



Multi-objective Optimization of Two Types of Kinetic Shading Devices to Enhance Energy Efficiency and Daylighting

Sayyed Mohammad Mahdi Mirmomtaz ¹ , Mohammad Baharvand ^{1*} , Narges Dehghan ² ,
Tabassom Safikhani ³

1. Department of Architecture, Isfahan (Khorasgan) branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

2. Department of Architecture, Advancement in Architecture and Urban Planning Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

3. Tourism Architecture and Urban Planning Research Center, Isfahan (Khorasgan) branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

ARTICLE INFO

Keywords:

- Extruded border kinetic shading device
- Office building
- Energy
- Useful daylight illumination
- Hot and dry climate
- Isfahan city

Research Article

Received: 16/02/2024

Accepted: 06/10/2024

ABSTRACT

The rising global population has resulted in a higher demand for energy, specifically in the building sector. Therefore, strategies that improve energy efficiency while simultaneously meeting occupant needs, especially in office buildings, are critical for environmental sustainability. Adequate daylighting, while vital for visual comfort, also generates heat, leading to increased cooling energy demand, particularly in hot, arid climates. Consequently, considering both energy consumption and visual comfort is essential in the early stages of architectural design, especially given recent energy crises. Adaptive shading devices offer a dynamic solution, adjusting to solar position to optimize building energy performance and enhance occupant visual comfort. This research explores adaptive shading's potential to simultaneously optimize daylighting and energy efficiency. A practical and quantitative approach, using experimental simulation, was employed. A 6m x 6m office space located on the third floor of a four-story building in Isfahan, Iran, was modeled using Rhinoceros software. The Ladybug Tools plugin was then employed to simulate various scenarios for each season. These scenarios include "no shading devices", "extruded borders" and "retractable shading", for the southern façade of the office space with a window-to-wall ratio of 40%. A total of 200 design alternatives were evaluated to determine the Pareto frontier for each season. The results indicate that by using adaptive shading devices on the southern façade of office buildings in Isfahan, daylight levels can be optimized up to 20% while energy consumption can be reduced by more than 48%.



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Citation: Mirmomtaz, S.M.M., Baharvand, M., Dehghan, D., and Safikhani, T., (2024). Multi-objective Optimization of Two Types of Kinetic Shading Devices to Enhance Energy Efficiency and Daylighting. *Sustainable Development of Geographical Environment*. Vol. 6, No. 11, (41-58)
<https://doi.org/10.48308/sdge.2024.234834.1187>

* Corresponding Author's Email: M.Baharvand@khuif.ac.ir



Sustainable Development of Geographical Environment

Journal homepage: <https://egsdejournal.sbu.ac.ir>



Extended Abstract

Background and purpose: Architects are increasingly exploring methods to enhance occupants' comfort within buildings by optimizing natural daylight levels while simultaneously improving energy efficiency. The incorporation of dynamic elements in building facades, however, remains relatively uncommon. The inherent dynamic nature of daylight, coupled with the static nature of conventional facades, often hinders the optimal utilization of natural light. Consequently, sustainable architecture strives to develop strategies that maximize the effective use of daylight throughout the day as well as achieve enhanced energy performance. Therefore, this study investigates the application of adaptive shading devices to optimize both daylighting and energy efficiency. Specifically, this is achieved by optimizing daylight utilization while considering the most effective variables influencing the performance of adaptive shading devices on the southern facade of an office building in Isfahan, Iran.

Methodology: This study adopts a rationalist approach, employing a quantitative, experimental methodology based on computer simulations to achieve its applied objective. It aims to investigate the causal relationships between independent variables (the design parameters of adaptive shading devices) and dependent variables (daylighting and energy efficiency optimization) within the context of south-facing facades of office buildings in Isfahan's hot and dry climate. The simulations were conducted using a parametric modeling workflow. The initial model was developed in Rhino software using the Grasshopper environment. Daylight and energy performance were simulated using the Ladybug Tools plugin. A genetic algorithm, specifically the NSGA-II algorithm, was employed for multi-objective optimization using the Wallacei plugin. The base model,

representing a square-shaped office space on the third floor of a building in Isfahan, was analyzed with two types of adaptive shading devices: peripheral and retractable. Each shading type was evaluated across 100 variations, totaling 200 simulations. Building performance indices, namely Useful Daylight Illuminance (UDI) and Energy Use Intensity (EUI), were analyzed both simultaneously and individually for each of the four seasons and annually to identify the optimal configurations. Given the conflicting nature of the two objectives (maximizing UDI and minimizing EUI), a multi-objective optimization approach was employed, allowing for the ranking and comparison of optimal solutions based on their performance across both indicators.

Findings and discussion: Based on the defined fitness function, the optimal design alternatives were identified. Regarding the peripheral adaptive shading system, the multi-objective optimization process showed that, across the 100 evaluated configurations, the best performance was achieved with a shading depth of 100 cm during spring, summer, and autumn, and a depth of 29 cm during winter. This configuration resulted in a 20 % increase in UDI and a 21 % reduction in EUI compared to the base case. Similarly, for the retractable adaptive shading system, a consistent depth of 100 cm across all four seasons yielded the most favorable results, leading to a 26 % increase in UDI and a substantial 48 % decrease in EUI.

Conclusion: The findings demonstrate that implementing either peripheral or retractable adaptive shading systems in office buildings in Isfahan can effectively optimize both daylighting performance and energy efficiency concurrently, despite the challenges posed by the region's hot and dry climate, particularly the intensely hot summers.

بهینه‌سازی چندهدفه دو الگوی سایبان متحرک ساختمان اداری به منظور کاهش مصرف انرژی و افزایش نور روز^۱

سید محمد مهدی میرممتاز^۱ ID، محمد بهاروند^۱ ID، نرگس دهقان^۲ ID، تبسم صفی خانی^۳ ID

۱. گروه معماری، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
۲. گروه معماری، مرکز تحقیقات افق‌های نوین در معماری و شهرسازی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.
۳. مرکز تحقیقات گردشگری معماری و شهرسازی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

واژه‌های کلیدی:

- سایبان متحرک پیرامونی
- ساختمان اداری
- انرژی
- روشنایی مفید نور روز
- اقلیم گرم و خشک
- شهر اصفهان

مقاله: پژوهشی

(مستخرج از رساله دکترا)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵

با افزایش جمعیت جهان، نیاز به انرژی به‌ویژه در ساختمان‌ها افزایش یافته است. الگوهای مناسب برای بهره‌وری انرژی نیازهای ساکنین بناهای معماری به‌ویژه ساختمان‌های اداری در تأمین پایداری محیط از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سویی، نور روز کافی که یکی از مهمترین عوامل تأمین‌کننده آسایش بصری ساکنین ساختمان‌هاست، تولید گرما می‌کند که خود باعث افزایش مصرف انرژی سرمایشی به‌ویژه در اقلیم گرم و خشک می‌شود. از این‌رو، باتوجه به بحران انرژی در ساختمان‌ها، توجه به معیارهای مؤثر در میزان مصرف انرژی و آسایش بصری ضروری به‌نظر می‌رسد. یکی از روش‌های مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان‌های پایدار، سایبان‌ها هستند و سایبان‌های متحرک به دلیل امکان پویایی و انطباق‌پذیری با نور روز و چرخش خورشید، می‌توانند کاربرد ویژه‌ای داشته باشند. هدف این پژوهش، بهره‌گیری از پتانسیل‌های سایبان‌های متحرک در بهینه‌سازی نور روز و بهره‌وری مصرف انرژی به‌صورت همزمان است. روش پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از دسته تحقیقات کمی است. شیوه انجام کار، روش آزمایشی و شبیه‌سازی بوده است. مدل مرجع به ابعاد ۶*۶ مترمربع در طبقه سوم ساختمان ۴ طبقه، در ۳ حالت کلی شامل بدون سایبان، حالت سایبان پیرامونی و سایبان جمع‌شونده در تنها یک پنجره در جبهه جنوبی فضای اداری با نسبت ۴۰ درصد، به‌تفکیک چهارفصل و در نهایت سالیانه در افزونه لیدی‌باگ‌تولز مورد شبیه‌سازی و تحلیل قرار گرفت. از میان ۲۰۰ گزینه مورد طراحی، بهترین گزینه‌ها انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد با بکارگیری سایبان‌های متحرک انطباق‌پذیر در نماهای ساختمان‌های اداری شهر اصفهان، می‌توان به بهینه‌سازی سطح مفید نور روز به میزان بیش از ۲۰ درصد و کاهش مصرف انرژی بیش از ۴۸ درصد دست یافت.



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

استناد: میرممتاز، سید محمد مهدی، بهاروند، محمد، دهقان، نرگس و صفی خانی، تبسم. (۱۴۰۳). بهینه‌سازی چندهدفه دو الگوی سایبان متحرک ساختمان اداری به منظور کاهش مصرف انرژی و افزایش نور روز. توسعه پایدار محیط جغرافیایی، دوره ۶، شماره ۱۱، (۵۸-۴۱).

