نشریهٔ علمی باغ نظر، ۲۲(۱۴۷)، ۳۵-۵۰ / شهریور ۱۴۰۴
DOI: 10.22034/BAGH.2025.516023.5793

ترجمهٔ انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
A Systematic Review of Shading Systems Across Diverse Climates: A Multi-Criteria Framework for Optimizing Energy Performance and User Comfort
در همین شمارهٔ مجله به‌چاپ رسیده است.

مقالهٔ مروری

مرور نظام‌مند سامانه‌های سایه‌انداز در اقلیم‌های گوناگون
چارچوبی چندمعیاره برای بهینه‌سازی انرژی و آسایش کاربران*

پرستو ترک‌زاده ماهانی[۱]، منصور نیک‌پور**[۱]، محسن قاسمی[۱]

۱.گروه معماری، واحد بم، دانشگاه آزاد اسلامی، بم، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

چکیده
بیان مسئله: در بسیاری از اقلیم‌های گرم، مرطوب و حتی معتدل، سازوکار کنترل تابش خورشیدی به معضلی پیچیده تبدیل شده است؛ زیرا سامانه‌های سایه‌انداز موجود اغلب صرفاً بر کاهش مصرف انرژی تمرکز دارند و دیگر ابعاد مانند آسایش بصری، انسجام معماری و رفتار کاربران نادیده گرفته می‌شوند. در نتیجه، اجرای راهکارهای سایه‌اندازی فاقد نگاه چندمعیاره، گاه به خروجی‌هایی ناکارآمد و عدم مقبولیت در محیط‌های واقعی منجر می‌شود.
هدف پژوهش: این مقاله با هدف پر کردن خلأ مذکور، به مرور نظام‌مند ۷۰ مطالعهٔ منتخب می‌پردازد تا ضمن تبیین طبقه‌بندی جامع سامانه‌های سایه‌انداز برپایهٔ اقلیم، فناوری، نوع بنا و ملاحظات کاربرمحور، چارچوبی یکپارچه برای انتخاب و طراحی بهینهٔ این سامانه‌ها در شرایط متنوع اقلیمی ارائه دهد.
روش پژوهش: رویکرد پژوهش برپایهٔ دستورالعمل‌های مرور نظام‌مند و تحلیل محتوای کیفی بنا شده است. در مرحلهٔ گردآوری، مقالات معتبر بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴ از پایگاه‌های علمی گزینش و از نظر نوع سایه‌انداز، روش‌شناسی، شاخص‌های عملکردی و بافت اقلیمی بررسی شدند. سپس برمبنای تحلیل تطبیقی، یک چارچوب چندمعیاره تدوین شد که شبیه‌سازی‌های انرژی، بهینه‌سازی پارامتریک، ارزیابی کاربرمحور و کالیبراسیون میدانی را ادغام می‌کند.
نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان داد که راهکارهای موفق سایه‌اندازی، عموماً آنهایی هستند که میان کاهش بار حرارتی، تأمین روشنایی مطلوب، رضایت کاربران و ملاحظات زیست‌محیطی تعادل ایجاد می‌کنند. چارچوب پیشنهادی، با درنظرگرفتن چرخه‌های بازخوردی طراحی، اجرا و ارزیابی، پاسخی پویا به تغییرات اقلیمی و نیازهای کاربران ارائه می‌دهد و می‌تواند در ارتقای معماری پایدار و انسان‌محور مؤثر واقع شود.
واژگان کلیدی: *سیستم‌های سایه‌انداز، مرور نظام‌مند، بهینه‌سازی انرژی، آسایش کاربران، انطباق اقلیمی.*

مقدمه
صنعت ساختمان، به‌مثابهٔ ستون فقرات کالبدی تمدن نوین، اگرچه در پیشبرد اقتصاد و ارتقاء کیفیت زیست جوامع بشری نقشی محوری ایفا می‌نماید، اما در عین حال، یکی از عمده‌ترین مصرف‌کنندگان منابع انرژی و تولیدکنندگان آلاینده‌های محیط زیست به شمار می‌رود. مستندات پژوهشی و آمارهای بین‌المللی گواهی بر این مدعاست که این حوزه به تنهایی حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد از کل انرژی نهایی جهان و افزون بر ۴۰ درصد از انتشارات جهانی دی‌اکسید کربن را به خود اختصاص می‌دهد (Mousavi et al., 2025; OECD, 2016). این الگوی مصرف، در مقیاس ملی نیز مصداق دارد؛ چنانکه گزارش‌های رسمی حاکی از آن است که حدود ۴۰ درصد از کل انرژی تولیدی کشور در بخش ساختمان به مصرف می‌رسد (Farahmandfar et al., 2025). این واقعیت‌های آماری، لزوم بازنگری بنیادین در پارادایم‌های طراحی معماری، به‌ویژه در

*این مقاله برگرفته از رسالهٔ دکتری معماری «پرستو ترک‌زاده ماهانی» با عنوان «ارزیابی عملکرد الگوهای مختلف کرکره‌های افقی بر بهبود آسایش فیزیکی درساختمان‌هایی اداری اقلیم گرم و خشک ایران (شهر کرمان)» با راهنمایی دکتر «منصور نیکپور» و مشاورهٔ دکتر «محسن قاسمی» در دانشکدهٔ معماری دانشگاه آزاد اسلامی واحد بم در حال انجام است.
**نویسندهٔ مسئول: ۰۹۱۴۲۹۸۳۰۲۷، mansour.nikpour@iau.ac.ir.

حیطهٔ مدیریت انرژی و تعدیل پیامدهای زیست‌محیطی را به‌وضوح نمایان می‌سازد. در میان اجزاء کالبدی مؤثر بر کارایی انرژی یک بنا، پوستهٔ خارجی ساختمان، به خصوص نماها و بازشوها، جایگاهی ممتاز دارند. مطالعات متعدد تأکید می‌کنند که با بهینه‌سازی عملکرد حرارتی-نوری اجزای پوسته، می‌توان بیش از نیمی از انرژی مصرفی ساختمان را مهار کرد (Hoffmann et al., 2016). در این راستا، سامانه‌های سایه‌انداز، به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در طراحی بیوکلیماتیک، از توانمندی قابل توجهی در کاهش بار حرارتی ناشی از تابش خورشید، ارتقاء آسایش حرارتی-بصری کاربران و کاهش وابستگی به سامانه‌های مکانیکی سرمایش برخوردارند (Kitsopoulou et al., 2024; De Luca et al., 2022). با وجود پتانسیل چشمگیر سامانه‌های سایه‌انداز، تحقق عملکرد بهینهٔ آنها با چالش‌های متعددی روبروست. سایه‌اندازهای ایستا، علی‌رغم سادگی در ساخت و بهره‌برداری، فاقد انعطاف‌پذیری لازم برای پاسخگویی به تغییرات پویای اقلیم، شدت تابش و زاویهٔ تابش خورشید در طول شبانه‌روز و چرخهٔ فصلی هستند. این عدم انطباق، می‌تواند در برخی موارد، به انسداد نور طبیعی و افزایش ناخواستهٔ وابستگی به سامانه‌های روشنایی مصنوعی منجر شود (Al-Tamimi & Fadzil, 2011; Nazari et al., 2023). در مقابل، سامانه‌های سایه‌انداز متحرک و تطبیق‌پذیر، اگرچه ظرفیت عملکردی بالاتری ارائه می‌دهند، اما پیاده‌سازی آنها مستلزم به‌کارگیری فناوری‌های پیشرفته‌ای در حوزه‌هایی چون حسگرهای محیطی، هوش مصنوعی، علم مواد و سازه‌های دینامیک است (Sendi, 2014; De Luca et al., 2022). گذشته از چالش‌های فناورانه، پویایی اقلیم و ناهمگونی شرایط محیطی، محدودیت‌های جدی در تعمیم‌پذیری راهکارهای سایه‌انداز ایجاد می‌کند. سامانه‌هایی که در یک منطقهٔ اقلیمی، عملکرد بهینه‌ای از خود نشان می‌دهند، ممکن است در بافت‌های اقلیمی متفاوت، کارایی خود را از دست داده و یا حتی منجر به اختلال در تعادل حرارتی و نوری فضا شود (Bedon et al., 2018; Hoffmann et al., 2016). از سوی دیگر، ملاحظات انسانی نظیر تأمین مطلوب نور طبیعی، پیشگیری از خیرگی، حفظ ارتباط بصری با محیط بیرونی و ارتقاء آسایش ادراکی کاربران، موضوعاتی حیاتی هستند که باید همزمان با ملاحظات صرفاً انرژی‌محور مورد توجه قرار گیرند (Sendi,2014). بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که سامانه‌های سایه‌انداز پویا می‌توانند تا ۳۰ درصد در کاهش مصرف انرژی ساختمان‌هایی تجاری مؤثر باشند (Ma et al., 2023; Chou et al., 2016). با این حال، اغلب این پژوهش‌ها منحصراً بر بهره‌وری انرژی تمرکز کرده و کمتر به تحلیل همزمان جنبه‌هایی نظیر کیفیت روشنایی طبیعی، آسایش روانی و اقتصادی، و پایداری بهره‌برداری پرداخته‌اند (Hoffmann et al., 2016). به‌علاوه، فقدان چارچوب‌های ارزیابی چندمعیاره، منسجم و بین‌رشته‌ای، سبب شده است که ادبیات پژوهشی این حوزه در مواجهه با پیچیدگی‌های واقعی طراحی و بهره‌برداری، دچار کاستی‌های مفهومی و کاربردی باشد. با عنایت به محدودیت‌های پیش‌گفته، هدف غایی این مطالعه مروری نظام‌مند آن است که با تجزیه‌وتحلیل سیستماتیک ادبیات علمی موجود پیرامون سامانه‌های سایه‌انداز در بستر اقلیم‌های متنوع ابعاد عملکردی، اقلیمی و فناورانه این سامانه‌ها را به صورت یکپارچه مورد واکاوی قرار دهد. در پاسخ به کاستی‌های پیش گفته، پژوهش حاضر با مرور نظام‌مند ۷۰ مقالهٔ منتشرشده بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴، درصدد است بنیانی جامع برای تحقیقات آتی در این حیطه فراهم آورد. هدف اصلی، پاسخ‌گویی به دو پرسش کلیدی زیر است:

۱. چه معیارها و روش‌هایی را می‌توان برای طبقه‌بندی جامع سامانه‌های سایه‌انداز براساس ویژگی‌های اقلیمی، تیپ‌ساختمان و اهداف عملکردی آنها به کار گرفت؟

۲. چگونه می‌توان چارچوبی یکپارچه توسعه داد که در آن طبقه‌بندی و راهنمایی جامع برای انتخاب و طراحی بهینهٔ سامانه‌های سایه‌انداز در شرایط گوناگون میسر شود؟

