



Daylighting and Sustainability in Educational Buildings: A Systematic Review and Identification of Research Gaps

Soheila Abdizadeh¹ and Yousef Gorji-Mahlabani^{*2}

Received 06/Nov/2025

Revised: 31/Dec/ 2025
(PP.: 37-70)

Accepted: 25/Feb/2026

Abstract

Introduction: Daylighting in educational spaces extends beyond a functional role and is recognized as a fundamental component linking architecture with health. Despite the expansion of research, the existing literature still faces conceptual and methodological fragmentation. This article, through a systematic review of studies published between 2019 and 2025, seeks to provide an integrated picture of the scientific landscape of this field while revealing hidden gaps and overlooked research directions.

Research Method: The research method was designed based on a comprehensive search of databases and systematic screening. In the analysis stage, the selected works were categorized according to dimensions including geographical and climatic patterns, type of educational space, research approaches, evaluation tools, thematic orientations, daylighting assessment metrics, and design strategies. The main objective was to focus on underlying patterns and shortcomings that hinder the formation of a comprehensive framework for sustainable and human-centered design in educational environments.

Results and Discussion: Findings indicated that the existing literature faces several structural gaps: first, the uneven geographical and climatic distribution of studies and the lack of data from cold and unique climates; second, the dominance of visual indicators compared with limited attention to biological criteria; third, the excessive reliance on simulations and the lack of field studies and neuro-monitoring methods; and fourth, the focus on daylighting interventions in contrast to the limited application of dynamic and smart technologies.

Conclusion: The study emphasizes the need to move toward interdisciplinary frameworks that integrate climatic data, advanced simulations, field measurements, and biological indicators to support sustainable, equitable design and promote cognitive health in educational spaces.

Keywords: Daylighting, Health, Educational Spaces, Sustainable Design, Simulation.

¹PhD. Student, Faculty of Architecture and Urban Planning, Imam Khomeini International Uni., Qazvin, Iran.

²Prof., Faculty of Architecture and Urban Planning, Imam Khomeini International Uni., Qazvin, Iran.
(Corresponding author) gorji@arc.ikiu.ac.ir

نور روز و پایداری در ساختمان‌های آموزشی: مرور نظام‌مند و شناسایی شکاف‌های پژوهشی

سهیلا عبدی‌زاده¹ و یوسف گرگی مهربانی^{2*}

تاریخ پذیرش: 06/1404/اسفند	تاریخ بازنگری: 10/1404/دی	تاریخ دریافت: 15/1404/آبان
(صفحات: 37-70)		

چکیده

مقدمه: نور روز در فضاهای آموزشی فراتر از نقشی صرفاً عملکردی، به‌عنوان مؤلفه‌ای بنیادین در پیوند میان معماری و سلامت شناخته می‌شود. با وجود گسترش روزافزون پژوهش‌ها، ادبیات موجود همچنان با پراکندگی مفهومی و روش‌شناختی مواجه است. این مقاله با مروری نظام‌مند بر مقالات منتشرشده طی سال‌های 2019 تا 2025، تلاش می‌کند تصویری یکپارچه از وضعیت علمی این حوزه ارائه دهد و در عین حال، خلأهای پنهان و مسیرهای مغفول مانده پژوهش را آشکار سازد.

روش تحقیق: روش مطالعه بر پایه جستجوی جامع در پایگاه‌های معتبر و غربالگری نظام‌مند طراحی شد. در مرحله تحلیل، آثار منتخب براساس ابعادی همچون الگوهای جغرافیایی و اقلیمی، نوع فضای آموزشی، رویکردهای پژوهشی، ابزارهای ارزیابی، گرایش‌های موضوعی، شاخص‌های سنجش نور و راهبردهای طراحی دسته‌بندی شد. هدف اصلی، تمرکز بر الگوهای پنهان و کاستی‌هایی است که مانع شکل‌گیری چارچوبی جامع برای طراحی پایدار و انسان‌محور در فضاهای آموزشی می‌شود.

نتایج و بحث: یافته‌ها نشان داد که ادبیات موجود با چندین شکاف ساختاری مواجه است: نخست، توزیع نابرابر جغرافیایی و اقلیمی پژوهش‌ها و کمبود جدی داده از اقلیم‌های سرد و خاص؛ دوم، غلبه شاخص‌های بصری در مقابل کم‌توجهی به معیارهای زیستی؛ سوم، اتکای بیش از حد به شبیه‌سازی و کمبود مطالعات میدانی و روش‌های نوین پایش عصبی و چهارم، تمرکز بر مداخلات متداول نور روز در برابر به‌کارگیری محدود فناوری‌های پویا و هوشمند.

نتیجه‌گیری: نتیجه‌گیری مطالعه بر ضرورت گذار به چارچوب‌های میان‌رشته‌ای تأکید دارد؛ چارچوبی که داده‌های اقلیمی، شبیه‌سازی‌های پیشرفته، سنجش‌های میدانی و شاخص‌های زیستی را در کنار هم به‌کار گیرد تا زمینه‌ساز طراحی پایدار، عادلانه و ارتقای سلامت شناختی در فضاهای آموزشی باشد.

واژگان کلیدی: نور روز، سلامت، فضاهای آموزشی، طراحی پایدار، شبیه‌سازی

¹ دانشجوی دکتری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
² استاد، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. (نویسنده مسئول).
gorji@arc.ikiu.ac.ir

1- مقدمه

نور روز¹ در فضاهای آموزشی نقشی فراتر از یک منبع روشنایی صرف ایفا می‌کند. به عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از کیفیت محیطی، نور روز نه تنها در بهبود شرایط بصری برای فعالیت‌های یادگیری مؤثر است، بلکه از طریق تأثیرات غیر بصری خود بر ریتم شبانه‌روزی، سطح هوشیاری، سلامت روان و کارکردهای شناختی، جایگاهی ویژه در ارتقای تجربه آموزشی به دست آورده است (Andersen et al., 2012). پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که کیفیت و کمیت نور روز در کلاس‌های درس می‌تواند به طور مستقیم یا غیر مستقیم بر عواملی همچون میزان تمرکز، بهره‌وری ذهنی و حتی وضعیت جسمانی کاربران اثرگذار باشد (Fang et al., 2023; Zhou & Bai, 2023). بدین ترتیب، نور روز به مثابه یک عامل بنیادین، پیوندی میان حوزه‌های معماری، سلامت و علوم رفتاری برقرار می‌سازد و توجه به آن در طراحی فضاهای آموزشی اهمیتی دوچندان می‌یابد. رشد فزاینده مطالعات میان‌رشته‌ای طی سال‌های اخیر، بازتابی از همین پیچیدگی و اهمیت چندبعدی نور روز است. موضوعاتی همچون معماری پایدار، روان‌شناسی محیطی، علوم اعصاب و پژوهش‌های مرتبط با بهره‌وری و رفاه انسانی به تدریج در یک نقطه مشترک تلاقی یافته‌اند و نور روز را به عرصه‌ای برای گفت‌وگوی علمی میان رشته‌های گوناگون تبدیل کرده‌اند. این روند نشان می‌دهد که دیگر نمی‌توان نور روز را صرفاً از منظر عملکردی یا مهندسی ارزیابی کرد؛ بلکه باید آن را در چارچوبی کل‌نگرانه و تلفیقی مورد مطالعه قرار داد، چارچوبی که ابعاد کالبدی، ادراکی و زیستی را هم‌زمان پوشش دهد.

با این حال، مرور مجموعه پژوهش‌های موجود بیانگر آن است که علی‌رغم افزایش کمی مقالات در این زمینه، همچنان کمبودهایی در انسجام مفهومی و تحلیل نظام‌مند مسیرهای آینده احساس می‌شود. بسیاری از مطالعات بر مسائل جزئی یا نمونه‌های موردی متمرکز بوده‌اند و تلاش کمتری برای ترسیم تصویری کلان از وضعیت پژوهش‌ها صورت گرفته است.

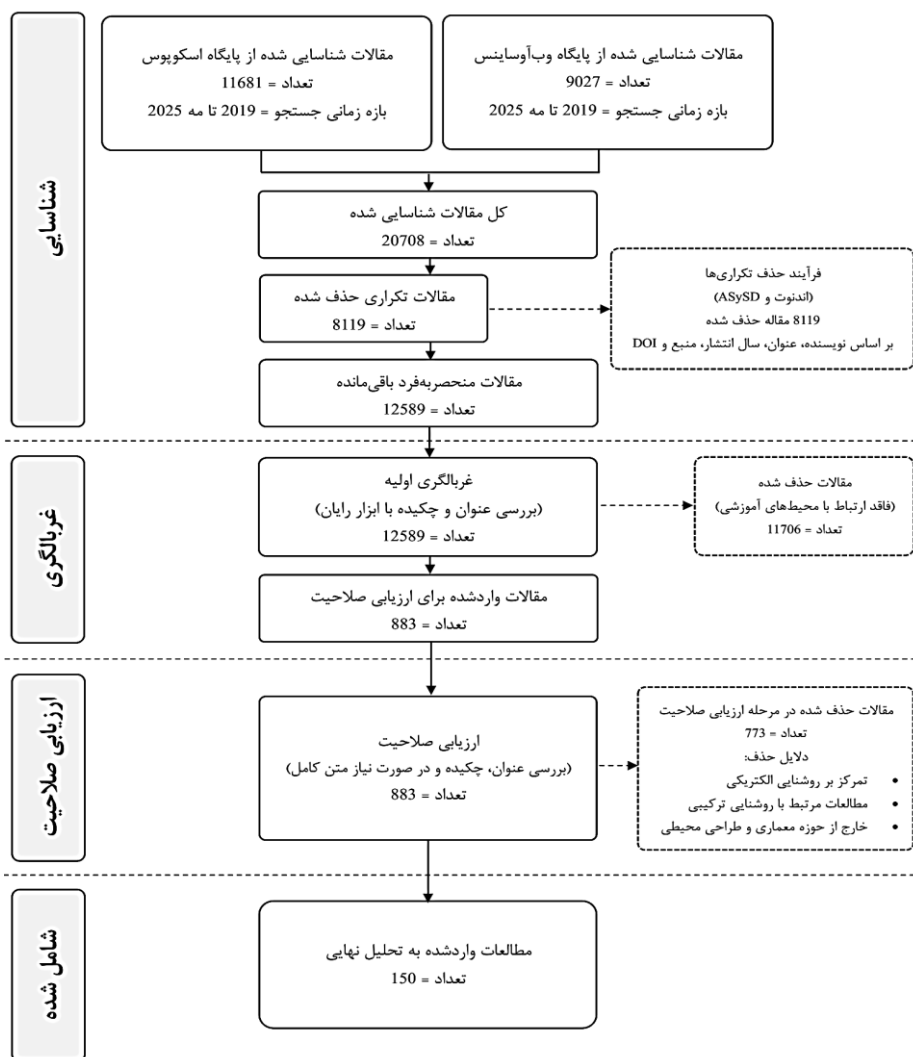
بر همین اساس، مقاله حاضر با رویکردی مروری - نظام‌مند به تحلیل پژوهش‌های منتشرشده طی سال‌های 2019 تا 2025 پرداخته است. مقالات منتخب در چارچوب محورهای کلیدی تحلیل شده‌اند و تمرکز این بررسی بر سازمان‌دهی بدنه پژوهشی، شناسایی روندها و برجسته‌سازی خلأهای موجود در ادبیات علمی بوده است. هدف نهایی آن ارائه تصویری ساختارمند و کلان از وضعیت پژوهش‌ها و فراهم‌سازی زمینه برای ترسیم مسیرهای آتی در حوزه نور روز و طراحی فضاهای آموزشی است.