<https://doi.org/10.48308/sdgc.2024.234834.1187>

* رایانامه نویسنده مسئول: M.Baharvand@khuif.ac.ir

مقدمه

نور روز به عنوان عنصری حیات‌بخش، همواره یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در طراحی معماری بوده است. از این رو، معماران و طراحان با بهینه‌سازی سطح نور طبیعی، در بهبود آسایش ساکنین در فضای داخلی، در جهت بازسازی و بهسازی کیفی فضا به ویژه در ساختمان‌های اداری بهره جسته‌اند، تا با وجود مصرف روز افزون انرژی در ساختمان‌ها^۱ (Ministry of Energy, 2023) تا به اندازه یک سوم مصرف جهانی (Agrawal and Sahu, 2025) به‌ویژه در اقلیم گرم و خشک، با مد نظر داشتن و توجه کافی به مقوله‌های مهمی از جمله طراحی و ساخت بنا و ارتباط آن با انرژی و محیط زیست به این مهم دست یابند (Bakmohammadi and Noorzai, 2020). تا به امروز، به گونه‌ای رایج، طراحی نما عناصر ثابت و ایستا هستند، و به دلایل طراحی، فنی و اجرایی و اقتصادی، متحرک بودن عناصر نما مرسوم نمی‌باشد و در حال حاضر به طور گسترده توسط طراحان و معماران در طول فرآیند طراحی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند (Grobman, et al., 2017). در عین حال، به دلیل متغیر بودن مسیر چرخش زمین و تغییر فصول، مؤلفه‌های نور روز طبیعی به صورت لحظه‌ای و مداوم، پویا بوده و با وجود نمای ثابت، امکان بهره‌گیری از نور روز، به صورت بهینه وجود ندارد. بر این اساس، یکی از دغدغه‌های امروز معماری پایدار، یافتن روشی است تا بتوان نور روز طبیعی در اکثر اوقات روز به صورت بهینه استفاده نماید (Borg, et al., 2016).

از سویی، وجود متغیرهایی نظیر سطح پنجره و عمق فضا، تناسبات در پلان و نما؛ و میزان گشودگی‌های سطوح در جبهه‌های مختلف، از جمله مواردی است که معماران و طراحان، بر مبنای روش علمی طراحی اقلیمی، به پیش‌بینی آن پرداخته و سپس از طریق شبیه‌سازی به بررسی دست‌آوردهای ناشی از پیش‌بینی نرم‌افزاری خود اقدام نموده‌اند (Hosseini, et al., 2019). البته، نتایج این روش، به دلیل در نظر نگرفتن همه مؤلفه‌های تأثیرگذار اصلی و متغیرها شاخص، ممکن است به صورت ناخواسته مشکلاتی از قبیل، عدم توجه به ابعاد و تناسبات سایبان‌های ثابت، گشودگی‌های در نما و تناسبات فضا در پلان، خیرگی مبتنی بر تابش شدید نور طبیعی روز بر مبنای آسایش بصری نامناسب در طراحی سایبان‌های ثابت، در برخی از اوقات روز و در نهایت مصرف بیش از حد مصرف انرژی و تحمیل هزینه‌های اقتصادی ناشی از این روش ناقص طراحی را ایجاد نماید (Arab, et al., 2019) (Couvelas, et al., 2018). این در حالی است که با استفاده از سایبان ثابت امکان بهره‌وری و بهینه‌سازی تنها یک متغیر آسایش بصری ناشی از تابش خورشید و نور روز؛ و یا انرژی فراهم خواهد شد (Aritonang, et al., 2016) و متغیر دیگر بهینه‌سازی نمی‌شود. این دغدغه در شهرهای واقع در اقلیم گرم و خشک نظیر شهر اصفهان بیشتر محسوس می‌باشد. از این رو، طراحی سایبان‌های متحرک نمای ساختمان مبتنی بر نور روز (Foroughi, et al., 2020; Rasuli, et al., 2019) یکی از نوآورانه‌ترین و فناوری‌ترین روش‌های بهره‌گیری از نور روز طبیعی در ساختمان در عین بهینه‌سازی مصرف انرژی، در دو دهه اخیر در دنیا می‌باشد (Belok, et al., 2020) (Bakr, 2019). بر این مبنای، هدف این مقاله استفاده از سایبان‌های متحرک نمای ساختمان، به منظور بهینه‌سازی آسایش بصری و بهره‌وری مصرف انرژی به صورت همزمان، بر مبنای بهینه‌سازی نور روز با در نظر گرفتن تأثیرات اصلی‌ترین متغیرهای سایبان‌های نماهای متحرک بر آسایش بصری در جبهه جنوبی یک فضای اداری در شهر اصفهان با اقلیم گرم و خشک می‌باشد. در راستای نیل به هدف یادشده، سایبان‌های متحرک در گرس‌هاپر^۲، راینو^۳ و لیدی‌باگ تولز^۴ روش شبیه‌سازی شده و سپس با بکارگیری الگوریتم ژنتیک حالت‌های بهینه متغیرهای روشنایی مفید نور روز^۵ و شدت مصرف انرژی^۶ اندازه‌گیری شده است و به روش بهینه‌سازی چندهدفه بهترین حالات بهینه روشنایی مفید نور روز و شدت مصرف انرژی ارائه شده است.

مبانی نظری و پیشینه

مفهوم حرکت در نما، از مفهوم پویایی در معماری نشأت گرفته است که در آن، نمای ساختمان را به عنوان یک فرم معماری تعریف می‌نماید؛ و در آن، کل نما، بخشی از آن و یا عنصری از عناصر نما (اعم از عناصر کوچک و یا

بزرگ)، ذاتاً و ماهیتاً قابلیت جابجایی، چرخش، تغییر شکل، توسعه داشته و به هر نحوی، مفهوم حرکت اعم از تغییر محسوس در بازه زمانی در فرم، شکل و یا مکان آنها در قالب سیستم‌های مکانیکی ساده و یا پیچیده‌ای قابل مشاهده است (Tabadkani, et al., 2021).

تکامل نماها از ادراک تاریخی با عناصر متحرک همانند یک درب کشویی شوجی در معماری سنتی ژاپن سرچشمه گرفته و تا ارس‌ها در معماری سنتی در ایران ادامه یافته است. عملکردهای تنظیمی نما، شامل تغییر، کنترل و پاسخگویی است که با پاسخ مداوم به محرک‌های محیطی، مطابق با متغیرهای خاصی برای مواجهه با اهداف مورد نظر اجرا شده‌اند (Hosseini, et al., 2019). همچنین، ارائه راه‌حل‌های نوآورانه و فن‌آورانه طراحی در نما، جهت بهبود و بهینه‌سازی آسایش ساکنین ساختمان اعم از آسایش بصری و حرارتی منطبق با ویژگی سازگاری اقلیمی عناصر پویا فراهم شده است (Romano, et al., 2019). بر این مبنا، برای اقلیم‌هایی نظیر اقلیم گرم و خشک اصفهان در عرض جغرافیایی ۳۳ درجه، که بهینه‌سازی آسایش ساکنین ساختمان و بهره‌وری مصرف انرژی به صورت همزمان، بر مبنای متغیرهای نور روز از اهمیت خاصی برخوردار است، بکارگیری فناوری‌هایی نظیر شبیه‌سازی در سایبان‌های متحرک، می‌تواند راه حل مناسبی برای نیل به اهداف مذکور باشد.

بر این اساس، مطالعات پیشینه نشان می‌دهد، مقالات متنوعی در حوزه بهینه‌سازی آسایش بصری و بهره‌وری مصرف انرژی با بررسی متغیرهای گوناگون به صورت منفرد و یا همزمان ارائه شده است که در اقلیم‌های مختلف و با ایده‌های متنوع و با فرم‌های گوناگون نظیر الگوهای جمع‌شونده^۶ و چرخشی، تا الگوهای الهام گرفته از اورینگامی مانند حلقه‌های کالیدوسایکل^۸ و الگوهای الهام گرفته از برگ درختان دیده می‌شوند. در زیر به برخی از نمونه‌های بررسی شده در این حوزه و دستاوردهای آن اشاره می‌گردد:

در پژوهشی، با طراحی و ارزیابی بیومیمتیک با الهام از فرم برگ درختان و عملکرد اتصالات استخوان و عضلات و مفصل‌های بازوی دست و انگشتان، به صورت سایبان متحرک برای طراحی عملکردگرا پوشش‌های ساختمانی سازگار چند منظوره، به منظور بهبود عملکرد نور روز و حرارتی یک ساختمان اداری تهران، نور سالانه خورشید را با معیارهای خودمختاری نور روز، روشنایی مفید نور روز، روشنایی مفید نور روز بالاتر از حد و پایین تر از حد و شبیه‌سازی در رادیانس و راینو با سه افزونه تحلیل پایدار دیوا، دی‌سیم و هانی‌بی و استفاده از انرژی پلاس برای تحلیل حرارتی و راحتی و تحلیل دما؛ و بکارگیری ابزار شبیه‌سازی ساختمان یکپارچه IES-VE، را مورد ارزیابی قرار داده شده است (Sadegh, et al., 2022). همچنین در پژوهشی دیگر، سعی در بررسی عملکرد آسایش بصری و تقاضای انرژی حرارتی ساختمان، یک نوع سایبان متحرک چندبخشی در نماهای متحرک، مبتنی بر شبیه‌سازی پارامتریک و مقایسه آن با سایبان‌های خودکار با کمک نرم‌افزارهای هانی‌بی، لیدی‌باگ، رادیانس، دی‌سیم و اولگری^۹؛ و برنامه‌نویسی کنترل آفلاین با استفاده از زبان پایتون در یک گردش کار یکپارچه و برنامه‌نویسی کنترل آفلاین با استفاده از زبان پایتون را داشته است (Tabadkani, et al., 2022). در مطالعه‌ای در این حوزه، با بررسی پتانسیل راهبرد تقویت نما متحرک برای کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های موجود، راهبرد نماهای متحرک پاسخگو و تعیین اثر آن بر افزایش گرمای خورشیدی با استفاده از شبیه‌سازی انرژی مبتنی بر بیم پارامتریک، توسط یک محیط برنامه‌نویسی بصری در برنامه مدل‌سازی اطلاعات ساختمان^{۱۰} و بکارگیری نرم‌افزارهای اینسایت ۳۶۰، داینامو و لیدی‌باگ برای رویت، تأثیر تفاوت‌های گونه‌شناسی بر کنترل خورشیدی در سیستم نمای متحرک، با مقایسه پانل‌های جمع‌شونده متحرک افقی و پانل‌های جمع‌شونده متحرک عمودی را مورد بررسی قرار داده است (Salah and Kayili, 2022). در جدول ۱ مشخصات مقالات بررسی شده ارائه شده است. در مطالعه‌ای دیگر، به تحلیل تأثیر سناریوهای کنترل سایه خودکار بر آسایش و بار انرژی ساکنین با استفاده از شبیه‌سازی ساختمان اداری با نرم‌افزار انرژی پلاس و لیدی‌باگ به صورت پارامتریک و نرم‌افزار اوپن‌استادیو برای محاسبات حرارتی با بکارگیری موتورهای رادیانس و دی‌سیم برای شبیه‌سازی نور روز پرداخته شده است (Tabadkani, et al., 2021). در مطالعه‌ای نیز، در رویکرد پیشنهادی جدیدی به طراحی

سایبان‌های متحرک پنجره بیرونی برای ساختمان‌های تجاری کوچک به منظور بهینه‌سازی معیارهای هندسی سطح در معرض خیرگی پنجره‌های موجود با استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای دیزاین‌بیلدر و انرژی‌پلاس پرداخته‌اند (Foroughi, et al., 2020). همچنین در مطالعه‌ای دیگر، بررسی توسعه پیشرفته ترکیب شیشه رنگی ارسی با نماهای متحرک تعاملی، ناشی از زمان آفتاب و موقعیت ساکنین با بهره‌گیری از روش شبیه‌سازی نما با بکارگیری نرم‌افزارهای راینو، گرس‌هاپر و دیوا در جهت بهبود کارایی نور روز و آسایش بصری اقدام شده است (Hosseini, et al., 2019). پژوهش دیگری به طراحی بهینه نمای پاسخگو مبتنی بر کارایی آسایش بصری و انرژی بر مبنای مطالعه مقایسه‌ای عملکرد تابش‌بندهای افقی و عمودی به‌عنوان نماهای پاسخگوی متحرک به روش شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای گرس‌هاپر و افزونه هانی‌بی و لیدی‌باگ پرداخته و کاهش مصرف انرژی در عین حال ایجاد سطح بالاتری از آسایش بصری دست یافته است (Valitabar, et al., 2018). مطالعه‌ای دیگر تلاش نموده است تا موضوع کارایی نور روز سیستم سایبان متحرک نمای سازگار را به روش شبیه‌سازی و تحلیل پارامتریک با استفاده از نرم‌افزار آرک‌سیم مدلینگ انرژی و افزونه دیوا در گرس‌هاپر در راینو، معیارهای طراحی، شامل: جهت‌یابی و عمق ساختارهای سایه‌اندازی و همچنین چرخش، عرض و فاصله بین لوورهای تعبیه شده را در جهت کارایی بهینه نور روز و در عین حال مانع از ورود گرمای بیش از حد ارزیابی نماید (Couvelas, et al., 2018). همچنین در پژوهش دیگری، تلاش داشته است تا با طراحی سطوح نور طبیعی روز به‌ویژه از طریق کنترل سطح سازگاری مناسب فصلی به ارائه یک روش عددی جدید جهت تعیین و مقایسه پتانسیل مشارکت عناصر پویا و ایستای سایبان‌های خارجی ساختمان‌ها، بر حسب اندازه‌گیری نور طبیعی روز پویا با استفاده از نرم‌افزار گراس‌هاپر و پایتون و افزونه دیوا پردازد (Grobman, et al., 2017).

جدول ۱: مشخصات برخی از مقالات مرتبط

نام محقق / سال انتشار	کاربری ساختمان	نوع متغیر مورد بررسی	نوع سایبان	نوع پویایی سایبان
(Grobman, et al., 2017)	اداری	AUDI روشنایی مفید نور روز انطباق یافته	ثابت، متحرک افقی خارجی	چرخش
(Couvelas, et al., 2018)	اداری	تابش انرژی خورشیدی	متحرک عمودی خارجی	چرخش
(Foroughi, et al., 2020)	تجاری	خیرگی	پرده و نیزی	چرخش
(Hosseini, et al., 2020)	اداری	نور روز (UDI و DA)	ادغام نماهای متحرک تعاملی با شیشه رنگی	حرکات چرخشی غیر متمرکز
(Valitabar, et al., 2018)	اداری	انرژی، شدت روشنایی	تابش‌بند عمومی تابش‌بند افقی	چرخش
(Tabadkani, et al., 2021)	اداری	انرژی حرارتی	پرده و نیزی	چرخش
(Sadegh, et al., 2022)	اداری	معیارهای خودمختاری نور روز، روشنایی مفید نور روز	الهام از فرم برگ درختان و عملکرد اتصالات استخوان، عضلات و مفاصل	عملکرد اتصالات استخوان، عضلات و مفاصل بازوی دست و انگشتان
(Tabadkani, et al., 2022)	فضای کار اداری مشترک	آسایش بصری و تقاضای انرژی حرارتی	سایبان متحرک شش وجهی	چرخش خاص در چند جهت
(SalahandKayili, 2022)	عمومی	انرژی	پانل‌های متحرک افقی و عمودی	پانل‌های متحرک تابش افقی و عمودی
پژوهش حاضر	اداری	انرژی (EUI) و نور روز (UDI)	سایبان پیرامونی و جمع‌شونده	تغییر مقیاس

روش‌شناسی

روش تحقیق در این پژوهش از لحاظ چارچوب کلی و نوع جمع‌آوری و پردازش داده‌ها، روش تحقیق تجربی (شبیه‌سازی رایانه‌ای) می‌باشد. این پژوهش، به دنبال کشف روابط علت و معلولی میان متغیرهای مستقل (طراحی عناصر نماهای متحرک) و متغیرهای وابسته (بهینه‌سازی آسایش بصری و بهره‌وری مصرف انرژی) در نماهای متحرک جبهه جنوبی ساختمان‌های اداری شهر اصفهان در عرض جغرافیایی ۳۳ درجه در اقلیم گرم و خشک می‌باشد؛ از این رو، از لحاظ ماهیت، تحقیقی تجربی و از نظر نوع شبیه‌سازی رایانه‌ای (غیر آزمایشگاهی) است. در مجموع، این پژوهش، رویکردی خردگرایانه، هدفی کاربردی و ماهیت و روشی تجربی داشته و گردآوری داده‌ها بصورت آزمایشی (شبیه‌سازی عددی) با داده‌های کمی انجام شده است.

شبیه‌سازی در دو حوزه نور و انرژی و همچنین نرم‌افزارهای تخصصی مشترک دو حوزه، نرم‌افزارهای تحلیل پارامتریک و طراحی الگوریتمیک با رویکرد تخصصی الگوریتم ژنتیک صورت پذیرفته است. روش شبیه‌سازی در این مقاله برای تهیه مدل اولیه فضای اداری مورد نظر، استفاده از افزونه گراس‌هاپر در نرم‌افزار راینو بوده و همچنین بکارگیری افزونه لیدی‌باگ‌تولز در فضای افزونه گراس‌هاپر برای شبیه‌سازی روشنایی مفید نور روز و انرژی مدل و بکارگیری روش الگوریتم ژنتیک از طریق الگوریتم الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرغالب نخبه‌گرا و در نهایت بهینه‌سازی چندهدفه با نرم‌افزار والاسی بوده است.

انتخاب مدل پایه

برای انجام آزمون‌های شبیه‌سازی فضای کار اداری، به مدلی که در نرم‌افزار شبیه‌سازی، مورد سنجش متغیرها قرارگیرد، نیاز است. از این رو، استفاده از مدلی که به لحاظ ابعاد در بستر مورد مطالعه یعنی شهر اصفهان، بیشتر بکارگیری شده باشد، به کاربردی بودن نتایج منجر خواهد شد. با بررسی میدانی مقادیر عمق اتاق اداری و استانداردهای علمی، در جبهه جنوبی شهر اصفهان ابعاد فضاهای اداری، ۶*۶ مترمربع و به فرم مربع و با ارتفاع کف تا کف ۳/۲۰ متر و ارتفاع سقف ۰/۴۰ متر در طبقه سوم یک ساختمان اداری در شهر اصفهان در اقلیم گرم و خشک انتخاب گردید (جدول ۲).