مرور ادبیات

سامانه‌های سایه‌انداز، در قامت اجزای راهبردی معماری پایدار، با تنظیم تابش خورشیدی، نقشی کلیدی در کنترل نور طبیعی، کاهش بار سرمایشی و ارتقاء آسایش حرارتی و بصری ایفا می‌کنند (Datta, 2001; Al-Tamimi et al., 2011). با این حال، مروری بر پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که غالب مطالعات، صرفاً بر جنبه‌های عملکردی خاصی نظیر کنترل خیرگی یا کاهش مصرف انرژی متمرکز بوده‌اند و از تحلیل جامع برهم‌کنش‌های پیچیدهٔ اقلیمی، هندسی و انسانی غفلت ورزیده‌اند (Dubois, 2001 ؛Kim et al., 2015). در اقلیم‌های گرم و خشک ایران - همچون اصفهان - پاسخ سامانه‌های سایه‌انداز به تابش و زاویهٔ خورشید در نماهای گوناگون، گاه نتایج متضادی در پی داشته است (Esfandiari et al., 2024). همچنین، فقدان مطالعاتی که عملکرد چندمعیارهٔ این سامانه‌ها را ارزیابی کنند - شامل شاخص‌های آسایش بصری، روشنایی روز و کیفیت دید به بیرون - یکی از خلأهای جدی ادبیات محسوب می‌شود (Taveres et al., 2019; Alsharif et al., 2023). رویکردهای تک‌ساحتی رایج، ممکن است به طراحی سامانه‌هایی بیانجامد که علی‌رغم بهبود حرارتی، در محیط‌های حساس به نور طبیعی نظیر کلاس‌های درس یا فضاهای اداری، ناکارآمدی خود را بروز دهند (Esfandiari & Shokri, 2023؛Dubois, 2001). ابعاد هندسی و مکانیکی سامانه‌های سایه‌انداز، نظیر نوع و عمق لوورها، در اقلیم‌های مختلف تأثیرات متناقضی از خود نشان می‌دهند. به‌عنوان نمونه، سیستمی که در یک اقلیم گرمسیری به کاهش مصرف انرژی منجر می‌شود، ممکن است در مناطق مدیترانه‌ای نارضایتی بصری را در پی داشته باشد (Lai et al., 2017; Buratti et al., 2022). لذا،

کالیبراسیون مدل‌های شبیه‌سازی با داده‌های اقلیمی واقعی، از جمله ضرایب بازتاب، نوع شیشه و رفتار حرارتی مصالح، امری حیاتی است (Esfandiari & Shokri, 2023; AbdelAziz, 2016). در بسیاری از پژوهش‌ها، اتکا به داده‌های میانگین جهانی در نرم‌افزارهایی نظیر TRNSYS و EnergyPlus، اعتبار نتایج را در بافت بومی ایران به‌شدت کاهش داده‌است (Aketouaneetal.,2018;Motlaghetal.,2024). همگام با تحولات فناورانه در زمینهٔ شیشه‌های الکتروکرومیک و لوورهای فتوولتائیک (Qingsongetal.,2023;Chouetal.,2016)، بررسی میدانی دوام، هزینه‌های نگهداری و میزان اثربخشی این فناوری‌ها در اقلیم‌های خشک همچنان مغفول مانده است (Edupuganti, 2013 ؛Bellia et al., 2014). به‌علاوه، عملکرد سیستم‌های هوشمند خودکار در اقلیم‌هایی با گردوغبار یا نوسانات شدید، همچون ایران، نیازمند اعتبارسنجی دقیق در شرایط واقعی است (Freewan, 2014; Esfandiari et al., 2024). در جمع‌بندی، طراحی سامانه‌های سایه‌انداز مستلزم اتخاذ یک چارچوب یکپارچه و تطبیق‌پذیر با زمینهٔ اقلیمی، الزامات انسانی و ظرفیت‌های فناورانه است. این چارچوب باید با بهره‌گیری از داده‌های بومی، معیارهای چندگانه عملکردی (نظیر آسایش، روشنایی و کنترل خیرگی) و ارزیابی‌های بلندمدت میدانی، پاسخگوی نیازهای معماری بومی ایران باشد (Palmero-Marrero & Oliveira, 2010). بر این اساس، پژوهش حاضر، با تکیه بر مرور نظام‌مند ۷۰ مقالهٔ منتخب منتشر شده بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴ و با تحلیل انتقادی مطالعات داخلی (Esfandiari et al., 2024)، در پی شناسایی خلأهای دانشی و فراهم آوردن بنیانی نظری برای ارتقاء طراحی اقلیم‌پاسخ و چندمعیارهٔ سامانه‌های سایه‌انداز در معماری معاصر ایران است.

پیشینهٔ پژوهش

مطالعات اخیر پیرامون سامانه‌های سایه‌انداز نشان می‌دهد که این سیستم‌ها نقشی اساسی در بهبود عملکرد انرژی، کنترل نور طبیعی و ارتقای آسایش حرارتی و بصری ساختمان‌های دارند. برای نمونه، کیریمتات و همکاران با بررسی مقالات منتشرشده در فاصلهٔ سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵، انواع گوناگون سایه‌انداز را براساس شرایط اقلیمی و الگوهای طراحی معماری طبقه‌بندی کرده و اثربخشی آنها را از طریق شبیه‌سازی‌های انرژی و روشنایی به ارزیابی گذاشتند. یافته‌های این پژوهش ضمن تأیید تأثیر قابل‌توجه سایه‌اندازها در کاهش مصرف انرژی و افزایش آسایش کاربران، بر اهمیت سازگاری راهکارهای طراحی با ویژگی‌های اقلیمی هر منطقه تأکید داشت (Kirimtat et al., 2016). در حوزهٔ کنترل خودکار نماهای تطبیق‌پذیر، تبادکانی و همکاران بر ناکافی‌بودنِ چارچوب‌های کنترل چندمعیاره در پژوهش‌های پیشین تأکید کردند. از دیدگاه آنها، بهره‌گیری از سیستم‌های پویا و هوشمند برای سازگاری با شرایط متغیر محیطی ضروری است، اما اغلب تحقیقات پیشین بر راهکارهای سنتی سایه‌اندازی (پرده‌های غلتکی و کرکره‌های ونیزی) متمرکز بوده‌اند و نیازمند ادغام ترجیحات کاربران در الگوریتم‌های کنترلی و گسترش سیستم‌های پاسخگو به شرایط واقعی هستیم (Tabadkani et al., 2020). همچنین سلوی و همکاران با بررسی جامع سیستم‌های سایه‌انداز در ساختمان‌هایی اداری مناطق استوایی (نظیر مالزی و سنگاپور)، سه دسته‌بندی کلی را پیشنهاد کردند: غیرفعال (Passive)، فعال (Active) و ترکیبی (Hybrid). طبق نتایج آنها، سایه‌اندازهای غیرفعال هرچند در کاهش خیرگی و گرمای بیش از حد مؤثرند، اما انعطاف‌پذیری پایینی دارند؛ درحالی‌که سیستم‌های پویا و ترکیبی، کنترل بهتری بر تابش خورشیدی اعمال می‌کنند و درعین‌حال نیازمند تأمین انرژی و نگهداری منظم‌اند. با وجود این مطالعات، همچنان خلأ یک چارچوب ساختاریافته و جامع برای طبقه‌بندی سامانه‌های سایه‌انداز احساس می‌شود. پژوهش حاضر می‌کوشد تا با نگاهی نظام‌مند، عوامل مؤثر در انتخاب و طراحی این سامانه‌ها را در ترکیب با جنبه‌های اقلیمی، عملکردی و زیبایی‌شناختی تلفیق کند و از این رهگذر، راهکارهایی کاربردی برای پروژه‌های معماری پایدار ارائه دهد.

روش پژوهش

مقالهٔ حاضر به روش مروری-تحلیلی و در چارچوب رویکردی نظام‌مند انجام شده است. بدین منظور، برپایهٔ دستورالعمل‌های PRISMA، ابتدا واژگان کلیدی مرتبط با «سامانه‌های سایه‌انداز»، «بازدهی انرژی»، «آسایش حرارتی»، «آسایش بصری» و «سازگاری با اقلیم» در پایگاه‌های معتبری نظیر Web of Science، ScienceDirect، IEEE Xplore، Scopus و Google Scholar جست‌وجو شد. برای حفظ به‌روز بودن اطلاعات، مقالات پس از سال ۲۰۲۰ در اولویت قرار گرفتند و از میان مطالعات پیشین، تنها پژوهش‌های بنیادین یا دارای ارجاعات بالا انتخاب شدند. در مرحلهٔ غربال‌گری، معیارهایی همچون داوری همتا، ارائه شواهد تجربی و ارتباط مستقیم با مباحث انرژی و آسایش در نظر گرفته شد. سپس، دو متخصص به‌طور مستقل عناوین، چکیده‌ها و متن کامل را بررسی کردند تا از کیفیت و همخوانی با اهداف پژوهش اطمینان حاصل شود. در نهایت، ۷۰ مقاله برتر برای تحلیل عمیق انتخاب و داده‌های آنها مطابق پروتکل استخراج ساختاریافته (شامل اطلاعات کتابشناختی، روش‌شناسی، نوع اقلیم، پارامترهای کلیدی و نوع سیستم سایه‌انداز) در یک پایگاه داده گردآوری شد. برای ارزیابی اعتبار مقالات، از نسخه‌ای اصلاح‌شده از چک‌لیست برنامهٔ ارزیابی مهارت‌های انتقادی (CASP) استفاده شد. بدین ترتیب، فقط مقالاتی که امتیاز کافی در ابعاد روش‌شناختی، کاربردپذیری نتایج و انطباق با مسائل اقلیمی کسب کردند، جهت تحلیل نهایی باقی ماندند. در مرحلهٔ بعد، داده‌های کمّی و کیفی با استفاده از رویکرد سنتز موضوعی در سه محور اصلی: (۱) شرایط

اقلیمی، (۲) تیپولوژی ساختمان‌های و (۳) نتایج عملکردی (به‌ویژه کاهش مصرف انرژی و ارتقای آسایش حرارتی-بصری) طبقه‌بندی شدند. درنهایت، داده‌های به‌دست‌آمده با نرم‌افزار R Studio تحلیل شد تا روندهای اصلی و خلأهای تحقیقاتی مشخص شود. نتایج حاصل، مبنایی برای ارائهٔ چارچوبی جامع در طراحی و گزینش سامانه‌های سایه‌انداز در پروژه‌های معماری پایدار خواهد بود.

با توجه به گستردگی و تعدد تعداد مقالات مورد بررسی (۷۰مورد) در جداول ۱ و ۲، اطلاعات کتاب‌شناختی و متغیرهای مورد بررسی ۲۰ مورد از مقالات مورد بررسی ارائه شده است. در هر سطر از این جدول، اطلاعات هر مقاله براساس مشخصات کتابشناختی (عنوان کامل، سال انتشار)، روش‌شناسی به کار رفته در پژوهش، پارامترهای مورد بررسی و انواع سیستم‌های سایه‌انداز مورد مطالعه آورده شده است. علاوه‌بر این، جدول مذکور به مناطق جغرافیایی و اقلیمی مختلفی که پژوهش‌ها در آنها صورت گرفته‌اند، اشاره دارد و بدین ترتیب، تنوع موقعیت‌های مکانی مطالعات را به نمایش می‌گذارد.

تحلیل کتاب‌سنجی

بررسی سیر زمانی هفتاد مقالهٔ منتخب در بازهٔ ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴، نشان می‌دهد که در سال‌های ابتدایی (۲۰۰۴-۲۰۱۰)، به دلیل محدودیت تحقیقات پایه در زمینهٔ کنترل خورشیدی و

جدول ۱. مشخصات و اطلاعات کتاب‌شناسی مقالات مورد بررسی. مأخذ: نگارندگان.