2- روش تحقیق

برای تدوین مقاله حاضر، فرآیند جستجو، شناسایی، غربالگری و تحلیل مقالات علمی با هدف بررسی نظام‌مند شواهد موجود درباره نور روز در فضاهای آموزشی انجام شد. این مطالعه بر اساس اصول مرور نظام‌مند و مطابق با دستورالعمل PRISMA 2020 گزارش شده است. بر این اساس، مراحل شناسایی منابع، حذف موارد تکراری، غربالگری، ارزیابی صلاحیت و انتخاب نهایی مطالعات به صورت نظام‌مند انجام شد تا جامعیت جستجو، شفافیت فرآیند انتخاب مطالعات و قابلیت بازتولید نتایج تضمین شود (شکل 1).

جستجوی مقالات در دو پایگاه اسکوپوس² و وب‌آو-ساینس³ انجام شد. این پایگاه‌ها به دلیل پوشش گسترده در حوزه‌های معماری، مهندسی، علوم محیطی و علوم اجتماعی و همچنین کیفیت بالای مقالات نمایه‌شده انتخاب شدند. استراتژی جستجو در هر دو پایگاه بر اساس عبارت: "Daylight" OR "Daylighting" OR ("Natural Light") در بخش‌های عنوان، چکیده و کلیدواژه‌ها (Title, Abstract and Keywords) اجرا شد. به منظور افزایش قابلیت مقایسه و تمرکز بر مطالعات معتبر، جستجو به مقالات منتشرشده به زبان انگلیسی محدود شد. همچنین، در مرحله بازبینی اولیه هیچ‌گونه محدودیتی از نظر حوزه موضوعی (Subject Area) اعمال نشد تا تمامی مطالعات مرتبط با نور روز در رشته‌های مختلف بازبینی شوند. پالایش موضوعی و انتخاب مطالعات مرتبط با فضاهای آموزشی در مرحله غربالگری

و بر اساس معیارهای ورود و خروج انجام شد. در پایگاه اسکوپوس، جستجو در بازه زمانی 1848 تا مه 2025 تعداد 34485 رکورد را بازایی کرد. سپس، با محدودسازی بازه زمانی به سالهای 2019 تا 2025، تعداد رکوردها به 11681 مورد کاهش یافت. این محدودیت زمانی به منظور تمرکز بر مطالعات جدید و همسو با پیشرفت‌های اخیر در حوزه ارزیابی نور روز، روش‌های شبیه‌سازی و فناوری‌های مرتبط اعمال شد. در پایگاه وب‌آوساینس نیز جستجویی مشابه انجام شد که در بازه زمانی 1985 تا 2025 تعداد 24967 رکورد را بازایی کرد. با اعمال همان محدودیت زمانی، تعداد رکوردها به 9027 مورد کاهش یافت (جدول 1).



شکل 1- فرایند شناسایی، حذف موارد تکراری، غربالگری و انتخاب نهایی مطالعات

Fig. 1- Flow diagram of the study identification, duplicate removal, screening, and final study selection process

جدول 1- فرایند جستجوی مقالات در پایگاه‌های داده

Tab. 1 – Literature Search Process in Databases

عبارت جستجو				
("Daylight" OR "Daylighting" OR "Natural Light")				
پایگاه داده	بازه زمانی اولیه	تعداد مقالات اولیه	بازه زمانی محدود	تعداد مقالات نهایی
Scopus	1848-2025	34485	2019-2025	11681
Web of Science	1985-2025	24976	2019-2025	9027

مورد مطالعه را به صورت همزمان پوشش می دادند. در مقابل، مطالعاتی که با اهداف پژوهش انطباق نداشتند، از جمله پژوهش هایی که تمرکز اصلی آن ها بر سیستم های روشنائی الکتریکی یا روشنائی ترکیبی یا حوزه های غیرمرتبط با معماری و طراحی محیطی بود، بر اساس معیارهای خروج کنار گذاشته شدند. در نهایت، 150 مقاله واجد شرایط برای تحلیل نهایی انتخاب شدند (جدول 3 و شکل 1). علاوه بر معیارهای ورود و خروج، پیش از استخراج داده ها، صلاحیت روش شناختی مطالعات از نظر نوع انتشار و انطباق با اهداف پژوهش بررسی شد. در این مرحله، تنها مقالات پژوهشی اصیل که نتایج پژوهش های تجربی، میدانی، شبیه سازی، آزمایشگاهی یا ترکیبی را گزارش کرده بودند، وارد مطالعه شدند. مقالات مروری، فصول کتاب، سرمقاله ها، یادداشت های علمی و سایر انتشارات فاقد داده های پژوهشی اولیه از فرایند انتخاب حذف شد. همچنین، مطالعات از نظر ارتباط مستقیم با موضوع نور روز در فضاهای آموزشی، شفافیت روش تحقیق و کفایت اطلاعات لازم برای استخراج داده ها ارزیابی شد. تنها مقالات علمی منتشر شده در مجلات و مقالات کنفرانسی که تمامی معیارهای ورود را احراز کرده بودند، در تحلیل نهایی وارد شدند.

رکوردهای بازیابی شده از دو پایگاه اطلاعاتی در نرم افزار اندنوت⁴ ادغام شدند و فرآیند حذف موارد تکراری به صورت چند مرحله ای انجام گرفت. در این فرآیند، ابتدا رکوردهای کاملاً مشابه بر اساس نویسنده، عنوان، سال انتشار و منبع حذف شدند. سپس موارد دارای عنوان و سال انتشار مشابه، رکوردهای دارای عنوان یکسان و در نهایت رکوردهای دارای شناسه دیجیتال شیء (DOI)⁵ تکراری شناسایی و حذف شدند. در مرحله پایانی، از ابزار ASySD⁶ برای شناسایی و حذف موارد تکراری باقی مانده استفاده شد. در مجموع 8119 رکورد تکراری حذف شد و 12589 مقاله منحصربه فرد برای مرحله غربالگری باقی ماند (جدول 2).

غربالگری مطالعات با استفاده از نرم افزار رایان⁷ انجام شد. در مرحله نخست، عنوان و چکیده 12589 مقاله منحصربه فرد با هدف شناسایی مطالعات مرتبط با فضاهای آموزشی بررسی شد. در این مرحله، مطالعاتی که به محیط های آموزشی نظیر مدارس، کلاس های درس، فضاهای آموزشی دانشگاهی و سایر محیط های یادگیری مرتبط بودند، انتخاب شدند و تعداد مقالات به 883 مورد کاهش یافت. در مرحله دوم، عنوان، چکیده و در صورت نیاز متن کامل این 883 مقاله به دقت ارزیابی شد. معیار ورود شامل مطالعاتی بود که نور روز به عنوان محور اصلی پژوهش و فضاهای آموزشی به عنوان محیط

جدول 2- فرایند حذف مقالات تکراری
Tab. 2 – Duplicate Article Removal Process

مرحله	ابزار یا روش	معیار بررسی	تعداد مقالات حذف شده	توضیحات
1	EndNote	نویسنده، عنوان، سال انتشار، مرجع	4273	حذف مقالاتی که از نظر تمام معیارها یکسان بودند.
2	EndNote	عنوان، سال انتشار	3241	بررسی محدودتر برای شناسایی موارد تکراری با تطابق عنوان و سال.
3	EndNote	عنوان	138	مقایسه صرفاً بر اساس عنوان برای حذف موارد باقی مانده.
4	EndNote	شناسه دیجیتال شیء (DOI)	418	استفاده از DOI برای شناسایی دقیق تر مقالات تکراری.
5	ASySD	بررسی جامع	49	بررسی نهایی با ابزار ASySD برای اطمینان از حذف کامل مقالات تکراری.
نتیجه	-	-	8119	جمع مقالات حذف شده
	-	-	12589	جمع مقالات باقی مانده

جدول 3- فرایند غربالگری مقالات با استفاده از ابزار رایان

Tab. 3 – Article Screening Process Using Rayyan

مرحله	ابزار	روش	معیارهای ورود	معیارهای خروج	تعداد مقالات
غربالگری اولیه	رایان	بررسی عنوان و چکیده مقالات	مطالعات مرتبط با فضاهای آموزشی (Learning, School, Classroom) Educational Space, Environment Study Room, Teaching Space Academic Setting, Lecture Hall (School Room)	مطالعات مربوط به فضاهای غیرآموزشی یا فاقد ارتباط با محیط‌های آموزشی	883
ارزیابی صلاحیت	رایان	بررسی عنوان، چکیده و در صورت نیاز متن کامل	مطالعاتی که به‌طور هم‌زمان نور روز را به‌عنوان محور اصلی پژوهش و فضاهای آموزشی را به‌عنوان محیط مورد مطالعه بررسی کرده بودند.	مطالعاتی که تمرکز اصلی آن‌ها بر روشنایی الکتریکی یا روشنایی ترکیبی (طبیعی و مصنوعی) بود، مطالعات خارج از حوزه معماری و طراحی محیطی و مطالعاتی که با اهداف پژوهش همخوانی نداشتند.	150

داده‌های استخراج‌شده از 150 مقاله منتخب بر اساس محورهای اصلی پژوهش شامل توزیع جغرافیایی و اقلیمی، نوع فضای آموزشی، رویکرد پژوهش (شبیه‌سازی، میدانی و ترکیبی)، ابزارهای ارزیابی، شاخص‌های نور روز، روش‌های شبیه‌سازی، راهکارهای معماری و فناوری و روندهای موضوعی طبقه‌بندی شدند. تحلیل کمی با استفاده از نرم‌افزار اکسل برای محاسبه فراوانی‌ها و درصدها انجام شد و تحلیل کیفی نیز از طریق کدگذاری موضوعی با هدف شناسایی روندهای پژوهشی، شکاف‌های دانشی و فرصت‌های مطالعاتی صورت گرفت.

