



Redefining the Role of Algae-Based Bio-Façades in Daylight Glare Control in Highperformance Buildings

ARTICLE INFO

Article Type
Analytic Study

Authors

Fayyaz Eslami¹,
Mohammadjavad
Mahdavinejad^{2*}

How to cite this article

Ron

URL: <http://>

ABSTRACT

Aims: : Glare is a major challenge to visual comfort in highperformance buildings and can be simultaneously influenced by the characteristics of openings, building orientation, the intensity and distribution of daylight, and users' visual conditions. This study aims to redefine the role of algae-based bio-façades as an effective architectural element for daylight glare control for adapting the placement of algae-based panels to specific glare conditions.

Methods: The study first identifies and classifies the concept of glare, its principal indicators, and its major types through a review and analysis of the theoretical foundations. Subsequently, by examining the relationships between glare type, glare source, spatial location, and daylight radiation characteristics, an analytical framework is developed to determine appropriate locations for the installation of algae-based bio-façade panels.

Findings: Different types of glares have distinct sources, spatial locations, and distribution patterns; therefore, a single fixed location cannot be proposed for the installation of algae-based panels. Based on the type of glare, appropriate locations for deploying the panels are identified across different parts of the building envelope and around openings. Targeted placement of the panels can function as a passive strategy for modulating daylight penetration and reducing direct or indirect exposure to glare sources.

Conclusion: The findings indicate that redefining the performance of algae-based bio-façades through the integration of energy-visual comfort and design quality can provide a new pathway toward highperformance building envelopes. Accordingly, algae-based bio-façades can be considered not merely as an energy-generation technology, but also as an integral component of the architectural design process.

Keywords: Sustainability, Energy Efficiency, Thermal Comfort, Visual Comfort, Visual-Thermal Comfort, Building Envelope, Future Architecture, Highperformance Architecture Theory

CITATION LINKS

1- Phd Student, Department of Architecture, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- Professor, Department of Architecture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Architecture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Email:

mahdavinejad@modares.ac.ir

Article History

Received:

Accepted:

Published:

[1]. United Nations Environment Programme. *Global Status Report for Buildings and...* [2]. Yu X, Su Y. *Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation—A literature review...* [3]. Giarma C, Tsikaloudaki K, Aravantos D. *Daylighting and visual comfort in...* [4]. Yu F, Wennersten R, Leng J. *A state-of-art ...* [5]. ... [6]. Askari A, Mahdavinejad M, Ansari M. *Investigation of displacement ventilation...* [7]. Bazazzadeh H, [8]. Bazazzadeh H, Świt-Jankowska B, Fazeli N, Nadolny A, Safar Ali Najari B, Hashemi Safaei S, [9]. Torabi M, Mahdavinejad M. *Past and Future Trends on the Effects of Occupant.....* [10]. Saligheh E, Saadatjoo P. *Impact of Central Courtyard Proportions on Passive Cooling..* [11]. Song B, Yao R, Zhu Y, Li Z, Costanzo V, Li B. *Quantifying visual comfort of daylight...* [12]. Yan Z, Wu P, Yao Q, Chen S, Feng J. *Enhancing visual comfort and cognitive...* [13]. Katia R, Rakha T. *Evaluating annual sun exposure in LEED v4 for commercial office...* [14]. Miraba S, Salehi A, Rostamzadeh-Renani M, Ehteshami... [15]. Shi S, Yu J, Zeng Y, Lin B. *Effects of supplementary lighting on subjective...* [16]. Fakhr BV, Mahdavinejad M, Rahbar M, Dabaj B. *Design...* [17]. Goharian A, Daneshjoo K, Shaeri J, Mahdavinejad M, ... [18]. Goharian A, Mahdavinejad M, Bemanian... [19]. Goharian A, Mahdavinejad M. *A novel approach to multi-...* [20]. Goharian A, Mahdavinejad M, Ghazazani S, Hosseini M, Zamani....



بازتعریف جایگاه نمای زیستی جلبک‌پایه در کنترل خیرگی نور روز در ساختمان پربازده

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: تحقیق بنیادی

نویسندگان

فیاض اسلامی^۱

محمدجواد مهدوی نژاد^{۲*}

اهداف: خیرگی ناشی از نور روز یکی از چالش‌های مهم آسایش بصری در ساختمان‌های پربازده است که می‌تواند هم‌زمان تحت تأثیر ویژگی‌های بازشو، جهت‌گیری، شدت و توزیع نور روز و شرایط دیداری کاربران قرار گیرد. این پژوهش با هدف بازتعریف جایگاه نمای زیستی جلبک‌پایه به‌عنوان عنصری مؤثر در کنترل خیرگی نور روز، به بررسی انواع خیرگی و امکان تطبیق محل استقرار این پنل‌ها با هر یک از شرایط خیرگی می‌پردازد.

روش‌ها: پژوهش در گام نخست با مرور و تحلیل مبانی نظری، مفهوم خیرگی و شاخص‌ها و انواع اصلی آن را شناسایی و طبقه‌بندی می‌کند. سپس، با استخراج رابطه میان نوع خیرگی، منشأ ایجاد آن، موقعیت فضایی و ویژگی‌های تابش نور روز، یک چارچوب تحلیلی برای تعیین محل مناسب استقرار پنل‌های زیستی جلبک‌پایه تدوین می‌شود.

یافته‌ها: انواع مختلف خیرگی دارای منشأ، موقعیت و الگوی فضایی متفاوتی هستند و در نتیجه، نمی‌توان یک موقعیت ثابت را برای استقرار پنل‌های زیستی جلبک‌پایه پیشنهاد کرد. بر اساس نوع خیرگی، موقعیت‌های مناسب برای به‌کارگیری پنل‌ها در بخش‌های مختلف پوسته و پیرامون بازشوها تعیین می‌شود؛ به‌گونه‌ای که جانمایی هدفمند پنل‌ها می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد غیرفعال برای تعدیل ورود نور روز و کاهش مواجهه مستقیم یا غیرمستقیم با منابع خیرگی عمل کند.

نتیجه‌گیری: تایج پژوهش نشان می‌دهد که بازتعریف عملکرد نمای زیستی جلبک‌پایه بر مبنای هم‌زمانی انرژی-دیدکارایی و کیفیت طراحی می‌تواند مسیر جدیدی برای طراحی پوسته‌های چندعملکردی و ساختمان‌های پربازده فراهم سازد. از این رو نمای زیستی جلبک‌پایه را می‌توان فراتر از یک فناوری تولید انرژی و به‌عنوان بخشی از فرآیند طراحی معماری در نظر گرفت.

کلید واژگان: پایداری، بهره‌وری انرژی، آسایش حرارتی، آسایش دیداری، انرژی-دیدکارایی، پوسته ساختمان، معماری آینده، نظریه معماری سرآمد

۱. دانشجوی دکتری، گروه معماری، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲. استاد گروه معماری، گروه معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

نویسنده مسئول *

mahdavinejad@modares.ac.ir

تاریخ مقاله

تاریخ دریافت:

تاریخ پذیرش:

تاریخ انتشار:

ارجاع‌دهی

URL: <http://>

این نشریه ی دارای دسترسی باز، تحت قوانین گواهینامه بین‌المللی Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License منتشر می‌شود که اجازه اشتراک (تکثیر و بازاریابی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

مقدمه

بخش ساختمان و ساخت‌وساز یکی از مهم‌ترین حوزه‌های مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان است. بر اساس گزارش‌های اخیر بین‌المللی، ساختمان‌ها و ساخت‌وساز حدود ۳۵ درصد از مصرف انرژی جهانی و حدود ۴۰ درصد از انتشار جهانی CO_2 را به خود اختصاص می‌دهند [۱] و ساختمان‌ها به‌تنهایی بیش از ۳۰ درصد از تقاضای انرژی جهانی را مصرف می‌کنند [۲]. این سهم قابل‌توجه، ضرورت حرکت به سوی ساختمان‌های پربازده و توسعه راهبردهایی را برجسته می‌کند که بتوانند به‌صورت هم‌زمان مصرف انرژی و کیفیت محیط داخلی را مدیریت کنند. در این میان، استفاده از نور روز به‌عنوان یک منبع طبیعی روشنایی، یکی از راهبردهای مهم برای کاهش وابستگی به روشنایی مصنوعی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی است [۳]. بااین‌حال، افزایش دسترسی به نور طبیعی لزوماً به معنای ارتقای کیفیت محیط بصری نیست؛ زیرا نور روز باید علاوه بر میزان دسترسی به نور، معیارهایی همچون یکنواختی روشنایی، خیرگی و آسایش دیداری (آسایش بصری) را نیز در نظر بگیرد [۴]. ازاین‌رو، دستیابی به عملکرد مطلوب ساختمان مستلزم ایجاد توازن میان دسترسی به نور روز، آسایش بصری، آسایش حرارتی و مصرف انرژی است [۵]. این عدد در کشورهای حوزه خلیج فارس به بیش از ۵۰ درصد می‌رسد و این در حالی است که باعث کاهش کیفیت فضای داخلی و همچنین گرمایش بیش از حد در بیرون از ساختمان‌ها می‌شود. [۶-۱۰] این سهم قابل توجه، ضرورت حرکت به سوی ساختمان‌های پربازده و توسعه راهبردهایی را برجسته می‌کند که بتوانند به‌صورت هم‌زمان مصرف انرژی، کیفیت محیط داخلی و پیامدهای زیست‌محیطی ساختمان را مدیریت کنند. در این میان، استفاده از نور روز به‌عنوان یک منبع طبیعی روشنایی، یکی از راهبردهای مهم کاهش وابستگی به روشنایی مصنوعی است؛ بااین‌حال، افزایش دسترسی به نور طبیعی لزوماً به معنای ارتقای کیفیت محیط بصری نیست. (شکل ۱)

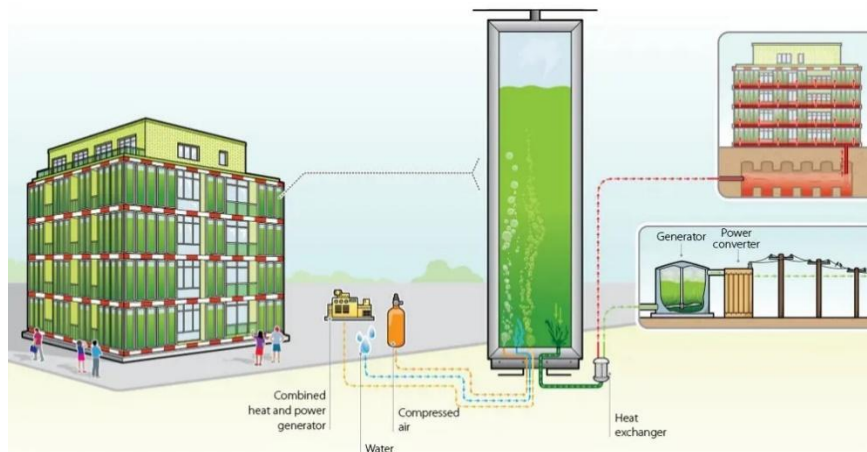
اهمیت و ضرورت پری‌اختن موضوع ریشه در نقش نور روز در کیفیت بخشی به فضاهای معماری و ارتقا کیفیت زندگی دارد. اهمیت کنترل خیرگی از آنجا ناشی می‌شود که این پدیده

صرفاً کاهش مقدار نور را نشان نمی‌دهد، بلکه به کیفیت ادراک بصری و قابلیت انجام فعالیت‌های بصری مربوط است. در ساختمان‌های اداری، افزایش دسترسی به نور روز، در صورت نبود کنترل مناسب، می‌تواند با خیرگی ناراحت‌کننده همراه شود و در نتیجه کیفیت تجربه بصری و عملکرد کاربران را تحت تأثیر قرار دهد. مطالعات تجربی اخیر نشان داده‌اند که خیرگی یکی از مهم‌ترین عوامل منفی مؤثر بر آسایش بصری کارکنان اداری است و در محیط‌های کاری مبتنی بر نمایشگر، عدم تطابق میان روشنایی محیط و شرایط بصری صفحه‌نمایش می‌تواند به خستگی بینایی، کاهش آسایش و افت کارایی انجام وظایف منجر شود [۱۱، ۱۲]. همچنین، پژوهش‌های انجام‌شده در فضاهای اداری نشان می‌دهند که کنترل ناکافی تابش مستقیم خورشید و خیرگی می‌تواند عملکرد بصری و آسایش کاربران را محدود کند، به‌گونه‌ای که ارزیابی خیرگی در سطح چشم برای پیش‌بینی عملکرد بصری و رضایت کاربران اهمیت ویژه‌ای دارد [۱۳]. در مطالعات اخیر مربوط به ساختمان‌های اداری، استفاده از سایه‌اندازهای تطبیقی توانسته است احتمال خیرگی ناشی از نور روز را به‌طور معناداری کاهش دهد، که نشان‌دهنده اهمیت کنترل خیرگی برای دستیابی هم‌زمان به دسترسی‌پذیری نور روز و آسایش بصری است [۱۵]. افزون بر این، شواهد تجربی جدید در محیط‌های کاری نشان می‌دهد که کیفیت نامناسب محیط نوری می‌تواند ادراک کارکنان از آسایش، ترجیح نوری و سایر پاسخ‌های ذهنی مرتبط با محیط کار را تضعیف کند و به همین دلیل ارزیابی عملکرد نوری ساختمان باید فراتر از صرفاً تأمین شدت روشنایی موردنیاز انجام شود [۱۵]. (شکل ۲)

استفاده از نمای زیستی جلبک‌پایه به‌عنوان یکی از راهکارهای تعدیل تابش خورشیدی و کنترل خیرگی نور روز در ساختمان‌ها، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. با وجود مطالعات انجام‌شده درباره ظرفیت این سامانه‌ها در کاهش تابش و بهبود شرایط نوری فضای داخلی، هنوز یک مسئله مهم و کاربردی به‌طور دقیق تبیین نشده است: پنل‌های زیستی جلبک‌پایه با چه کیفیت و در چه موقعیت و آرایش استقرار باید در پوسته ساختمان نصب شوند تا بتوانند در عمل، به‌طور مؤثر در کاهش خیرگی نور روز نقش داشته باشند؟



شکل ۱. ساختمان BIQ یک ساختمان نوآورانه پنج طبقه با استاندارد خانه غیرفعال است که توسط دفتر معماری SPLITTERWERK از گراتس و شرکت Arup طراحی شده است. (منبع: <https://www.arup.com>)



شکل ۲. مسئله اصلی پژوهش بر تعیین کیفیت و نحوه استقرار پنل‌های زیستی جلبک پایه به منظور کاهش مؤثر خیرگی نور روز در فضای داخلی ساختمان تمرکز کرده است. (منبع: <https://www.arup.com>) [۲۵]

دید، موقعیت منبع نسبت به خط دید و شرایط سازگاری چشم ایجاد می‌شود. از این رو، ارزیابی آن نسبت به شاخص‌های ساده‌ای مانند لومینانس (شدت روشنایی یا دقیق‌تر روشنایی تابشی سطح) پیچیده‌تر است [۱۶-۲۶]. در فضای داخلی، ممکن است یک محیط از نظر میزان روشنایی کاملاً مناسب باشد، اما به دلیل وجود یک منبع بسیار روشن در میدان دید کاربر، همچنان شرایط خیرگی ناراحت‌کننده ایجاد شود. از این رو، پژوهش‌های مرتبط با آسایش بصری از شاخص‌هایی نظیر شاخص خیرگی نور روز (DGI)، شاخص خیرگی کمیسیون بین‌المللی روشنایی (CGI)، درجه‌بندی یکپارچه خیرگی (UGR)، احتمال آسایش بصری (VCP) و، به‌ویژه، احتمال خیرگی ناشی از نور روز (DGP) برای ارزیابی و

در واقع، صرف وجود پنل زیستی در نما لزوماً به معنای کنترل مؤثر خیرگی نیست؛ بلکه میزان و نحوه اثرگذاری آن می‌تواند به موقعیت استقرار، جهت‌گیری، میزان پوشش سطح باز شو و رابطه آن با مسیر تابش و میدان دید کاربران وابسته باشد. از این رو، خلأ اصلی پژوهش حاضر نه در اثبات قابلیت بالقوه نمای زیستی جلبک پایه، بلکه در تعیین شرایط استقرار و کیفیت عملکردی آن برای مواجهه هدفمند با سناریوهای مختلف خیرگی نور روز قرار دارد.