ردیف	عنوان	رویکرد روش‌شناسی	پارامترها	نگارندگان
۱	بهینه‌سازی چندهدفه انرژی و روشنایی روزِ سامانه‌های سایه‌انداز نامنظم در ساختمان‌ها	بهینه‌سازی چندهدفهٔ مبتنی‌بر ارزیابی عملکرد	روشنایی روز، صرفه‌جویی در مصرف انرژی	Kirimtat et al. (2016)
۲	دستگاه سایه‌انداز حرکتی قابل‌نصب با چاپ سه‌بعدی و محرک جایگزین: کاربرد آلیاژ حافظه‌دار برای معماری واکنش‌گرا و سازگار با اقلیم	طراحی، شبیه‌سازی و نمونه‌سازی اولیه	نور، چاپ سه‌بعدی، آلیاژ حافظه‌دار (SMA)	Yi et al. (2020)
۳	نقش دستگاه‌های سایه‌انداز در ارتقای آسایش حرارتی و بصری در ساختمان‌هایی شیشه‌ای موجود	پژوهش مبتنی‌بر شبیه‌سازی	آسایش حرارتی و بصری، روشنایی روز، یکنواختی	Evola et al. (2017)
۴	تأثیر دستگاه‌های سایه‌انداز خورشیدی بر نیازهای انرژی ساختمان‌هایی اداری مستقل در اقلیم‌های ایتالیا	پژوهش مبتنی‌بر شبیه‌سازی پویا	گرمایش، سرمایش، روشنایی، صرفه‌جویی در انرژی	Bellia et al. (2013)
۵	مطالعه‌ای مبتنی‌بر شبیه‌سازی برای طراحی محیط شفابخش در بخش مراقبت‌های ویژه: ارتقای روشنایی روز و دید، بهینه‌سازی اتاق ICU در اقلیم معتدل، مطالعه موردی فلسطین	پژوهش مبتنی‌بر شبیه‌سازی	بهینه‌سازی، روشنایی روز، دسترسی به دید، کاهش بار گرمایش و سرمایش	Amleh et al. (2023)
۶	استفاده از شبیه‌سازی برای بررسی تأثیر سایه‌اندازهای عمودی بر عملکرد حرارتی ساختمان‌هایی مسکونی (مطالعهٔ موردی: شهر جدید اسیوط)	پژوهش مبتنی‌بر شبیه‌سازی	استفاده از شبیه‌سازی برای بررسی تأثیر سایه‌اندازهای عمودی بر عملکرد حرارتی ساختمان‌هایی مسکونی (مطالعهٔ موردی: شهر جدید اسیوط)	Ali (2012)
۷	کنترل سایه‌اندازی و روشنایی روز و صرفه‌جویی انرژی در دفاتر با نماهای کاملاً شیشه‌ای در اقلیم‌های گرم	پژوهش ترکیبی مبتنی‌بر شبیه‌سازی و آزمایش تجربی	روشنایی روز، شاخص DGI، صرفه‌جویی در انرژی، جهت‌گیری، دما، تابش خیره‌کننده	Al Touma & Ouahrani, (2017)
۸	تأثیر سایه‌اندازهای لوور بر نیازهای انرژی ساختمان	پژوهش مبتنی‌بر شبیه‌سازی و پارامتریک	نماهای متفاوت، عرض‌های جغرافیایی مختلف، آسایش حرارتی، انرژی	Palmero-Marrero & Oliveira (2010)
۹	تحلیل تطبیقی عملکرد روشنایی روز و انرژی ساختمان در نماهای دوپوسته با سیستم‌های سایه‌انداز چندبخشی و راهبردهای کنترلی مختلف	پژوهش مبتنی‌بر شبیه‌سازی	روشنایی روز، عملکرد حرارتی	Hong et al. (2022)
۱۰	شبیه‌سازی انرژی برای ساختمان‌هایی اداری شیشه‌ای در سوئد	پژوهش مبتنی‌بر شبیه‌سازی	آسایش حرارتی، مصرف انرژی، دفاتر باز و سلولی، نسبت سطح پنجره به دیوار (WWR)	Poirazis et al. (2008)

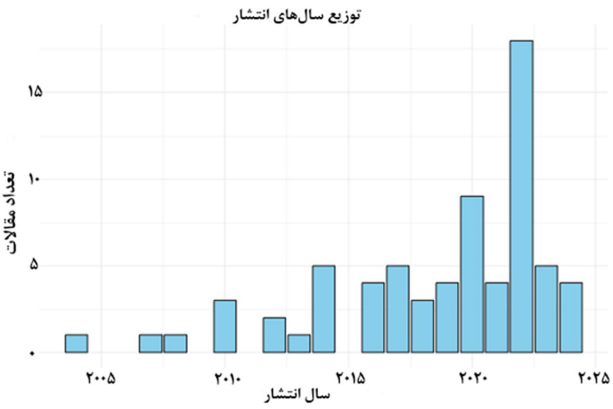
جدول ۲. مشخصات و اطلاعات کتاب‌شناسی مقالات مورد بررسی(دنباله). مأخذ: نگارندگان.

ردیف	نرم‌افزار به‌کار گرفته شده	نوع دستگاه سایه‌انداز	نو بنا	موقعیت جغرافیایی	نوع اقلیم براساس طبقه‌بندی کوپن
۱	Energy plus	Amorphous SDs	اداری	ترکیه	Csa, Cfb, BSh, BSk
۲	DIVA, Energy Plus, Rhino, Grosshopper, Radiance	Kinetic	ساختمان با پوسته متحرک	آمریکا	Cfa, Csa, Af
۳	Energy Plus	Reflective coatings or movable	اداری	ایتالیا	Csa, Cfb
۴	Energy Plus (dynamic simulation)	Solar shading, Louver, Overhang	اداری	ایتالیا	Csa, Cfb
۵	Design builder	Horizontal (overhang) & Vertical	درمانی	فلسطین	Csa, BSh
۶	TAS	Louvers	مسکونی	مصر	BWh
۷	Energy Plus	Blinds, brise soleil (Louvers)	اداری	قطر	BWh
۸	TRNSYS, EES	Louvers	ساختمانی با یک منطقه عملکردی و حرارتی مشترک	مکزیک، مصر، پرتغال، اسپانیا و انگلیس	Aw, BWh, Csa, Cfb
۹	Energy Plus, Radiance	Multisectional SDs (Rollers &blinds)	نمای دو پوسته	چین	Cfa, Dwa
۱۰	IDA ICE , Parasol	Intermediate venetian, Internal screens, Fixed external louvers	اداری	سوئد	Cfb, Dfb

سایه‌اندازها، تعداد پژوهش‌ها اندک بوده است. اما از سال ۲۰۱۱ به بعد، با افزایش آگاهی جهانی نسبت به پایداری انرژی و پیشرفت ابزارهای شبیه‌سازی، روند انتشار مقالات در این حوزه شتاب گرفته و اوج آن در سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ مشهود است (تصویر ۱).

تحلیل توزیع جغرافیایی

همانطور که تصویر ۲ به وضوح نشان می‌دهد، تحلیل جغرافیایی پژوهش‌های انجام‌شده در حوزهٔ سامانه‌های سایه‌انداز طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴، تمرکز چشمگیری را در مناطق خاصی از جهان آشکار می‌سازد. خاورمیانه، فلات ایران و شرق مدیترانه، با رنگ‌های زرد و سبز روشن، حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد کل مطالعات را به خود اختصاص داده‌اند. این تراکم بالا، ارتباط مستقیمی با اقلیم گرم و خشک غالب در این نواحی و نیاز مبرم به کنترل تابش خورشیدی دارد. در مراتب بعدی، جنوب شرق آسیا و بخش‌هایی از اروپای مرکزی با سهمی حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد قرار می‌گیرند. در این مناطق، توسعهٔ شهری و الزامات طراحی اقلیمی، محرک اصلی پژوهش‌ها بوده‌اند. در مقابل، آمریکای شمالی، آمریکای لاتین و صحرای آفریقا، با رنگ‌های آبی تیره و بنفش، تراکمی کمتر از ۱۰ درصد را نشان می‌دهند. نکته قابل توجه این است

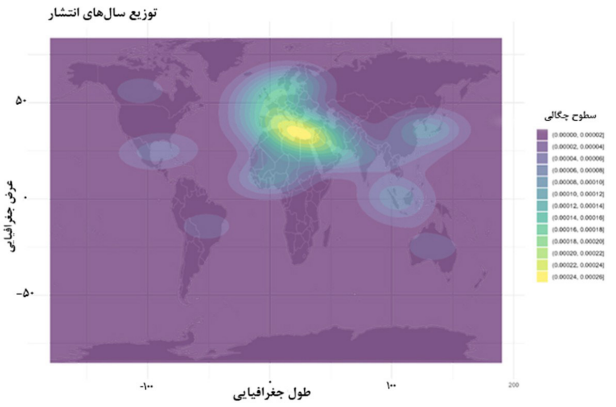


تصویر ۱. توزیع زمانی مقالات مورد بررسی از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴. مأخذ: نگارندگان.

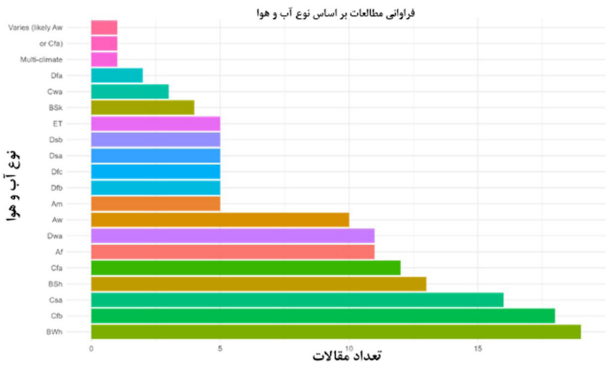
که نواحی قطبی، اقیانوسیه و استرالیا تقریباً از گسترهٔ ادبیات بررسی‌شده حذف شده‌اند، که نشان‌دهندهٔ عدم تمرکز یا نیاز کمتر به این نوع پژوهش‌ها در آن اقلیم‌هاست.

تحلیل فراوانی اقلیم‌ها

نمودار فراوانی اقلیم‌ها تصویر ۳، که برپایهٔ طبقه‌بندی کوپن-گایگر تنظیم شده، توزیع مطالعات در زمینهٔ سامانه‌های سایه‌انداز را از منظر اقلیمی به وضوح تبیین می‌کند. اقلیم



تصویر ۲. توزیع جغرافیایی مقالات مورد بررسی. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۳. فراوانی مطالعات در اقلیم‌های مختلف براساس طبقه‌بندی کوپن. مأخذ: نگارندگان.