3- نتایج و بحث

یافته‌های به‌دست‌آمده از مرور نظام‌مند مقالات، تصویری چندلایه از وضعیت پژوهش‌های مرتبط با نور روز در فضاهای آموزشی ارائه می‌دهد. به منظور تحلیل جامع‌تر، داده‌ها در چندین محور کلیدی دسته‌بندی شده‌اند. شایان ذکر است که در برخی دسته‌بندی‌ها، شمارش مقالات به‌صورت غیر انحصاری انجام شده است؛ بدین معنا که یک مقاله می‌تواند هم‌زمان ذیل بیش از یک حوزه (برای نمونه، انرژی و آسایش بصری) قرار گیرد و بنابراین درصدهای گزارش‌شده لزوماً مجموعی برابر با صد نخواهند داشت.

1-3- توزیع جغرافیایی و اقلیمی مقالات مرور شده
بررسی توزیع جغرافیایی مطالعات نشان می‌دهد که پژوهش‌های مرتبط با نور روز در فضاهای آموزشی در بازه زمانی مورد بررسی، عمدتاً در کشورهای آسیایی و مناطق با تنوع اقلیمی بالا متمرکز بوده‌اند (جدول 4). چین با 32 مطالعه (21.3 درصد از کل مقالات) بیشترین سهم را به خود اختصاص داده و پس از آن، اندونزی با 19 مطالعه (12.6 درصد)، ایران با 9 مطالعه (6 درصد) و به دنبال آن هند و ایالات متحده آمریکا هر یک با 8 مطالعه (5.3 درصد) در رتبه‌های بعدی قرار دارند. ترکیه و عربستان سعودی هر کدام با 7 مطالعه (4.6 درصد)، مصر با 6 مطالعه (4 درصد) و اسپانیا و مالزی هر یک با 5 مطالعه (3.3 درصد) در ادامه این توزیع قرار گرفته‌اند. سهم سایر کشورها به تدریج کاهش می‌یابد؛ به‌طوری که تعداد قابل توجهی از کشورها در این حوزه دارای تعداد محدودی مطالعه هستند. این پراکندگی پژوهشی در کشورهایی نظیر آرژانتین و اردن (هر کدام 3 مطالعه) و مجموعه‌ای از کشورهای دیگر که تنها یک یا دو مطالعه در این حوزه ثبت کرده‌اند (از جمله نروژ، لهستان، استونی، قطر و غیره)، مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده گستردگی جغرافیایی موضوع پژوهش در سطح جهانی است.



مقابل، اقلیم‌های کمتر مطالعه‌شده شامل بیابانی سرد (BWk) و سرد و مرطوب با تابستان بسیار خنک (Dsb) هستند که تنها یک مطالعه در هر یک انجام شده است.

جدول 5- توزیع مطالعات بر اساس کدهای اقلیمی کوپن-گایگر

Tab. 5 – Distribution of Studies by Köppen-Geiger Climate Classification

توضیح اقلیم	تعداد مطالعات	کد اقلیم
اقلیم بیابانی گرم	21	BWh
اقلیم موسمی گرمسیری	20	Am
اقلیم معتدل مرطوب با تابستان گرم	20	Cfa
اقلیم معتدل مرطوب با تابستان خنک	17	Cfb
اقلیم استپی سرد	14	BSk
اقلیم معتدل با زمستان خشک و تابستان گرم	13	Cwa
اقلیم گرمسیری مرطوب	13	Af
اقلیم سرد و مرطوب با تابستان خنک	11	Dfb
اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان گرم	11	Csa
اقلیم سرد با زمستان خشک و تابستان گرم	7	Dwa
اقلیم استپی گرم	5	BSh
اقلیم ساوانا با زمستان خشک	5	Aw
اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان خنک	5	Csb
اقلیم معتدل با زمستان خشک و تابستان خنک	3	Cwb
اقلیم بیابانی سرد	1	BWk
اقلیم سرد و مرطوب با تابستان بسیار خنک	1	Dsb

تحلیل توزیع مطالعات انجام‌شده در زمینه نور روز در فضاهای آموزشی نشان‌دهنده تمرکز قابل توجه پژوهش‌ها بر اقلیم‌های گرم، مرطوب و بیابانی است. از مجموع 150 مطالعه مورد بررسی، تقریباً نیمی از آن‌ها در پنج اقلیم BWh (بیابانی گرم)، Am (موسمی گرمسیری)، Cfa (معتدل مرطوب با تابستان گرم)، Cfb (معتدل مرطوب با تابستان خنک) و BSk (استپی سرد)

جدول 4- توزیع مطالعات بر اساس کشور محل انجام

پژوهش

Tab. 4 – Distribution of Studies by Country of Conduct

کشور محل انجام پژوهش	تعداد مطالعات
چین	32
اندونزی	19
ایران	9
هند، ایالات متحده آمریکا	8
ترکیه، عربستان سعودی	7
مصر	6
اسپانیا، مالزی	5
آرژانتین، اردن	3
عراق، تایلند، آلبانی، جمهوری چک، شیلی، ایتالیا، الجزایر، کره جنوبی، کانادا، امارات متحده عربی، اسلواکی	2
نروژ، لهستان، کاستاریکا، یونان، اتریش، انگلستان، ژاپن، هلند، فلسطین، مجارستان، لبنان، دانمارک، استونی، قطر، کلمبیا، مکزیک	1

بررسی توزیع مطالعات بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر⁸ نشان می‌دهد که پژوهش‌ها طیف وسیعی از شرایط آب‌وهوایی را پوشش داده‌اند، اما تمرکز عمده بر اقلیم‌های گرم و مرطوب، بیابانی و معتدل بوده است (جدول 5). بیشترین فراوانی مطالعات به اقلیم بیابانی گرم (BWh) با 21 مقاله (14 درصد از کل) اختصاص دارد. این اقلیم به دلیل شدت تابش خورشید، گرمای بالا و چالش‌های مرتبط با کنترل خیرگی و بار حرارتی، از اهمیت ویژه‌ای در طراحی نور روز برخوردار است. پس از آن، اقلیم موسمی گرمسیری (Am) و اقلیم معتدل مرطوب با تابستان گرم (Cfa) هر یک با 20 مقاله (حدود 13 درصد) قرار دارند. این دو اقلیم نیز به دلیل رطوبت بالا و تغییرات فصلی تابش، نیازمند رویکردهای خاص در بهره‌گیری از نور روز هستند. اقلیم معتدل مرطوب با تابستان خنک (Cfb) با 17 مطالعه، اقلیم استپی سرد (BSk) با 14 مطالعه و دو اقلیم معتدل با زمستان خشک و تابستان گرم (Cwa) و گرمسیری مرطوب (Af) هر یک با 13 مطالعه، بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها را تشکیل می‌دهند. اقلیم‌های سرد و مرطوب با تابستان خنک (Dfb) و مدیترانه‌ای با تابستان گرم (Csa) هر یک با 11 مطالعه نیز نشان‌دهنده توجه به مناطق با تغییرات دمایی فصلی و الزامات متفاوت نورپردازی طبیعی هستند. در

انجام شده است، در حالی که اقلیم‌های سرد یا با شرایط خاص مانند BWk (بیابانی سرد) و Dsb (سرد و مرطوب با تابستان بسیار خنک) سهم ناچیزی (کمتر از یک درصد) از کل مطالعات دارند. این توزیع نشان می‌دهد که پژوهشگران عمدتاً به مناطق با چالش‌های دوگانه تابش بالای خورشید و نیاز به کنترل حرارت و خیرگی توجه کرده‌اند، جایی که طراحی نور روز نه تنها بر آسایش بصری، بلکه بر مصرف انرژی و کارکرد محیطی فضاهای آموزشی تأثیر مستقیم دارد.

اقلیم‌های معتدل مرطوب نیز با 37 مطالعه قابل توجه، بخش مهمی از پژوهش‌ها را تشکیل می‌دهند؛ در این مناطق، مطالعات عمدتاً بر بهینه‌سازی نفوذ یکنواخت نور روز، کاهش نیاز به نور مصنوعی و بهبود کیفیت روشنایی در طول روزهای ابری متمرکز بوده است. این تفاوت‌های اقلیمی در تمرکز پژوهشی حاکی از آن است که نیازهای طراحی نور روز به شدت با ویژگی‌های اقلیمی منطقه همبسته است و راهکارهای یکسان نمی‌توانند در تمام شرایط آب‌وهوایی کارآمد باشند. از سوی دیگر، کمبود مطالعات در اقلیم‌های سرد یا نیمه‌خشک نشان‌دهنده یک شکاف پژوهشی مهم است و فرصت‌های بالقوه‌ای برای تحقیقات آتی فراهم می‌کند. این شکاف به ویژه در زمینه ارزیابی تأثیر نور روز بر سلامت و کارایی یادگیری دانش‌آموزان و دانشجویان در فضاهای آموزشی اقلیم‌های سرد اهمیت دارد و می‌تواند مسیر توسعه راهنماها و استراتژی‌های طراحی نور روز اختصاصی برای این مناطق را هموار سازد. در مجموع، یافته‌های حاضر تأکید می‌کنند که رویکرد اقلیم‌محور در طراحی نور روز نه تنها یک ضرورت علمی، بلکه یک الزام عملی برای معماری آموزشی پایدار است و توجه به این رویکرد می‌تواند همزمان آسایش بصری، بهره‌وری انرژی و کیفیت محیط یادگیری را بهبود بخشد.