جدول ۲: مقادیر ابعاد فضاهای اداری در جبهه جنوبی در شهر اصفهان

ابعاد جبهه جنوبی (متر)	طول (عمق)	عرض (پهنا)	ارتفاع کف تا کف	ارتفاع سقف	ارتفاع کف تا زیر سقف
تیپ نهایی انتخابی	۶	۶	۳/۲۰	۰/۴۰	۲/۸۰

(منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲)

رنگ و پوشش مرسوم دیوارها، سقف و کف در این منطقه که غالباً رنگ‌های روشن بعنوان پوشش دیوارها، رنگ سفید برای سقف و پوشش سنگ برای کف مورد استفاده قرار می‌گیرد، دارای بازتابش ۵۰ درصد سطوح دیوار، ۷۰ درصد سقف و ۲۰ درصد کف در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که ارتفاع استاندارد ۰/۸۰ متر برای سطح میز کار مناسب می‌باشد، صفحه حسگرها در نرم‌افزار شبیه‌سازی، هم‌تراز با ارتفاع سطح میز کار تعیین می‌گردد. پیش‌تر ذکر شد که عمق نفوذ نور با ارتفاع بالای پنجره از کف رابطه متناظر دارد. بنابراین، برای بهره‌وری از حداکثر پتانسیل عمق نفوذ نور، ارتفاع پنجره تا زیرسقف در نظر گرفته می‌شود. همچنین، از آنجا که مقدار مناسب ارتفاع کف پنجره در فضای اداری ۱/۸-۱/۱۰ متر از کف فضای مورد نظر توصیه شده است (Ghiabakloo, 2012)، ارتفاع ۰/۸ متر به عنوان ارتفاع کف پنجره در مدل پایه شبیه‌سازی لحاظ می‌شود. در این پژوهش، با در نظر گرفتن ارتفاع مدل پایه (۳ متر) و ارتفاع کف پنجره (۰/۸ متر)، ارتفاع پنجره ۲/۲ متر می‌باشد که افزایش سطح پنجره، در واحد ارتفاع پنجره ثابت و در واحد طول پنجره متغیر صورت می‌پذیرد (جدول ۳).

جدول ۳: مشخصات مدل مرجع

مؤلفه	جزئیات
نسبت پنجره به دیوار	۴۰ درصد
فاصله کف پنجره از کف اتاق	۰/۸ متر
شیشه	دوجداره شفاف شکاف هوا
مصالح	جداره حامل سیستم کنترل گر نور روز عمومی ^{۱۱} سایر جداره‌ها عایق حرارتی ^{۱۲}
درصد انعکاس سطوح	کف ۲۰ درصد سقف ۷۰ درصد جداره‌های داخلی ۵۰ درصد
برنامه زمانی اشغال فضا	ساعت ۸ صبح تا ۶ بعدازظهر روزهای شنبه تا چهارشنبه
نوع فعالیت کاربران	نشستن پشت میز
دوره بررسی	دوره یک ساله

(منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲)

ابعاد مدل مرجع شامل عرض، عمق و ارتفاع اتاق و برابر با ۶ متر، ۶ متر و ۳/۲ متر در نظر گرفته شده‌است. نسبت مساحت پنجره به دیوار (WWR) مطابق با بررسی صورت گرفته در تحقیقات میدانی شهر اصفهان، برابر با ۴۰٪ و فاصله کف پنجره از کف اتاق برابر با ۰/۸ متر تعیین شده‌است. جهت امکان کنترل متغیرهای مداخله‌گر، تمامی جداره‌ها، کف و سقف به جز جداره حامل سیستم کنترل گر نور روز، آدیاباتیکی در نظر گرفته شده‌اند. جدول ۴، مشخصات مدل مرجع در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۴: مشخصات سایبان‌های مدل مرجع

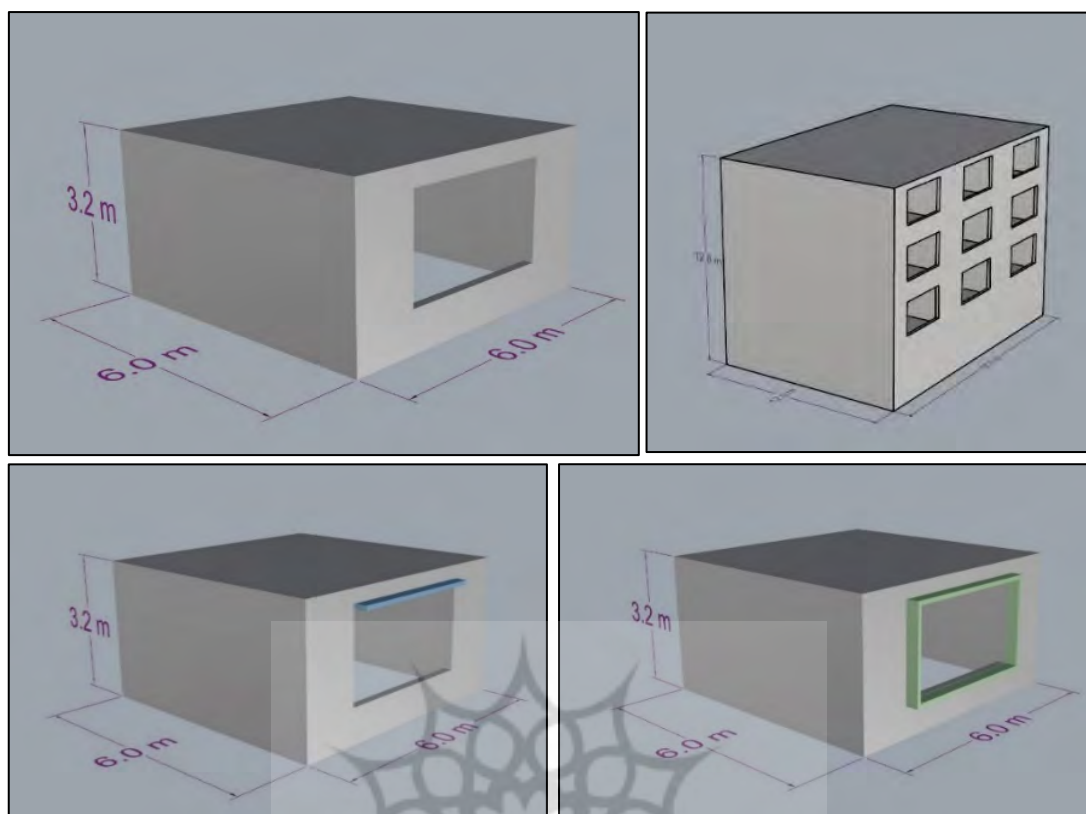
سیستم سایبان	پیرامونی		جمع‌شونده	
	بازه	تعداد	بازه	تعداد
زاویه	-	-	-	-
فاصله از جداره	-	-	-	-
فاصله تیغه‌ها از یکدیگر	-	-	-	-
متغیرها	عمق سایبان	۰/۱ تا ۱ متر	۱۰۰	۰/۱ تا ۱ متر
نسبت سطح پنجره به سطح دیوار	۴۰ درصد	۱	۴۰ درصد	۱
عمق پنجره	-	-	۰/۲ متر	۱

(منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲)

شاخص‌های عملکردی

- روشنایی مفید نور روز (UDI)

روشنایی مفید نور روز شاخصی بلندمدت، محلی و دو دامنه است که مقدار نور طبیعی را مورد سنجش قرار می‌دهد. مطابق نظر نیل و ماردالیویچ، روشنایی مفید نور روز نه فقط در رابطه با سطوح روشنایی مفید نور روز بلکه در مورد بسامد رخداد سطوح بیش از حد نور روز که ممکن است باعث احساس عدم آسایش در ساکنین (خیرگی) و جذب حرارت خورشیدی ناخواسته گردد نیز اطلاعات می‌دهد (Carlucci et al., 2015).