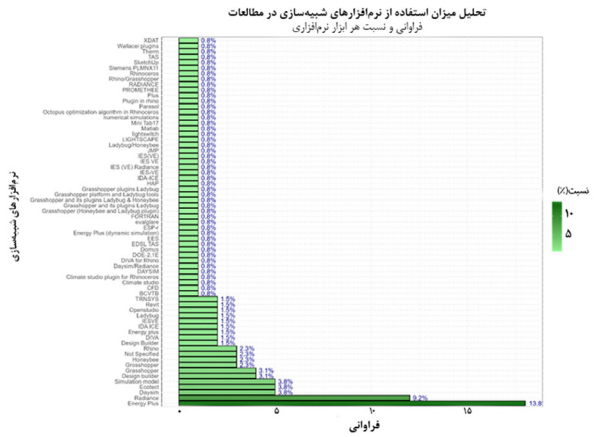
بیابانی گرم (BWh)، با بیشترین فراوانی (بیش از ۱۷ مورد) و رنگ سبز روشن، صدرنشین این مطالعات است؛ این امر کاملاً با منطق تابش شدید خورشیدی و دمای بالای این نواحی همخوانی دارد. در مراتب بعدی، اقلیم‌های اقیانوسی معتدل (Cfb) و مدیترانه‌ای گرم (Csa)، با ۱۳ تا ۱۵ مطالعه و رنگ‌های سبز و سبزآبی، نیاز مداوم به راهکارهای سایه‌انداز را در مناطق دارای تابستان‌های گرم و نور طبیعی فراوان نشان می‌دهند. اقلیم نیمه‌خشک گرم (BSh) نیز با فراوانی قابل توجه (۱۲- ۱۳ مورد)، جایگاه مهمی را به خود اختصاص داده است، در حالی که اقلیم مرطوب نیمه‌گرمسیری (Cfa) با حدود ۱۱ مورد، بر پیچیدگی‌های طراحی در شرایط داغ و مرطوب تأکید می‌ورزد. اقلیم‌های بارانی استوایی (Af)، خشک‌فصل گرمسیری (Aw) و قاره‌ای تابستان‌گرم (Dwa) با فراوانی متوسط (۸- ۱۰ مطالعه)، گویای نیاز به راهکارهای ترکیبی هستند. در اقلیم‌های سردتر مانند Dfc، Dfb و Dfa، با فراوانی پایین‌تر (۵- ۷ مورد)، تمایل کمتری به استفاده از سایه‌انداز مشاهده می‌شود. اقلیم‌های تندرا (ET)، نیمه‌خشک سرد (BSk) و نواحی چنداقلیمی، با تنها ۱ تا ۳ مطالعه و رنگ‌های بنفش کم‌رنگ، خلأ جدی پژوهشی را در نواحی سرد و متغیر آشکار می‌سازند؛ این نکته، فرصت‌های ارزشمندی را برای تحقیقات آتی فراهم می‌آورد.

بررسی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در مقالات مورد بررسی

نرم‌افزار EnergyPlus با ۹/۲ درصد استفاده، بیشترین اقبال را در میان ابزارهای مدل‌سازی عملکرد انرژی ساختمان دارد و این امر نشانگر دقت بالای آن در تحلیل گرمایش، سرمایش و مصرف انرژی است. Radiance و Daysim نیز هرکدام با ۳/۸ درصد، به دلیل توانایی مطلوب در شبیه‌سازی روشنایی طبیعی و تحلیل نور روز، جایگاه ویژه‌ای دارند. افزون بر این، DesignBuilder، Ecotect و Honeybee (۳/۱ تا ۳/۸ درصد) به واسطهٔ رابط کاربرپسند و قابلیت‌های متنوع، از توجه خوبی برخوردار شده‌اند. در همین راستا، پلاگین‌های مرتبط با Grasshopper (نظیر Ladybug و Honeybee) نیز نقش روزافزونی در رویکردهای پارامتریک ایفا می‌کنند، هرچند گروهی از نرم‌افزارهای تخصصی‌تر نظیر Octopus یا Parasol، هنوز کاربرد محدودی (کمتر از ۱ درصد) دارند (تصویر ۴).

روند تحقیقات براساس نوع بنا

ساختمان‌هایی اداری با سهمی حدود ۳۵ درصد، بیشترین موضوع مطالعاتی را تشکیل داده‌اند؛ موضوعی که مبیّن نقش آنها در مصرف قابل توجه انرژی است. پس از آن، بناهای مسکونی با ۹/ ۹ درصد قرار دارند که بیانگر توجه فزاینده به بهینه‌سازی انرژی در حوزهٔ مسکن است. بناهای آموزشی (نظیر کلاس‌های درس) و فضاهای خاص (مانند بیمارستان‌ها و کتابخانه‌ها) در جایگاه‌های بعدی هستند؛ هرچند پژوهش‌های محدود اما نوآورانه‌ای نیز بر سازه‌های پیشرفته نظیر نماهای دوپوسته یا بناهای کاملاً شیشه‌ای متمرکز شده‌اند. این توزیع



تصویر ۴. فراوانی نرم‌افزارهای مورد استفاده در مقالات مورد بررسی. مأخذ: نگارندگان.

نشان می‌دهد که مطالعات به دنبال تطبیق طراحی سایه‌انداز با نیازهای عملکردی بناهای متفاوت هستند (جدول ۳).

روند تحقیقات براساس نوع دستگاه سایه‌انداز

دستگاه‌های سایه‌انداز خارجی (ESDs) با ۱۵/ ۵ درصد، پراستفاده‌ترین رویکرد سایه‌اندازی در تحقیقات اخیر به شمار می‌آیند؛ زیرا در کنترل تابش مستقیم خورشید تأثیر زیادی دارند. همچنین، سیستم‌های فتوولتائیک (PVSDs) با حدود ۱۰ درصد، تلفیقی از کاهش بار حرارتی و تولید انرژی پاک را عرضه می‌کنند. لوورها نیز با ۸/ ۵ درصد جایگاه مهمی دارند و از قابلیت انطباق بالایی در مدیریت تابش و تهویه برخوردارند. سیستم‌های پویا و خودکار هرچند سهم اندکی (کمتر از ۵ درصد) دارند، اما نمایانگر رویکرد آینده‌گرایانه در طراحی پوسته‌های هوشمند هستند که با استفاده از حسگرها و الگوریتم‌های کنترل، به شکل آنی شرایط داخلی را بهینه می‌کنند (جدول ۴).

رویکردهای روش‌شناختی

مطالعات موجود در این حوزه عمدتاً بر رویکردهای مبتنی‌بر شبیه‌سازی (حدود ۲۰ درصد) متکی‌اند و برخی نیز از ترکیب شبیه‌سازی و داده‌های تجربی برای ارتقای دقت مدل‌ها بهره می‌برند. جریان رو به رشدی از بهینه‌سازی‌های تک‌هدفه یا چندهدفه (درمجموع ۸/۴ درصد) به چشم می‌خورد که هدف آنها برقراری موازنه میان کاهش مصرف انرژی، افزایش نور روز و ملاحظات اقتصادی است. طراحی پارامتریک نیز روزبه‌روز در حال گسترش بوده و بخشی از پژوهش‌ها (حدود

جدول ۳. فراوانی متغیر نوع بناهای مورد بررسی در مطالعات. مأخذ: نگارندگان.

نوع بنا	فراوانی	مقالات
ساختمان‌هایی اداری	۲۵	Abdou et al., 2022; Ahadi, 2022; Al-Masrani et al., 2018; Alsukkar et al., 2022; Alwetaishi et al., 2021; Bessoudo et al., 2010; Bhatia et al., 2019; Buratti et al., 2022; Cho et al., 2014; Chou et al., 2016; Da Silva & Veras, 2023; Dabaj et al., 2022; De Luca et al., 2022; Dutta et al., 2017; Edupuganti, 2013; Esfandiari et al., 2024; Jiang et al., 2024; Kalaimathy et al., 2023; Karlsen et al., 2016; Keshtkar Ghalati & Ahmadian, 2024; Khidmat et al., 2022; Kirimtat et al., 2016; Knudsen & Petersen, 2020; Lau et al., 2016; Mandalaki et al., 2012; Mousavi et al., 2025
ساختمان‌هایی مسکونی	۷	Bellia et al., 2013; de Almeida Rocha et al., 2020; Heidari et al., 2021; Mangkuto et al., 2019; Manzan & Clarich, 2017; Motlagh et al., 2024; Nazari et al., 2023
فضاهای اتاقی منفرد	۵	Datta, 2001; Alsharif et al., 2023; Fouad et al., 2019; Kirimtat et al., 2019; Mendis et al., 2020
کلاس‌های درس	۴	Khidmat et al., 2022; Kitsopoulou et al., 2024; Lai et al., 2017; Li et al., 2019
ساختمان‌هایی اداری مرتفع	۳	Esfandiari & Shokri, 2023; Mangkuto et al., 2019; Nicoletti et al., 2023
گونه‌های متنوع و غیرقابل طبقه‌بندی؛ نماهای دوپوسته؛ هتل‌های چندطبقه	۲	Hamza et al., 2022; Hashemi, 2014; Cho et al., 2014; Al Touma & Ouahrani, 2017; Evangelisti et al., 2020; Hoffmann et al., 2016
ساختمان با ناحیهٔ عملکردی واحد (تک‌منطقه‌ای)؛ ساختمان‌هایی تجاری و اداری؛ ساختمان آموزشی(سالن کنسرت)؛ ساختمان‌هایی آموزشی (مدارس)؛ سالن مطالعهٔ چهارجهته (کتابخانه)؛ نماهای کاملاً شیشه‌ای؛ گنبدهای شفاف و شیشه‌ای؛ ساختمان‌هایی مرتفع؛ ساختمان‌هایی تجاری مرتفع؛ ساختمان‌هایی مسکونی مرتفع؛ بیمارستان؛ واحد مراقبت‌های ویژه (ICU)؛ ساختمان جنبشی (پویا)؛ نامشخص؛ ساختمان اداری (به‌طور خاص)؛ بنای بازسازی‌شده؛ ساختمان‌هایی ترکیبی مسکونی و اداری؛ ساختمان‌هایی اداری تک‌پوسته با نمای شیشه‌ای؛ ساختمان شهرداری و فضای اتاق زیرشیروانی با مصرف صفر انرژی.	۱	Aketouane et al., 2018; Alhuwayil et al., 2019; Ali, 2012; Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019; Gomes et al., 2022; Ito & Lee, 2024; Koç & Kalfa, 2021; Mohammed et al., 2022; Park et al., 2020; Samadi et al., 2019; Sern et al., 2022; Skarning et al., 2017; Sorooshnia et al., 2025; Stamatakis et al., 2016

جدول ۴. فراوانی متغیر نوع دستگاه‌های سایه‌انداز در مطالعات. مأخذ: نگارندگان.