خیرگی پدیده‌ای پیچیده و پویاست که شدت، فراوانی و الگوی بروز آن در طول شبانه‌روز و در فصل‌های مختلف سال تغییر می‌کند. خیرگی معمولاً در نتیجه ترکیب نامطلوبی از درخشندگی منبع، کنتراست روشنایی، اندازه منبع در میدان

مروری بر پایه های نظری پژوهش نشان می‌دهد که در این میان، کنترل خیرگی در ساختمان‌های اداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا کاربران این ساختمان‌ها بخش قابل توجهی از ساعات روز را در محیط‌های کاری و غالباً در مجاورت پنجره‌ها و سطوح شفاف سپری می‌کنند و بسیاری از فعالیت‌های آنان نیز به دریافت دقیق اطلاعات بصری و کار مداوم با نمایشگرها وابسته است. بنابراین، وجود منابع روشنایی شدید یا کنتراست نامناسب در میدان دید می‌تواند صرفاً به ناراحتی لحظه‌ای محدود نشود، بلکه بر کیفیت ادراک بصری، تمرکز، خوانایی اطلاعات و تجربه کلی کاربر از محیط اثرگذار باشد. این مسئله در ساختمان‌های پربازده که هدف آن‌ها افزایش بهره‌گیری از نور روز و کاهش مصرف انرژی روشنایی است، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا راهبردهای افزایش دسترسی به نور طبیعی، در صورت فقدان کنترل مناسب، ممکن است هم‌زمان احتمال بروز خیرگی را افزایش دهند. از این رو، تأمین نور روز کافی بدون ایجاد شرایط نامطلوب خیرگی باید به عنوان یکی از الزامات اساسی طراحی محیط‌های اداری در نظر گرفته شود.

بر این اساس، پرداختن به خیرگی نباید صرفاً به مرحله ارزیابی عملکرد پس از طراحی محدود شود، بلکه باید از ابتدای فرآیند طراحی معماری و در مقیاس پوسته، بازشو و سازمان‌دهی فضایی مورد توجه قرار گیرد. کنترل مؤثر خیرگی مستلزم شناخت نوع، منشأ، شدت و موقعیت فضایی آن و سپس انتخاب راهکار متناسب با هر شرایط است؛ به گونه‌ای که کاهش خیرگی به قیمت از دست رفتن نور مفید روز، ارتباط بصری با محیط بیرون یا افزایش مصرف انرژی تمام نشود. در این چارچوب، توسعه راهکارهای چندعملکردی برای پوسته ساختمان می‌تواند امکان ایجاد تعادل میان دسترسی به نور روز، آسایش بصری و عملکرد انرژی را فراهم کند. بنابراین، بررسی ظرفیت عناصر نوظهور پوسته، از جمله نمای زیستی جلبک‌پایه، برای ایفای نقشی فراتر از تولید انرژی و مشارکت در کنترل هدفمند خیرگی، می‌تواند یک مسیر پژوهشی قابل توجه برای ارتقای عملکرد ساختمان‌های اداری و توسعه نسل جدید پوسته‌های چندعملکردی باشد.

پیش‌بینی خیرگی استفاده کرده‌اند. مقایسه چندین شاخص خیرگی در شرایط مختلف نشان داده است که احتمال خیرگی ناشی از نور روز (DGP) در بسیاری از شرایط مبتنی بر نور روز، عملکرد قابل قبول‌تری در پیش‌بینی خیرگی ناراحت‌کننده دارد [۲۷-۳۵]. حساسیت مسئله خیرگی در ساختمان‌های معاصر با افزایش سطح شفافیت پوسته و استفاده گسترده از سطوح شیشه‌ای بیشتر می‌شود. اگرچه بازشوهای بزرگ می‌توانند دسترسی به نور روز و ارتباط بصری با محیط بیرون را افزایش دهند، ورود کنترل نشده تابش خورشیدی می‌تواند احتمال ناراحتی بصری را افزایش دهد. نور روز تنها یک منبع طبیعی برای تأمین روشنایی محیط داخلی نیست، بلکه از طریق مسیرهای غیرتصویری دستگاه بینایی و تنظیم ریتم شبانه‌روزی می‌تواند با پیامدهای مختلف سلامت انسان مرتبط باشد. شواهد جدید نشان می‌دهند که مواجهه بیشتر با نور روز در طول روز با شاخص‌های مطلوب‌تر سلامت روان، از جمله کاهش علائم افسردگی و بهبود برخی شاخص‌های خواب، ارتباط دارد [۳۶،۳۷]. همچنین، مطالعات انسانی نشان داده‌اند که تغییر در شدت و طیف نور روز می‌تواند بر شاخص‌های فیزیولوژیک مرتبط با ریتم شبانه‌روزی، از جمله ملاتونین، کورتیزول و کیفیت خواب، اثر بگذارد [۳۸]. این ارتباط حتی به حوزه سلامت متابولیک نیز گسترش یافته است؛ یک مطالعه مداخله‌ای جدید در افراد مبتلا به دیابت نوع ۲ نشان داد که قرارگیری در معرض نور طبیعی روز در ساعات کاری، در مقایسه با نور مصنوعی ثابت، زمان قرارگیری در محدوده طبیعی گلوکز خون را افزایش داده و متابولیسم کل بدن را به سمت اکسیداسیون بیشتر چربی تغییر می‌دهد [۳۹]. افزون بر این، پژوهش‌های جدید در محیط‌های درمانی نشان می‌دهند که شرایط نور طبیعی در داخل بیمارستان، از جمله شدت نور و دسترسی به نور بیرون، با توجه به زمان روز و فصل تغییر می‌کند و از این منظر می‌تواند برای طراحی محیط‌های سلامت‌محور و تنظیم مواجهه بیماران با نور اهمیت داشته باشد [۴۰]. بنابراین، ارزیابی عملکرد نور روز در ساختمان‌ها می‌تواند فراتر از شدت روشنایی و آسایش بصری، ابعاد زیستی و پزشکی نظیر هم‌زمان‌سازی ریتم شبانه‌روزی، خواب، سلامت روان و سلامت متابولیک را نیز دربرگیرد.

سؤالات پژوهش

سؤال اول: انواع خیرگی ناشی از نور روز در ساختمان‌های پربازده چیست و هر یک بر اساس منشأ، ویژگی‌های نوری و موقعیت فضایی چگونه قابل طبقه‌بندی هستند؟

سؤال دوم: با توجه به نوع، منشأ و موقعیت فضایی خیرگی، نمای زیستی جلبک‌پایه در کدام بخش‌های پوسته و پیرامون بازشوها می‌تواند به‌صورت هدفمند در کنترل خیرگی نور روز به کار گرفته شود؟

اهداف پژوهش

هدف اول: شناسایی و طبقه‌بندی انواع خیرگی ناشی از نور روز در ساختمان‌های پربازده بر اساس منشأ، ویژگی‌های نوری و موقعیت فضایی آن‌ها.

هدف دوم: تعیین و پیشنهاد موقعیت‌های مناسب برای استقرار نمای زیستی جلبک‌پایه در پوسته و پیرامون بازشوها، متناسب با انواع و شرایط مختلف خیرگی، با هدف ارتقای هم‌زمان آسایش بصری و عملکرد انرژی.

مواد و روش‌ها

برای درک دقیق نمای زیستی جلبک‌پایه و نقش آن در کنترل خیرگی نور روز، لازم است مبانی و اصول طراحی نمای زیستی جلبک‌پایه بررسی شود. نمای زیستی جلبک‌پایه را می‌توان به‌عنوان یکی از رویکردهای نوظهور در توسعه پوسته‌های چندعملکردی ساختمان در نظر گرفت که در آن، سامانه‌های حاوی ریزجلبک، علاوه بر ایفای نقش در تولید زیستی انرژی و جذب دی‌اکسیدکربن، ظرفیت تأثیرگذاری بر شرایط نوری و حرارتی فضای داخلی را نیز دارا هستند. در این سامانه‌ها، محیط کشت جلبک، پنل یا بایورآکتور و اجزای پوسته می‌توانند به‌صورت یک لایه فعال در ساختار نما عمل کنند و بخشی از تابش خورشیدی ورودی به ساختمان را جذب، تعدیل یا فیلتر کنند. از منظر عملکرد نوری، مهم‌ترین ویژگی این سامانه در ارتباط با پژوهش حاضر، امکان تغییر میزان و توزیع تابش عبوری از پوسته است. برخلاف یک سطح شفاف معمولی که بخش قابل توجهی از تابش خورشیدی را مستقیماً به فضای داخلی منتقل می‌کند، محیط کشت جلبکی می‌تواند بخشی از تابش ورودی را در فرایند فتوسنتز جذب کرده و از شدت تابش عبوری بکاهد. در نتیجه، نمای زیستی جلبک‌پایه

می‌تواند به‌عنوان یک لایه تعدیل‌کننده نور روز در پوسته ساختمان عمل کند.

این ویژگی از منظر کنترل خیرگی اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا خیرگی ناراحت‌کننده تنها به میزان کلی نور در فضا وابسته نیست، بلکه تحت تأثیر ویژگی‌های فوتومتریک و هندسی منبع خیرگی، از جمله درخشندگی منبع، کنتراست درخشندگی، اندازه ظاهری منبع، موقعیت آن در میدان دید و میزان سازگاری چشم با درخشندگی محیط پیرامون قرار دارد [۴۱-۴۴]. در ارزیابی خیرگی نور روز نیز، شاخص‌هایی مانند احتمال خیرگی نور روز این عوامل را در کنار روشنایی عمودی در سطح چشم در نظر می‌گیرند؛ به‌ویژه درخشندگی، اندازه زاویه‌ای و موقعیت منبع در میدان دید از عوامل مؤثر در ارزیابی خیرگی هستند [۴۱]. بر این اساس، اگر نمای زیستی جلبک‌پایه در بخشی از پوسته ساختمان قرار گیرد که بتواند تابش مستقیم خورشید یا مواجهه بصری با سطوح بسیار روشن را تعدیل کند، می‌تواند به‌طور بالقوه با کاهش کنتراست درخشندگی و محدودکردن مواجهه مستقیم کاربر با منابع دارای درخشندگی بالا، در کنترل خیرگی نور روز مؤثر باشد [۴۴، ۴۵].

بر این مبنا، پژوهش حاضر به نمای زیستی جلبک‌پایه فراتر از یک فناوری برای تولید انرژی می‌نگرد و آن را به‌عنوان بخشی فعال از پوسته ساختمان در مدیریت تابش خورشیدی و تنظیم شرایط نوری فضای داخلی بررسی می‌کند. در این رویکرد، عملکرد نمای جلبک‌پایه بر اساس ارتباط میان نوع و منشأ خیرگی، مسیر ورود تابش، موقعیت منبع نور در میدان دید و محل استقرار سامانه در پوسته ساختمان تحلیل می‌شود. تمرکز اصلی بر شناسایی موقعیت‌هایی است که در آن‌ها جانمایی هوشمندانه این سامانه بتواند بدون کاهش نامطلوب دسترسی به نور روز، شدت مواجهه بصری کاربران با منابع بسیار روشن و کنتراست‌های شدید درخشندگی را کاهش دهد. از این منظر، پژوهش حاضر یک تغییر رویکرد مفهومی را پیشنهاد می‌کند: گذار از «نمای جلبک‌پایه به‌عنوان مولد انرژی» به «نمای جلبک‌پایه به‌عنوان پوسته‌ای چندعملکردی برای تعدیل نور روز». چنین نگاهی امکان ارزیابی هم‌زمان و یکپارچه ظرفیت‌های انرژی، حرارتی و

را دارند شناسایی شدند. در گام نهایی، این نواحی با قابلیت‌های عملکردی نمای زیستی جلبک‌پایه، از جمله جذب و تعدیل بخشی از تابش خورشیدی و کنترل نور عبوری، تطبیق داده شدند. بنابراین، نتایج پژوهش از یک استدلال مرحله‌ای «نوع خیرگی، منشأ و ویژگی نوری، موقعیت و مسیر تابش، ناحیه قابل مداخله در پوسته، موقعیت پیشنهادی نمای زیستی جلبک‌پایه» استخراج می‌شوند. در نتیجه، موقعیت پیشنهادی برای نمای زیستی جلبک‌پایه نه به‌صورت پیشینی، بلکه بر اساس انطباق منطقی میان ویژگی هر نوع خیرگی و ظرفیت عملکردی بخش‌های مختلف پوسته تعیین می‌شود. بر اساس روش شناسی پژوهش، انواع خیرگی بر مبنای منشأ نوری و نحوه اثرگذاری آن بر سیستم بینایی شناسایی و تفکیک شدند. این دسته‌بندی شامل خیرگی ناشی از تابش مستقیم خورشید، خیرگی ناشی از منابع نوری با درخشندگی بالا، خیرگی ناشی از بازتاب نور از سطوح و خیرگی ناشی از کنتراست شدید درخشندگی بود. این تفکیک از آن جهت اهمیت دارد که هر یک از این سازوکارها می‌تواند الگوی متفاوتی از توزیع درخشندگی در میدان دید ایجاد کرده و شرایط متفاوتی را برای سازگاری چشم به وجود آورد. برای نمونه، ورود مستقیم تابش خورشید از طریق بازشو می‌تواند یک منبع بسیار درخشان و موضعی در میدان دید ایجاد کند، در حالی که یک سطح داخلی با درخشندگی بالا نیز ممکن است بدون وجود تابش مستقیم خورشید، از طریق افزایش اختلاف درخشندگی نسبت به زمینه، موجب ناراحتی بصری شود. از آنجا که نور روز یکی از مؤلفه‌های مؤثر در شکل‌گیری محیط سالم و ارتقای سلامت ساکنان است و کیفیت محیط ساخته‌شده می‌تواند از طریق تعامل میان عوامل محیطی و ویژگی‌های ساختمان بر سلامت انسان اثرگذار باشد [۵۷]. در این چارچوب، انتخاب مصالح ساختمانی و طراحی محیط داخلی نیز باید با هدف تأمین شرایط سالم برای ساکنان و ارتقای کیفیت محیط مورد توجه قرار گیرد [۵۸]. همچنین، رویکرد یکپارچه به طراحی نما، بر ارتباط میان ویژگی‌های زیست‌محیطی ساختمان و سلامت ساکنان تأکید دارد [۵۹]. در حالی که عملکرد پوسته ساختمان و نقش آن در کنترل و پالایش عوامل محیطی نیز بخشی از رویکرد جامع به سلامت در معماری محسوب می‌شود [۶۰]. تمامی این‌ها نشان

بصری این فناوری را در راستای ارتقای عملکرد ساختمان‌های پربازده فراهم می‌سازد.