2-3- توزیع مطالعات بر مبنای نوع فضای آموزشی و رویکرد پژوهشی

بررسی جامع داده‌ها در شش سال اخیر نشان می‌دهد که ادبیات پژوهشی حوزه نور روز در فضاهای آموزشی، با عدم توازن میان مقیاس‌های مختلف آموزشی مواجه است. از مجموع 150 مطالعه بررسی‌شده، 45 مطالعه

(معادل 30 درصد) به فضاهای دانشگاهی اختصاص یافته، در حالی که 105 مطالعه (70 درصد) متمرکز بر مقاطع پیش‌دانشگاهی (شامل مدارس متعارف، مدارس دینی و مهدکودک‌ها) بوده است (جدول 6). در میان این مقاطع، تمرکز غالب بر مدارس متعارف است؛ به گونه‌ای که مدارس دینی و مهدکودک‌ها با وجود اهمیت کالبدی و رفتاری‌شان، هرکدام تنها سهمی ناچیز (2 درصد) از کل پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. این توزیع بیانگر آن است که در ادبیات موجود، مدارس معمولی به‌عنوان نماینده کل فضاهای پیش‌دانشگاهی در نظر گرفته شده‌اند و سایر فضاها با نیازهای نوری و الزامات طراحی متفاوت، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

از نظر روش‌شناسی، تحلیل الگوها نشان‌دهنده غلبه رویکردهای شبیه‌سازی در تمامی مقیاس‌هاست، اما نسبت «شبیه‌سازی با اعتبارسنجی میدانی» در دانشگاه‌ها (55 درصد) به‌طور معناداری بالاتر از مدارس (43 درصد) است. این تفاوت احتمالاً ناشی از ماهیت محیط‌های آموزشی است؛ مدارس به دلیل حضور مداوم دانش‌آموزان و چالش‌های اجرایی/مدیریتی، دسترسی محدودتری برای جمع‌آوری داده‌های میدانی گسترده فراهم می‌کنند. این در حالی است که سهم مطالعات میدانی خالص (بدون شبیه‌سازی) در هر دو مقیاس محدود است (حدود 15 درصد در دانشگاه و 9 درصد در مدارس) که نشان‌دهنده وابستگی شدید پژوهش‌ها به مدل‌سازی‌های رایانه‌ای است.

این نتایج دو شکاف پژوهشی کلیدی را آشکار می‌سازد: نخست، کمبود بازنمایی تنوع سنی و فرهنگی در فضاهایی نظیر مهدکودک‌ها و مدارس دینی؛ و دوم، غلبه روش‌های شبیه‌سازی بر ارزیابی‌های میدانی که ممکن است اعتبار عملیاتی نتایج را به دلیل فاصله گرفتن از شرایط واقعی کاربر محدود کند.

3-3- چارچوب‌ها و ابزارهای ارزیابی نور روز و انرژی

1-3-3- روش‌ها و ابزارهای ارزیابی میدانی

تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که در مطالعات نور روز در فضاهای آموزشی، از طیف متنوعی از روش‌ها و ابزارهای ارزیابی میدانی استفاده شده است (جدول 7). در میان این روش‌ها، پرسشنامه‌ها با فاصله قابل توجه بیشترین

سهم را داشته‌اند و در 25 مقاله به کار رفته‌اند. ابزارهای پرسشنامه‌ای مورد استفاده شامل مقیاس‌های مختلف لیکرت⁹ (5، 7 و 10 گزینه‌ای)، ابزارهای تخصصی مانند اسپوز¹⁰ برای ارزیابی رضایت از محیط فیزیکی، دی‌کی-ای¹¹ برای سنجش ادراک نور روز و مقیاس‌های دیداری-سنجشی¹² بوده‌اند.

جدول 6- توزیع مطالعات بر اساس نوع فضای آموزشی و رویکرد پژوهشی

Tab. 6 – Distribution of Studies by Type of Educational Space and Research Approach

نوع فضا (کلاس درس)	نوع مطالعه	تعداد مطالعات
دانشگاه	مطالعات میدانی (داده‌های اصلی میدانی واقعی)	7
دانشگاه	مطالعات صرفاً شبیه‌سازی (بدون اعتبارسنجی میدانی)	13
دانشگاه	مطالعات شبیه‌سازی با اعتبارسنجی میدانی	25
جمع دانشگاه		45
مدرسه	مطالعات میدانی (داده‌های اصلی میدانی واقعی)	10
مدرسه	مطالعات صرفاً شبیه‌سازی (بدون اعتبارسنجی میدانی)	46
مدرسه	مطالعات شبیه‌سازی با اعتبارسنجی میدانی	43
جمع مدرسه		99
مدرسه دینی	مطالعات میدانی (داده‌های اصلی میدانی واقعی)	2
مدرسه دینی	مطالعات صرفاً شبیه‌سازی (بدون اعتبارسنجی میدانی)	0
مدرسه دینی	مطالعات شبیه‌سازی با اعتبارسنجی میدانی	1
جمع مدرسه دینی		3
مهدکودک	مطالعات میدانی (داده‌های اصلی میدانی واقعی)	1
مهدکودک	مطالعات صرفاً شبیه‌سازی (بدون اعتبارسنجی میدانی)	1
مهدکودک	مطالعات شبیه‌سازی با اعتبارسنجی میدانی	1
جمع مهدکودک		3

جدول 7- روش‌ها و ابزارهای ارزیابی میدانی در مطالعات نور روز

Tab. 7 – Field Assessment Methods and Tools in Daylight Studies

روش	نوع ابزار/روش	تعداد مقالات	شماره مقالات مرتبط در منابع	توضیحات
پرسشنامه	لیکرت (5، 7 و 10 گزینه‌ای)، اسپوز (7 گزینه‌ای)، ارزیابی رضایت از محیط فیزیکی و فضای باز مدرسه، دی‌کی‌ای (5 گزینه‌ای)، سنجش ادراک نور روز، آشری (7 گزینه‌ای)، ارزیابی رضایت حرارتی، ادراک روشنایی، احساس سلامت، ارزیابی شرایط محیطی، خواب‌آلودگی کودکان، مقیاس دیداری - سنجشی (خط پیوسته با دو سر تعریف شده مانند تاریک - روشن)، مقیاس خیرگی 4 سطحی	25	[28-4].	ارزیابی آسایش بصری، نور روز، خیرگی، رضایت، استرس، خواب‌آلودگی، آسایش حرارتی و عوامل محیطی (IEQ)
مصاحبه	مصاحبه نیمه‌ساختاریافته (با کارت‌های تصویری یا مستقل)، پرسشنامه ساختاریافته با مصاحبه	5	[4, 22, 29-31].	ارزیابی آسایش بصری، ترجیحات طراحی، تجربه کاربران و چیدمان مبلمان
آزمون عملکردی	آزمون نوشتاری عربی ¹⁴ ، آزمون ریاضی پایه، آزمون منطق، آزمون حافظه، چارت BAL دست‌نویسی، آزمون تمرکز d2-R	5	[8, 15, 24, 32, 33].	ارزیابی عملکرد تحصیلی، نوشتاری و تمرکز تحت شرایط نوری
آزمون فیزیولوژیکی	تست حساسیت نوری فردی، پریمتری ¹⁵ ، سنجش کورتیزول بزاقی ¹⁶ ، اتورفرکتومتر ¹⁷ ، اندازه‌گیری لنز داخل چشمی ¹⁸ ، چارت اسنلن ¹⁹	5	[13-16, 34].	ارزیابی حساسیت نوری، نقص میدان دید، استرس و خطای انکساری چشم
مشاهده رفتاری	مشاهده مستقیم (الگوهای استفاده از فضا، رفتار کاربران)، غیرمستقیم (سطح پوشش لباس)، چک‌لیست مشاهده کالبدی	6	[10, 31, 35-38].	ثبت الگوهای استفاده از فضا، پوشش لباس، رفتار کاربران (مانند تنظیم پرده‌ها) و ویژگی‌های کالبدی

این روش‌ها عمدتاً برای سنجش ادراک بصری، خیرگی، رضایت کاربران، احساس سلامت، آسایش حرارتی و عوامل محیطی استفاده شده و دامنه متنوعی از گروه‌های سنی و فرهنگی را در کشورهای مختلف پوشش داده است. مصاحبه‌های ساختاریافته و نیمه‌ساختاریافته در پنج مطالعه به کار رفته و امکان استخراج داده‌های کیفی درباره ترجیحات طراحی، تجربه کاربران و نحوه استفاده از فضا را فراهم کرده‌اند. این رویکرد بیشتر در مطالعاتی استفاده شده که هدف آن‌ها درک عمیق‌تر زمینه‌های فرهنگی، آموزشی یا چیدمان فضایی بوده است. آزمون‌های عملکردی در پنج مطالعه، عمدتاً برای ارزیابی اثرات شرایط نوری بر عملکرد تحصیلی، تمرکز و حافظه دانش‌آموزان مورد استفاده قرار گرفته است. این آزمون‌ها شامل آزمون‌های ریاضی، منطق، حافظه و آزمون تمرکز 2-R بوده و در محیط‌های آموزشی متنوعی از مدارس ابتدایی تا متوسطه اجرا شده‌اند. آزمون‌های فیزیولوژیکی در پنج مطالعه، با استفاده از ابزارهایی نظیر تست حساسیت نوری¹³، سنجش کورتیزول بزاقی و اندازه‌گیری‌های بینایی‌سنجی، به بررسی واکنش‌های بیولوژیکی کاربران به شرایط نوری پرداخته است. این روش‌ها گرچه کمتر رایج بوده است، اما داده‌های عینی ارزشمندی درباره اثرات نور روز بر سلامت بینایی و وضعیت فیزیولوژیک فراهم کرده‌اند. مشاهده رفتاری نیز در شش مطالعه برای ثبت مستقیم یا غیر مستقیم رفتار کاربران، مانند تنظیم پرده‌ها، استفاده از فضا یا پوشش لباس، مورد استفاده قرار گرفته است. این رویکرد امکان تحلیل الگوهای رفتاری در پاسخ به شرایط نوری واقعی را فراهم کرده و مکمل داده‌های حاصل از پرسشنامه‌ها و سنجش‌های فیزیولوژیکی بوده است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که رویکردهای گردآوری داده در مطالعات میدانی مربوط به نور روز در فضاهای کلاس درس، توزیعی نامتوازن از منظر روش‌شناختی دارند. پرسشنامه‌ها با سهم غالب (25 مطالعه) و طیف متنوع ابزارها، از مقیاس‌های استاندارد بین‌المللی مانند لیکرت در سطوح مختلف، اسپوز، دی‌کی‌ای، اشری بخش اصلی داده‌های موجود را تشکیل می‌دهند. این تسلط احتمالاً ناشی از سه عامل اصلی است: سهولت اجرا در

جمعیت‌های بزرگ و متنوع، امکان مقایسه‌پذیری بین فرهنگی و قابلیت سنجش همزمان چند متغیر. با این حال، اتکای بیش از حد به ابزارهای خودگزارشی، خطر سوگیری ادراکی و اثرات مطلوبیت اجتماعی را افزایش می‌دهد و ضرورت اعتبارسنجی متقاطع با روش‌های عینی‌تر را برجسته می‌کند.