نوع دستگاه‌های سایه‌انداز	فراوانی	مقالات
سامانهٔ سایه‌انداز خارجی	۱۱	Bessoudo et al., 2010; Dabaj et al., 2022; Kirimtat et al., 2019; Lau, Salleh et al., 2016; Mangkuto et al., 2019
سامانهٔ سایه‌انداز فتوولتائیک (ترکیبی از تولید برق و سایه‌اندازی)	۷	Ahadi, 2022; Alsukkar et al., 2022; Alwetaishi et al., 2021; Fouad et al., 2019; Karlsen et al., 2016; Mangkuto et al., 2019
لوور (تیغه‌های سایه‌انداز)، یا پره‌های سایه‌انداز	۶	Alsharif et al., 2023; Bellia et al., 2013; Bessoudo, 2010; Hashemi, 2014; Keshtkar Ghalati & Ahmadian, 2024
سامانهٔ سایه‌انداز دینامیک؛ کرکره وِنیزی متحرک	۳	Evangelisti et al., 2020; Dutta et al., 2017; De Almeida Rocha et al., 2020; Knudsen & Petersen, 2020; Mendis et al., 2020; Nicoletti et al., 2023
سامانهٔ سایه‌انداز داخلی شامل کرکره‌های عمودی و افقی؛ سامانهٔ سایه‌انداز جنبشی؛ سامانهٔ سایه‌انداز رول‌شونده؛ طاقچه‌های نوری (LSS)؛ و انواع گوناگون سامانه‌های سایه‌انداز	۲	Alhuwayil et al., 2019; Bhatia et al., 2019; Gomes et al., 2022; Koç & Kalfa, 2021; Li et al., 2019; Lim et al., 2020; Mohammed et al., 2022
سامانه‌های سایه‌انداز نامنظم یا بی‌شکل؛ سامانهٔ سایه‌انداز جنبشی خودکار؛ پانل بازتابی خودکار قابل الحاق/لوور بازتابی خودکار؛ کرکره‌ها و بریز-سولِی (لوورهای معماری خورشیدی)؛ ترکیب سامانه‌های سایه‌انداز داخلی و خارجی؛ کرکرهٔ وِنیزی دوگانه با قابلیت تنظیم دوطرفه؛ سامانهٔ سایه‌انداز خارجی؛ سایه‌انداز خارجی شامل پیش‌آمدگی افقی و پانل عمودی؛ سایه‌انداز خارجی متحرک؛ سایه‌انداز خارجی شامل پیش‌آمدگی پره‌ای با لوورها؛ ترکیب سامانهٔ سایه‌انداز خارجی و کرکرهٔ وِنیزی داخلی؛ ترکیب سامانه‌های سایه‌انداز ثابت و پویا؛ سامانه‌های سایه‌انداز افقی و عمودی؛ پیش‌آمدگی افقی و پانل عمودی؛ ترکیب سایه‌اندازهای افقی، عمودی و شبکه‌ای (تخم‌مرغی)؛ کرکره‌های وِنیزی میانی، داخلی، صفحات سایه‌انداز داخلی، و لوورهای خارجی ثابت؛ سایه‌اندازهای خورشیدی متحرک؛ سامانهٔ سایه‌انداز چندبخشی (پرده‌های رول‌شونده و کرکره‌ها)؛ طاقچه نوری چندطبقه؛ ترکیب پیش‌آمدگی، پره‌های عمودی و لوورهای افقی؛ مواد تغییر فازدهندهٔ (PCM) برای کنترل حرارتی؛ پوشش‌های بازتابی یا سایه‌اندازهای متحرک؛ پرده‌های رول‌شونده و کرکره‌های وِنیزی؛ ترکیب سایه‌انداز خورشیدی، لوور و پیش‌آمدگی؛ سامانهٔ سایه‌انداز خورشیدپیما (ردیاب خورشیدی)؛ کرکرهٔ وِنیزی، لوور افقی، طاقچه نوری و سامانهٔ شبکه‌ای تخم‌مرغی؛ کرکره‌های وِنیزی و پرده‌های پارچه‌ای/پرده‌های سنتی؛ سامانهٔ سایه‌انداز عمودی	۱	Abdou et al., 2022; Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019; Al-Masrani et al., 2018; Cho et al., 2014; Da Silva & Veras, 2023; de Almeida Rocha et al., 2020; Evangelisti et al., 2020; Kalaimathy et al., 2023; Ito & Lee, 2024; Jiang et al., 2024; Hamza et al., 2022; Mandalaki et al., 2012; Manzan & Clarich, 2017; Nicoletti et al., 2023

۴ تا ۵ درصد) تلفیقی از طراحی الگوریتمی و مدل‌سازی را به کار گرفته‌اند. هرچند سهم مطالعات کیفی و مشاهده‌محور بسیار اندک است، اما روند استفاده از یادگیری ماشینی و سیستم‌های داده‌محور نشان می‌دهد که پژوهش‌های آینده می‌تواند عمیق‌تر به نیازهای واقعی کاربران و صحت‌سنجی میدانی بپردازد (جدول ۵).

تحلیل محتوای واژه‌نگار: روندهای اصلی و شکاف‌های پژوهشی مرور کلیدواژه‌های پرتکرار در پژوهش‌های مرتبط با سیستم‌های سایه‌انداز، سه محور عمده را آشکار می‌سازد: کاهش مصرف انرژی، بهبود آسایش حرارتی و بهینه‌سازی روشنایی روز. فراوانی واژه‌هایی همچون «صرفه‌جویی انرژی» یا «UDI» (شاخص مفید روشنایی روز)، بیانگر جهت‌گیری کمّی و داده‌محور در اغلب این مطالعات است؛ جایی که شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای و شاخص‌های عملکردی بر تحلیل‌های کیفی اولویت می‌یابند. درعین‌حال، واژه‌های مرتبط با طراحی پارامتریک و بهینه‌سازی چندمعیاره هرچند حضور دارند، اما وزن کمتری نسبت به مفاهیمی چون «مصرف انرژی سرمایشی» و «شدت نور» دارند. این موضوع نشان می‌دهد پژوهش‌ها در حال گذار از رویکردهای تک‌بعدی به مدل‌های پیچیده‌تر طراحی و ارزیابی هستند، اما هنوز فاصله‌ای تا تسلط رویکردهای پارامتریک و انسان‌محور وجود دارد. افزون بر این، غیبت کلیدواژه‌هایی نظیر «ترجیحات کاربران» و «ارزیابی پس از بهره‌برداری» گویای شکافی مهم است؛ بدین معنا که گرچه پژوهش‌های اخیر به دقت مهندسی و معیارهای فنی متمرکزند، اما بُعد «تعامل انسان و محیط» همچنان کمتر مورد توجه قرار گرفته و نیازمند پژوهش‌های تکمیلی است (تصویر ۵).

جدول ۵. فراوانی متغیر نوع رویکردهای روش‌شناختی در مطالعات. مأخذ: نگارندگان.

رویکرد روش‌شناسی	فراوانی	مقالات
پژوهش مبتنی‌بر شبیه‌سازی	۱۴	Bedon et al., 2018; Al Dakheel & Tabet Aoul, 2017; Al-Masrani et al., 2018; Evangelisti et al., 2020; Evola et al., 2017; Fouad et al., 2019; Hamza et al., 2022; Koç & Kalfa, 2021; Lim et al., 2020; Mangkuto et al., 2019; Manzan & Clarich, 2017
پژوهش ترکیبی شبیه‌سازی و آزمایش تجربی	۵	Da Silva & Veras, 2023; Dabaj et al., 2022; Dutta et al., 2017; Kalaimathy et al., 2023
پژوهش بهینه‌سازی مبتنی‌بر شبیه‌سازی	۴	Khidmat et al., 2022; Bhatia et al., 2019; Motlagh et al., 2024
پژوهش شبیه‌سازی همراه با تحلیل اقتصادی، پژوهش شبیه‌سازی پویا، پژوهش شبیه‌سازی مبتنی‌بر بهینه‌سازی، پژوهش پارامتریک ترکیب‌شده با شبیه‌سازی، طراحی پارامتریک و پژوهش شبیه‌سازی، پژوهش شبیه‌سازی به همراه بهینه‌سازی چندهدفه	۲	Alwetaishi et al., 2021; Ali, 2012; Keshtkar et al., 2024; Khidmat et al., 2022; Khidmat et al., 2022; Mohammed et al., 2022; Park et al., 2020
پژوهش پارامتریک و شبیه‌سازی، چارچوب طراحی پارامتریک همراه با پژوهش شبیه‌سازی، ترکیب پژوهش تجربی و شبیه‌سازی، ترکیب پژوهش تجربی با تحلیل شبیه‌سازی، ترکیب تحلیل شبیه‌سازی و ارزیابی تجربی، ترکیب تحلیل شبیه‌سازی و مطالعات پارامتریک، طراحی، شبیه‌سازی و ساخت نمونهٔ اولیه، پژوهش تجربی و شبیه‌سازی، پژوهش تجربی، پژوهش تجربی همراه با تحلیل شبیه‌سازی، پژوهش تجربی، تحلیل رگرسیونی و تکنیک‌های بهینه‌سازی، مطالعهٔ تجربی همراه با اعتبارسنجی شبیه‌سازی، پژوهش اکتشافی با رویکرد روش‌شناسی ترکیبی و پشتیبانی‌شده با شبیه‌سازی پویا، تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ (MCDA)، روش بهینه‌سازی چندمعیارهٔ ترکیب‌شده با پژوهش مبتنی‌بر شبیه‌سازی، پژوهش شبیه‌سازی به همراه بهینه‌سازی چندهدفه، مدل‌سازی عددی، شبیه‌سازی و تحلیل اقتصادی، ترکیب اعتبارسنجی تجربی و پژوهش شبیه‌سازی، پژوهش پارامتریک و شبیه‌سازی همراه با بهینه‌سازی چندهدفه (MOO)، پژوهش پارامتریک مبتنی‌بر شبیه‌سازی، بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی‌بر ارزیابی عملکرد، تحقیق تجربی و شبیه‌سازی عددی، طراحی پژوهش کیفی مبتنی‌بر مشاهده، چارچوب پژوهش مبتنی‌بر شبیه‌سازی و الگوریتم، چارچوب پژوهشی تلفیقی از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، پژوهش شبیه‌سازی همراه با پارامترسازی، تحلیل یکپارچه مبتنی‌بر شبیه‌سازی، پژوهش شبیه‌سازی همراه با کالیبراسیون میدانی، پژوهش شبیه‌سازی ترکیب‌شده با تحلیل اقتصادی، پژوهش شبیه‌سازی همراه با اعتبارسنجی تجربی، پژوهش شبیه‌سازی همراه با اعتبارسنجی میدانی، پژوهش شبیه‌سازی همراه با بهینه‌سازی چندهدفه، پژوهش شبیه‌سازی ترکیب‌شده با تحلیل‌های تجربی کمی، پژوهش شبیه‌سازی یکپارچه با یادگیری ماشین	۱	Theodoropoulou et al., 2024; Tzempelikos & Athienitis, 2007; Wang et al., 2020; Wong & Istiadji, 2004; Wu & Zhang, 2022; Yao, 2014; Ye et al., 2016; Yi et al., 2020; Yin & Muhieldeen, 2024; Yun et al., 2014; Ziaee & Vakilinezhad, 2022; Zoure & Genovese, 2023; Sern et al., 2022; Skarning et al., 2017; Sorooshnia et al., 2025; Stamatakis et al., 2016; Rabani et al., 2021; Sabbagh et al., 2022; Samadi et al., 2019; Sendi, 2014

تصویر ۵. پارامترهای اصلی در مقالات مورد بررسی Word Cloud. مأخذ: نگارندگان.

تحلیل طبقه‌بندی سیستم‌های سایه‌انداز در شرایط اقلیمی مختلف

تحلیل داده‌های موجود به وضوح نمایانگر این واقعیت است که تنوع اقلیمی، از اقلیم استوایی (Af) تا تندرا (ET)، ضرورت اتخاذ راهکارهای سایه‌اندازی متنوع و به شدت تطبیق‌پذیر را ایجاب می‌کند. در نواحی گرم و مرطوب (Cfa, Aw)، فناوری‌هایی نظیر سایه‌بان‌های پویا و لوورهای فتوولتائیک، با هدف کاهش بار سرمایشی و تولید انرژی، کاربرد گسترده‌ای دارند. این در حالی است که در اقلیم‌های سردتر (Dfb, Dfc, ET)، تجهیزاتی مانند طاقچه‌های نوری یا کرکره‌های غلتکی، برای افزایش روشنایی طبیعی و کاهش اتلاف حرارت به کار گرفته می‌شوند. این گوناگونی راهکارها، به خوبی نشان می‌دهد که سایه‌اندازی صرفاً یک مداخلهٔ فنی مجرد نیست، بلکه یک نظام انطباق‌پذیر است که باید با کالبد بنا، عملکرد مورد انتظار و شرایط اقلیمی به‌طور کامل همخوانی داشته باشد. تلفیق فناوری‌های نوین در ساختمان‌هایی بلندمرتبه مناطق گرمسیری، گویای گذار به راهکارهای چندمعیاره، هیبریدی و اقلیم‌پاسخ است. همچنین، در اقلیم‌های سرد

و نیمه‌خشک، تنظیم نسبت پنجره به دیوار (WWR) و بهره‌گیری حداکثری از نور طبیعی در اولویت قرار دارد. به‌طور کلی، کارآمدی سامانه‌های سایه‌انداز نیازمند چارچوبی است که به‌طور همزمان به پیچیدگی‌های اقلیمی، عملکردی و ادراکی پاسخ دهد (تصویر ۶).