شکل ۱: مشخصات مدل‌های شبیه‌سازی شده (به ترتیب ساعت گرد: ساختمان ۴ طبقه اداری، مدل مرجع بدون سایبان، مدل با سایبان جمع شونده و مدل با سایبان پیرامونی)
 (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲)

همان‌طور که گفته شد، در محاسبات مربوط به روشنایی مفید نور روز، به‌جهت تقسیم دوره تحلیل به سه بازه هم‌اندازه، مقادیر حد بالا و پایین روشنایی تعریف می‌شوند. بازه بالایی مقادیر حاصل شده، نشان‌دهنده درصد زمان‌هایی است که وجود نور روز بیش از حد منجر به بروز عدم آسایش بصری می‌گردد، بازه پایینی مقادیر، نشان‌دهنده درصد زمان‌هایی است که نور روز بسیار کم است؛ و بازه میانی مقادیر، نشان‌دهنده درصد زمان‌هایی است که روشنایی در سطحی مناسب قرار دارد (Ayoub, 2019; Carlucci et al., 2015). بر این مبنا، هرچه‌قدر میزان درصد محدوده مابین مقادیر ۳۰۰ تا ۳۰۰۰ بالاتر باشد، فضای مناسب‌تری به لحاظ کیفیت نور طبیعی روز در فضا داشته و فضای مناسب‌تری در اختیار ساکنان فضا خواهد بود. به‌هرتقدیر، روشنایی مفید نور روز، نه تنها کارایی ساده رویکردهای ایستا همانند معیار نور روز را به دلیل تعیین سطوح روشنایی تحقق یافته حفظ می‌کند، درعین‌حال می‌تواند اطلاعات مهمی همچون همزمانی شرایط گرمایش بیش از حد برای ساکنین فضا و همچنین عدم آسایش بصری در نزدیکی پنجره‌ها، را در اختیار طراح و پژوهشگر قرار دهد (Chi et al., 2018).

- شاخص‌های ارزیابی مصرف انرژی

شاخص‌های مرتبط با ارزیابی انرژی از عبارات متفاوتی برای تعریف خود استفاده نموده‌اند اما در مجموع همگی دارای معانی مشابه هستند. پرکاربردترین شاخص‌های انرژی، شاخص شدت مصرف انرژی^{۱۳} (EUI) با واحد اندازه‌گیری کیلووات ساعت بر مترمربع در سال ($\text{kWh/m}^2/\text{year}$) است که به‌عنوان استاندارد در ارزیابی شدت انرژی مصرف شده در ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص، کمی بوده و برای مقایسه بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های مشابه

و ارزیابی طراحی آن‌ها مناسب است. برای اندازه‌گیری شدت مصرف انرژی، انرژی کل شامل سوخت، گاز، الکتریسته و انرژی‌های مختلف که در دوره یک‌ساله توسط ساختمان مصرف می‌شوند به واحد کیلووات‌ساعت تبدیل شده و سپس بر مساحت طبقه تقسیم می‌شوند. بدین‌روش انرژی کل مصرف‌شده به‌ازای مساحت طبقه در دوره یک‌ساله به‌دست می‌آید. شدت مصرف انرژی شاخصی مهم در ارزیابی عملکرد انرژی ساختمان و پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف انرژی بوده است (Samadi and Fattahi, 2021) (Yu et al., 2020). دو شاخص یاد شده بایستی به صورت همزمان و به تفکیک ۴ فصل و در نهایت سالیانه مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد و بهترین گزینه‌ها انتخاب گردد. بر این مبنای با توجه به وجود دو هدف؛ یکی بهینه‌سازی نور روز و دیگری بهینه‌سازی انرژی، لازم است از روش بهینه‌سازی چندهدفه استفاده گردد، چراکه یکی از شاخص‌ها بایستی در حداکثر خود؛ و دیگری در کمترین مقدار عددی خود باشند.

- بهینه‌سازی چندهدفه

روش بهینه‌سازی چندهدفه از دهه ۱۹۷۰ مورد مطالعه قرار گرفت و حوزه‌های کاربردی گسترده‌ای را شامل شد. طرح کلی آن، ارزیابی دو یا چند هدف متضاد با یکدیگر و یافتن مقدار کمینه یا بیشینه توابع اهداف به‌وسیله انتخاب تعدادی از متغیرها با توجه به محدودیت‌های مختلف است (Toutou et al., 2018) (Wang, 2019). علی‌رغم روش‌های گوناگونی که برای بهینه‌سازی مسائل چندهدفه وجود دارد، الگوریتم ژنتیک که از جمله الگوریتم‌های تکاملی یعنی الگوریتم‌هایی که مقلد فرآیند تکاملی هستند که به‌صورت طبیعی در طبیعت رخ می‌دهد، از جمله الگوریتم‌هایی است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Kheiri, 2018; Pilechiha et al., 2020). اساس الگوریتم ژنتیک، تکامل است و مبتنی بر مجموعه راه‌حل‌هایی منتخب است که هریک به‌تنهایی نشان‌دهنده راه‌حلی نهایی برای مسأله بهینه‌سازی پیش‌رو است (Costa-Carrapiço et al., 2020; Yang, 2020). هریک از راه‌حل‌های مذکور، به‌صورت بالقوه می‌توانند راه‌حلی بهینه برای مسأله بهینه‌سازی باشند. در الگوریتم ژنتیک عمل‌گرهای ژنتیکی نظیر جهش و برش با ایجاد راه‌حل‌های جدید منجر به واریاسیون فضای پاسخ می‌شوند. (Kramer, 2017) (Mirjalili & Dong, 2020). در این پژوهش، از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرغالب نخبه‌گرا (NSGA-II)^{۱۴} استفاده شده است. تنظیمات الگوریتم ژنتیک در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۵: تنظیمات بهینه‌سازی

جمعیت هر نسل	حداکثر تعداد نسل	نرخ هم‌بری	نرخ جهش
۵	۲۰	۰/۹	۰/۲

(منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲)

شایان ذکر است دو شاخص فوق، شاخص‌هایی هستند که در این پژوهش مورد بررسی واقع شده‌اند. اما برای مقایسه و بررسی نتایج حاصل از این دو شاخص می‌بایست امکان رتبه‌بندی آنها فراهم گردد. بر این اساس، نتایج حاصل که از طریق فرآیند بهینه‌سازی نتایج شبیه‌سازی بدست می‌آیند (پارتو فرانت)، نتایجی هستند که هیچی یک بر دیگری برتری ندارند. از آنجا که در عمل لازم است که تنها یک گزینه نهایی انتخاب شود استفاده از روشی مناسب برای رتبه‌بندی این نتایج ضروری است. در این پژوهش، این روش شامل، بکارگیری تابع برازندگی انجام شده است. تابع برازندگی در رابطه ۱ ارائه شده است:

رابطه ۱) تابع برازندگی (Fitness Function)^{۱۵}

$$Y = (UDI_i - UDI_{min}) \left(\frac{100}{UDI_{max} - UDI_{min}} \right) - (EUI_i - EUI_{min}) \left(\frac{100}{EUI_{max} - EUI_{min}} \right)$$

(منبع: Kramer, 2017)

یافته‌ها

در راستای انتخاب سایبان متحرک مناسب از نظر بهینه مصرف انرژی و تأمین نور روز کافی و در نتیجه افزایش آسایش ساکنین، یک فضای اداری در اقلیم گرم و خشک شهر اصفهان در عرض جغرافیایی ۳۳ درجه به عنوان نمونه مورد بررسی در نظر گرفته شد. فضای اداری مورد بررسی دارای ابعاد مربع بوده و نسبت مساحت پنجره به دیوار ۴۰٪ و تنها جبهه جنوبی آن قابلیت جذب نور را داشته و در سایر جهات به صورت آدیاباتیک بوده است. با توجه به رابطه مستقیم بین میزان مساحت پنجره به دیوار و شدت تابش ورودی به ساختمان ضمن در نظر گرفتن میزان نسبت پنجره به دیوار به صورت ثابت ۴۰٪ در سایبان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در هنگام تحلیل‌ها تمامی ویژگی‌ها به صورت ثابت در نظر گرفته شد. دو عامل سایبان پیرامونی در ۱۰۰ حالت و شبیه‌سازی‌های متنوع؛ و همچنین سایبان جمع‌شونده در ۱۰۰ حالت و شبیه‌سازی‌های مختلف و در مجموع ۲۰۰ حالت شبیه‌سازی‌های سایبان مختلف، تغییر نمود. بر مبنای اطلاعات پایه، شاخص‌های عملکردی روشنایی مفید نور روز و انرژی در مدل مرجع به تفکیک چهار فصل به صورت ذیل می‌باشد:

جدول ۶: شاخص‌های عملکردی روشنایی مفید نور روز و انرژی در مدل مرجع پایه بدون سایبان

فصل	مدل	شاخص‌های عملکردی	
		درصد روشنایی مفید نور روز	شدت مصرف انرژی (kwh/m ² /season)
بهار	Sp-Base	۷۵/۵۴۵	۲۹/۲۴۴
تابستان	Su-Base	۷۶/۰۳۱	۵۰/۲۳۱
پاییز	F-Base	۵۵/۷۴۸	۲۴/۱۵۱
زمستان	W-Base	۵۸/۵۳۱	۲۱/۹۹۱

(منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲)

در ادامه شبیه‌سازی، شاخص‌های عملکردی، تابع برازندگی و تغییرات روشنایی مفید نور روز و انرژی نسبت به حالت پایه به تفکیک سایبان پیرامونی و جمع‌شونده در چهار فصل به ترتیب در جداول ۷ و ۸ ارائه شده است. نمودار ۱ و نمودار ۲ بیانگر مقدار عددی شاخص‌های عملکردی در گزینه‌های برتر هر فصل نسبت به پایه همان فصل می‌باشند:

جدول ۷: شاخص‌های عملکردی روشنایی مفید نور روز و انرژی در مدل مرجع پایه با سایبان متحرک پیرامونی