روش انجام پژوهش

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، تحلیلی-توصیفی است و با رویکرد تحلیل مفهومی و تطبیقی انجام شده است. چارچوب پژوهش بر این فرض استوار است که کنترل مؤثر خیرگی نور روز، مستلزم شناسایی رابطه میان نوع خیرگی، منشأ ایجاد آن، ویژگی‌های نوری منبع خیرگی و موقعیت فضایی آن در محیط داخلی و پوسته ساختمان است. بر این اساس، فرآیند پژوهش در دو مرحله اصلی شامل شناسایی و طبقه‌بندی خیرگی و تطبیق شرایط خیرگی با موقعیت استقرار نمای زیستی جلبک‌پایه انجام می‌شود. مبنای روش شناختی پژوهش [۴۶-۵۶] ایجاب می‌نماید که با رویکردی طراحانه، موضوع نور روز و کاربردهای آن در ساختمان‌های اداری دیده شود.

در مرحله نخست پژوهش، ادبیات علمی مرتبط با خیرگی نور روز، آسایش بصری، ارزیابی خیرگی و کنترل نور روز به‌صورت نظام‌مند بررسی شد تا چارچوب مفهومی و مبنای نظری لازم برای تحلیل خیرگی در فضاهای داخلی فراهم شود. در این مرحله، ضمن بررسی تعاریف و رویکردهای مختلف ارائه‌شده در مطالعات پیشین، مفاهیم کلیدی مرتبط با ادراک خیرگی، سازگاری بینایی، توزیع روشنایی و درخشندگی در میدان دید و همچنین شاخص‌های کمی ارزیابی خیرگی استخراج و دسته‌بندی شدند. هدف این مرحله، علاوه بر شناسایی شاخص‌های موجود، تبیین ارتباط میان ویژگی‌های فیزیکی محیط نوری و پاسخ ادراکی کاربران به خیرگی بود.

در مرحله بعد، یافته‌های استخراج‌شده از مطالعات پیشین به‌صورت تطبیقی و در قالب یک زنجیره تحلیلی شامل نوع خیرگی، منشأ ایجاد، ویژگی‌های نوری منبع، موقعیت آن در میدان دید و مسیر ورود یا بازتاب نور سازمان‌دهی شدند. سپس، برای هر وضعیت خیرگی، ارتباط میان ویژگی‌های منبع خیرگی و قابلیت مداخله اجزای پوسته ساختمان بررسی شد. بر این اساس، ابتدا مشخص گردید که هر نوع خیرگی از چه منبعی و تحت چه شرایط نوری ایجاد می‌شود؛ سپس با دنبال کردن مسیر انتقال نور از منبع تا میدان دید کاربر، نواحی از پوسته و پیرامون بازشو که قابلیت تعدیل این مسیر

شرایط نور روز، ویژگی‌های میدان دید و توانایی شاخص در بازنمایی شرایط واقعی ادراک بصری کاربران مورد بررسی قرار گرفت.

در نهایت، یافته‌های این مرحله به‌عنوان مبنای تدوین چارچوب تحلیلی پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند. بر این اساس، منشأ خیرگی، مسیر ورود یا بازتاب نور، موقعیت منبع نسبت به خط دید، درخشندگی، اختلاف درخشندگی، شرایط سازگاری چشم و ویژگی‌های هندسی بازشو به‌عنوان مؤلفه‌های اصلی مؤثر بر خیرگی در نظر گرفته شدند. این چارچوب زمینه را برای بررسی نقش نمای زیستی جلبک‌پایه به‌عنوان یک جزء عملکردی پوسته ساختمان فراهم می‌کند؛ به‌گونه‌ای که این نما نه صرفاً به‌عنوان یک سامانه تولیدکننده انرژی، بلکه به‌عنوان عنصری برای تعدیل تابش، کنترل توزیع نور روز و کاهش احتمال ایجاد خیرگی در فضای داخلی مورد ارزیابی قرار گیرد.

در مرحله دوم، بر اساس نتایج مرحله نخست، یک ماتریس تحلیلی نوع خیرگی-منشأ-موقعیت-راهبرد کنترل تدوین شد. در این ماتریس، ابتدا منشأ و موقعیت فضایی هر نوع خیرگی مشخص و سپس رابطه آن با اجزای پوسته و بازشوهای ساختمان تحلیل گردید. موقعیت‌های بالقوه برای استقرار عناصر نمای زیستی جلبک‌پایه در سه مقیاس اصلی شامل سطح بازشو، پیرامون بازشو و بخش‌های مجاور یا مکمل پوسته بررسی شدند. معیار اصلی انتخاب موقعیت، امکان ایجاد مدولاسیون هدفمند نور روز و کاهش مواجهه مستقیم یا غیرمستقیم میدان دید با منبع خیرگی بود، بدون آنکه کنترل خیرگی به حذف غیرضروری نور روز یا کاهش عملکرد انرژی پوسته منجر شود.

در ادامه، برای هر یک از انواع شناسایی‌شده خیرگی، مناسب‌ترین ناحیه استقرار نمای زیستی جلبک‌پایه تعیین و منطق عملکردی آن تبیین شد. این تطبیق بر اساس سه مؤلفه اصلی شامل منشأ خیرگی، موقعیت منبع نسبت به فضای داخلی و قابلیت عنصر پوسته برای تعدیل مسیر ورود یا توزیع نور روز انجام گرفت. در نهایت، روابط حاصل در قالب یک چارچوب مفهومی ارائه شد که از شناسایی نوع خیرگی به تعیین منشأ و موقعیت آن و سپس به انتخاب موقعیت مناسب

می‌دهد که شامل خیرگی ناشی از تابش مستقیم خورشید، خیرگی ناشی از منابع نوری با درخشندگی بالا، خیرگی ناشی از بازتاب نور از سطوح و خیرگی ناشی از کنتراست شدید درخشندگی؛ همه و همه بخشی از رویکرد جامع به ساختمان سالم است [۶۱-۶۲] که باید دیده شده، کنترل شوند.

همچنین، با اتکا به ادبیات موضوع [۶۳-۶۷] متغیرهای مؤثر بر شکل‌گیری و شدت خیرگی و آسایش بصری شناسایی شدند. مهم‌ترین این متغیرها شامل شدت و توزیع نور روز، درخشندگی منبع، اختلاف درخشندگی میان منبع و زمینه، اندازه ظاهری منبع نور، موقعیت منبع نسبت به خط دید، میزان انسداد یا پوشیدگی منبع و شرایط سازگاری چشم بودند. در این چارچوب، خیرگی به‌عنوان ویژگی مستقل یک منبع نوری در نظر گرفته نمی‌شود، بلکه حاصل برهم‌کنش میان منبع نور، زمینه پیرامون، موقعیت مشاهده‌گر و وضعیت سازگاری بینایی فرد تلقی می‌شود. استفاده از نماهای دوپوسته [۶۸-۷۰] بخشی از رویکرد جامع به کنترل گرمایش بیش از حد [۷۱-۷۵] در تابستان است. بنابراین، حتی یک منبع نوری با درخشندگی ثابت می‌تواند بسته به اندازه ظاهری، موقعیت زاویه‌ای، فاصله از خط دید و درخشندگی زمینه، درجات متفاوتی از ناراحتی بصری ایجاد کند.

پژوهش با رویکردی کیفی، متغیرهای اصلی را بررسی می‌کند و به جای محاسبه آن‌ها، کارکردها و تاثیر آن‌ها را در پوسته ساختمان مورد مطالعه قرار می‌دهد. در ادامه، شاخص‌های متداول ارزیابی خیرگی شامل شاخص خیرگی نور روز (DGI)، شاخص یکپارچه خیرگی (UGR)، احتمال آسایش بصری (VCP) و احتمال خیرگی نور روز (DGP) بررسی شدند. این شاخص‌ها از نظر مبانی محاسباتی، متغیرهای ورودی، نوع منبع نوری و شرایط کاربرد با یکدیگر تفاوت دارند و بنابراین نمی‌توان آن‌ها را بدون توجه به ماهیت پدیده خیرگی به‌صورت معادل به کار گرفت. به‌ویژه، احتمال خیرگی ناشی از نور روز (DGP) با تمرکز بر ارزیابی احتمال وقوع خیرگی در شرایط نور روز توسعه یافته است، در حالی که احتمال خیرگی نور روز اساساً برای ارزیابی خیرگی ناشی از سامانه‌های روشنایی مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این‌رو، در این پژوهش، قابلیت کاربرد هر شاخص با توجه به ماهیت خیرگی،

استقرار نمای زیستی جلبک‌پایه است. این چارچوب می‌تواند مبنایی برای مطالعات بعدی شامل شبیه‌سازی نورروز، ارزیابی شاخص احتمال خیرگی نور روز (DGP) و سنجش هم‌زمان عملکرد انرژی و آسایش بصری قرار گیرد.

یافته‌ها

الف- شناسایی عوامل خیرگی، دسته‌بندی و اولویت‌بندی آن‌ها

اولین یافته پژوهش از طریق تحلیل و طبقه‌بندی ادبیات علمی مرتبط با خیرگی نور روز به دست آمد. در این مرحله، مؤلفه‌های مرتبط با منشأ خیرگی، سازوکار ایجاد آن و موقعیت قرارگیری منبع خیرگی در میدان دید از منابع منتخب استخراج و به‌صورت کیفی کدگذاری شدند. سپس، موارد دارای منشأ و سازوکار مشابه با یکدیگر مقایسه و در طبقات مفهومی اصلی ادغام شدند. حاصل این فرایند، شناسایی چهار الگوی اصلی خیرگی شامل خیرگی ناشی از تابش مستقیم خورشید، خیرگی ناشی از منابع نوری با درخشندگی بالا، خیرگی ناشی از بازتاب نور از سطوح و خیرگی ناشی از کنتراست شدید درخشندگی بود. این طبقه‌بندی سپس به‌عنوان مبنای تحلیل رابطه میان هر نوع خیرگی و امکان جانمایی نمای زیستی جلبک‌پایه در مراحل بعدی پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. (جدول ۱)

نمای زیستی جلبک‌پایه برای کنترل هدفمند خیرگی منتهی می‌شود.

به عبارت دیگر، این مطالعه را می‌توان به‌عنوان یک پژوهش بسترساز و اکتشافی برای توسعه مطالعات کمی و تجربی آینده در زمینه یکپارچه‌سازی عملکرد نوری و زیستی نمای جلبک‌پایه در نظر گرفت. چارچوب ارائه‌شده، با شناسایی ارتباط میان شرایط و انواع مختلف خیرگی نور روز، مسیر تابش، موقعیت استقرار و ظرفیت عملکردی نمای زیستی، مبنایی مفهومی برای تعریف سناریوهای قابل آزمون و متغیرهای قابل اندازه‌گیری فراهم می‌کند. بر این اساس، مطالعات آینده می‌توانند با بهره‌گیری از شبیه‌سازی نور روز و شاخص‌هایی مانند DGP، شرایط نوری حاصل از استقرار این نما را به‌صورت کمی ارزیابی کرده و هم‌زمان اثر آن را بر مصرف انرژی، آسایش بصری و عملکرد حرارتی ساختمان بررسی کنند. در گام‌های پیشرفته‌تر نیز می‌توان این داده‌ها را در قالب مطالعات تجربی میدانی یا آزمایشگاهی، مدل‌سازی چندهدفه و روش‌های بهینه‌سازی و هوش مصنوعی به کار گرفت تا از چارچوب تحلیلی حاضر، به یک مدل پیش‌بینی و تصمیم‌یار برای طراحی و جانمایی بهینه نمای زیستی جلبک‌پایه در شرایط اقلیمی مختلف دست یافت. بنابراین، خروجی روش پژوهش یک مدل تجربی یا شبیه‌سازی عددی مستقل نیست، بلکه یک چارچوب تحلیلی برای ارتباط دادن شرایط مختلف خیرگی نور روز با ظرفیت عملکردی و موقعیت

جدول ۱. تحلیل منشأ خیرگی در ساختمان‌های اداری شهر تهران با تحلیل و طبقه‌بندی نظام‌مند منابع

ارتباط با پوسته	موقعیت معمول منبع	سازوکار ایجاد خیرگی	منشأ خیرگی	مؤلفه استخراج‌شده از ادبیات
کنترل مسیر مستقیم تابش	پنجره، بازشو، نما	ورود مستقیم تابش با شدت بالا به میدان دید	خورشید	تابش مستقیم خورشید
کاهش مواجهه مستقیم با منبع	چراغ، سطح بسیار روشن، منبع خارجی	درخشندگی بالای منبع نسبت به زمینه	منبع مصنوعی/روشن	منبع نوری با درخشندگی بالا
کنترل تابش و بازتاب	سطوح داخلی/خارجی، شیشه	انعکاس تابش از سطح و ورود آن به میدان دید	سطح بازتابنده	بازتاب نور
تعدیل توزیع نور و کنتراست	اطراف بازشو و میدان دید	اختلاف شدید بین منبع/ناحیه روشن و زمینه	اختلاف زیاد روشنایی	کنتراست شدید درخشندگی