بحث

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که علی‌رغم پیشرفت‌های فناورانه در حوزهٔ طراحی و شبیه‌سازی سامانه‌های سایه‌انداز، بخش عمده‌ای از مطالعات (بیش از دو سوم از ۷۰ مقالهٔ بررسی‌شده) همچنان به رویکردهای تک‌بعدی محدود مانده‌اند. این محدودیت عمدتاً برکاهش مصرف انرژی یا کنترل خیرگی متمرکز است (Al-Tamimi et al., 2011; Dubois, 2001). چنین جهت‌گیری‌ای، اگرچه در اقلیم‌های گرم و خشک نتایج مؤثری داشته است (Buratti et al., 2022; Lai et al., 2017)؛ اما در پاسخ به نیازهای ترکیبی کاربران، نظیر تأمین روشنایی روز، آسایش بصری و کیفیت دید، ناکافی به نظر می‌رسد (Taveres et al., 2019). در مقابل، رویکردهای چندمعیاره که به‌طور همزمان به مؤلفه‌های عملکردی، زیباشناختی و اقلیمی توجه دارند، اگرچه در اقلیت‌اند، اما شواهد موجود حاکی از آن است که کارایی محیطی و ادراکی مطلوب‌تری را فراهم می‌آورند (Alsharif et al., 2023; Hafez et al., 2023). نتایج پژوهش‌های اخیر حاکی از آن است که در اقلیم‌های معتدل و نیمه‌خشک، به‌کارگیری رویکردهای چندوجهی در طراحی سایه‌اندازها می‌تواند ضمن حفظ کیفیت نور طبیعی، به کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش رضایت کاربران منجر شود (Palmero-Marrero & Oliveira, 2010). با این وجود، استفاده از مدل‌های پارامتریک، الگوریتم‌های هوشمند یا سامانه‌های بهینه‌سازی خودکار همچنان در سطح محدودی باقی مانده است. این امر عمدتاً به دلایلی نظیر پیچیدگی محاسباتی، هزینه اجرایی و نبود داده‌های میدانی بلندمدت محدود می‌شود (AbdelAziz, 2016; Al Dakheel & Tabet Aoul, 2017). تنها معدودی از پژوهش‌ها به طراحی مبتنی‌بر مدل‌های تطبیق‌پذیر پرداخته‌اند که امکان پاسخ‌گویی به شرایط متغیر محیطی و رفتار کاربران‌رافراهم‌می‌آورند(Freewan,2014;Alsharifetal.,2023). اما، چالش‌هایی نظیر هزینه‌های نگهداری، پیچیدگی عملکرد و کمبود داده‌های مستند دربارهٔ دوام این سیستم‌ها، مانع جدی در مسیر گسترش عملیاتی و فراگیر شدن آنها محسوب

تصویر ۶. طبقه‌بندی سیستماتیک دستگاه‌های سایه‌انداز براساس اقلیم، موقعیت جغرافیایی، نوع ساختمان و پارامترهای عملکردی. مأخذ: نگارندگان.

می‌شوند (Bellia et al., 2014; Edupuganti, 2013). از منظر اقلیمی، غلبهٔ مطالعات بر اقلیم‌های گرم و خشک (BWh) و مدیترانه‌ای (Csa) چشمگیر است. این نواحی، با تابش شدید و نیاز سرمایشی بالا، کانون اصلی پژوهش‌ها را تشکیل داده‌اند (Buratti et al., 2022). در مقابل، اقلیم‌های سرد (Dfb, Dfc) سهم اندکی در ادبیات داشته‌اند. این در حالی است که در این اقلیم‌ها، هدف اصلی نه صرفاً محدودسازی تابش، بلکه حفظ گرما و بهینه‌سازی روشنایی روز است؛ ابزارهایی نظیر طاقچه‌های نوری یا سایه‌اندازهای غلتکی در این زمینه عملکرد بهینه‌ای دارند (Dubois, 2001; Prieto et al., 2018). از بعد فناورانه، نوآوری‌هایی نظیر لوورهای فتوولتائیک و شیشه‌های الکتروکرومیک امکان تلفیق کنترل تابش با تولید انرژی را فراهم آورده‌اند. اما شواهد تجربی دربارهٔ دوام، کارایی واقعی و تأثیر رفتاری این فناوری‌ها همچنان محدود است (Edupuganti, 2013). همچنین، موضوعاتی نظیر کربن نهفته، انرژی تولیدی، پتانسیل بازیافت و ارزیابی چرخهٔ عمر مصالح در بسیاری از مطالعات مغفول مانده است (Bellia et al., 2014; Hafez et al., 2023).

در پاسخ به پرسش نخست مقاله، نتایج به وضوح نشان می‌دهد که طبقه‌بندی سامانه‌های سایه‌انداز مستلزم رویکردی ساخت‌یافته است که به‌طور همزمان به اقلیم، نوع ساختمان، فناوری، ملاحظات انسانی و رفتار محیطی توجه کند (Datta, 2001). اتکای صرف به یک شاخص عملکردی، بی‌تردید به نتایج ناکارآمد و هزینه‌زا منجر خواهد شد (Alsharif et al., 2023). در پاسخ به پرسش دوم، چارچوب پیشنهادی این مطالعه سه لایهٔ کلیدی را در بر می‌گیرد: (۱) مدل‌سازی پیشرفته و شبیه‌سازی چندمعیاره، (۲) بهینه‌سازی پارامتریک متناسب با شرایط واقعی، و (۳) چرخهٔ بازخورد طراحی–اجرا–ارزیابی مبتنی‌بر داده‌های حسگرها و تجربهٔ کاربران (Freewan, 2014; Al Dakheel & Tabet Aoul, 2017). این چارچوب، راه را برای گذار از راهکارهای سنتی به سامانه‌هایی تطبیق‌پذیر، زیست‌پایدار و انسان‌محور هموار می‌سازد. درنهایت، برای ارتقاء آتی این حوزه، چهار محور کلیدی پیشنهاد می‌شود: (۱) توسعهٔ مدل‌های کاربرمحور با توجه به رفتار و فرهنگ استفاده، (۲) تلفیق سامانه‌های بهینه‌سازی پیشرفته، (۳) ارزیابی چرخه عمر فناورانه و زیست‌محیطی و (۴) اجرای مطالعات میدانی بلندمدت. تنها با این رویکرد جامع‌نگر می‌توان به طراحی سامانه‌هایی دست یافت که به‌طور همزمان بهره‌وری انرژی، کیفیت محیطی و پایداری را محقق سازند.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که علی‌رغم ارتقای کمّی و کیفی پژوهش‌ها در حوزهٔ سیستم‌های سایه‌انداز، همچنان با چالش‌هایی نظیر نبود نگاه یکپارچه میان ملاحظات اقلیمی، رفتاری و طراحی مواجه‌ایم. مرور ۷۰ مقالهٔ منتخب روشن ساخت که رویکردهای تک‌بعدی غالباً بر جنبه‌هایی همچون کاهش مصرف انرژی یا کنترل تابش مستقیم متمرکز بوده‌اند و الزامات چندمعیاره–نظیر آسایش بصری و ترموفیزیولوژیک کاربران را در نظر نگرفته‌اند. افزون بر این، دشواری انطباق‌دهی راهکارهای موجود با اقلیم‌های سرد یا نواحی دارای نوسانات دمایی شدید، نیاز به راهکارهای جامع‌تر را بیشتر نمایان می‌سازد. پژوهش حاضر در پاسخ به دو پرسش کلیدی خود، ابتدا نشان داد که ماتریس طبقه‌بندی کارآمد باید دست‌کم چهار بعد اصلی (اقلیم، گونه‌های ساختمانی، فناوری‌های سایه‌اندازی و شاخص‌های عملکردی چندجانبه) را توأمان لحاظ کند تا از ارائهٔ راهکارهای کلی و ناکارآمد جلوگیری شود. دوم، به کمک تحلیل رویکردهای گوناگون شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و اعتبارسنجی میدانی، چارچوبی یکپارچه پیشنهاد شد که با استفاده از چرخه‌های طراحی–اجرا–ارزیابی، به شکل پویا ویژگی‌های سایه‌انداز را کالیبره می‌کند. این رویکرد راه را برای ادغام داده‌های کاربران، شرایط واقعی اقلیمی و معیارهای زیست‌محیطی در طول چرخهٔ عمر ساختمان هموار می‌سازد. در نگاهی کلان، روشن است که حرکت به سمت سازوکارهای سایه‌اندازی چندمعیاره و سازگار با واقعیت‌های اقلیمی، مستلزم یکپارچه‌سازی چندین حوزهٔ دانشی از مهندسی انرژی و شبیه‌سازی حرارتی گرفته تا روان‌شناسی محیطی و طراحی معماری است. پژوهش‌های آینده، در صورت تمرکز بیشتر بر روش‌های پارامتریک، بهینه‌سازی فرارشته‌ای و بررسی رفتار کاربران در بازه‌های زمانی طولانی، می‌توانند فراتر از کاهش مصرف انرژی رفته و به راهکارهایی دست یابند که هم‌زمان مقبولیت کاربران، انعطاف‌پذیری اقلیمی و هویت معمارانه را ارتقا بخشند. به این ترتیب، سیستم‌های سایه‌انداز قادر خواهند بود گامی فراتر از پوسته‌هایی صرفاً محافظتی بگذارند و به عاملی فعال در شکل‌گیری معماری پایدار و انسان‌محور بدل شوند.