مصاحبه‌ها (5 مطالعه) با وجود سهم اندک، ظرفیت قابل توجهی برای شناسایی سازوکارهای روان‌شناختی و اجتماعی نهفته در تجربه کاربران دارند. محدودیت استفاده از این روش‌ها نشان‌دهنده کم‌توجهی ادبیات موجود به تحلیل کیفی و عمیق مکانیسم‌های اثرگذاری محیط فیزیکی است. آزمون‌های عملکردی (5 مطالعه) و فیزیولوژیکی (5 مطالعه) نقش پل ارتباطی میان شرایط محیطی و پیامدهای شناختی-تحصیلی یا پاسخ‌های زیستی را ایفا می‌کنند. سهم محدود آن‌ها نشان می‌دهد که ارزیابی پیامدهای عینی، به ویژه در زمینه‌های فیزیولوژیکی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ در حالی که شاخص‌هایی نظیر کورتیزول بزاقی یا پارامترهای اپتومتریک می‌توانند روابط علی-معلولی را با دقت بالاتری آشکار کنند. با این حال، تقریباً هیچ مطالعه‌ای در این نمونه به بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته پایش عصبی - فیزیولوژیک مانند EEG²⁰ (برای سنجش فعالیت الکتریکی مغز)، fNIRS²¹ (برای ارزیابی اکسیژناسیون قشر مغز)، فناوری ردیابی حرکات چشم²² (برای تحلیل الگوهای توجه بصری) یا اندازه‌گیری HRV²³ (برای پایش تنش و برانگیختگی فیزیولوژیک) نپرداخته است. این خلأ نشان می‌دهد که مطالعات انسانی مبتنی بر سنجش‌های نوروفیزیولوژیک و بیومتریک هنوز توسعه نیافته‌اند و تمرکز پژوهش‌ها عمدتاً بر ابزارهای غیر تهاجمی ساده یا خودگزارشی باقی مانده است. در نتیجه، فرصت قابل توجهی برای طراحی مطالعات آینده وجود دارد که از این فناوری‌ها برای تولید شواهد تجربی دقیق‌تر درباره تأثیر پارامترهای محیطی، به ویژه نور روز، بر عملکرد شناختی و کیفیت تجربه کاربران بهره بگیرند. مشاهدات رفتاری (6 مطالعه) طیفی از روش‌های مشاهده مستقیم، از جمله الگوهای استفاده از فضا و تعامل با عناصر فیزیکی مانند پرده‌ها و پنجره‌ها، تا مشاهده غیر

پژوهشگران بوده است. دی‌سیم با 20 تکرار (13 درصد) در رتبه دوم قرار دارد و به دلیل قابلیت شبیه‌سازی پویا مبتنی بر داده‌های اقلیمی و ارزیابی شاخص‌های سالانه عملکرد نور روز، به ویژه در مطالعات اقلیم‌محور، محبوبیت یافته است. ابزارهای کاربرپسندتری مانند ولوکس دی‌لایت ویزوالایزر (9 مطالعه) لایت استنزا (4 مطالعه) بیشتر برای تحلیل‌های سریع یا پروژه‌هایی با تمرکز بر شاخص‌های خاص استفاده شده‌اند. پلاگین‌ها و نرم‌افزارهای یکپارچه مانند دیوا (7 مطالعه)، IES-VE (8 مطالعه) و کلایمت استودیو (10 مطالعه) نیز نقش مهمی در اتصال فرایند طراحی و شبیه‌سازی ایفا کرده و علاوه بر محاسبات نور روز، امکان تحلیل انرژی و شرایط محیطی را نیز فراهم کرده‌اند. در حوزه شبیه‌سازی ترکیبی نور روز و نور مصنوعی، نرم‌افزارهای رلوکس (2 مطالعه) و دیالوکس (4 مطالعه) به کار رفته است که بیشتر در ارزیابی سیستم‌های روشنایی داخلی و خارجی و طراحی ترکیبی نورپردازی کاربرد داشته است. از نظر بررسی اثرات غیربصری نور، ابزارهایی نظیر آلفا (4 مطالعه) و لارک (1 مطالعه) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نرم‌افزارها امکان ارزیابی شاخص‌های زیستی را فراهم می‌کنند و در مطالعات اخیر که به ارتباط نور با سلامت فیزیولوژیک و ریتم بیولوژیکی پرداخته‌اند، اهمیت ویژه‌ای یافته است.

3-3-3- ابزارها و نرم‌افزارهای مدل‌سازی انرژی ساختمان

تحلیل داده‌های جدول 9 نشان می‌دهد که انرژی پلاس به عنوان هسته اصلی شبیه‌سازی انرژی و آسایش حرارتی، با اختلاف قابل توجهی بیشترین کاربرد را در مطالعات داشته است (29 مطالعه). این موتور شبیه‌سازی، به دلیل دقت بالا، پشتیبانی از استانداردهای بین‌المللی (ASHRAE و CEN) و قابلیت ادغام با ابزارهای متنوعی چون هانی‌بی، اپن‌استودیو و گرس‌هاپر، به عنوان مرجع اصلی در مدل‌سازی انرژی ساختمان شناخته می‌شود.

مستقیم، مانند بررسی سطح پوشش لباس یا استفاده از چک‌لیست‌های کالبدی را شامل می‌شوند. با وجود این، سهم اندک این روش‌ها و فقدان پیوند سیستماتیک آن‌ها با داده‌های فیزیولوژیک یا عملکردی، نشان‌دهنده پتانسیل بالای توسعه چارچوب‌های چندبعدی ترکیبی است. چنین چارچوب‌هایی می‌توانند با تلفیق مشاهدات رفتاری و سنجش‌های شناختی - فیزیولوژیک، تحلیل جامع‌تری از تجربه کاربران ارائه دهند.

در مجموع، یافته‌ها حاکی از آن است که پرسشنامه‌ها همچنان غالب‌ترین ابزار ارزیابی میدانی هستند، در حالی که روش‌های مصاحبه، آزمون‌های عملکردی و فیزیولوژیکی و مشاهدات رفتاری سهم محدودی دارند. این غلبه ابزارهای خودگزارشی، همراه با فقدان روش‌های پیشرفته پایش انسانی، تمرکز پژوهش‌ها را بر ادراکات و ترجیحات، به جای سنجش مستقیم و چندبعدی اثرات محیطی، برجسته می‌کند. شکاف موجود در استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند EEG، fNIRS، Eye-tracking و HRV، فرصت مهمی برای مطالعات آینده فراهم می‌آورد تا رابطه دقیق میان پارامترهای محیطی، به ویژه نور روز و عملکرد شناختی در بستر واقعی فضاهای آموزشی روشن شود. چنین رویکردی نه تنها دانش موجود را غنی‌تر می‌سازد، بلکه ظرفیت طراحی معماری را برای بهینه‌سازی فضاهای آموزشی بر اساس شواهد علمی بهبود می‌بخشد.

3-3-2- ابزارها و رویکردهای شبیه‌سازی نور روز، خیرگی و اثرات غیر بصری

نتایج بررسی ابزارهای شبیه‌سازی مورد استفاده در مطالعات نشان می‌دهد که رادیانس با اختلاف قابل توجه، پرکاربردترین موتور محاسباتی در حوزه تحلیل نور روز و خیرگی بوده و در 60 مطالعه (40 درصد) به کار رفته است (جدول 8). این موتور، به دلیل دقت فیزیکی بالا، توانایی مدل‌سازی پیچیده و سازگاری با طیف وسیعی از پلاگین‌ها و نرم‌افزارها نظیر هانی‌بی، لیدی‌باگ، گرس-هاپر، دیوا، دیزاین‌بیلدر و آی‌ای‌اس-وی‌ای، انتخاب غالب

جدول 8- ابزارهای شبیه‌سازی نور روز، خیرگی و اثرات غیربصری در مطالعات
 Tab. 8 – Simulation Tools for Daylight, Glare, and Non-Visual Effects in Studies

ابزار	نوع	دسته‌بندی کاربرد	وابستگی‌ها	تعداد تکرار	شماره مقالات مرتبط در منابع	توضیحات
Radiance	موتور شبیه‌سازی	شبیه‌سازی نور روز و خیرگی	Honeybee, Ladybug, Grasshopper, DIVA, IES-VE, DesignBuilder	60	[4, 9, 15, 17, 21, 24, 26, 31, 34, 39, 90]	موتور محاسباتی فیزیکی برای شبیه‌سازی دقیق نور روز، توزیع روشنایی و تحلیل شاخص‌های خیرگی مطابق استانداردهای CIE
Daysim	موتور شبیه‌سازی	شبیه‌سازی نور روز پویا مبتنی بر اقلیم	Honeybee, Grasshopper, DIVA	20	[43, 45, 47, 62-65, 67, 69, 72, 74, 77, 82, 83, 85, 90-94]	تحلیل مبتنی بر روش‌های daylight coefficient و داده‌های اقلیمی برای ارزیابی شاخص‌های عملکرد نور روز سالانه
VELUX Daylight Visualizer	نرم‌افزار مستقل	شبیه‌سازی نور روز	مستقل	9	[95-104]	نرم‌افزار کاربرپسند برای تحلیل ساده نور روز و محاسبه فاکتور نور روز (DF)
LightStanza	نرم‌افزار/پلاگین	شبیه‌سازی نور روز	Revit	4	[19, 102, 105]	محاسبه شاخص‌های sDA و ASE بر اساس IES LM-83-12 و تحلیل شاخص خیرگی (DGP)
IES-VE	نرم‌افزار مستقل	شبیه‌سازی نور روز	Radiance, FlucsDL	8	[24, 31, 50, 75, 106-109]	پلتفرم جامع تحلیل انرژی و نور روز
DIVA	پلاگین	شبیه‌سازی نور روز مبتنی بر Radiance	Rhinoceros, Grasshopper, Radiance, Daysim	7	[11, 28, 44, 45, 76, 80, 110]	محیط یکپارچه برای شبیه‌سازی نور روز، تحلیل بصری‌سازی نتایج و محاسبه شاخص‌های سالانه نور
ClimateStudio	پلاگین	شبیه‌سازی نور روز و انرژی	Rhinoceros, Radiance, EnergyPlus	10	[12, 20, 23, 42, 46, 73, 98, 111, 113]	ابزار جدید با سرعت بالا برای تحلیل نور روز سالانه، خیرگی و مصرف انرژی
Relux	نرم‌افزار مستقل	شبیه‌سازی نور روز و نور مصنوعی	مستقل	2	[14, 114]	تحلیل توزیع شدت روشنایی، سهم نور روز/مصنوعی و طراحی سیستم روشنایی
DIALux	نرم‌افزار مستقل	شبیه‌سازی نور روز و نور مصنوعی	مستقل	4	[115-118]	طراحی و ارزیابی سیستم‌های روشنایی داخلی و خارجی بر اساس استانداردهای CIE
ALFA	نرم‌افزار/پلاگین	شبیه‌سازی نور روز و ریتم شبانه‌روزی	Rhinoceros	4	[11, 42, 111, 119]	ارزیابی شدت و طیف نور برای تحلیل اثرات بصری و غیر بصری بر ریتم شبانه‌روزی
Lark	نرم‌افزار/پلاگین	شبیه‌سازی نور روز و اثرات غیر بصری	Grasshopper, Radiance	1	[34]	محاسبه شاخص‌های نور غیر بصری (melanopic) برای ارزیابی اثر نور بر فیزیولوژی انسان