بر اس روش‌شناسی انتخاب شده در پژوهش، پژوهش با استفاده از کمی‌سازی چندمعیاره از لیکرت ساده قوی‌تر است؛ چون نشان می‌دهد که «اهمیت» هر نوع خیرگی چگونه از چند مؤلفه مستقل ساخته شده و سپس آن را به موقعیت فضایی در اتاق اداری مرتبط می‌کند. در مدل پیشنهادی، چهار نوع خیرگی را در نظر گرفته شده و برای هر کدام شش معیار تعریف، و برای هر معیار با مقیاس ۱ تا ۵ امتیازدهی شده است. امتیاز هر نوع خیرگی با استفاده از رابطه:

$$S_i = \sum_{j=1}^6 x_{ij}$$

محاسبه شده است. بنابراین حداکثر امتیاز هر نوع خیرگی ۳۰ و حداقل ۶ خواهد بود. (جدول ۳)

برای کمی‌سازی اهمیت انواع خیرگی، چهار دسته اصلی شامل خیرگی ناشی از ۱- تابش مستقیم خورشید، ۲- منابع نوری با درخشندگی بالا، ۳- بازتاب نور از سطوح و ۴- کنتراست شدید درخشندگی در نظر گرفته شد. اهمیت هر دسته بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای مرتبط با عملکرد دیداری و قابلیت مداخله پوسته ارزیابی شد. برای هر معیار، امتیازی در مقیاس پنج‌درجه‌ای لیکرت از ۱ (اهمیت بسیار کم) تا ۵ (اهمیت بسیار زیاد) اختصاص یافت. سپس امتیازهای حاصل برای هر نوع خیرگی تجمیع و میانگین آن‌ها محاسبه شد. بر اساس امتیاز نهایی، میزان اهمیت نسبی انواع خیرگی تعیین و موارد با امتیاز بالاتر به‌عنوان شرایط دارای اولویت بیشتر برای مداخله طراحی شناسایی شدند. در ادامه، همین فرآیند برای زون‌های مختلف فضای اداری تکرار شد تا علاوه بر تعیین اهمیت هر نوع خیرگی، رابطه میان نوع خیرگی و موقعیت فضایی آن نیز مشخص شود. (جدول ۲)

جدول ۲. عملیاتی‌سازی معیارهای ارزیابی و سؤالات سنجش اهمیت انواع خیرگی برای تعیین اولویت مداخله نمای زیستی جلبک‌پایه

مقیاس ارزیابی	سؤال کمی‌شونده از خبرگان	تعریف عملیاتی معیار	معیار
۱ = بسیار کم تا ۵ = بسیار زیاد	این نوع خیرگی تا چه حد می‌تواند باعث ناراحتی دیداری و اختلال در عملکرد بصری کاربران شود؟	میزان بالقوه ایجاد ناراحتی، اختلال در دید و کاهش آسایش دیداری توسط نوع خیرگی	شدت اثر دیداری
۱ = بسیار کم تا ۵ = بسیار زیاد	احتمال وقوع این نوع خیرگی در یک فضای اداری معمول چقدر است؟	میزان احتمال مشاهده یا تجربه این نوع خیرگی در شرایط معمول بهره‌برداری از فضای اداری	احتمال وقوع
۱ = بسیار کم تا ۵ = بسیار زیاد	این نوع خیرگی تا چه حد به‌صورت مکرر یا پایدار در طول زمان رخ می‌دهد؟	میزان تکرار، استمرار یا مدت باقی‌ماندن شرایط خیرگی در دوره بهره‌برداری	تداوم زمانی
۱ = بسیار محدود تا ۵ = بسیار گسترده	این نوع خیرگی چه میزان از فضای اداری یا چه گستره‌ای از میدان دید کاربران را تحت تأثیر قرار می‌دهد؟	گستره فضایی ناحیه‌ای که تحت تأثیر خیرگی قرار می‌گیرد	دامنه اثر فضایی
۱ = بسیار کم تا ۵ = بسیار زیاد	این نوع خیرگی تا چه حد مستقیماً به بازشو، پنجره یا ویژگی‌های پوسته ساختمان وابسته است؟	میزان وابستگی ایجاد یا تشدید خیرگی به پنجره، بازشو، شیشه، جهت‌گیری و سایر اجزای پوسته	ارتباط با بازشو و پوسته
۱ = بسیار کم تا ۵ = بسیار زیاد	تا چه حد می‌توان اثر این نوع خیرگی را از طریق جانمایی مناسب پنل زیستی جلبک‌پایه در پوسته یا پیرامون بازشو کاهش یا تعدیل کرد؟	میزان امکان کاهش، تعدیل یا کنترل خیرگی از طریق جانمایی و عملکرد پنل زیستی جلبک‌پایه	قابلیت کنترل با پنل زیستی

جدول ۳. نتایج ارزیابی خبرگان و امتیازدهی چندمعیاره انواع خیرگی در فضای اداری

امتیاز کل	قابلیت کنترل	ارتباط با بازشو	دامنه	تداوم	وقوع	شدت	نوع خیرگی
28	5	5	4	4	5	5	تابش مستقیم خورشید
18	2	2	3	4	3	4	منبع با درخشندگی بالا
24	4	4	4	4	4	4	بازتاب از سطوح
29	4	5	5	5	5	5	کنتراست شدید درخشندگی

و امتیاز کل تابش مستقیم خورشید برابر است با:
 $50 + 50 + 40 + 40 + 50 + 50 = 280$
 به همین ترتیب، کنتراست شدید درخشندگی با ۲۹۰ از ۳۰۰ بالاترین امتیاز تجمعی را دارد، درحالی‌که منابع با درخشندگی بالا با ۱۸۰ از ۳۰۰ پایین‌ترین امتیاز را کسب کرده است. (جدول ۴)

برای تعیین اهمیت نسبی انواع خیرگی، ۱۰ خبره در حوزه‌های مرتبط با معماری، نور روز، آسایش بصری و پوسته ساختمان به‌صورت مستقل چهار نوع خیرگی شناسایی شده را ارزیابی کردند. هر خبره برای هر نوع خیرگی، شش معیار شامل شدت، وقوع، تداوم، دامنه اثر، ارتباط با بازشو و قابلیت کنترل را در مقیاس پنج‌درجه‌ای از ۱ تا ۵ امتیازدهی کرد. سپس امتیازهای ثبت شده برای هر معیار در میان ۱۰ خبره با یکدیگر جمع شدند. ازاین‌رو، امتیاز هر معیار در دامنه ۱۰ تا ۵۰ و امتیاز کل هر نوع خیرگی، بر اساس شش معیار، در دامنه ۶۰ تا ۳۰۰ قرار گرفت.

نتایج نشان داد که کنتراست شدید درخشندگی با امتیاز ۲۹۰ از ۳۰۰ بالاترین اهمیت را در ارزیابی خبرگان به خود اختصاص داد. پس از آن، تابش مستقیم خورشید با امتیاز ۲۸۰ و بازتاب نور از سطوح با امتیاز ۲۴۰ قرار گرفتند؛ درحالی‌که منابع با درخشندگی بالا با امتیاز ۱۸۰ کمترین امتیاز تجمعی را به دست آورد. این نتایج مبنای مرحله بعدی پژوهش، یعنی تحلیل ارتباط میان نوع خیرگی و موقعیت فضایی آن در اتاق اداری و تعیین اولویت جانمایی نمای زیستی جلبک‌پایه، قرار گرفت.

مهمترین یافته پژوهش در این بخش نشان می‌دهد که خیرگی مستقیم خورشید و کنتراست شدید درخشندگی، بالاترین اهمیت را در ارتباط با نواحی مجاور و پیرامونی بازشو

یکی از یافته‌های اصلی پژوهش آن است که «منبع با درخشندگی بالا» الزاماً نباید فقط منبع مصنوعی باشد؛ در فضای اداری تهران می‌تواند شامل سطوح بسیار روشن، آسمان روشن، ساختمان مقابل یا عناصر مصنوعی نیز باشد. بنابراین بهتر است «خیرگی ناشی از منابع با درخشندگی بالا» از محورهای اصلی مطالعه در حوزه کنترل خیرگی در ساختمان‌های اداری شهر تهران قرار گیرد.

همچنین، در مرحله بعد، جدول تحلیل شده با استفاده از یک رویکرد کمی چندمعیاره تقویت شد؛ به‌گونه‌ای که برای هر سلول، امتیاز نهایی از ترکیب شدت، احتمال وقوع، مدت مواجهه و قابلیت کنترل توسط پنل محاسبه شد. بر این اساس، مقادیر ۱ تا ۵ صرفاً به‌عنوان قضاوت کلی در نظر گرفته نشدند، بلکه به‌عنوان خروجی یک مدل کمی چندمعیاره تعیین شدند و بدین ترتیب، استحکام روش‌شناختی جدول برای استفاده در مقاله افزایش یافت. (شکل ۳)

در این مرحله، مقیاس ارزیابی بر اساس پنل خبرگان است. هر یک از ۱۰ خبره، هر معیار را در مقیاس ۱ تا ۵ امتیازدهی کرده است؛ بنابراین امتیاز هر معیار برای هر نوع خیرگی بین ۱۰ و ۵۰ قرار می‌گیرد. امتیاز کل هر نوع خیرگی حاصل جمع شش معیار است و دامنه نظری آن ۶۰ تا ۳۰۰ است. ستون «میانگین کل / ۱۰» حاصل تقسیم امتیاز کل بر تعداد خبرگان است و برای حفظ مقیاس اولیه، معادل امتیاز تجمعی متوسط در مقیاس ۶ تا ۳۰ است. تفسیر روش‌شناختی موضوع، ترکیب روش‌های کیفی و کمی را نشان می‌دهد. در این ساختار، مثلاً عدد ۵۰ در ستون «شدت» برای تابش مستقیم خورشید به این معناست که مجموع امتیازهای ۱۰ خبره برای این معیار برابر ۵۰ بوده است؛ یعنی هر ۱۰ خبره حداکثر امتیاز ۵ را داده‌اند. بنابراین:

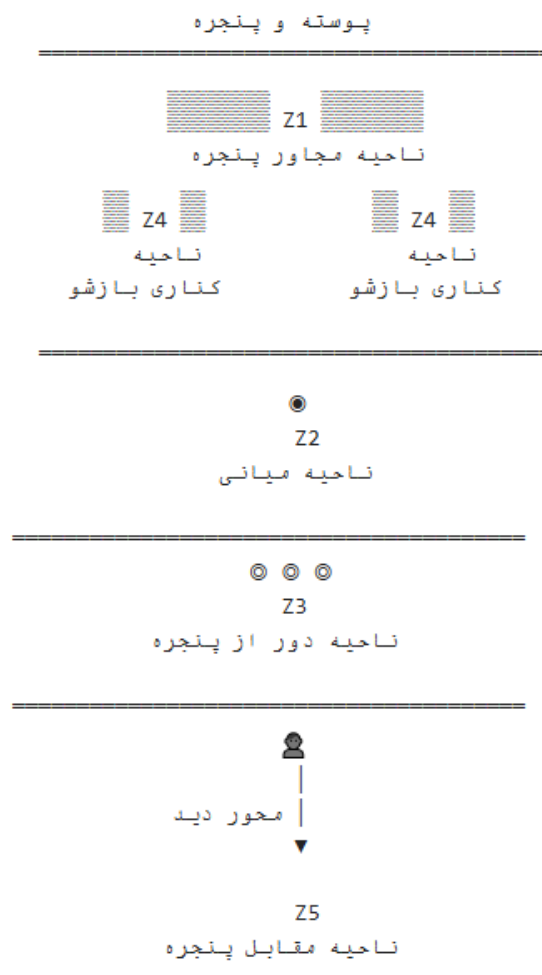
$$50 = 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5$$

تحلیل ادبیات علمی نشان داد که خیرگی صرفاً تابع شدت نور ورودی نیست، بلکه بر اساس منشأ تابش، موقعیت منبع نسبت به میدان دید، نحوه بازتاب نور و اختلاف درخشندگی میان منبع و زمینه، می‌تواند به شکل‌های متفاوتی در فضای داخلی ساختمان ظاهر شود. بر مبنای این تحلیل، چهار الگوی اصلی شامل خیرگی ناشی از تابش مستقیم خورشید، خیرگی ناشی از منابع با درخشندگی بالا، خیرگی ناشی از بازتاب نور از سطوح و خیرگی ناشی از کنتراست شدید درخشندگی شناسایی و طبقه‌بندی شد.

نشان دادند؛ درحالی‌که خیرگی ناشی از بازتاب سطوح دارای پراکنش فضایی گسترده‌تری در فضای اداری بود. بر اس روش‌شناسی انتخاب شده در پژوهش، در این مرحله می‌توانیم دقیقاً به سؤال اصلی پژوهش متصل شویم که نمای زیستی جلبک‌پایه را کجا در ساختمان‌های اداری شهر تهران قرار دهیم؟ (شکل ۴)

ب- تعیین محل استقرار نمای زیستی جلبک‌پایه

در مرحله نخست پژوهش، مسئله خیرگی نور روز به‌عنوان یک مسئله چندبعدی در فضای داخلی ساختمان بررسی شد.