فهرست منابع

- AbdelAziz, F. M. F. A. (2016). *Utilizing Genetic Algorithms and Parametric Design for Efficient Daylighting Performance in Educational Spaces* [Doctoral dissertation, Ain Shams University].
- Abdou, Y., Kim, Y. K., Abdou, A., & Anabtawi, R. (2022). Energy optimization for fenestration design: evidence-based retrofitting solution for office buildings in the UAE. *Buildings, 12*(10), 1541. https://doi.org/10.3390/buildings12101541
- Aketouane, Z., Malha, M., Bruneau, D., Bah, A., Michel, B., Asbik, M., & Ansari, O. (2018). Energy savings potential by integrating Phase Change Material into hollow bricks: The case

Alsehli, M., Alghamdi, S., & Shrahily, R. (2021). An investigation of shading devices in a hot region: A case study in a school building. *Ain Shams Engineering Journal, 12*(3), 3229-3239. https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.02.008

• Amleh, D., Halawani, A., & Hussein, M. H. (2023). Simulation-Based Study for Healing environment in intensive care units: enhancing daylight and access to view, optimizing an ICU room in temperate climate, the case study of Palestine. *Ain Shams Engineering Journal, 14*(2), 101868. https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101868

• Bedon, C., Zhang, X., Santos, F., Honfi, D., Kozłowski, M., Arrigoni, M., ... & Lange, D. (2018). Performance of structural glass facades under extreme loads–Design methods, existing research, current issues and trends. *Construction and Building Materials, 163*(5), 921-937. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.153

• Bellia, L., De Falco, F., & Minichiello, F. (2013). Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates. *Applied Thermal Engineering, 54*(1), 190-201. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.039

• Bellia, L., Marino, C., Minichiello, F., & Pedace, A. (2014). An overview on solar shading systems for buildings. Energy Procedia, 62, 309-317. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.392

• Bessoudo, M., Tzempelikos, A., Athienitis, A. K., & Zmeureanu, R. (2010). Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices–Part I: Experiments and building thermal model. *Building and Environment, 45*(11), 2506-2516. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.013

• Bhatia, A., Sangireddy, S. A. R., & Garg, V. (2019). An approach to calculate the equivalent solar heat gain coefficient of glass windows with fixed and dynamic shading in tropical climates. *Journal of Building Engineering, 22*, 90-100. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.11.008

• Buratti, C., Belloni, E., Merli, F., Mastoori, M., Sharifi, S. N., & Pignatta, G. (2022). Evaluating the impact of shading devices, glazing systems, and building orientation on the energy consumption in educational spaces. *Environmental Sciences Proceedings, 12*(1), 22. https://doi.org/10.3390/environsciproc2021012022

• Cho, J., Yoo, C., & Kim, Y. (2014). Viability of exterior shading devices for high-rise residential buildings: Case study for cooling energy saving and economic feasibility analysis. *Energy and Buildings, 82*, 771-785. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.092

• Chou, D. C., Chang, C. S., & Chang, J. C. (2016). Energy conservation using solar collectors integrated with building louver shading devices. *Applied Thermal Engineering, 93*, 1282-

of Moroccan buildings. *Building Simulation, 11*(4). https://doi.org/10.1007/s12273-018-0457-5

• Al Dakheel, J., & Tabet Aoul, K. (2017). Building Applications, opportunities and challenges of active shading systems: A state-of-the-art review. *Energies, 10*(10), 1672. https://doi.org/10.3390/en10101672

• Al Touma, A., & Ouahrani, D. (2017). Shading and day-lighting controls energy savings in offices with fully-Glazed façades in hot climates. *Energy and Buildings, 151*, 263-274. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.058

• Alah Ahadi, A. (2022). Developing and optimizing of shading devices to improve daylight performance of glass and transparent domes. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development, 13*(3), 328-348. https://www.sbt-durabi.org/articles/article/8Yjb/

• Alhuwayil, W. K., Mujeebu, M. A., & Algarny, A. M. M. (2019). Impact of external shading strategy on energy performance of multi-story hotel building in hot-humid climate. *Energy, 169,* 1166-1174. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.069

• Ali, A. A. E. M. M. (2012). Using simulation for studying the influence of vertical shading devices on the thermal performance of residential buildings (Case study: New Assiut City). *Ain Shams Engineering Journal, 3*(2), 163-174. https://doi.org/10.1016/j.asej.2012.02.001

• Al-Masrani, S. M., & Al-Obaidi, K. M. (2019). Dynamic shading systems: A review of design parameters, platforms and evaluation strategies. *Automation in Construction, 102*, 195-216. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.014Get rights and content

• Al-Masrani, S. M., Al-Obaidi, K. M., Zalin, N. A., & Isma, M. A. (2018). Design optimisation of solar shading systems for tropical office buildings: Challenges and future trends. *Solar Energy, 170*, 849-872. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.047

• Alsharif, R., Arashpour, M., Golafshani, E., Rashidi, A., & Li, H. (2023). Multi-objective optimization of shading devices using ensemble machine learning and orthogonal design of experiments. *Energy and Buildings, 283*(1), 112840. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112840

• Alsukkar, M., Hu, M., Eltaweel, A., & Su, Y. (2022). Daylighting performance improvements using of split louver with parametrically incremental slat angle control. *Energy and Buildings, 274*(6), 112444. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112444

• Al-Tamimi, N. A., & Fadzil, S. F. S. (2011). The potential of shading devices for temperature reduction in high-rise residential buildings in the tropics. *Procedia Engineering, 21*(3-4), 273-282. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2015

• Alwetaishi, M., Al-Khatri, H., Benjeddou, O., Shamseldin, A.,

1294. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.014

• Da Silva, F. T., & Veras, J. C. G. (2023). A design framework for a kinetic shading device system for building envelopes. *Frontiers of Architectural Research, 12*(5), 837-854. https://doi.org/10.1016/j.foar.2023.05.010

• Dabaj, B., Rahbar, M., & Fakhr, B. V. (2022). Impact of different shading devices on daylight performance and visual comfort of A four opening sides' reading room in rasht. *Journal of Daylighting, 9*(1), 97-116. https://doi.org/10.15627/jd.2022.7

• Datta, G. (2001). Effect of fixed horizontal louver shading devices on thermal perfomance of building by TRNSYS simulation. *Renewable energy, 23*(3-4), 497-507. https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00131-2

• De Almeida Rocha, A. P., Reynoso-Meza, G., Oliveira, R. C., & Mendes, N. (2020). A pixel counting based method for designing shading devices in buildings considering energy efficiency, daylight use and fading protection. *Applied energy, 262*, 114497. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114497

• De Luca, F., Sepúlveda, A., & Varjas, T. (2022). Multi-performance optimization of static shading devices for glare, daylight, view and energy consideration. *Building and Environment, 217*, 109110. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109110

• Dubois, M. C. (2001). *Impact of shading devices on daylight quality in offices*. Simulations with Radiance.

• Dutta, A., Samanta, A., & Neogi, S. (2017). Influence of orientation and the impact of external window shading on building thermal performance in tropical climate. *Energy and Buildings, 139*, 680-689. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.018

• Edupuganti, S. R. (2013). *Dynamic shading: an analysis* [Master's Thesis, University of Washington]. http://hdl.handle.net/1773/22868

• Esfandiari, A. , Neshat Safavi, S. H. , Touran Poshti, F. , Majidihatkehlouei, S. , Haghani, M., & Hosseini, S. B. (2024). Enhancement of the Potential of Exterior Louvre Shadings for Internal Daylight Distribution and Space Visual Quality in Isfahan City, Iran. *Bagh-e Nazar, 21*(133), 5-20. https://doi.org/ 10.22034/bagh.2024.418024.5458

• Esfandiari, A., & Shokri, E. (2023). Evaluation of Space Syntax Effect on Visual Quality and Daylight Indexes for the Interior Spaces of Residential Units in Isfahan City. *Karafan Journal, 19*(4), 43-66. https://doi.org/10.48301/kssa.2022.306315.1754

• Evangelisti, L., Guattari, C., Asdrubali, F., & de Lieto Vollaro, R. (2020). An experimental investigation of the thermal performance of a building solar shading device. *Journal of Building Engineering, 28*, 101089. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101089

• Evola, G., Gullo, F., & Marletta, L. (2017). The role of shading devices to improve thermal and visual comfort in existing glazed buildings. *Energy Procedia, 134*, 346-355. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.543

• Farahmandfar, A., Gharehghani, A., & Saray, J. A. (2025). Towards net-zero energy buildings: Real-time monitoring, data-driven, and machine learning optimization. *Energy Conversion and Management, 343*, 120264. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136477

• Fouad, M. M., Shihata, L. A., & Mohamed, A. H. (2019). Modeling and analysis of Building Attached Photovoltaic Integrated Shading Systems (BAPVIS) aiming for zero energy buildings in hot regions. *Journal of Building Engineering, 21*, 18-27. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.09.017

• Freewan, A. A. (2014). Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions. *Solar Energy, 102,* 14-30. https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.009

• Gomes, M. G., Santos, A. J., & Calhau, M. (2022). Experimental study on the impact of double tilted Venetian blinds on indoor daylight conditions. *Building and Environment, 225,* 109675. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109675

• Hafez, F. S., Sa'di, B., Safa-Gamal, M., Taufiq-Yap, Y. H., Alrifaey, M., Seyedmahmoudian, M., ... & Mekhilef, S. (2023). Energy efficiency in sustainable buildings: a systematic review with taxonomy, challenges, motivations, methodological aspects, recommendations, and pathways for future research. *Energy Strategy Reviews, 45*, 101013. https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101013

• Hamza, M., Adamu, M. B., Usman, A. J., & Usman, B. W. (2022). Evaluation of mixed-mode strategies in office buildings of the tropical savanna climate. *International Journal of Innovative Science and Research Technology, 7*(3). https://doi.org/10.5281/zenodo.6372370

• Hashemi, A. (2014). Daylighting and solar shading performances of an innovative automated reflective louvre system. *Energy and Buildings, 82*, 607-620. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.086

• Heidari, A., Taghipour, M., & Yarmahmoodi, Z. (2021). The effect of fixed external shading devices on daylighting and thermal comfort in residential building. *Journal of Daylighting, 8*(2), 165-180. https://doi.org/10.15627/jd.2021.15

• Hoffmann, S., Lee, E. S., McNeil, A., Fernandes, L., Vidanovic, D., & Thanachareonkit, A. (2016). Balancing daylight, glare, and energy-efficiency goals: An evaluation of exterior coplanar shading systems using complex fenestration modeling tools. *Energy and Buildings, 112*, 279-298. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.009

• Hong, X., Lin, J., Yang, X., Wang, S., & Shi, F. (2022).

Comparative analysis of the daylight and building-energy performance of a double-skin facade system with multisectional shading devices of different control strategies. *Journal of Energy Engineering, 148*(3), 05022001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000828

• Ito, R., & Lee, S. (2024). Performance enhancement of photovoltaic integrated shading devices with flexible solar panel using multi-objective optimization. *Applied Energy, 373*, 123866. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123866

• Jiang, Y., Qi, Z., Ran, S., & Ma, Q. (2024). A study on the effect of dynamic photovoltaic shading devices on energy consumption and daylighting of an office building. *Buildings, 14*(3), 596. https://doi.org/10.3390/buildings14030596

• Kalaimathy, K., Priya, R. S., Rajagopal, P., Pradeepa, C., & Senthil, R. (2023). Daylight performance analysis of a residential building in a tropical climate. *Energy Nexus, 11*, 100226. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100226

• Karlsen, L., Heiselberg, P., Bryn, I., & Johra, H. (2016). Solar shading control strategy for office buildings in cold climate. *Energy and buildings, 118*, 316-328. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.03.014

• Keshtkar Ghalati, A., & Ahmadian, M. (2024). Effects of window and light shelve configurations on energy consumption and daylight illuminance in classrooms. *Renewable Energy Research and Applications, 5*(1), 107-119. https://doi.org/10.22044/rera.2023.12563.1194

• Khidmat, R. P., Fukuda, H., Paramita, B., & Koerniawan, M. D. (2022). The optimization of louvers shading devices and room orientation under three different sky conditions. *Journal of Daylighting, 9*(2), 137-149. https://doi.org/10.15627/jd.2022.11

• Khidmat, R. P., Fukuda, H., Paramita, B., Qingsong, M., & Hariyadi, A. (2022). Investigation into the daylight performance of expanded-metal shading through parametric design and multi-objective optimisation in Japan. *Journal of Building Engineering, 51*, 104241. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104241

• Kim, M., Leigh, S. B., Kim, T., & Cho, S. (2015). A study on external shading devices for reducing cooling loads and improving daylighting in office buildings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 14*(3), 687-694. https://doi.org/10.3130/jaabe.14.687

• Kirimtat, A., Koyunbaba, B. K., Chatzikonstantinou, I., & Sariyildiz, S. (2016). Review of simulation modeling for shading devices in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53*, 23-49. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.020

• Kirimtat, A., Krejcar, O., Ekici, B., & Tasgetiren, M. F. (2019). Multi-objective energy and daylight optimization of amorphous shading devices in buildings. *Solar Energy, 185*, 100-111. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.048