فصل	مدل	معیار	شاخص‌های عملکردی		تابع برازندگی		تغییرات	
			عمق سایبان در درصد روشنایی	شدت مصرف انرژی (kwh/m ² /season)	مفید نور روز	رتبه شدت	تابع	رتبه تابع
بهار *	EB-(۱۴؛۰؛۰)	۱	۸۲/۴۵۴	۲۳/۰۷۱	N/A	N/A	N/A	N/A
تابستان *	EB-(۱۳؛۰؛۰)	۱	۸۲/۹۹۴	۲۷/۳۹۲	N/A	N/A	N/A	N/A
پاییز *	EB-(۱۰؛۰؛۰)	۱	۶۷/۲۵۴	۲۱/۲۱۹	N/A	N/A	N/A	N/A
	EB-(۳؛۳؛۰)	۰/۶۱	۶۵/۵۰۵	۲۱/۲۹۶	۵	۷	۰/۱۶۰	۱
	EB-(۲؛۳؛۰)	۰/۴۶	۶۳/۸۵۷	۲۱/۱۴۲	۶	۶	۰/۱۴۸	۲
زمستان	EB-(۰؛۳؛۰)	۰/۶۶	۶۵/۹۳۷	۲۱/۳۷۳	۴	۸	۰/۱۲۳	۳
	EB-(۸؛۴؛۰)	۰/۲۹	۸۱/۸۶۶	۲۰/۹۸۸	۸	۴	۰/۰۹۹	۴
	EB-(۷؛۱؛۰)	۰/۷۹	۶۷/۲۰۰	۲۱/۵۲۸	۳	۹	۰/۰۹۲	۵

*: در این حالت تنها یک پاسخ بهینه مطلوب (Pareto Optimal) تولید شده است.

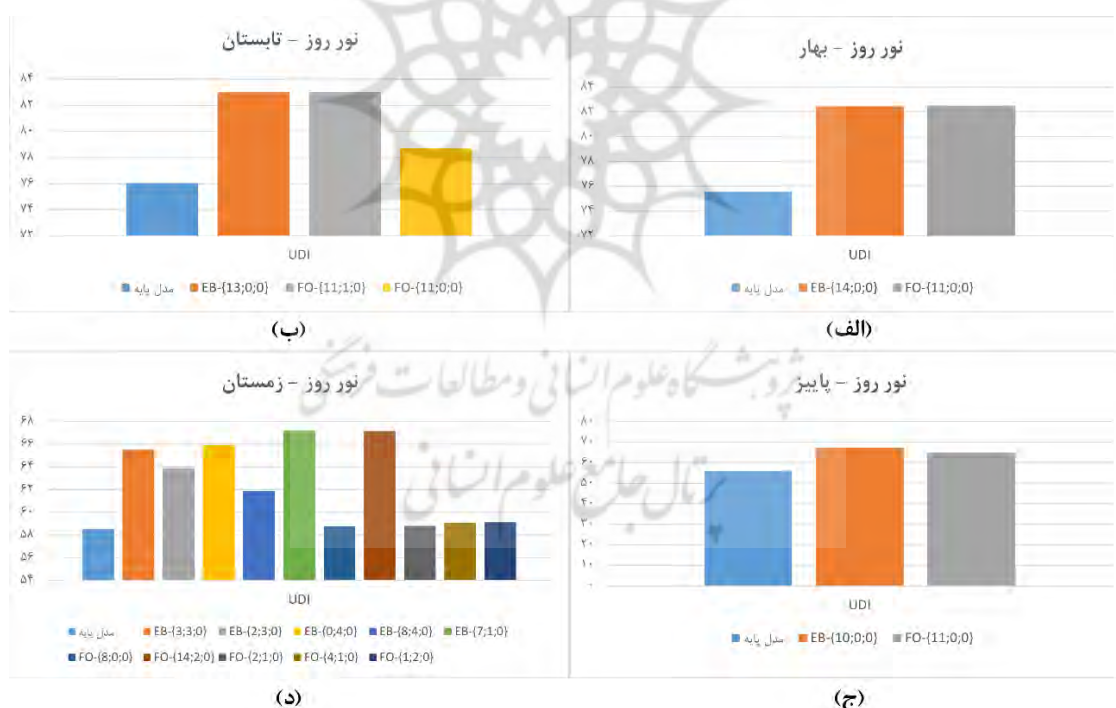
(منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲)

جدول ۸: شاخص‌های عملکردی روشنایی مفید نور روز و انرژی در مدل مرجع پایه با سایبان متحرک جمع‌شونده

فصل	مدل	معیار	شاخص‌های عملکردی	تابع برازندگی	تغییرات
	کد	عمق سایبان درصد روشنایی شدت مصرف انرژی (kwh/m ² /season) مفید نور روز	رتبه روشنایی	رتبه شدت	رتبه تابع
بهار*	FO-(۱۱;۰;۰)	۱	۸۲/۴۸۱	۲۱/۳۷۳	N/A
تابستان*	FO-(۱۱;۱;۰)	۱	۸۳/۰۰۱	۲۵/۹۲۶	N/A
پاییز*	FO-(۱۱;۰;۰)	۱	۶۴/۸۱۷	۲۰/۲۹۳	N/A
	FO-(۸;۰;۰)	۰/۰۳	۵۸/۷۶۱	۲۱/۶۸۲	۹
	FO-(۱۴;۲;۰)	۱	۶۷/۱۷۳	۲۳/۳۰۲	۱
زمستان	FO-(۲;۱;۰)	۰/۰۴	۵۸/۷۸۹	۲۱/۹۱۴	۸
	FO-(۴;۱;۰)	۰/۰۷	۵۹/۰۹۱	۲۲/۳۷۷	۷
	FO-(۱;۲;۰)	۰/۰۸	۵۹/۱۳۳	۲۲/۵۳۱	۶

* در این حالت تنها یک پاسخ بهینه مطلوب (Pareto Optimal) تولید شده است.

(منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۲)



نمودار ۱: شاخص‌های عملکردی روشنایی مفید نور روز در مدل مرجع پایه و دو سایبان پیرامونی و جمع‌شونده در فصل‌های (الف) بهار، (ب) تابستان، (ج) پاییز و، (د) زمستان

در خصوص نتایج بدست آمده در شبیه‌سازی ذکر این نکته حائز اهمیت است که در نگاه اول به مقادیر ارائه شده در ستون تغییرات درجداول ۷ و ۸، برخی از نتایج ارائه شده به تنهایی قابل قبول به عنوان نتایج بهینه‌سازی نیست. اما با توجه به بررسی همزمان نتایج بوسیله تابع برازندگی، نتایج دو ستون به صورت همزمان نتایج بهینه‌سازی این پژوهش قابل استناد می‌باشد.



نمودار ۲: شاخص‌های عملکردی انرژی در مدل مرجع پایه و دو سایبان پیرامونی و جمع شونده در فصل‌های (الف) بهار، (ب) تابستان، (ج) پاییز و، (د) زمستان

بر این مبنا، نتایج حاکی از آن است که در گزینه‌های برتر تابع برازندگی در خصوص سایبان پیرامونی، در فصل بهار از میان ۱۰۰ گزینه بهینه‌سازی شده بر مبنای بهینه‌سازی چندهدفه در بهترین حالت، سطح مفید نور روز بیش از ۹ درصد افزایش یافته است درحالی‌که میزان مصرف انرژی بیش از ۲۱ درصد کاهش یافته است. همچنین در فصل تابستان نیز در بهترین حالت، سطح مفید نور روز بیش از ۹ درصد افزایش یافته است، درحالی‌که میزان مصرف انرژی بیش از ۴۵ درصد کاهش یافته است. همچنین در فصل پاییز، در بهترین حالت، سطح مفید نور روز بیش از ۲۰ درصد افزایش یافته است که بهترین نتیجه در چهار فصل سال محسوب می‌گردد، این در حالی‌که است که میزان مصرف انرژی در فصل پاییز بیش از ۱۲ درصد کاهش یافته است. اما در فصل زمستان، از میان ۹ گزینه برتر در تابع برازندگی، ۵ گزینه ارائه شده است که در میان آنها بهترین حالت، سطح مفید نور روز بیش از ۱۱ درصد افزایش یافته است درحالی‌که میزان مصرف انرژی بیش از ۳ درصد کاهش یافته است.

اما در گزینه‌های برتر تابع برازندگی در سایبان متحرک جمع‌شونده در مدل ارائه شده در شبیه‌سازی، نتایج نشان می‌دهد که در فصل بهار از میان گزینه‌های بهینه‌سازی شده بر مبنای بهینه‌سازی چندهدفه در بهترین حالت، سطح مفید نور روز همانند سایبان متحرک پیرامونی، بیش از ۹ درصد افزایش یافته است، درحالی‌که میزان مصرف انرژی بیش از ۲۶ درصد نسبت به مدل پایه، کاهش یافته است. همچنین در فصل تابستان نیز در بهترین حالت، سطح مفید نور روز بیش از ۹ درصد افزایش یافته است، درحالی‌که میزان مصرف انرژی بیش از ۴۸ درصد کاهش یافته است. همچنین در فصل پاییز، در بهترین حالت، سطح مفید نور روز بیش از ۱۶ درصد افزایش یافته است، که همانند سایبان متحرک پیرامونی، بهترین نتیجه در کل سال محسوب می‌گردد، این در حالی‌که است که میزان مصرف انرژی در فصل پاییز بیش از ۱۵ درصد کاهش یافته است که این عدد ۳ درصد بالاتر از سایبان متحرک پیرامونی در فصل مشابه می‌باشد. اما در فصل زمستان نیز، همانند سایبان پیرامونی، از میان ۹ گزینه برتر در تابع برازندگی، ۵ گزینه ارائه شده است که در میان آنها بهترین حالت، سطح مفید نور روز کمتر از ۱ درصد افزایش یافته است درحالی‌که میزان مصرف انرژی نیز تنها کمتر از ۲ درصد کاهش یافته است.