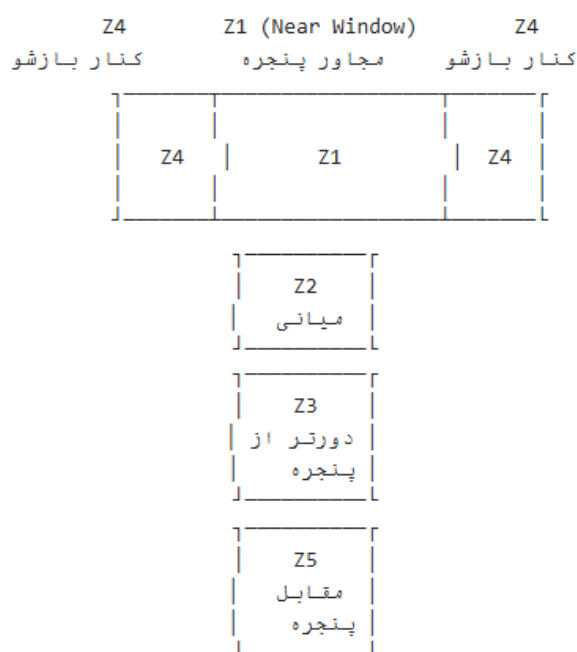


شکل ۳. زون‌بندی داخل فضای اداری بر اساس الگوریتم‌های محاسبه میزان خیرگی

جدول ۴. ماتریس ارزیابی چندمعیاره اهمیت انواع خیرگی و قابلیت کنترل آن‌ها در فضای اداری

میانگین کل / ۱۰	امتیاز کل	قابلیت کنترل	ارتباط با بازشو	دامنه	تداوم	وقوع	شدت	نوع خیرگی
28.0	280	50	50	40	40	50	50	تابش مستقیم خورشید
18.0	180	20	20	30	40	30	40	منابع با درخشندگی بالا
24.0	240	40	40	40	40	40	40	بازتاب نور از سطوح
29.0	290	40	50	50	50	50	50	کنتراست شدید درخشندگی
24.75	990	150	160	160	170	170	180	مجموع

دیوار خارجی / پنجره



عمق فضای اداری

شکل ۴. برای تحلیل میزان خیرگی، برای این منظور، فضای اداری به پنج ناحیه عملکردی شامل ناحیه مجاور پنجره (Z1)، ناحیه میانی (Z2)، ناحیه دور (Z3)، ناحیه کناری بازشو (Z4) و ناحیه مقابل پنجره (Z5) تقسیم شده است

پوسته ساختمان در اولویت قرار گیرند. برای این منظور، ۱۰ خبره در حوزه‌های مرتبط با معماری، نور روز، آسایش دیداری و عملکرد پوسته ساختمان، هر یک از چهار نوع خیرگی را بر اساس شش معیار شامل شدت اثر دیداری، احتمال وقوع، تداوم، دامنه اثر فضایی، ارتباط با بازشو و قابلیت کنترل از طریق پوسته در مقیاس پنج‌درجه‌ای از ۱ تا ۵ ارزیابی کردند. امتیازهای خبرگان برای هر معیار تجمیع و سپس امتیاز کل هر نوع خیرگی محاسبه شد. این مرحله، یک شاخص کمی از

با این حال، شناسایی انواع خیرگی به‌تنهایی برای پاسخ به مسئله طراحی در ساختمان‌های اداری شهر تهران کافی نیست؛ زیرا هدف صرفاً تعیین نوع خیرگی نیست، بلکه بررسی این موضوع است که نمای زیستی جلبک‌پایه در کدام بخش از ساختمان اداری می‌تواند بیشترین ظرفیت را برای کنترل شرایط خیرگی داشته باشد. از این‌رو، در مرحله دوم، اهمیت نسبی هر نوع خیرگی به‌صورت کمی ارزیابی شد تا مشخص شود کدام الگوهای خیرگی باید در تصمیم‌گیری مربوط به

فناوری تولید انرژی، بلکه به عنوان یک جزء عملکردی پوسته در کنترل شرایط نوری و تعدیل خیرگی در نظر گرفته شد. بر اس روش شناسی انتخاب شده در پژوهش، اتاق اداری را به **زون های فضایی** تقسیم شده است که عبارتند از:

Z1: بلافاصله مجاور پنجره

Z2: محدوده میانی اتاق

Z3: محدوده دور از پنجره

Z4: محدوده پیرامونی/کناری باز شو

Z5: محدوده مقابل پنجره

سپس برای هر نوع خیرگی، علاوه بر اهمیت کلی، امتیاز **فضایی** تعیین شده است، با استفاده از رابطه:

$$G_{ik} = S_i \times L_{ik}$$

که در آن:

- S_i = اهمیت کلی نوع خیرگی i
- L_{ik} = میزان ارتباط آن نوع خیرگی با زون k

برای یک ساختمان اداری معمولی در تهران، جدول تحلیلی مربوط، به عنوان سناریوی پایه برای ارزیابی اولیه در نظر گرفته شد. با توجه به ماهیت اولیه این سناریو، مقادیر ارائه شده به عنوان داده های تجربی قطعی تلقی نشدند و برای گزارش آن ها به عنوان یافته های کمی در پژوهش، اعتبار آن ها از طریق ارزیابی خبرگان، شبیه سازی عددی یا داده های میدانی مورد تأیید قرار گرفت. (جدول ۵)

بر اساس رویکرد طراحی مبنا در پژوهش، اهمیت نتایج را بایست در جایگاه مهم طراحی معماری در کیفیت زندگی مردم جستجو کرد. تفسیر فضایی خیرگی و تعامل آن با محیط از اهمیت و ضرورت ویژه ای برخوردار است. بر اساس این سناریوی نمونه، بیشترین امتیاز مربوط به کنتراست شدید درخشندگی است، به ویژه در نواحی مجاور، کناری و مقابل پنجره. پس از آن، تابش مستقیم خورشید و بازتاب نور از سطوح اهمیت بیشتری دارند. ناحیه دور از پنجره نیز امتیاز پایین تری دارد؛ بنابراین در یک اتاق اداری معمولی، نیاز به مداخله پوسته ای مرتبط با خیرگی عمدتاً در محدوده پیرامون باز شو و میدان دید مرتبط با پنجره متمرکز می شود. (جدول ۶)

اهمیت نسبی انواع خیرگی فراهم کرد و مشخص ساخت که کدام شرایط خیرگی از منظر طراحی پوسته نیازمند توجه بیشتری هستند.

در گام بعد، مسئله از «چه نوع خیرگی مهم تر است؟» به «این خیرگی در کجای فضای اداری رخ می دهد و در کدام موقعیت امکان مداخله مؤثر پوسته وجود دارد؟» انتقال یافت.

بر اس روش شناسی انتخاب شده در پژوهش، برای این منظور، فضای اداری به پنج ناحیه عملکردی شامل ناحیه مجاور پنجره (Z1)، ناحیه میانی (Z2)، ناحیه دور از پنجره (Z3)، ناحیه کناری باز شو (Z4) و ناحیه مقابل پنجره (Z5) تقسیم شد. این تقسیم بندی با هدف ایجاد یک چارچوب فضایی برای ارتباط دادن منشأ خیرگی با موقعیت کاربر، باز شو و پوسته انجام گرفت. سپس هر یک از چهار نوع خیرگی در ارتباط با این نواحی ارزیابی شد و شدت ارتباط فضایی آن با هر ناحیه در مقیاس پنج درجه ای تعیین گردید.

در نهایت، نتایج دو مرحله با یکدیگر تلفیق شد؛ به این معنا که اهمیت هر نوع خیرگی با موقعیت فضایی آن در اتاق اداری و سپس با قابلیت مداخله پوسته در آن موقعیت مرتبط شد. حاصل این فرایند، یک ماتریس تصمیم گیری «نوع خیرگی - موقعیت فضایی - مداخله پوسته» بود که امکان تعیین نواحی دارای اولویت برای استقرار نمای زیستی جلبک پایه را فراهم کرد. بنابراین، جانمایی پنل ها نه بر اساس یک موقعیت ثابت و از پیش تعیین شده، بلکه بر مبنای رابطه میان منشأ خیرگی، اهمیت آن، موقعیت فضایی، مسیر تابش و قابلیت کنترل توسط پوسته تعیین شد.

با توجه به هدف کاربردی پژوهش، این چارچوب برای شرایط ساختمان های اداری شهر تهران در نظر گرفته شد؛ به گونه ای که ویژگی های اقلیمی، تابش خورشیدی و الگوی معمول باز شوهای ساختمان های اداری تهران در تفسیر فضایی نتایج مورد توجه قرار گیرد. بدین ترتیب، خروجی پژوهش از یک طبقه بندی نظری از خیرگی فراتر رفته و به یک چارچوب کمی برای تعیین محل اولویت دار استقرار نمای زیستی جلبک پایه در ساختمان های اداری تهران تبدیل شد. در این چارچوب، نمای زیستی جلبک پایه نه صرفاً به عنوان یک

جدول ۵. ماتریس اهمیت فضایی انواع خیرگی و اولویت مداخله در ساختمان اداری تهران

اولویت جانمایی	امتیاز کل فضایی	Z5مقابل پنجره	Z4کنار بازشو	Z3دور از پنجره	Z2 میانی	Z1مجاور پنجره	نوع خیرگی
بالا	20	4	5	2	4	5	تابش مستقیم خورشید
متوسط	16	4	3	3	3	3	منابع با درخشندگی بالا
بالا	19	4	4	3	4	4	بازتاب از سطوح
بسیار بالا	23	5	5	3	5	5	کنتراست شدید درخشندگی

جدول ۶. ماتریس تعیین راهبرد جانمایی نمای زیستی جلبک‌پایه بر اساس نوع خیرگی، موقعیت فضایی و مسیر تابش و تبدیل نتایج ارزیابی به راهبرد جانمایی

هدف عملکردی	موقعیت پیشنهادی پنل زیستی	راهبرد مداخله در پوسته	رابطه با بازشو	ناحیه بحرانی	منبع /مسیر اصلی خیرگی	نوع خیرگی
کاهش مواجهه مستقیم و تعدیل شدت نور	پیرامون بازشو و بخش‌های در معرض تابش مستقیم	قطع یا تعدیل مسیر مستقیم تابش	بسیار زیاد	Z5, Z4, Z1	تابش مستقیم خورشید به میدان دید	تابش مستقیم خورشید
کاهش مواجهه مستقیم با منبع	بخش‌های منتخب پیرامون بازشو یا مسیر دید	محدود کردن میدان دید مستقیم به منبع	متوسط/کم	Z5 و نواحی دارای دید مستقیم به منبع	منبع با luminance بالا نسبت به زمینه	منبع با درخشندگی بالا
کاهش luminance بازتابی و پراکندگی نور	مجاور بازشو و بخش‌های مرتبط با سطح بازتابنده	کنترل تابش ورودی و مسیر بازتاب	زیاد	Z2, Z1 Z5, Z4	انعکاس نور از سطوح داخلی/خارجی	بازتاب نور از سطوح
کاهش luminance و contrast و بهبود visual comfort	اطراف بازشو و ناحیه انتقالی بین پنجره و فضای داخلی	تعدیل توزیع luminance و کاهش اختلاف روشنایی	بسیار زیاد	Z2, Z1 Z5, Z4	اختلاف شدید luminance بین ناحیه روشن و زمینه	کنتراست شدید درخشندگی

نوع خیرگی، ابتدا منبع و مسیر غالب ایجاد آن و سپس ناحیه فضایی بحرانی شناسایی می‌شود؛ در ادامه، متناسب با ویژگی آن خیرگی، راهبرد مداخله در پوسته و موقعیت مناسب برای استقرار پنل زیستی جلبک‌پایه تعیین می‌گردد. بنابراین، جانمایی پنل در این پژوهش یک موقعیت ثابت و از پیش تعیین‌شده نیست، بلکه حاصل ارتباط منطقی میان نوع خیرگی، شدت و اهمیت آن، موقعیت فضایی، مسیر تابش،

یافته‌های پژوهش (جدول ۶) مرحله انتقال از ارزیابی و اولویت‌بندی خیرگی به تصمیم‌گیری طراحی برای جانمایی نمای زیستی جلبک‌پایه را نشان می‌دهد. در این جدول، نتایج حاصل از تحلیل منشأ خیرگی، ارزیابی اهمیت آن‌ها توسط خبرگان و تعیین نواحی فضایی تحت تأثیر، در ارتباط با مسیر ورود یا بازتاب نور و میزان وابستگی هر نوع خیرگی به بازشو و پوسته ساختمان تلفیق شده است. بر این اساس، برای هر

کاهش مواجهه با خیرگی تبدیل می‌شود. بنابراین، دستاوردهای کاربردی پژوهش (جدول ۷) چارچوبی برای پیوند دادن ارزیابی خیرگی، تحلیل فضایی و تصمیم طراحی فراهم می‌کند و می‌تواند مبنایی برای توسعه مدل‌های بعدی شبیه‌سازی، ارزیابی عملکرد و بهینه‌سازی جانمایی پل در ساختمان‌های اداری تهران باشد. (جدول ۸)

مطالعه تحلیلی نقاط بحرانی و چینش صحیح پل‌ها (جدول ۸)، توزیع فضایی انواع اصلی خیرگی را در فضای اداری موردنظر در تهران نشان می‌دهد و با مقایسه امتیازهای پنج ناحیه فضایی، نواحی دارای بیشترین مواجهه یا حساسیت نسبت به هر نوع خیرگی را مشخص می‌کند. تقسیم فضای اداری به پنج ناحیه شامل Z1 مجاور پنجره، Z2 ناحیه میانی، Z3 دور از پنجره، Z4 کنار بازو و Z5 مقابل پنجره امکان می‌دهد که تحلیل خیرگی از سطح یک پدیده کلی به سطح یک مسئله فضایی و قابل مداخله منتقل شود. بر اساس نتایج جدول، تابش مستقیم خورشید بیشترین ارتباط را با نواحی مجاور پنجره و کنار بازو دارد، در حالی که منابع با درخشندگی بالا بیشترین امتیاز را در ناحیه مقابل پنجره دریافت می‌کنند. همچنین، بازتاب از سطوح عمده‌تر در نواحی مرتبط با بازو و مسیرهای دریافت و بازتاب نور اهمیت بیشتری دارد. کنتراست شدید درخشندگی نیز گستره فضایی بیشتری را دربر می‌گیرد و در چهار ناحیه Z1، Z2، Z4 و Z5 دارای امتیاز بالا است. میانگین امتیاز فضایی نیز نشان می‌دهد که کنتراست شدید درخشندگی با مقدار ۴.۶ و تابش مستقیم خورشید با مقدار ۴.۰، در مقایسه با سایر انواع خیرگی، نیازمند توجه فضایی بیشتری در فرآیند طراحی هستند.