جدول 9- ابزارها و نرم افزارهای مدل سازی انرژی ساختمان در مطالعات
Tab. 9 – Tools and Software for Building Energy Modeling in Studies

ابزار	نوع	دسته بندی کاربرد	وابستگی ها	تعداد تکرار	شماره مقالات مرتبط در منابع	توضیحات
EnergyPlus	موتور شبیه سازی	مدل سازی انرژی و آسایش حرارتی	Honeybee, OpenStudio, Grasshopper, DesignBuilder	29	[17, 28, 34, 39, 46, 48, 51, 53, 55, 59, 62, 65, 68, 72, 78, 83, 86, 90, 94, 117, 120-125]	موتور شبیه سازی دقیق انرژی، مصرف و آسایش حرارتی با پشتیبانی از استانداردهای ASHRAE و CEN
Design Builder	نرم افزار مستقل	مدل سازی انرژی/نور روز	EnergyPlus, Radiance	14	[17, 30, 40, 66, 77, 93, 117, 121, 122, 126-130]	رابط گرافیکی پیشرفته برای انرژی-پلاس و رادیانس
Ecotect	نرم افزار مستقل	مدل سازی نور/حرارتی	Radiance	7	[47, 52, 71, 79, 131-133]	نرم افزار قدیمی اتودسک برای تحلیل مفهومی نور، حرارت و تابش خورشیدی در مراحل طراحی اولیه
IDA ICE	نرم افزار مستقل	مدل سازی انرژی و آسایش حرارتی	مستقل	2	[76, 134]	شبیه سازی دقیق انرژی، آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخلی
WUFI Plus	نرم افزار مستقل	مدل سازی انرژی/دما/رطوبت	مستقل	2	[101, 135]	شبیه سازی همزمان انرژی، انتقال حرارت و رطوبت در ساختمان
TAS EDSL	نرم افزار مستقل	مدل سازی انرژی/نور روز	مستقل (گاهی Radiance)	2	[59, 136]	شبیه سازی دینامیک انرژی و نور روز با قابلیت تحلیل تهویه طبیعی
Teplo	نرم افزار مستقل	مدل سازی انرژی	مستقل	1	[100]	نرم افزار محاسبه تلفات حرارتی در ساختمان
Area	نرم افزار مستقل	مدل سازی انرژی	مستقل	1	[100]	ابزار ارزیابی عملکرد انرژی ساختمان
Stabilita	نرم افزار مستقل	مدل سازی انرژی	مستقل	1	[100]	نرم افزار محاسبه پایداری حرارتی ساختمان
SIMEDIF	نرم افزار مستقل	مدل سازی حرارتی	مستقل	1	[79]	شبیه سازی دینامیک حرارتی، عمدتاً در تحقیقات دانشگاهی
TRNSYS	نرم افزار مستقل	مدل سازی انرژی و سیستم ها	مستقل	1	[92]	شبیه سازی رفتار دینامیک انرژی ساختمان و سیستم های انرژی تجدیدپذیر

و حرارت. ابزارهای تخصصی تر مانند آیدای آیس (2 مطالعه) و ووفی پلاس (2 مطالعه) نیز به دلیل دقت بالا در شبیه سازی آسایش حرارتی و فرایندهای همزمان انرژی-رطوبت، بیشتر در پژوهش های دقیق نگر و دانشگاهی به کار رفته است. سایر نرم افزارها نظیر ترنسیس، تپلو، اریا، استابیلیتا، سیمدیف با فراوانی محدود (1 یا 2 مطالعه) عمدتاً در مطالعات خاص یا پروژه هایی با نیاز به تحلیل های تخصصی استفاده شده است.

در جایگاه دوم، دیزاین بیلدر با 14 مطالعه قرار دارد که نقش رابط کاربری گرافیکی پیشرفته برای انرژی پلاس و رادیانس را ایفا کرده و امکان شبیه سازی همزمان انرژی، نور روز و حتی CFD را فراهم می آورد. استفاده گسترده از این نرم افزار نشان می دهد که ترکیب سادگی کاربری با توانمندی های فنی، عاملی کلیدی در انتخاب ابزار توسط پژوهشگران است. اکوتکت با 7 مطالعه، علی رغم توقف توسعه توسط اتودسک، همچنان در مراحل مفهومی طراحی اولیه به کار گرفته می شود، به ویژه برای تحلیل های ترکیبی نور

3-3-4- ابزارها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی

بررسی ابزارها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی نشان می‌دهد که بخش عمده مطالعات از پلاگین‌های بهینه‌سازی متصل به گرس‌هاپر استفاده کرده‌اند و الگوریتم‌های تکاملی، به ویژه NSGA-II²⁴، هسته اصلی بسیاری از این ابزارها را تشکیل می‌دهند (جدول 10). در میان آن‌ها، اکتاپوس با 9 مطالعه، بیشترین فراوانی را دارد. این ابزار امکان بهینه‌سازی چندهدفه را با رویکرد جست‌وجوی جمعیت‌محور فراهم کرده و به دلیل رابط کاربری گرافیکی و سازگاری مستقیم با گرس‌هاپر، در فرایندهای طراحی پارامتریک محبوبیت یافته است. والاسی نیز با 6 مطالعه در رتبه دوم قرار گرفته و به واسطه امکانات تحلیلی پیشرفته‌تر در بصری‌سازی نتایج نسل‌ها و جبهه پارتو، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. گالاپاگوس (5 مطالعه) به عنوان یکی از نخستین ابزارهای بهینه‌سازی داخلی در گرس‌هاپر همچنان

کاربرد دارد، اگرچه به دلیل محدودیت‌های آن در بهینه‌سازی چندهدفه، سهم آن نسبت به ابزارهای جدیدتر کاهش یافته است. اپسوم (3 مطالعه) با استفاده از الگوریتم RBFOpt رویکرد متفاوتی در جست‌وجوی فضای طراحی ارائه کرده و بیشتر در پروژه‌هایی با نیاز به همگرایی سریع‌تر استفاده شده است. در بخش الگوریتم‌های توسعه‌یافته در محیط‌های برنامه‌نویسی، مواردی چون سگا-کیو، موگا و گیرپی تنها در یک مطالعه به کار رفته است؛ موضوعی که نشان‌دهنده کاربرد محدود اما تخصصی آن‌هاست، به‌ویژه در پژوهش‌هایی که نیاز به کنترل کامل بر پارامترهای بهینه‌سازی و شخصی‌سازی الگوریتم وجود داشته است. همچنین، اپتونا به عنوان ابزار بهینه‌سازی هایپرپارامتر شبکه‌های عصبی در یک مطالعه مورد استفاده قرار گرفته و نشان‌دهنده حرکت تدریجی برخی پژوهش‌ها به سمت ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین و بهینه‌سازی هوشمند است.

جدول 10- ابزارها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مطالعات
Tab. 10 – Tools and Optimization Algorithms in Studies

ابزار	نوع	دسته‌بندی کاربرد	وابستگی‌ها	تعداد تکرار	شماره مقالات مرتبط در منابع	توضیحات
Octopus	پلاگین	بهینه‌سازی چندهدفه	Grasshopper	9	[51, 56, 62, 63, 65, 86, 90, 91, 94]	بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک (NSGA-II)
Wallacei	پلاگین	بهینه‌سازی چندهدفه	Grasshopper	6	[39, 55, 70, 72, 83, 137]	بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم NSGA-II
Galapagos	پلاگین	بهینه‌سازی تک‌هدفه/چندهدفه	Grasshopper	5	[12, 49, 67, 88, 89]	بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک
Opossum	پلاگین	بهینه‌سازی چندهدفه	Grasshopper	3	[12, 57, 84]	بهینه‌سازی با الگوریتم RBFOpt
SEGA-Q	الگوریتم بهینه‌سازی	بهینه‌سازی تک‌هدفه	Python	1	[124]	الگوریتم بهینه‌سازی عددی
MOPSO	الگوریتم بهینه‌سازی	بهینه‌سازی چندهدفه	Python	1	[124]	بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم ازدحام ذرات
MOGA	الگوریتم بهینه‌سازی	بهینه‌سازی چندهدفه	Python	1	[124]	بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک
Gearpy	ابزار بهینه‌سازی	بهینه‌سازی چندهدفه	Python	1	[53]	الگوریتم تکاملی با NSGA-II
Optuna	ابزار بهینه‌سازی	بهینه‌سازی هایپرپارامتر	Python	1	[137]	بهینه‌سازی هایپرپارامترهای شبکه عصبی (ANN)

مدل‌های اولیه معماری و تحلیل تابش خورشیدی به کار رفته‌اند و نقش مکمل در فرایند شبیه‌سازی دارند. بررسی داده‌های جدول 12 نشان می‌دهد که لیدی‌باگ با 35 مطالعه، پرکاربردترین ابزار برای تحلیل اقلیمی و نور روز در پژوهش‌های معماری و انرژی است. این پلاگین که عمدتاً بر روی گرس‌هاپر اجرا می‌شود و قابلیت اتصال به رادیانس را دارد، امکان تحلیل داده‌های آب‌وهوایی، تولید نمودارهای خورشیدی و محاسبه شاخص‌های عملکرد نور روز را فراهم می‌آورد. این ابزار، نقش کلیدی در اتصال مدل‌های سه‌بعدی به شبیه‌سازی‌های دقیق نور و انرژی ایفا می‌کند و در بسیاری از مطالعات به عنوان نقطه شروع برای تحلیل اقلیمی به کار رفته است. نرم‌افزارهای مستقل مانند کلایمت‌کانسالنت با 4 مطالعه، برای تحلیل داده‌های اقلیمی و ارائه راهنمایی‌های طراحی مبتنی بر اقلیم استفاده شده‌اند. همچنین، متانورم با یک مطالعه، به عنوان منبع تولید و ارائه داده‌های هواشناسی و ایجاد فایل‌های اقلیمی برای موتورهای شبیه‌سازی انرژی مورد استفاده قرار گرفته است.