بحث و نتیجه گیری

در دو دهه‌ی اخیر به کارگیری ایده‌ی پویایی در معماری، به‌ویژه در طراحی نما، به‌واسطه‌ی دلایل زیبایی‌شناختی و مزیت‌های بهینه‌سازی آسایشی و بهره‌وری انرژی، به‌طور فزاینده‌ای مورد استفاده‌ی طراحان قرار گرفته است. نمود چنین ایده‌ای به‌صورت محسوس‌تر و پرکاربردتر، بیش از سایر عناصر نما، در سیستم‌های سایه‌اندازی به چشم می‌خورد. اگرچه ایده سایبان‌های متحرک در سال‌های اخیر با بکارگیری فناوری‌هایی نوین به دنبال ارائه راهکارهای بهره‌وری مصرف انرژی و بهینه‌سازی نور در فضای داخلی ساختمان‌ها می‌باشد، اما چنین ایده‌ای، چه در معماری ایران و چه در معماری جهان قدمتی قابل توجه داشته و نه تنها ذاتاً ماهیتی پویا و قابل جابه‌جایی داشته که به‌عنوان فرمی الحاقی، مؤلفه‌ای تزئینی نیز برشمرده می‌شده است. بر این اساس؛ و نیز با توجه به تغییرات اقلیمی و معضلات ناشی از آن، اصول اصلی به کارگیری این دسته از سیستم‌های سایه‌اندازی در سالیان اخیر برقراری سازش میان جذابیت فرمی سایبان‌های متحرک در نمای ساختمان با کارکردهای عملی آن در حوزه پایداری، شامل بهینه‌سازی آسایشی و بهره‌وری در مصرف انرژی است. از این رو، این مقاله سعی در ارائه نمونه‌ای از بهینه‌سازی چندهدفه الگوهای از سایبان متحرک ساختمان در زمینه کاهش مصرف انرژی و افزایش نور روز نموده است.

از جمله مهم‌ترین شاخص‌های طراحی سایبان‌های متحرک می‌توان به شاخص‌های فرمی آنها که شامل چرخش، انتقال و تغییر مقیاس است اشاره نمود. همچنین در میان شاخص‌های عملکردی سایبان‌ها، حوزه آسایش بصری، روشنایی مفید نور روز و در حوزه مصرف انرژی، شدت مصرف انرژی از جمله کاربردی‌ترین این شاخص‌ها هستند. این شاخص‌ها در طراحی سایبان‌های متحرک، در جبهه‌های مختلف، اقلیم‌های متفاوت و کاربری‌های گوناگون متغیر می‌باشد. بر این مبنا، پژوهش ارائه شده با بکارگیری مدل‌سازی پارامتریک و شبیه‌سازی نور روز و انرژی به دنبال یافتن بهترین گزینه طراحی دو نوع سیستم سایبان انتخابی متحرک در میان سایبان‌های متحرک با فرم‌های متعدد، سایبان پیرامونی و سایبان جمع‌شونده در جبهه جنوبی فضای اداری شهر اصفهان در عرض جغرافیایی ۳۳ درجه در اقلیم گرم و خشک بوده است. در این فرآیند از میان متغیرهایی نظیر زاویه سایبان، فاصله سایبان از جداره، فاصله تیغه‌های سایبان از یکدیگر و عمق سایبان؛ متغیر عمق سایبان به عنوان متغیر تغییر مقیاس، در دو گزینه طراحی برای هر یک از دو مدل سایبان متحرک شبیه‌سازی شده یعنی، سایبان‌های پیرامونی و جمع‌شونده شامل ۱۰۰ گزینه طراحی برای هریک از دو مدل سایبان انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

بر این مبنا، با توجه به نتایج ارائه شده در جدول شماره ۷، پیشنهاد می‌شود در بناهای اداری با اقلیم گرم و خشک در عرض جغرافیایی ۳۳ درجه با تابستان‌های گرم و خشک نظیر شهر اصفهان، در صورت استفاده از سایبان‌های متحرک پیرامونی در جبهه جنوبی ساختمان، در سه فصل ابتدایی سال، یعنی فصول بهار، تابستان و پاییز، از سایبان‌هایی با عمق ۱ متر (۱۰۰ سانتی‌متر) استفاده گردد. در این حالت، در فصول یاد شده به ترتیب بالغ بر ۲۱ درصد، ۴۵ درصد و ۱۲ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی خواهد شد و در حالات یادشده، بهینه‌سازی روشنایی مفید نور روز به ترتیب نیز بیش از ۹ درصد، ۹ درصد و ۲۰ درصد می‌باشد. همچنین، در فصل زمستان بکارگیری سایبان‌های متحرک پیرامونی با عمق ۰/۲۹ متر (۲۹ سانتی‌متر) موجب بهره‌وری ۴/۵ درصدی مصرف انرژی و بهینه‌سازی حدود ۶ درصدی روشنایی مفید نور روز می‌گردد. این درحالی‌است که با توجه به بهینه‌سازی چندهدفه مصرف انرژی و افزایش نور روز، بکارگیری سایبان‌های متحرک پیرامونی با عمق ۰/۷۹ متر (۷۹ سانتی‌متر) موجب بهینه‌سازی حدود ۱۵ درصدی روشنایی مفید نور روز و بهره‌وری ۲ درصدی مصرف انرژی می‌گردد.

همچنین با توجه به یافته‌های این پژوهش ارائه شده در جدول شماره ۸، در صورت استفاده از سایبان‌های متحرک جمع‌شونده در بناها با کاربری یاد شده در این اقلیم در جبهه جنوبی بنا، پیشنهاد می‌شود در سه فصل اول سال یعنی فصول بهار، تابستان و پاییز از سایبان‌هایی مشابه با سایبان‌های متحرک پیرامونی با عمق ۱ متر استفاده گردد. در این حالت، در فصول یاد شده به ترتیب حدود ۲۷ درصد، ۴۹ درصد و ۱۶ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی خواهد شد

که در حالات یادشده، بهینه‌سازی روشنایی مفید نور روز به ترتیب نیز بالغ بر ۹ درصد، ۹ درصد و ۱۶ درصد می‌باشد. همچنین در فصل زمستان بکارگیری سایبان‌های متحرک جمع‌شونده با عمق ۱ متر موجب بهینه‌سازی حدود ۱۵ درصدی روشنایی مفید نور روز می‌گردد که در این حالت، مصرف انرژی در حدود ۶ درصد افزایش خواهد داشت. در بقیه حالات بهینه‌سازی چندهدفه مصرف انرژی و افزایش نور روز در این فصل، به نظر می‌رسد نتایج به لحاظ آسایشی یا بهره‌وری انرژی قابل توجه نیستند.

درمجموع با مدنظر داشتن مقایسه نتایج ارائه شده در جداول ۷ و ۸؛ و درنظرگرفتن مباحث آسایشی و بهره‌وری انرژی، پیشنهاد می‌گردد از سایبان‌های متحرک پیرامونی، در سه فصل بهار، تابستان و پاییز از سایبان‌هایی با عمق ۱۰۰ سانتی‌متر و فصل زمستان با عمق ۲۹ سانتی‌متر استفاده گردد.

نتایج به‌دست آمده از بهینه‌سازی در فول متخلف، حاکی از آن است که استفاده از پیکربندی‌های پیشنهادی هر یک از دو سیستم سایه‌انداز سایبان‌های متحرک پیرامونی و جمع‌شونده در ساختمان‌های اداری شهر اصفهان و با وجود اقلیم گرم و خشک و تابستان‌هایی به شدت گرم، موجب شده است بهینه‌سازی نور روز و بهره‌وری مصرف انرژی به صورت همزمان امکان‌پذیر باشد. اهمیت این موضوع در مقایسه با بهینه‌سازی تک هدفه آن است که در فرآیند بهینه‌سازی تک هدفه نور روز و یا مصرف انرژی به تنهایی، موجب بهره‌وری تنها در یکی از حوزه‌ها خواهد شد. بر این مبنا، بهره‌وری مصرف انرژی به تنهایی بدون توجه به موضوع بهینه‌سازی نور روز، موجب کاهش نور روز در فضاهای اداری و افزایش مصرف نور مصنوعی و درنتیجه افزایش مصرف انرژی و همچنین کاهش بهره‌وری کیفی کار کارکنان در فضای اداری می‌گردد. همچنین، بهینه‌سازی تک هدفه نور روز به تنهایی و بدون در نظرگرفتن بهره‌وری مصرف انرژی، موجب افزایش مصرف انرژی ناشی از شدت گرمای تابشی نور روز و در نتیجه افزایش مصرف انرژی سرمایشی به‌ویژه در فصل تابستان خواهد شد.