ارتباط با بازو و قابلیت مداخله پوسته است. خروجی این ماتریس، مبنای استخراج راهبردهای طراحی و تعیین نواحی دارای اولویت برای استقرار نمای زیستی جلبک‌پایه در ساختمان‌های اداری مورد مطالعه در تهران فراهم می‌کند. (جدول ۷)

دستاوردهای کاربردی پژوهش (جدول ۷) نشان می‌دهد چگونه یافته‌های حاصل از شناسایی، طبقه‌بندی و اولویت‌بندی انواع خیرگی می‌توانند به تصمیم‌های مشخص درباره جانمایی پل زیستی جلبک‌پایه تبدیل شوند. در این ماتریس، هر یک از معیارهای ارزیابی شامل شدت اثر دیداری، احتمال وقوع، تداوم زمانی، دامنه اثر فضایی، ارتباط با بازو و قابلیت کنترل، به یک پیامد مستقیم در طراحی پوسته مرتبط شده است. بدین ترتیب، افزایش اهمیت هر معیار به معنای ضرورت توجه بیشتر به نحوه استقرار، گستره، مجاورت و میزان مداخله پل در مسیر تابش و میدان دید است. این ماتریس نشان می‌دهد که جانمایی پل نباید صرفاً بر اساس موقعیت پنجره یا جهت‌گیری نما تعیین شود، بلکه باید حاصل هم‌زمانی شرایط ایجاد خیرگی، میزان اهمیت آن، محدوده اثرگذاری و ظرفیت مداخله پوسته باشد. مهم‌ترین دستاورد این جدول، تبدیل یک ارزیابی کیفی و کمی از پدیده خیرگی به مجموعه‌ای از قواعد تصمیم‌گیری طراحی است؛ به گونه‌ای که طراح می‌تواند بر اساس نوع و شدت مسئله، مشخص کند آیا مداخله باید به بازو نزدیک‌تر شود، چه بخشی از مسیر تابش را کنترل کند، چه میزان از سطح پوسته را دربرگیرد و با چه هدف عملکردی مورد استفاده قرار گیرد. از این منظر، پل زیستی جلبک‌پایه از یک عنصر صرفاً انرژی‌زا به یک جزء عملکردی پوسته ساختمان برای تعدیل شرایط نور روز و

جدول ۷. ماتریس تصمیم‌گیری طراحی برای جانمایی پل زیستی جلبک‌پایه

تصمیم جانمایی	پیامد طراحی	شدت/اهمیت	معیار تصمیم
افزایش پوشش یا نزدیکی پل به مسیر تابش	نیاز به مداخله مؤثرتر	زیاد	شدت خیرگی
اولویت با بازوهای در معرض تابش	مداخله باید در محل پرتکرار انجام شود	زیاد	احتمال وقوع
استفاده از پل ثابت/پایدار	مداخله پایدار مورد نیاز است	زیاد	تداوم زمانی
افزایش گستره پل یا توسعه آن در امتداد بازو	مداخله باید سطح بیشتری را پوشش دهد	زیاد	دامنه اثر فضایی
استقرار پل در مجاورت بازو	پوسته نقش مستقیم دارد	زیاد	ارتباط با بازو
استفاده از پل به عنوان لایه کنترل‌کننده نور	مداخله پوسته‌ای امکان‌پذیر است	زیاد	قابلیت کنترل

جدول ۸. ماتریس تعیین نواحی بحرانی فضایی انواع خیرگی برای جانمایی نمای زیستی جلبک‌پایه در ساختمان‌های اداری

نوع خیرگی	Z1 مجاور پنجره	Z2 میانی	Z3 دور از پنجره	Z4 کنار بازشو	Z5 مقابل پنجره	میانگین فضایی کل	ناحیه بحرانی
تابش مستقیم خورشید	5	4	2	5	4	4.0	Z1/Z4
منبع با درخشندگی بالا	3	3	3	3	4	3.2	Z5
بازتاب از سطوح	4	4	3	4	4	3.8	Z1/Z4/Z5
کنتراست شدید درخشندگی	5	5	3	5	5	4.6	Z1/Z2/Z4/Z5

توضیح جدول: ناحیه بحرانی به ناحیه یا نواحی‌ای اطلاق شد که بالاترین امتیاز فضایی را برای هر نوع خیرگی کسب کردند.

یک الگوی ثابت انجام شود. تحلیل انجام‌شده نشان داد که در خیرگی مستقیم ناشی از تابش یا منبع روشن واقع در میدان دید، استقرار پنل‌ها در مجاورت بازشو و در مسیر مستقیم تابش می‌تواند به‌عنوان یک لایه تعدیل‌کننده، مواجهه مستقیم کاربر با منبع خیرگی را کاهش دهد. در مقابل، در شرایطی که خیرگی ناشی از بازتاب سطوح داخلی یا خارجی است، جانمایی پنل‌ها در بخش‌هایی از پوسته که قادر به کنترل شدت و جهت ورود نور و کاهش ایجاد کنتراست‌های شدید هستند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. همچنین، در شرایط مرتبط با کنتراست بالای روشنایی در میدان دید، استقرار هدمند پنل‌ها پیرامون بازشو می‌تواند با تعدیل توزیع نور روز و کاهش اختلاف شدید روشنایی میان ناحیه پنجره و سطوح پیرامونی، به بهبود شرایط دیداری کمک کند. از سوی دیگر، یافته‌ها نشان می‌دهد که موقعیت عمودی و افقی پنل نسبت به بازشو باید متناسب با مسیر غالب تابش و موقعیت دیداری کاربر تعیین شود. در بخش‌های فوقانی بازشو، پنل می‌تواند نقش مؤثرتری در تعدیل تابش ورودی از زوایای بالاتر داشته باشد، درحالی‌که در بخش‌های جانبی یا پیرامونی، امکان کنترل منابع خیرگی واقع در میدان دید و کاهش مواجهه مستقیم با آن‌ها بیشتر است. بنابراین، رابطه میان نوع خیرگی، موقعیت منبع خیرگی، مسیر تابش و محل استقرار پنل را می‌توان به‌عنوان یک رابطه طراحی‌محور در نظر گرفت، نه صرفاً یک رابطه فنی مربوط به عملکرد پوسته.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که نمای زیستی جلبک‌پایه دارای ظرفیت آن است که از یک سامانه منفعل تولید و تعدیل انرژی به یک عنصر پاسخ‌گو به شرایط دیداری پوسته بازتعریف شود. بر این اساس، جانمایی پنل‌ها باید پیش از تعیین فرم نهایی پوسته، بر مبنای شناسایی منبع خیرگی و تحلیل مسیر

از دیدگاه کاربردی، این نتایج برای ساختمان‌های اداری تهران نشان می‌دهد که جانمایی نمای زیستی جلبک‌پایه نباید به‌صورت یکنواخت در کل پوسته یا صرفاً بر اساس وجود پنجره انجام شود، بلکه باید بر اساس الگوی فضایی ایجاد خیرگی و مسیر ورود یا توزیع نور روز صورت گیرد. برای مثال، در نواحی Z1 و Z4 که در معرض مستقیم‌تر ارتباط با بازشو و مسیر تابش قرار دارند، پنل می‌تواند به‌عنوان یک لایه مداخله‌ای برای تعدیل تابش ورودی و کاهش مواجهه مستقیم با منبع خیرگی مورد استفاده قرار گیرد؛ در مقابل، در Z5، توجه به کنترل میدان دید و درخشندگی منبع یا بازتاب اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. از آنجا که شرایط تابش و جهت‌گیری ساختمان‌های اداری تهران در طول روز و سال تغییر می‌کند، این ماتریس رویکردی طراحی مبنا دارد، لذا چارچوبی برای شناسایی نواحی اولویت‌دار و تطبیق جانمایی پنل با شرایط واقعی هر ساختمان فراهم می‌کند. بنابراین، دستاورد اصلی این بخش از پژوهش (جدول ۸) تبدیل «نوع خیرگی» به «مکان مداخله» است؛ یعنی مشخص می‌کند که کدام بخش از فضای پیرامون بازشو و پوسته باید در مراحل بعدی طراحی، شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد، برای استقرار نمای زیستی جلبک‌پایه در اولویت قرار گیرد.

بحث و نتیجه‌گیری

بازتعریف جایگاه نمای زیستی جلبک‌پایه در کنترل خیرگی نور روز در ساختمان پربازده موضوعی بسیار کلیدی در دست یابی به یک صنعت ساختمان پیشرفته بر اساس اسناد بالادستی و سند چشم انداز است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که خیرگی نور روز پدیده‌ای وابسته به موقعیت، منشأ تابش و نحوه قرارگیری منبع نور در میدان دید کاربر است و از این‌رو، جانمایی نمای زیستی جلبک‌پایه نمی‌تواند بر اساس

مربوط باشد و بنابراین کنترل آن صرفاً از طریق کاهش مقدار کل نور ورودی قابل حل نیست. از این منظر، طراحی پوستر باید هم‌زمان به مقدار نور و توزیع فضایی درخشندگی توجه کند.

یکی از یافته‌های مهم پژوهش، تفاوت میان اهمیت کلی یک نوع خیرگی و موقعیت فضایی بروز آن بوده است. تحلیل فضایی نشان داده است که تابش مستقیم خورشید در نواحی مجاور پنجره و کنار بازو اهمیت بیشتری داشته، در حالی که منابع با درخشندگی بالا بیشترین امتیاز را در ناحیه مقابل پنجره دریافت کرده‌اند. بازتاب نور از سطوح عمده‌تاً در نواحی مجاور پنجره، کنار بازو و مقابل پنجره اهمیت بیشتری داشته است. کنتراست شدید درخشندگی نیز برخلاف برخی انواع خیرگی، دامنه فضایی گسترده‌تری نشان داده و در نواحی Z_1 ، Z_2 ، Z_4 و Z_5 دارای امتیاز بالا بوده است. بنابراین، یافته‌ها نشان می‌دهند که شدت یا اهمیت یک نوع خیرگی به‌تنهایی برای تعیین محل مداخله کافی نیست؛ بلکه باید آن را با موقعیت فضایی و مسیر تابش تلفیق کرد. این نتیجه مبنای انتقال تحلیل از «چه نوع خیرگی مهم‌تر است؟» به پرسش کاربردی‌تر «در کدام بخش از فضا و پوستر باید مداخله انجام شود؟» را فراهم کرده است.

در زمینه ساختمان‌های اداری تهران، این موضوع اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا رابطه میان بازو، جهت‌گیری نما، دریافت تابش مستقیم و توزیع نور روز می‌تواند الگوی فضایی خیرگی را در طول ساعات مختلف روز تغییر دهد. از این‌رو، استفاده از نمای زیستی جلبک‌پایه صرفاً به‌عنوان یک سامانه تولید انرژی، ظرفیت عملکردی آن را محدود می‌کند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که این سامانه می‌تواند در صورت جانمایی متناسب با مسیر تابش و نواحی بحرانی، به‌عنوان لایه‌ای عملکردی از پوستر برای تعدیل شرایط نور روز نیز مورد توجه قرار گیرد. در این چارچوب، پنل زیستی می‌تواند در مجاورت بازو یا در بخش‌هایی از پوستر که مستقیماً با مسیر تابش و میدان دید مرتبط هستند، به‌عنوان یک واسط میان منبع نور و فضای داخلی عمل کند. البته میزان واقعی کاهش خیرگی به ویژگی‌های نوری و هندسی پنل، میزان عبور و پراکندگی نور، ضخامت و تراکم سامانه و شرایط زمانی

ورود یا بازتاب نور روز انجام گیرد. این رویکرد، امکان ایجاد یک راهبرد جانمایی تفکیک‌شده برای انواع مختلف خیرگی را فراهم می‌کند و مبنایی برای توسعه مطالعات بعدی شامل شبیه‌سازی نور روز، ارزیابی شاخص‌هایی مانند DGP و DA و بررسی هم‌زمان عملکرد انرژی و آسایش دیداری خواهد بود.

استفاده نمای زیستی جلبک‌پایه در کنترل خیرگی نور روز در ساختمان پربازده شهر تهران، موضوعی چندبعدی است. یافته‌های پژوهش نشان داد که مسئله خیرگی در ساختمان‌های اداری را نمی‌توان صرفاً به وجود یک منبع نوری با درخشندگی بالا یا ورود مستقیم تابش خورشید تقلیل داد، بلکه خیرگی حاصل برهم‌کنش میان منشأ تابش، سازوکار انتقال یا بازتاب نور، موقعیت منبع نسبت به میدان دید و ویژگی‌های پوستر ساختمان بوده است. تحلیل و طبقه‌بندی نظام‌مند ادبیات، چهار الگوی اصلی شامل تابش مستقیم خورشید، منابع با درخشندگی بالا، بازتاب نور از سطوح و کنتراست شدید درخشندگی را آشکار کرده است. اهمیت این طبقه‌بندی در آن است که هر یک از این الگوها مسیر متفاوتی برای مداخله در پوستر ایجاد می‌کنند. در نتیجه، یک راهکار واحد برای کنترل تمام انواع خیرگی نمی‌تواند به‌عنوان یک قاعده عمومی برای ساختمان‌های اداری در نظر گرفته شود. این یافته، جایگاه پوستر را از یک مرز کالبدی میان فضای داخل و خارج به یک واسط عملکردی برای مدیریت مسیر تابش و شرایط دیداری ارتقا داده است. نتایج ارزیابی خبرگان نیز این تفاوت را به‌صورت کمی‌تر نشان داده است. بر اساس میانگین امتیازهای شش معیار، کنتراست شدید درخشندگی با امتیاز کل ۲۹ بالاترین اهمیت نسبی را به دست آورده و پس از آن تابش مستقیم خورشید با امتیاز ۲۸، بازتاب نور از سطوح با امتیاز ۲۴ و منابع با درخشندگی بالا با امتیاز ۱۸ قرار گرفته‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که در ارزیابی طراحی، صرفاً شدت منبع نور تعیین‌کننده نیست؛ بلکه احتمال وقوع، تداوم زمانی، دامنه اثر، ارتباط با بازو و قابلیت مداخله از طریق پوستر نیز در تعیین اولویت اهمیت دارند. به‌ویژه امتیاز بالای کنتراست شدید درخشندگی نشان می‌دهد که مسئله خیرگی می‌تواند به توزیع نامتوازن درخشندگی در میدان دید

تابش وابسته است و بنابراین نتایج حاضر باید به‌عنوان راهبرد جانمایی و نه اثبات کمی عملکرد نهایی پنل تفسیر شوند.

دستآورد روش‌شناختی دیگر پژوهش، ایجاد یک زنجیره تصمیم‌گیری از شواهد نظری تا تصمیم طراحی بوده است. در این زنجیره، ابتدا منشأ و سازوکار خیرگی از ادبیات استخراج شده؛ سپس معیارهای قابل ارزیابی برای مقایسه انواع خیرگی عملیاتی شده‌اند؛ پس از آن، اهمیت نسبی انواع خیرگی از طریق ارزیابی خبرگان تعیین شده و در مرحله بعد، توزیع فضایی آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در نهایت، این اطلاعات به راهبردهای جانمایی و تصمیم‌گیری طراحی تبدیل شده‌اند. بنابراین، خروجی پژوهش صرفاً یک طبقه‌بندی از انواع خیرگی یا یک رتبه‌بندی ساده از منابع نور نیست، بلکه چارچوبی برای پیوند دادن ارزیابی خیرگی با مداخله در پوسته ارائه کرده است. این چارچوب می‌تواند در مطالعات بعدی با داده‌های عینی مانند درخشندگی، روشنایی، روشنایی عمودی و شاخص‌هایی نظیر احتمال خیرگی نور روز (DGP) اعتبارسنجی و کمی‌سازی شود.