• Kitsopoulou, A., Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2024). An Up-to-Date Review of Passive Building Envelope Technologies for Sustainable Design. *Energies, 17*(16), 4039. https://doi.org/10.3390/en17164039

• Knudsen, M. D., & Petersen, S. (2020). Economic model predictive control of space heating and dynamic solar shading. *Energy and Buildings, 209*, 109661. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109661

• Koç, S. G., & Kalfa, S. M. (2021). The effects of shading devices on office building energy performance in Mediterranean climate regions. *Journal of Building Engineering, 44*, 102653. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102653

• Lai, K., Wang, W., & Giles, H. (2017). Solar shading performance of window with constant and dynamic shading function in different climate zones. *Solar Energy, 147*, 113-125. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.10.015

• Lau, A. K. K., Salleh, E., Lim, C. H., & Sulaiman, M. Y. (2016). Potential of shading devices and glazing configurations on cooling energy savings for high-rise office buildings in hot-humid climates: The case of Malaysia. *International Journal of Sustainable Built Environment, 5*(2), 387-399. https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.04.004

• Li, X., Peng, J., Li, N., Wu, Y., Fang, Y., Li, T., ... & Wang, C. (2019). Optimal design of photovoltaic shading systems for multi-story buildings. *Journal of Cleaner Production, 220*, 1024-1038. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.246

• Lim, T., Yim, W. S., & Kim, D. D. (2020). Evaluation of daylight and cooling performance of shading devices in residential buildings in South Korea. *Energies, 13*(18), 4749. https://doi.org/10.3390/en13184749

• Ma, Q., Ran, S., Chen, X., Li, L., Gao, W., & Wei, X. (2023). Study on the effect of photovoltaic louver shading and lighting control system on building energy consumption and daylighting. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 45*(4), 10873-10889. https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2251439

• Mandalaki, M., Zervas, K., Tsoutsos, T., & Vazakas, A. (2012). Assessment of fixed shading devices with integrated PV for efficient energy use. *Solar Energy, 86*(9), 2561-2575. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.05.026

• Mangkuto, R. A., Dewi, D. K., Herwandani, A. A., & Koerniawan, M. D. (2019). Design optimisation of internal shading device in multiple scenarios: Case study in Bandung, Indonesia. *Journal of Building Engineering, 24*, 100745. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100745

• Manzan, M., & Clarich, A. (2017). FAST energy and daylight optimization of an office with fixed and movable shading devices. *Building and Environment, 113*, 175-184. https://doi.

org/10.1016/j.buildenv.2016.09.035

• Mendis, T., Huang, Z., Xu, S., & Zhang, W. (2020). Economic potential analysis of photovoltaic integrated shading strategies on commercial building facades in urban blocks: A case study of Colombo, Sri Lanka. *Energy, 194*, 116908. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116908

• Mohammed, A., Tariq, M. A. U. R., Ng, A. W. M., Zaheer, Z., Sadeq, S., Mohammed, M., & Mehdizadeh-Rad, H. (2022). Reducing the cooling loads of buildings using shading devices: A case study in Darwin. *Sustainability, 14*(7), 3775. https://doi.org/10.3390/su14073775

• Motlagh, A. A., Havaeji, S., Orangian, M., & Samadani, A. (2024). Achieving Net-Zero Energy Buildings: Analyzing and Optimizing Strategies Using Sensitivity Analysis. *Journal of Asian Energy Studies, 8*, 51-67. https://doi.org/10.24112/jaes.080004

• Mousavi, S. M. R., Mohammadi, S. H., & Jahanshahi Javaran, E. (2025). Effect of Shading Devices on an Office Building Energy Consumption in Hot Arid Climate: A Case Study for Kerman. *Iranica Journal of Energy & Environment, 16*(1), 90-101. https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.01.10

• Nazari, S., MirzaMohammadi, P. K., Sajadi, B., Ha, P. P., Talatahari, S., & Sareh, P. (2023). Designing energy-efficient and visually-thermally comfortable shading systems for office buildings in a cooling-dominant climate. *Energy Reports,10*(1), 2352-4847. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.062

• Nicoletti, F., Kaliakatsos, D., & Parise, M. (2023). Optimizing the control of Venetian blinds with artificial neural networks to achieve energy savings and visual comfort. *Energy and Buildings, 294*, 113279. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113279

• OECD/International Energy Agency. (2016). *Energy and air pollution: World energy outlook special report 2016*. OECD Publishing.

• Özdemir, H., & Çakmak, B. Y. (2022). Evaluation of daylight and glare quality of office spaces with flat and dynamic shading system facades in hot arid climate. *Journal of Daylighting, 9*(2), 197-208. https://doi.org/10.15627/jd.2022.15

• Palmero-Marrero, A. I., & Oliveira, A. C. (2010). Effect of louver shading devices on building energy requirements. *Applied energy, 87*(6), 2040-2049. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.020

• Park, J. H., Yun, B. Y., Chang, S. J., Wi, S., Jeon, J., & Kim, S. (2020). Impact of a passive retrofit shading system on educational building to improve thermal comfort and energy consumption. *Energy and Buildings, 216*, 109930. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109930

• Poirazis, H., Blomsterberg, Å., & Wall, M. (2008). Energy simulations for glazed office buildings in Sweden. *Energy and buildings, 40*(7), 1161-1170. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.10.011

• Prieto, A., Knaack, U., Auer, T., & Klein, T. (2018). Passive cooling & climate responsive façade design: Exploring the limits of passive cooling strategies to improve the performance of commercial buildings in warm climates. *Energy and Buildings, 175*, 30-47. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.016

• Qingsong, M., Ran, S., Chen, X., Li, L., Gao, W., & Wei, X. (2023). Study on the effect of photovoltaic louver shading and lighting control system on building energy consumption and daylighting. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 45*(4), 10873-10889. https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2251439

• Rabani, M., Madessa, H. B., & Nord, N. (2021). Achieving zero-energy building performance with thermal and visual comfort enhancement through optimization of fenestration, envelope, shading device, and energy supply system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 44*, 101020. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101020

• Sabbagh, M., Mandourah, S., & Hareri, R. (2022). Light shelves optimization for daylight improvement in typical public classrooms in Saudi Arabia. *Sustainability, 14*(20), 13297. https://doi.org/10.3390/su142013297

• Samadi, S., Noorzai, E., Beltra, L. O., Abbasi, S., Beltrán, L. O., & Abbasi, S. A. (2019). computational approach for achieving optimum daylight inside buildings through automated kinetic shading systems. *Frontiers of Architectural Research, 9*(2). https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.10.004

• Sendi, M. (2014). The Effect of Technology to Integrate Aesthetic Desire of Contemporary Architecture with Environmental Principles in Façade Design. *Architecture and Engineering, 7*, 24-31.

• Sern, C. H. Y., Liou, L. T. K., & Fadzil, S. F. S. (2022). Daylighting Performance of Integrated Light Shelf with Horizontal Light Pipe System for Deep Plan High-Rise Office in Tropical Climate. *Journal of Daylighting, 9*(1), 83-96. https://doi.org/10.15627/jd.2022.6

• Skarning, G. C. J., Hviid, C. A., & Svendsen, S. (2017). The effect of dynamic solar shading on energy, daylighting and thermal comfort in a nearly zero-energy loft room in Rome and Copenhagen. *Energy and Buildings, 135*, 302-311. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.053

• Sorooshnia, E., Rashidi, M., Rahnamayiezekavat, P., Mahmoudkelayeh, S., Pourvaziri, M., Kamranfar, S., ... & Moezzi, R. (2025). A novel approach for optimized design of low-E windows and visual comfort for residential spaces. *Energy and Built Environment, 6*(1), 27-42. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.08.002

• Stamatakis, A., Mandalaki, M., & Tsoutsos, T. (2016). Multi-criteria analysis for PV integrated in shading devices for Mediterranean region. *Energy and Buildings, 117*, 128-137. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.007

• Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., & Tsangrassoulis, A. (2020). A review of automatic control strategies based on simulations for adaptive facades. *Building and Environment, 175*, 106801. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106801

• Taveres-Cachat, E., Lobaccaro, G., Goia, F., & Chaudhary, G. (2019). A methodology to improve the performance of PV integrated shading devices using multi-objective optimization. *Applied energy, 247*, 731-744. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.033

• Theodoropoulou, P., Brembilla, E., Schipper, R., & Louter, C. (2024). Glare-based control strategy for Venetian blinds in a mixed-use conference space with fully glazed facades. *Journal of Building Engineering, 82*, 108181. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108181

• Tzempelikos, A., & Athienitis, A. K. (2007). The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. *Solar energy, 81*(3), 369-382. https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.015

• Wang, R., Li, G., Xu, L., Wang, Y., & Peng, C. (2020). Integration of sun-tracking shading panels into window system towards maximum energy saving and non-glare daylighting. *Applied Energy, 260*(1), 114304. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114304

• Wong, N. H., & Istiadji, A. D. (2004). Effect of external shading devices on daylighting penetration in residential buildings. *Lighting Research & Technology, 36*(4), 317-330. https://doi.org/10.1191/1365782804li126oa

• Wu, H., & Zhang, T. (2022). Multi-objective optimization of energy, visual, and thermal performance for building envelopes in China's hot summer and cold winter climate zone. *Journal of Building Engineering, 59*, 105034. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105034

• Yao, J. (2014). An investigation into the impact of movable solar shades on energy, indoor thermal and visual comfort improvements. *Building and environment, 71*, 24-32.

• Ye, Y., Xu, P., Mao, J., & Ji, Y. (2016). Experimental study on the effectiveness of internal shading devices. *Energy and Buildings, 111*, 154-163. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.040\

• Yi, H., Kim, D., Kim, Y., Kim, D., Koh, J. S., & Kim, M. J. (2020). 3D-printed attachable kinetic shading device with alternate actuation: Use of shape-memory alloy (SMA) for climate-adaptive responsive architecture. *Automation in Construction, 114*, 103151. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103151

• Yin, X., & Muhieldeen, M. W. (2024). Impact of vertical shading designs on the cross-ventilation performance of a high-rise office building. *Results in Engineering, 21*(3), 101676. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101676

• Yun, G., Yoon, K. C., & Kim, K. S. (2014). The influence of shading control strategies on the visual comfort and energy demand of office buildings. *Energy and Buildings, 84*(1), 70-85. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.040

• Ziaee, N., & Vakilinezhad, R. (2022). Multi-objective optimization of daylight performance and thermal comfort in classrooms with light-shelves: Case studies in Tehran and Sari, Iran. *Energy and Buildings, 254*, 111590. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111590

• Zoure, A. N., & Genovese, P. V. (2023). Implementing natural ventilation and daylighting strategies for thermal comfort and energy efficiency in office buildings in Burkina Faso. *Energy Reports, 9*, 3319-3342. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.02.017

COPYRIGHTS
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Bagh-e Nazar Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

نحوهٔ ارجاع به این مقاله:
ترک‌زاده ماهانی، پرستو؛ نیک‌پور، منصور و قاسمی، محسن. (۱۴۰۴). مرور نظام‌مند سامانه‌های سایه‌انداز در اقلیم‌های گوناگون؛ چارچوبی چندمعیاره برای بهینه‌سازی انرژی و آسایش کاربران. *باغ نظر*، ۲۲(۱۴۷)، ۳۵-۵۰.

DOI: 10.22034/BAGH.2025.516023.5793
URL:https://www.bagh-sj.com/article_225153.html