5-3-3- ابزارهای مدل‌سازی سه‌بعدی و تحلیل اقلیمی
تحلیل داده‌های جدول 11 نشان می‌دهد که راینو با 44 مطالعه، پرکاربردترین نرم‌افزار مدل‌سازی سه‌بعدی در پژوهش‌های مرتبط با شبیه‌سازی نور و انرژی است. این نرم‌افزار به‌ویژه در کنار گرس‌هاپر برای ایجاد مدل‌های پارامتریک، امکان تولید هندسه پیچیده و متغیر برای تحلیل‌های شبیه‌سازی را فراهم می‌آورد. این ویژگی باعث شده تا راینو به عنوان ابزار اصلی ورودی برای موتورهای شبیه‌سازی انرژی و نور روز در پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در مرتبه بعد، رویت با 7 مطالعه قرار دارد که به دلیل توانایی ایجاد مدل‌های BIM و استخراج داده‌های هندسی، کاربرد گسترده‌ای در مدل‌سازی سه‌بعدی و همزمان آماده‌سازی داده برای شبیه‌سازی انرژی و نور دارد. اسکچ‌آپ با 4 مطالعه، به عنوان ابزار سریع مدل‌سازی سه‌بعدی و ارزیابی راهکارهای نورپردازی استفاده شده و عمدتاً برای شبیه‌سازی‌های سطحی یا اولیه مورد توجه بوده است. اتوکد و فورم‌ایت به ترتیب با 2 و 1 مطالعه، عمدتاً برای تهیه نقشه‌ها،

جدول 11- ابزارهای مدل‌سازی سه‌بعدی در مطالعات

Tab. 11 – 3D Modeling Tools in Studies

ابزار	نوع	دسته‌بندی کاربرد	وابستگی‌ها	تعداد تکرار	شماره مقالات مرتبط در منابع	توضیحات
Rhinoceros	نرم‌افزار مستقل	مدل‌سازی سه‌بعدی پارامتریک	Grasshopper	44	[4, 10, 12, 18, 23, 26, 28, 39, 41, 42, 44-46, 48, 49, 51, 53, 55-57, 59-63, 65, 67-69, 72, 73, 82-85, 88, 89, 91, 112, 119, 120, 138, 139]	مدل‌سازی هندسه ورودی برای شبیه‌سازی‌های نور و انرژی با رویکرد پارامتریک
Revit	نرم‌افزار مستقل	مدل‌سازی سه‌بعدی و BIM	مستقل	7	[10, 31, 71, 108, 133, 140, 141]	ایجاد مدل‌های BIM و استخراج داده‌های هندسی برای شبیه‌سازی
SketchUp	نرم‌افزار مستقل	مدل‌سازی سه‌بعدی سریع برای تحلیل نور	مستقل (یا پلاگین Sefaira/V-Ray)	4	[97, 118, 122, 132]	مدل‌سازی سریع و ارزیابی راهکارهای نورپردازی
AutoCAD	نرم‌افزار مستقل	مدل‌سازی دوبعدی/سه‌بعدی پایه	مستقل	2	[25, 141]	تهیه نقشه‌ها و مدل‌های اولیه معماری جهت ورود به نرم‌افزارهای شبیه‌سازی
FormIt	نرم‌افزار مستقل	مدل‌سازی سه‌بعدی/تحلیل تابش	مستقل (یا یکپارچه با Insight 360/Revit)	1	[97]	مدل‌سازی اولیه و تحلیل تابش خورشیدی با اتصال به ابزارهای تحلیل انرژی

جدول 12- ابزارها و نرم افزارهای تحلیل اقلیمی و داده های هواشناسی در مطالعات

Tab. 12 – Tools and Software for Climate and Meteorological Data Analysis in Studies

ابزار	نوع	دسته بندی کاربرد	وابستگی ها	تعداد تکرار	شماره مقالات مرتبط در منابع	توضیحات
Ladybug	پلاگین	تحلیل اقلیمی / نور روز	Grasshopper, Radiance	35	[4, 18, 34, 39, 41, 48, 49, 51, 53, 55, 59, 61-63, 65, 67-70, 78, 81-83, 85-90, 94, 119, 132, 137-139]	تحلیل داده های آب و هوایی و نور روز
Climate Consultant	نرم افزار مستقل	تحلیل اقلیمی تولید و ارائه	مستقل	4	[108, 114, 122, 128]	تحلیل داده های اقلیمی
Meteonorm	نرم افزار مستقل	داده های اقلیمی	مستقل	1	[122]	ارائه داده های هواشناسی

بررسی نظام مند مطالعات انجام شده در حوزه شبیه سازی نور روز، انرژی و بهینه سازی عملکرد ساختمان نشان می دهد که چارچوب ابزارهای مورد استفاده در این عرصه، بازتابی از پیشرفت های فناوریانه، الگوهای رایج طراحی و نیازهای پژوهشی نوظهور است. تحلیل داده ها آشکار می سازد که برخی ابزارها به دلیل دقت محاسباتی بالا، توانایی ارزیابی شاخص های پیشرفته و قابلیت هم راستایی با استانداردهای بین المللی، جایگاهی محوری در تحقیقات به دست آورده اند، در حالی که دسته ای دیگر، به دلیل سادگی رابط کاربری و سرعت پردازش، عمدتاً در پروژه های عملیاتی و مطالعات اولیه ترجیح داده شده اند. در این میان، رادیانس با 40 درصد فراوانی، نه تنها پرکاربردترین ابزار شبیه سازی نور روز است، بلکه به دلیل دقت در محاسبات رادیوسیت و پشتیبانی از معیارهایی چون sDA، ASE، DGP و DF، به عنوان مرجع استاندارد در ارزیابی کیفیت نور روز شناخته می شود. با این حال، پیچیدگی فنی آن سبب شده است تا در اغلب موارد از طریق رابط های کاربرپسند نظیر هانی بی، لیدی باگ و دیوا به کار گرفته شود.

در حوزه مدل سازی پارامتریک، ترکیب گرس هاپر با هانی بی، لیدی باگ و رادیانس که در بخشی قابل توجه از مقالات مشاهده شده، رویکردی جامع برای تحلیل همزمان نور روز، انرژی و بهینه سازی طراحی ایجاد کرده است. انرژی پلاس با 19 درصد کاربرد، عمدتاً برای شبیه سازی بارهای حرارتی و سرمایشی و ارزیابی آسایش حرارتی مورد استفاده قرار گرفته و اغلب از طریق هانی بی

یا اپن استودیو اجرا شده است. ابزارهای ترکیبی نظیر دیزاین بیلدر (9 درصد) با قابلیت ادغام رادیانس و انرژی-پلاس و دی سیم با رویکرد شبیه سازی پویا مبتنی بر اقلیم، جایگاه مهمی در مطالعات با ماهیت کاربردی تر و تحلیل های اقلیمی یافته اند.

الگوهای استفاده از ابزارها دو رویکرد غالب را نمایان می سازد: رویکرد نخست، مبتنی بر مدل سازی پارامتریک و تحلیل پیچیده است که در آن گرس هاپر به عنوان هسته مرکزی، با پلاگین هایی چون هانی بی و لیدی باگ و ابزارهای بهینه سازی مانند اکتاپوس و والاسی ترکیب می شود و امکان تحلیل های چندهدفه، از جمله بهینه سازی همزمان مصرف انرژی و بهبود دسترسی به نور روز را فراهم می سازد. رویکرد دوم، استفاده از ابزارهای مستقل و ساده تری چون دیزاین بیلدر، ولوکس دیلایت و یژوالایزر است که به دلیل کاهش زمان محاسبات و نیاز کمتر به دانش فنی پیشرفته، برای پروژه های اولیه یا با محدودیت منابع انسانی و سخت افزاری، گزینه ای مناسب به شمار می رود. در این میان، ترکیب چهارگانه گرس هاپر + هانی بی + رادیانس + انرژی پلاس، به عنوان الگوی تحلیلی جامع و همسو با الزامات استانداردهایی چون لید، برییم²⁵ و استاندارد اروپا 17037، قابلیت تحلیل یکپارچه نور روز و انرژی را در سطح پیشرفته ارائه کرده است. لیدی باگ با تمرکز بر تحلیل داده های اقلیمی مبتنی بر فایل های آب و هوایی (EPW)²⁶، مکمل مهمی در این ترکیب بوده و ابزارهای تخصصی نظیر ژن بی اس دی اف²⁷ و ال بی ان ال ویندوز²⁸

کمتری در مقالات بررسی شده دارند. این یافته‌ها بیانگر تمرکز عمده پژوهش‌ها بر نور و دید بصری است و توجه به جنبه‌های فیزیولوژیکی یا حرارتی نور کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول 13- توزیع موضوعی مطالعات نور روز در فضاهای آموزشی

Tab. 13 – Thematic Distribution of Daylight Studies in Educational Spaces

موضوع	تعداد مطالعات	درصد از کل مقالات
آسایش بصری	140	93 درصد
آسایش حرارتی	24	16 درصد
عملکرد انرژی	79	53 درصد
تأثیرات غیربصری	26	17 درصد

بررسی نظام‌مند 150 مطالعه منتشرشده در حوزه نور روز در فضاهای آموزشی نشان می‌دهد که آسایش بصری با سهم برجسته 93 درصد (140 مطالعه) جایگاه مسلط را در ادبیات علمی نور روز در فضاهای آموزشی به خود اختصاص داده است. این برتری را می‌توان به چند عامل بنیادین نسبت داد: نخست، ماهیت سنجش‌پذیر و استانداردشده شاخص‌های بصری نظیر شدت روشنایی، یکنواختی توزیع نور و شاخص خیرگی که امکان ارزیابی کمی دقیق و مقایسه‌پذیر را فراهم می‌آورد؛ دوم، هم‌راستایی این شاخص‌ها با الزامات طراحی معماری و مقررات ملی و بین‌المللی ساختمان و سوم، دسترسی گسترده به ابزارهای شبیه‌سازی پیشرفته که قابلیت پیش‌بینی رفتار نور روز را در شرایط اقلیمی و فضایی متنوع ایجاد می‌کنند. هم‌افزایی این سه بُعد فنی، مقرراتی و ابزاری باعث شده مطالعات این حوزه نه تنها از نظر کمیت، بلکه از حیث عمق تحلیلی نیز در موقعیتی غالب قرار گیرند.