با وجود این، نتایج باید در محدوده روش پژوهش تفسیر شوند. امتیازهای خبرگان بیانگر قضاوت تخصصی درباره اهمیت نسبی و قابلیت مداخله هستند و نباید با اندازه‌گیری فیزیکی شدت خیرگی یکسان تلقی شوند. همچنین، نواحی Z1 تا Z5 یک مدل فضایی تحلیلی برای شناسایی نواحی بحرانی هستند و لزوماً نماینده تمام هندسه‌ها، ابعاد، جهت‌گیری‌ها و الگوهای استقرار مبلمان در ساختمان‌های اداری تهران نیستند. از این‌رو، برای تبدیل این چارچوب به یک مدل پیش‌بینی‌کننده یا بهینه‌ساز، انجام شبیه‌سازی‌های نور روز و خیرگی در شرایط مختلف اقلیمی و هندسی، همراه با اعتبارسنجی میدانی، ضروری خواهد بود. استفاده از احتمال خیرگی نور روز (DGP)، نقشه‌برداری درخشندگی، روشنایی عمودی و سناریوهای مختلف جهت‌گیری و نسبت پنجره به دیوار می‌تواند در مرحله بعد مشخص کند که آیا نواحی دارای اولویت نظری در این پژوهش، در شرایط فیزیکی واقعی نیز بیشترین پتانسیل مداخله را دارند یا خیر.

بازتعریف جایگاه نمای زیستی جلبک‌پایه در کنترل خیرگی نور روز در ساختمان پربازده، دریچه‌ای نوین به روی صنعت

ساختمان‌سازی در کشور می‌گشاید. این پژوهش با هدف بازتعریف جایگاه نمای زیستی جلبک‌پایه در کنترل خیرگی نور روز، یک چارچوب تحلیلی برای ارتباط دادن نوع خیرگی، اهمیت آن، موقعیت فضایی، مسیر تابش و قابلیت مداخله پوسته ارائه کرده است. نتایج نشان داده‌اند که چهار الگوی اصلی خیرگی شامل تابش مستقیم خورشید، منابع با درخشندگی بالا، بازتاب نور از سطوح و کنتراست شدید درخشندگی را می‌توان به‌عنوان مبنای تحلیل طراحی در نظر گرفت. ارزیابی خبرگان نیز نشان داده است که اهمیت این انواع خیرگی یکسان نیست و در چارچوب معیارهای تعریف‌شده، کنتراست شدید درخشندگی و تابش مستقیم خورشید دارای امتیاز کلی بالاتری بوده‌اند. با این حال، تحلیل فضایی نشان داده است که اهمیت هر نوع خیرگی باید همراه با محل وقوع آن تفسیر شود؛ زیرا نواحی بحرانی برای انواع مختلف خیرگی یکسان نیستند. بر این اساس، مهم‌ترین نتیجه پژوهش آن است که جانمایی نمای زیستی جلبک‌پایه باید از یک تصمیم ثابت و صرفاً کالبدی به یک تصمیم عملکردمحور و وابسته به شرایط خیرگی تبدیل شود. در این رویکرد، پنل زیستی نه فقط به‌عنوان سامانه‌ای برای تولید انرژی، بلکه به‌عنوان بخشی از پوسته ساختمان برای تعدیل مسیر تابش، کنترل مواجهه مستقیم با منابع نوری و تنظیم شرایط درخشندگی در فضای داخلی تعریف می‌شود. برای ساختمان‌های اداری تهران، این رویکرد امکان می‌دهد که مداخله ابتدا در نواحی‌ای مورد توجه قرار گیرد که هم از نظر اهمیت خیرگی و هم از نظر ارتباط با بازشو و قابلیت کنترل پوسته دارای اولویت هستند.

در نهایت، ارزش اصلی چارچوب ارائه‌شده در ایجاد یک رابط میان تحلیل پدیده خیرگی و تصمیم طراحی پوسته است. این چارچوب می‌تواند مبنای مطالعات آینده برای توسعه مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی جانمایی پنل‌های زیستی جلبک‌پایه قرار گیرد؛ به‌گونه‌ای که ارزیابی کیفی و خبره‌محور حاضر با داده‌های فیزیکی و شبیه‌سازی عددی ترکیب شود و رابطه میان جانمایی پنل، کاهش خیرگی، حفظ دسترسی به نور روز و عملکرد انرژی به‌صورت هم‌زمان ارزیابی گردد. در چنین مسیری، نمای زیستی جلبک‌پایه می‌تواند از یک فناوری منفرد در حوزه تولید انرژی به یک جزء چندعملکردی در

طراحی معماری با عملکرد بالا تبدیل شود که میان عملکرد انرژی، کیفیت نور روز و کیفیت محیط داخلی ارتباط برقرار می‌کند.

پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده

با توجه به یافته‌های پژوهش، مطالعات آینده می‌توانند چارچوب ارائه‌شده را از سطح تحلیل خبره‌محور به سطح ارزیابی کمی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی عملکردی توسعه دهند. به‌ویژه، اعتبارسنجی ارتباط میان نواحی بحرانی خیرگی و عملکرد واقعی پوسته می‌تواند زمینه را برای توسعه راهکارهای دقیق‌تر در جانمایی نمای زیستی جلبک‌پایه فراهم کند. مهم‌ترین مسیرهای پیشنهادی عبارت‌اند از:

- شبیه‌سازی سناریوهای مختلف پوسته: بررسی تأثیر جانمایی، ابعاد، تراکم و ویژگی‌های نوری پنل زیستی جلبک‌پایه بر خیرگی و دسترسی به نور روز در جهت‌گیری‌ها و شرایط اقلیمی مختلف.
- بهینه‌سازی چندهدفه: توسعه یک مدل بهینه‌سازی برای ایجاد تعادل میان کاهش خیرگی، حفظ نور روز، کاهش بار سرمایشی و افزایش عملکرد انرژی پوسته.

▪ تحلیل زمانی و اقلیمی: بررسی تغییرات خیرگی در ساعات مختلف روز و فصل‌های مختلف و تعیین شرایطی که در آن جانمایی پنل زیستی بیشترین اثر عملکردی را ایجاد می‌کند.

▪ توسعه مدل تصمیم‌یار طراحی: تبدیل چارچوب حاضر به یک سامانه تصمیم‌یار طراحی که بتواند بر اساس جهت‌گیری، موقعیت بازشو، مسیر تابش و ناحیه بحرانی، مناسب‌ترین محدوده برای استقرار پنل زیستی را پیشنهاد دهد.

▪ اعتبارسنجی در اقلیم‌ها و شهرهای مختلف: تکرار چارچوب در سایر اقلیم‌های گرم و خشک و مقایسه نتایج با ساختمان‌های اداری تهران، به‌منظور بررسی قابلیت تعمیم مدل.

در مجموع، پژوهش‌های آینده می‌توانند با ترکیب داده‌های میدانی، شبیه‌سازی نور روز و مدل‌های بهینه‌سازی، چارچوب حاضر را از یک ابزار تحلیلی برای شناسایی نواحی بحرانی به یک ابزار کمی برای تصمیم‌گیری درباره طراحی و جانمایی نمای زیستی جلبک‌پایه ارتقا دهند.

تشکر و قدردانی: این مقاله برگرفته از رساله دکتری فیاض اسلامی با عنوان «تبیین نقش پتل نمای جلبکی در خیرگی نور روز ساختمان» به راهنمایی آقای دکتر محمدجواد مهدوی نژاد و مشاوره خانم دکتر مهناز محمودی در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال در دست تهیه است.

تأییدیه‌های اخلاقی: از ChatGPT و Claude برای تصحیح و معادل‌سازی از لاتین به فارسی استفاده شده است.

سهم نویسندگان: نویسنده اول، نگارنده درفت اصلی، برگزاری آزمون‌ها ۵۰٪؛ نویسنده دوم، ایده‌پردازی، روش‌شناسی، کنترل نتایج و راهبری پژوهش ۳۰٪؛ نویسنده سوم تحلیل نتایج، راهبری پژوهش و کنترل نتایج، و روش‌شناسی ۲۰٪.

منابع مالی / حمایت‌ها: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: تعارض منافی میان نویسندگان وجود ندارد.

References

- [1]. United Nations Environment Programme. *Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025: Not just another brick in the wall—The solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fast*. Paris: United Nations Environment Programme; 2025. Available from: <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-20242025>
- [2]. Yu X, Su Y. Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation—A literature review. *Renew Sustain Energy Rev*. 2015;52:494-503. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.142>
- [3]. Giarna C, Tsikaloudaki K, Aravantinos D. Daylighting and visual comfort in buildings' environmental performance assessment tools: A critical review. *Procedia Environ Sci*. 2017;38:522-529. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.116>
- [4]. Yu F, Wennersten R, Leng J. A state-of-art review on concepts, criteria, methods and factors for reaching 'thermal-daylighting balance'. *Build Environ*. 2020;186:107330. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107330>
- [5]. International Energy Agency. *Energy Efficiency 2025: Buildings*. Paris: IEA; 2025. Available from: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025/buildings>
- [6]. Askari A, Mahdavinejad M, Ansari M. Investigation of displacement ventilation performance under various room configurations using computational fluid dynamics simulation. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2022 May 7;43(5):627-643. <https://doi.org/10.1177/01436244221097312>
- [7]. Bazazzadeh H, Pilechiha P, Nadolny A, Mahdavinejad M, Hashemi Safaei SS. The Impact Assessment of Climate Change on Building Energy Consumption in Poland. *Energies*. 2021 July 06;14(14):4084. <http://dx.doi.org/10.3390/en14144084>
- [8]. Bazazzadeh H, Świt-Jankowska B, Fazeli N, Nadolny A, Safar Ali Najari B, Hashemi Safaei S, Mahdavinejad M. Efficient Shading Device as an Important Part of Daylightophil Architecture; a Designerly Framework of High-Performance Architecture for an Office Building in Tehran. *Energies*. 2021 December 8;14(24), 8272. <https://doi.org/10.3390/en14248272>
- [9]. Torabi M, Mahdavinejad M. Past and Future Trends on the Effects of Occupant Behaviour on Building Energy Consumption. *J. Sustain. Archit. Civ. Eng*. 2021 Oct 27;29(2) 83-101. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.29.2.28576>
- [10]. Saligheh E, Saadatjoo P. Impact of Central Courtyard Proportions on Passive Cooling Potential in Hot and Humid Regions (Case Study: Single-story Buildings in Bandar Abbas). *Naqshejahan - Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 2020 Sep 10;10(2):137-52. [Persian] Available from: https://bsnt.modares.ac.ir/article_885.html?lang=en
- [11]. United Nations Environment Programme. *Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025: Not just another brick in the wall—The solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fast*. Paris: United Nations Environment Programme; 2025. Available from: <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-20242025>
- [12]. Yu X, Su Y. Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation—A literature review. *Renew*

- Sustain Energy Rev. 2015;52:494-503. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.142>
- [13]. Giarma C, Tsikaloudaki K, Aravantinos D. Daylighting and visual comfort in buildings' environmental performance assessment tools: A critical review. *Procedia Environ Sci.* 2017;38:522-529. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.116>
- [14]. Yu F, Wennersten R, Leng J. A state-of-art review on concepts, criteria, methods and factors for reaching 'thermal-daylighting balance'. *Build Environ.* 2020;186:107330. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107330>
- [15]. International Energy Agency. *Energy Efficiency 2025: Buildings*. Paris: IEA; 2025. Available from: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025/buildings>
- [16]. Askari A, Mahdavejad M, Ansari M. Investigation of displacement ventilation performance under various room configurations using computational fluid dynamics simulation. *Building Services Engineering Research and Technology.* 2022 May 7;43(5):627-643. <https://doi.org/10.1177/01436244221097312>
- [17]. Bazazzadeh H, Pilechiha P, Nadolny A, Mahdavejad M, Hashemi Safaei SS. The Impact Assessment of Climate Change on Building Energy Consumption in Poland. *Energies.* 2021 July 06;14(14):4084. <http://dx.doi.org/10.3390/en14144084>
- [18]. Bazazzadeh H, Świt-Jankowska B, Fazeli N, Nadolny A, Safar Ali Najari B, Hashemi Safaei S, Mahdavejad M. Efficient Shading Device as an Important Part of Daylightophil Architecture; a Designerly Framework of High-Performance Architecture for an Office Building in Tehran. *Energies.* 2021 December 8;14(24):8272. <https://doi.org/10.3390/en14248272>
- [19]. Torabi M, Mahdavejad M. Past and Future Trends on the Effects of Occupant Behaviour on Building Energy Consumption. *J. Sustain. Archit. Civ. Eng.* 2021 Oct 27;29(2) 83-101. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.29.2.28576>
- [20]. Saligheh E, Saadatjoo P. Impact of Central Courtyard Proportions on Passive Cooling Potential in Hot and Humid Regions (Case Study: Single-story Buildings in Bandar Abbas). *Naqshejahan - Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning.* 2020 Sep 10;10(2):137-52. [Persian] Available from: https://bsnt.modares.ac.ir/article_885.html?lang=en
- [21]. Jokar R, Maleki M. Investigating the effect of Voronoi shell parametric design on improving daylight efficiency in an office building in Shiraz. *Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning.* 2023 Jan 10; 12(4):116-141. <https://dori.net/dor/20.1001.1.23224991.1401.12.4.5.1>
- [22]. Mahdavejad M, Mator S, Fayaz R, Bemanian M. Estimation of daylight availability and illuminance on vertical south facing surfaces in Tehran. In *Advanced Materials Research 2012* (Vol. 518, pp. 1525-1529). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.518-523.1525>
- [23]. Mehrvarz F, Bemanian M, Nasr T, Mansoori R, AL-Kazee MF, Khudhayer WA, Mahdavejad M. Designerly Approach to Design Responsive Façade for Occupant Visual Comfort in Different Latitudes. *Journal of Daylighting.* 2024 Jun 29;11(1):149-64. <https://doi.org/10.15627/jd.2024.9> Available: <https://solarlits.com/jd/11-149>
- [24]. Oghazian F, Daneshjoo K, Mahdavejad M. The role of geometry and non-uniform distribution of openings in daylighting performance of solar screens. In *The Proceedings of Passive and Low Energy Architecture (PLEA) Conference 2017* (pp. 3332-339). Available: https://www.researchgate.net/profile/Farzaneh-Oghazian/publication/321361768_The_role_of_geometry_and_non-uniform_distribution_of_openings_in_daylighting_performance_of_solar_screens/links/5a1eb6f6458515a4c3d20ff8/The-role-of-geometry-and-non-uniform-distribution-of-openings-in-daylighting-performance-of-solar-screens.pdf
- [25]. Elrayies GM. Microalgae: Prospects for greener future buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2018 Jan 1;81:1175-91. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.032>
- [26]. Yazhari Kermani A, Nasrollahi F, Mahdavejad M. Investigation of the relationship between depth of overhang and