شایان ذکر است با توجه به محدودیت‌های زمانی و اقلیمی این پژوهش، پیشنهاد می‌گردد، پژوهش‌هایی با مدنظرداشتن و اعمال تغییرات در پیکربندی سیستم سایه‌انداز در فواصل زمانی کوتاه‌تر به‌صورت روزانه یا هفتگی؛ در دیگر اقلیم‌ها و نیز مدل‌های ساختمان‌های اداری رایج در سایر شهرهای ایران انجام شود. همچنین با درنظرگرفتن گستره جامعی از شاخص‌ها نظیر خیرگی و آسایش حرارتی؛ مدنظرداشتن سیستم‌های سایبان متحرک دیگر و متغیرهای متفاوت با این پژوهش و نیز خصوصیات اپتیکال و هندسی ویژه هریک از آنان؛ و پرداختن به سیستم‌های متغیرهای پنجره و شیشه مختلف و سایر جهت‌گیری‌ها و کاربری‌های گوناگون، امکان انجام پژوهش‌های متفاوت و نیل به نتایج کاربردی بیشتری دست یافت.

سپاسگزاری

نویسندگان از همه کسانی که در این پژوهش همکاری داشته و کمک کرده‌اند، سپاسگزاری می‌نمایند.

پی‌نوشت

۱. طبق تحقیقات به‌عمل آمده ساختمان‌ها سهمی بیش از ۷۰٪ از کل انرژی مصرفی را در سال ۲۰۲۴ در کشور داشته‌اند.

2. Grasshopper
3. Rhino
4. Ladybug Tools
5. UDI= Useful Daylight Illuminance
6. EUI= Energy use intensity
7. Retractable
8. Kaleidocycle
9. EVALGLARE
10. BIM

11. Generic
12. Adiabatic
13. Energy use intensity (EUI)
14. Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)
15. Fitness Function

حامی مالی: بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش: همه نویسندگان، در بخش‌های نگارش و تنظیم مقاله حاضر نقش و سهم برابر دارند.

تضاد منافع: نویسنده (نویسندگان) اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

- Agrawal, S. and Sahu, M., 2025. Enhancing building energy system design using computational intelligence for smart buildings. *AIS-Architecture Image Studies*, 6(1), 26-35.
- Arab, Y., Qanaa, B. and Khozaei, F., 2019. Shading Performances on Neo-Minimalist and Colonial Style Apartment in Penang, Malaysia. *MANZAR, the Scientific Journal of landscape*, 11(46), 56-61. <https://doi.org/10.22034/manzar.2019.84298>
- Aritonang, S.R., Mangkuto, R.A., Atthailah and Prasetyo, I., 2025. Daylighting Design Optimization of Complex Fenestration Systems with External Shading and Horizontal Slats in Tropical Elementary School Classrooms. *Journal of Architectural Engineering*, 31(1), 04025001.
- Ayoub, M., 2019. 100 Years of daylighting: A chronological review of daylight prediction and calculation methods. *Solar Energy*, 194, 360-390
- Bakmohammadi, P. and Noorzai, E., 2020. Optimization of the design of the primary school classrooms in terms of energy and daylight performance considering occupants' thermal and visual comfort. *Energy Reports*, 6, 1590-1607
- Bakr, A. O., 2019. Kinetic Facades The new paradigm shift in architecture Toward an Environmental Design Performance. *Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences*, 43, 577-590
- Belok, F., Rabea, M., Hanafi, M. and El-Bastawissi, I. Y., 2020. Achieving visual comfort in university educational spaces: a design framework for responsive kinetic skin. *Architecture and Planning Journal (APJ)*, 25(1), 6
- Borg, S. P., Farrugia, E. and Buhagiar, V., 2016. A comparative study of the energetic performance of climate adaptive façades compared to static façade design in a Mediterranean climate, In *Proceedings of the 11th Conference on Advanced Building Skins*; 2016; 1–10.
- Carlucci, S., Causone, F., De Rosa, F. and Pagliano, L., 2015. A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 1016-1033 , <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.062>
- Chi, D. A., Moreno, D. and Navarro, J., 2018. Correlating daylight availability metric with lighting, heating and cooling energy consumptions. *Building and Environment*, 132, 170-180
- Costa-Carrapiço, I., Raslan, R. and González, J. N., 2020. A systematic review of genetic algorithm-based multi-objective optimisation for building retrofitting strategies towards energy efficiency. *Energy and Buildings*, 210, 109690. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109690>

- Couvelas, A., Phocas, M., Maden, F., Matheou, M. and Ölmez, D., 2018. Daylight performance of an adaptive façade shading system integrated on a multi-storey office building. 13th Conference on Advanced Building Skins Foroughi, R., Asadi, S. and Khazaeli, S., 2020. New approach in designing a kinetic window shading using optimization methods. *Journal of Architectural Engineering*, 26(3), 04020023
- Ghiabakloo, Z., 2012. Fundamentals of building physics (Tehran: Jihad University Press, Amirkabir Industrial Unit, **(In Persian)**).
- Grobman, Y. J., Capeluto, I. G. and Austern, G., 2017. External shading in buildings: comparative analysis of daylighting performance in static and kinetic operation scenarios. *Architectural Science Review*, 60(2), 126-136. <https://doi.org/10.1080/00038628.2016.1266991>
- Hosseini, S. M., Mohammadi, M. and Guerra-Santin, O., 2019. Interactive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by 2D and 3D shape changes. *Building and Environment*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106396>
- Kheiri, F., 2018. A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 897-920 <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.080>
- Kramer, O., 2017. Genetic Algorithm Essentials. Springer International Publishing. <https://books.google.com/books?id=NxLcDQAAQBAJ>
- Mirjalili, S. and Dong, J. S., 2020. Multi-Objective Optimization Using Artificial Intelligence Techniques. Springer International Publishing. <https://books.google.com/books?id=tuuqzQEACAAJ>
- Pilechiha, P., Mahdavinejad, M., Rahimian, F. P., Carnemolla, P., and Seyedzadeh, S., 2020. Multi-objective optimisation framework for designing office windows: quality of view, daylight and energy efficiency. *Applied Energy*, 261, 114356 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114356>
- Rasuli M., Shahbazi Y. and Matini M., 2019. Horizontal and Vertical Movable Drop-Down Shades Performance in Double Skin Facade of Office Buildings; Evaluation and Parametric Simulation. *Naqshejahan*, 9 (2), 135-144, <http://bsnt.modares.ac.ir/article-2-38226-en.html> **(In Persian)**.
- Romano R., Aelenei L., Aelenei D. and Mazzucchelli E.S., 2018. What is an Adaptive Façade? Analysis of Recent Terms and Definitions from an International Perspective. *Journal of Facade Design & Engineering*, 6: 65-76. <http://hdl.handle.net/10400.9/3128>.
- Sadegh, S. O., Haile, S. G. and Jamshidzahi, Z., 2022. Development of two-step biomimetic design and evaluation framework for performance-oriented design of multi-functional adaptable building envelopes. *Journal of Daylighting*, 9(1), 13-27 <https://dx.doi.org/10.15627/jd.2022.2>
- Salah, F. and Kayili, M. T., 2022. RESPONSIVE KINETIC FAÇADE STRATEGY AND DETERMINATION OF THE EFFECT ON SOLAR HEAT GAIN USING PARAMETRIC BIM-BASED ENERGY SIMULATION. *Journal of Green Building*, 17(1), 71-88 <https://doi.org/10.3992/jgb.17.1.71>
- Samadi, M. and Fattahi, J., 2021. Energy use intensity disaggregation in institutional buildings—A data analytics approach. *Energy and Buildings*, 235, 110730.
- Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X. and Tsangrassoulis, A., 2021. Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. *Automation in Construction*, 121, 103450 <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103450>.
- Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X. and Tsangrassoulis, A., 2022. Simulation-based personalized real-time control of adaptive facades in shared office spaces. *Automation in Construction*, 138, 104246. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104246>
- Toutou, A., Fikry, M. and Mohamed, W., 2018. The parametric based optimization framework daylighting and energy performance in residential buildings in hot arid zone. *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 3595-3608 <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.04.006>.

- Valitabar, M., Moghimi, M., Mahdavinejad, M. and Pilechiha, P., 2018. Design optimum responsive façade based on visual comfort and energy performance. 23rd International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia: Learning, Prototyping and Adapting, CAADRIA,
- Wang, J. C., 2019. Analysis of energy use intensity and greenhouse gas emissions for universities in Taiwan. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118363. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118363>
- Yang, X.-S., 2020. Nature-inspired optimization algorithms: Challenges and open problems. *Journal of Computational Science*, 46, 101104. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2020.101104>.
- Yu, F., Wennersten, R. and Leng, J., 2020. A state-of-art review on concepts, criteria, methods and factors for reaching 'thermal-daylighting balance'. *Building and Environment*, 186, 107330 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107330>