- amount of daylight indicators in office buildings of Kerman city. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 2018; 5(3): 129-36. <https://doi.org/10.15171/EHEM.2018.18>
Available: <http://chemj.com/article-1-372-en.html>
- [27]. Zamanian SM, Latifi M, Baharvand M, Mahdavejad M. Multi-Criteria Evaluation of South Classroom Windows Forms in BWh Climate: Daylight Performance, View Quality and Energy Efficiency. *Journal of Daylighting*. 2026 Sep 10;13(2):521-536. <https://doi.org/10.15627/jd.2026.29>
- [28]. Maroofi N, Mahdavejad M, Moradi Nasab H. Daylightophil educational buildings; Case Study: Optimizing of the southern walls' openings of the classrooms in Semnan. *Journal of Architecture in Hot and Dry Climate*. 2023 Mar 24; 10(16): 164-181. doi: 10.22034/ahdc.2023.18776.1668. Available: http://smb.yazd.ac.ir/article_3023.html?lang=en
- [29]. Shoghi F, Hosseini M, Heidari S, Wang J, Mahdavejad M, Attia S. Human Interaction with urban morphology under the Influence of urban heat island: a systematic review. *Journal of Daylighting*. 2025 Oct 18; 12:2 (2025) 468-490. <https://doi.org/10.15627/jd.2025.28>
- [30]. Mahdavejad M, Bitaab N. From Smart-Eco Building to High-Performance Architecture: Optimization of Energy Consumption in Architecture of Developing Countries. *E&ES*. 2017 Aug;83(1): 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/83/1/012020>
- [31]. Shirzadnia Z, Goharian A, Mahdavejad M. Designerly approach to skylight configuration based on daylight performance; Toward a novel optimization process. *Energy and Buildings*. 2023 Mar 11:112970. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112970>
- [32]. Fallahtafti R, Mahdavejad M. Optimisation of building shape and orientation for better energy efficient architecture. *International Journal of Energy Sector Management*. 2015 Nov 2; 9(4): 593-618. <https://doi.org/10.1108/IJESM-09-2014-0001>
- [33]. Fallahtafti R, Mahdavejad M. Window geometry impact on a room's wind comfort. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2021 Mar 24;28(9):2381-2410. <https://doi.org/10.1108/ECAM-01-2020-0075>
- [34]. Goharian A, Daneshjoo K, Mahdavejad M, Yeganeh M. Voronoi geometry for building facade to manage direct sunbeams. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2022 Oct 26;31(2):109-24. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.31.2.30800>
- [35]. Dezfali RR, Bazazzadeh H, Taban M, Mahdavejad M. Optimizing stack ventilation in low and medium-rise residential buildings in hot and semi-humid climate. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023 Oct 28:103555. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103555>
- [36]. Raza A, Partonen T, Magnusson Hanson L, Asp M, Engström E, Westerlund H, Halonen JI. Daylight during winters and symptoms of depression and sleep problems: a within-individual analysis. *Environ Int*. 2024;183:108413. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108413>
- [37]. Bonatto FS, Pilz LK, Borges RB, Xavier NB, Tonon AC, do Amaral FG, Hidalgo MPL. Daylight exposure and mood in real life: direct association and mediating role of sleep and routine regularity. *Chronobiol Int*. 2024;41(8):1128-1141. <https://doi.org/10.1080/07420528.2024.2381590>
- [38]. Kováčová K, Dzirkbiková Z, Grácová L, Turlík M, Hartman P, Bacigál T, Hanuliak P, Vargová A, Hraška J, Stebelová K. Daylight spectrum and intensity reduction and its impact on melatonin, cortisol, alpha-amylase, sleep parameters and sleepiness in humans. *Chronobiol Int*. 2025;42(11):1547-1565. <https://doi.org/10.1080/07420528.2025.2556842>
- [39]. Harmsen JF, Habets I, Biancolin AD, Lesniewska A, Phillips NE, Metz L, Sanchez-Avila J, Kotte M, Timmermans M, Hashim D, de Kam SS, Schaart G, Jörgensen JA, Gemmink A, Moonen-Kornips E, Doligkeit D, van de Weijer T, Buitinga M, Haans F, De Lorenzo R, Pallubinsky H, Gordijn MCM, Collet TH, Kramer A, Schrauwen P, Dibner C, Hoeks J. Natural daylight during office hours improves glucose control and whole-body substrate metabolism. *Cell Metab*. 2026;38(1):65-

- 81.e10.
<https://doi.org/10.1016/j.cmet.2025.11.006>
- [40]. Chilakapatia N, Timplec L, Pizzid S, et al. Light levels in a modern intensive care unit: impact of time of year, window directionality, and outdoor light levels. *Chronobiol Int*. 2025;42(3). <https://doi.org/10.1080/07420528.2025.2469885>
- [41]. Wienold J, Christoffersen J. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy Build*. 2006;38(7):743-757.
- [42]. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.01.017>
- [43]. Jakubiec JA, Reinhart CF. Predicting visual comfort conditions from luminance distributions. *Build Res Inf*. 2014;42(3):272-285.
- [44]. <https://doi.org/10.1080/09613218.2014.886115>
- [45]. Kent MG, Altomonte S, Tregenza PR, Wilson R. Temporal effects on glare response from daylight. *Build Environ*. 2017;113:49-61.
- [46]. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.035>
- [47]. Chi DA, Moreno D, Navarro I. Luminance and vertical eye illuminance thresholds for occupants' visual comfort in daylit office environments. *Build Environ*. 2018;145:102-113.
- [48]. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.005>
- [49]. Fang A, Yang Y, Dong W. Optimal design of tilted building envelope considering air conditioning energy demand, daylight utilization and glare protection—case study. *Buildings*. 2024;14(2):473.
- [50]. <https://doi.org/10.3390/buildings14020473>
- [51]. Talaei M, Mahdavejad M, Azari R, Haghighi HM, Atashdast A. Thermal and energy performance of a user-responsive microalgae bioreactive façade for climate adaptability. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022 Aug 1;52:101894. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101894>
- [52]. Talaei M, Mahdavejad M, Azari R, Prieto A, Sangin H. Multi-objective optimization of building-integrated microalgae photobioreactors for energy and daylighting performance. *Journal of Building Engineering*. 2021 Jun 5:102832. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102832>
- [53]. Talaei M, Mahdavejad M, Azari R. Thermal and energy performance of algae bioreactive façades: A review. *Journal of Building Engineering*. 2020 Mar 1;28:101011. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101011>
- [54]. Talaei M, Mahdavejad M, Zarkesh A, Haghighi HM. A review on interaction of innovative building envelope technologies and solar energy gain. *Energy Procedia*. 2017 Dec 1;141:24-8. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.006>
- [55]. Talaei M, Mahdavejad M. Probable cause of damage to the panel of microalgae bioreactor building façade: Hypothetical evaluation. *Engineering Failure Analysis*. 2019 Jul 1;101:9-21. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.060>
- [56]. Talaei M, Mahdavejad M, Haghighi HM. Building-Integrated Microalgae Photobioreactor: An Adaptive Solution to Urban Heat Island Mitigation. In *Microalgae Horizons*. 2025 May 16; (pp. 425-453). Springer, Cham. Print ISBN: 978-3-031-84281-8; Online ISBN: 978-3-031-84282-5 https://doi.org/10.1007/978-3-031-84282-5_15
- [57]. Mahdavejad M, Hepf C, Berardi U, Auer T. Data-Driven Prioritization of Visual-Thermal Comfort Hotspots: An Integrated Approach to Highperformance Office Buildings. *Solar Compass*, 19, pp. 100169–100169. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2026.100169>
- [58]. Azimi M, Mahdavejad M, Yeganeh M, Zamani Z. Real-time adaptive algae bioreactor facades: a novel method for dynamic daylight and thermal efficiency optimization in buildings. *Energy Conversion and Management*. 2025 Dec 15;346:120409. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120409>
- [59]. Delkhosh F, Mahdavejad M, Goharian A, Hepf C, Auer T. A novel experimental approach to achieve optical properties of algae panels improving visual-thermal comfort in office buildings. *Solar Compass*. 2025 Jun 1;14:100116. <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2025.100116>

- [60]. Haghiri, S., Tashakori, L., Rezazadeh, H., Ahmadi, F. Algae Façade for Reducing CO₂ Emission and Mitigating Global Warming (Case Study: Tehran Enghelab Street). *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, 2020 Oct 22;17(89):33-44. <https://doi.org/10.22034/bagh.2020.188585.4147>
- [61]. Sarmadi H, Mahdavejad M. A designerly approach to Algae-based large open office curtain wall Façades to integrated visual comfort and daylight efficiency. *Solar Energy*. 2023 Feb 1;251:350-65. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.021>
- [62]. Rasoolzadeh M, Moshari M. Prioritizing for Healthy Urban Planning: Interaction of Modern Chemistry and Green Material-based Computation. *Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 2021 May 10;11(1):94-105. [Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1400.11.1.7.0>. Available at: <https://bsnt.modares.ac.ir/article-2-49429-en.html>
- [63]. Rasoolzadeh M, Moshari M. Designerly approach to occupant health with the interaction of building material selection and healthy environment. *Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*, 2023;13(3):129-148. Available: <http://bsnt.modares.ac.ir/article-2-73856-en.html>
- [64]. Shams G, Rasoolzadeh M. Bauchemie: Environmental Perspective to Well-Building and Occupant Health. *Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 2023 Jan 10; 12(4):51-69. Available: <https://bsnt.modares.ac.ir/article-2-65610-en.html>
- [65]. Shams G, Moshari M. Health and Post-Corona: Air Filtration through Building Skins as Biological Membranes. *Naqshejahan - Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 2022 Jan 10;11(4):44-59. [Persian] Available: <https://bsnt.modares.ac.ir/article-2-57478-en.html>
- [66]. Ghomeshi M, Pourzargar M, Mahdavejad M. A Healthy Approach to
- [75]. Double Skin Façade Structural Element Impacts on Flow and Heat Transfer Post-COVID Reopening of Sugar Factory of Kahrizak, Iran. In *INTERNATIONAL SYMPOSIUM: New Metropolitan Perspectives 2022* (pp. 2638-2647). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06825-6_252
- [67]. Mohtashami N, Mahdavejad M, Bemanian M. Contribution of city prosperity to decisions on healthy building design: A case study of Tehran. *Frontiers of Architectural Research*. 2016 Sep 1;5(3):319-31. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.06.001>
- [68]. Hosseini SM, Mohammadi M, Rosemann A, Schröder T, Lichtenberg J. A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort: review. *Building and Environment*. 2019;153:186-204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.040>
- [69]. Heidarzadeh S, Mahdavejad M, Habib F. External shading and its effect on the energy efficiency of Tehran's office buildings. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2023 May 17:e14185. <https://doi.org/10.1002/ep.14185>
- [70]. Heidarzadeh S, Habib F. Bio-inspiration from sponge for highperformance building. *Naqshejahan-Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*, 2023 Sep 10; 13(3):86-101. Available: <http://bsnt.modares.ac.ir/article-2-69443-en.html>
- [71]. Mahdavejad M, Hashemin SA, Nasr T, Galil MI, Shaeri J, Garcia EH, Bazazzadeh H. Effect of tree characteristics on visual-thermal comfort; case study: Retiro Park, Madrid. *Results in Engineering*. 2025 Oct 10:107673. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107673>
- [72]. Valitabar M, Mohammadjavad M, Henry S, Peiman P. A dynamic vertical shading optimisation to improve view, visual comfort and operational energy. *Open House International*. 2021 Jul 9;46(3):401-415. <https://doi.org/10.1108/OHI-02-2021-0031>
- [73].
- [74]. Ahmadi J, Mahdavejad M, Kalyanova Larsen O, Aram F, Oghazian F, Mosavi A. A Compendious Investigation of

- in Hot-Dry Climates. Available at SSRN 4449201.
<https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4449201>
- [76]. Ahmadi J, Mahdavinejad M, Larsen OK, Zhang C, Zarkesh A, Asadi S. Evaluating the different boundary conditions to simulate airflow and heat transfer in Double-Skin Facade. In Building Simulation 2022 May;15(5):799-815. Tsinghua University Press.
<https://doi.org/10.1007/s12273-021-0824-5>
- [77]. Ahmadi J, Mahdavinejad M, Larsen OK, Zhang C, Asadi S. Naturally ventilated folded double-skin façade (DSF) for PV integration-geometry evaluation via thermal performance investigation. Thermal Science and Engineering Progress. 2023 Oct 1;45:102136.
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102136>
- [78]. Mahdavinejad M, Zia A, Larki AN, Ghanavati S, Elmi N. Dilemma of green and pseudo green architecture based on LEED norms in case of developing countries. International Journal of Sustainable Built Environment, 2014 Dec 1;3(2):235-46.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.06.003>
- [79]. Mansourimajoumerd P, Mahdavinejad M, Niknia S, Shirvani M. Comprehensive Strategies for Optimization e_Energy System in Different Climate Zone. In The 4th International Conference on Architecture, Arts and Applications www.iconfaaa.com 2020 Oct 12. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3709733>
- [80]. Mansourimajoumerd P, Bazazzadeh H, Mahdavinejad M, Nia SN. Energy Efficiency and Building's Envelope: An Integrated Approach to High-Performance Architecture. Urban Planning and Architectural Design for Sustainable Development (UPADSD 2021). Florence, Italy, 14, Sep / 16, Sep 2021; Pp. 122-123. Available:
https://flore.unifi.it/bitstream/2158/1259071/6/UPADSD%202021_ATTII_Firenze.pdf#page=133
- [81]. Szagri D, Szalay Z. Summer overheating in a prefabricated concrete panel building: Are passive measures sufficient in a warming climate?. Journal of Building Physics.:17442591261468026.
<https://doi.org/10.1177/17442591261468026>
- [82]. Ade R, Rehm M. Thermal Comfort, Overheating, and Health in Residential Buildings. Overheating, and Health in Residential Buildings. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=7211774> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.7211774>