در مقابل، تأثیرات غیربصری نور روز تنها در 17 درصد از مقالات (26 مطالعه) مورد بررسی قرار گرفته است. این حوزه که به اثرات نور روز بر ریتم شبانه‌روزی، ترشح ملاتونین وضعیت خلق‌وخو و کارکرد شناختی می‌پردازد، در سطح جهانی به‌عنوان حوزه‌ای نوظهور و میان‌رشته‌ای شناخته می‌شود. سهم پایین آن در مجموعه مطالعات حاضر، علاوه بر آشکارسازی شکاف دانشی، بیانگر

نیز در مطالعات پیشرفته برای مدل‌سازی دقیق خواص نوری و تحلیل خیرگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، استفاده بسیار محدود از ابزارهای تحلیل آسایش حرارتی مانند سی‌بی‌ای²⁹ و ووفی پلاس، شکاف معناداری را در ادغام کامل تحلیل‌های نور، انرژی و آسایش حرارتی نمایان می‌سازد.

روندهای نوظهور در این حوزه، بیانگر حرکت به سمت مدل‌سازی پارامتریک پیشرفته، بهینه‌سازی چندهدفه و بهره‌گیری از رویکردهای داده‌محور است. استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مانند NSGA-II، سگا-کیو همچنین ورود ابزارهای یادگیری ماشین نظیر پای‌تورچ³⁰ و اپتونا به بدنه مطالعات اخیر، نشان‌دهنده تلاش برای پیش‌بینی هوشمند عملکرد ساختمان و بهینه‌سازی خودکار فرایند طراحی است. نقش پایتون به عنوان بستری برای توسعه و پیاده‌سازی الگوریتم‌های بهینه‌سازی و یادگیری ماشین نیز در حال تقویت است. در عین حال، بسامد پایین به‌کارگیری ابزارهای تحلیل اقلیمی مانند کلایمت کانسلانت و پایگاه/مولد داده متانورم نشان می‌دهد که اغلب مطالعات تحلیل اقلیم را در بستر هانی‌بی/لیدی‌باگ و با فایل‌های آب‌وهوایی متداول پیش برده‌اند؛ از این رو مسئله اصلی نه فقدان ابزار، بلکه نیاز به داده‌های استاندارد و شفاف با پوشش مکانی گسترده، فراداده کامل و رویه‌های اعتبارسنجی برای افزایش دقت و مقایسه‌پذیری نتایج است.

3-4- گرایش‌ها و شاخص‌های پژوهش

1-4-3- توزیع موضوعی مطالعات

تحلیل 150 مقاله بررسی‌شده نشان می‌دهد که آسایش بصری با 140 مطالعه، بیشترین تمرکز پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده است و تقریباً 93 درصد کل مقالات را شامل می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت ارزیابی نور روز و کیفیت روشنایی داخلی در مطالعات معماری و طراحی پایدار است (جدول 13). موضوع عملکرد انرژی نیز با 79 مطالعه (53 درصد مقالات) دومین حوزه پراهمیت است که نشان‌دهنده توجه به مصرف انرژی و بهینه‌سازی ساختمان‌ها در کنار آسایش کاربران است. در مقابل، آسایش حرارتی با 24 مطالعه (16 درصد) و تأثیرات غیر بصری نور روز با 26 مطالعه (17 درصد) سهم

چالش‌های روش‌شناختی و اجرایی در سنجش متغیرهای فیزیولوژیکی و روان‌شناختی در شرایط واقعی است؛ مسائلی که مستلزم همکاری نزدیک میان رشته‌های معماری، طراحی نور، علوم اعصاب و پزشکی هستند.

عملکرد انرژی با سهم 53 درصد (79 مقاله) جایگاه دوم را به خود اختصاص داده است. پرننگی این موضوع را می‌توان به نگرانی‌های فزاینده جهانی نسبت به تغییرات اقلیمی، سیاست‌های کاهش مصرف انرژی و گسترش رویکردهای طراحی پایدار نسبت داد. با این حال، در بخش قابل توجهی از این مطالعات، نور روز بیشتر به عنوان ابزاری برای کاهش مصرف انرژی الکتریکی مدنظر قرار گرفته تا به عنوان یک هدف طراحی مستقل. چنین رویکردی، هرچند از منظر سیاست‌گذاری محیطی ارزشمند است، اما خطر تقلیل ملاحظات انسانی و کیفی به رویکردی صرفاً مهندسی را در پی دارد. آسایش حرارتی نیز تنها در 16 درصد (24 مقاله) مطالعات حضور یافته است. این کم‌توجهی در حالی است که تعامل تابش خورشید با شرایط حرارتی، از ایجاد نقاط داغ موضعی تا نوسانات دمایی ناشی از تغییرات زاویه و شدت تابش در محیط‌های آموزشی کاملاً ملموس است. احتمالاً پیچیدگی‌های مدل‌سازی همزمان شاخص‌های بصری و حرارتی، همراه با گرایش غالب پژوهش‌های نور روز به حوزه‌های بصری، این کاستی را توضیح می‌دهد.

برآیند این نتایج، بازتاب‌دهنده شکافی پژوهشی با ماهیتی دووجهی است: نخست، تمرکز زیاد بر ابعاد مرتبط با آسایش بصری و تا حدودی عملکرد انرژی و دوم، غیبت نسبی و برجسته‌بودن خلأ در حوزه‌های غیربصری و حرارتی. چنین نامتوازنی موجب شده است که بخش قابل توجهی از راهکارهای طراحی ارائه‌شده، علی‌رغم بهینگی از منظر شاخص‌های بصری و مصرف انرژی، فاقد پشتوانه داده‌ای کافی در ارزیابی جامع سلامت انسان و پایداری محیطی باشند. تداوم این وضعیت، ضرورت گذار به رویکردهای پژوهشی یکپارچه را برجسته می‌سازد؛ رویکردهایی که ترکیبی از سنجش‌های کمی و کیفی، پایش مستقیم شاخص‌های فیزیولوژیک در شرایط واقعی و به‌کارگیری شبیه‌سازی‌های چندبعدی را در بر گیرند تا چارچوبی

مبتنی بر شواهد برای تحلیل جامع، متوازن و کاربردی اثرات نور روز در فضاهای آموزشی فراهم آید.

2-4-3- توزیع شاخص‌های ارزیابی نور روز

تحلیل 150 مقاله بررسی‌شده نشان می‌دهد که شاخص‌های روشنایی روز با فراوانی متفاوت در مطالعات مورد استفاده قرار گرفته‌اند (جدول 14). بیشترین کاربرد مربوط به شدت روشنایی با 66 تکرار است که معادل 44 درصد مقالات می‌شود و به عنوان شاخص پایه‌ای و مرجع در تحلیل‌های نور روز به کار رفته است. پس از آن، روشنایی مفید نور روز (UDI) با 51 تکرار و فاکتور نور روز (DF) با 46 تکرار، به ترتیب در 33 و 30 درصد مقالات دیده می‌شوند و تمرکز بر میزان بهره‌وری نور روز در فضا را نشان می‌دهند. کفایت فضایی نور روز (sDA) با 42 تکرار و احتمال خیرگی ناراحت‌کننده (DGP) با 32 تکرار، معادل 28 و 21 درصد مقالات، بیانگر توجه پژوهش‌ها به توزیع نور و آسایش بصری کاربران است. تابش مستقیم سالانه (ASE) با 31 تکرار و نسبت یکنواختی نور (U_o) با 28 تکرار، کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند و نشان‌دهنده توجه نسبی به یکنواختی و تابش مستقیم نور است. همچنین، کفایت نور روز (DA) با 23 تکرار و شاخص‌های زیستی نور روز با 9 تکرار، کمترین فراوانی را دارند و این موضوع محدود بودن مطالعات مرتبط با اثرات غیربصری و ریتم شبانه‌روزی نور را نشان می‌دهد.

تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که ارزیابی نور روز در ادبیات علمی موجود همچنان به شدت متکی بر شاخص‌های سنتی، ایستا و عمدتاً بصری است، در حالی که شاخص‌های پویا و به‌ویژه شاخص‌های زیستی سهم ناچیزی در پژوهش‌ها دارند. شدت روشنایی با 66 مورد (44 درصد) همچنان جایگاه غالب دارد؛ جایگاهی که بیش از هر چیز ناشی از سهولت برداشت، سازگاری با تجهیزات سنجش متداول و تثبیت در آیین‌نامه‌های ملی و بین‌المللی است. با این حال، اتکای بیش‌ازحد به این معیار تک‌بعدی می‌تواند به ساده‌سازی بیش از اندازه رفتار پیچیده نور روز انجامیده و ظرفیت پیش‌بینی کیفیت محیط و تجربه کاربر را محدود کند.

پژوهش‌ها همچنان بیشتر بر کمیت نور باقی مانده تا تجربه ادراکی یکپارچه.

در انتهای طیف، شاخص‌های زیستی مرتبط با نور روز تنها در 9 مطالعه (6 درصد) به کار رفته است؛ این در حالی است که شواهد علمی دو دهه اخیر نقش تعیین‌کننده نور روز را در تنظیم ریتم شبانه‌روزی، ترشح هورمون‌ها، عملکرد شناختی و سلامت روان-جسمی به‌وضوح اثبات کرده‌اند. این خلأ پژوهشی می‌تواند به طراحی‌هایی منجر شود که از منظر انرژی و آسایش بصری بهینه هستند اما پاسخ‌گوی کامل نیازهای فیزیولوژیک کاربران نیستند.

در مجموع، الگوی مشاهده‌شده نشان‌دهنده یک عدم توازن ساختاری در انتخاب شاخص‌هاست: غلبه معیارهای ساده و سنتی، حضور محدود شاخص‌های پویا و غیبت تقریباً کامل شاخص‌های زیستی. پر کردن این شکاف مستلزم توسعه رویکردهای یکپارچه‌ای است که معیارهای چندبعدی را در هم ادغام کرده و داده‌های بصری، حرارتی و زیستی را هم‌زمان در فرایند ارزیابی وارد کنند. چنین گذار مفهومی می‌تواند زمینه‌ساز افزایش دقت ارزیابی کیفیت نور روز و ارتقای طراحی فضاهای آموزشی به‌گونه‌ای شود که به‌طور هم‌زمان پاسخ‌گوی بهره‌وری انرژی، آسایش بصری و سلامت بلندمدت کاربران باشند.

5-3- توزیع راهکارهای معماری و فناوری‌های کنترل نور روز

بررسی مقالات منتخب نشان داد که در حوزه کنترل و بهینه‌سازی نور روز، طیف گسترده‌ای از راهکارهای معماری و فناوری مورد استفاده قرار گرفته است (جدول 15). بیشترین فراوانی به طراحی و تنظیم پنجره‌ها اختصاص دارد (82 مورد) که شامل بهینه‌سازی نسبت پنجره به دیوار/کف و بهره‌گیری از انواع شیشه‌ها با ویژگی‌های نوری متفاوت (از شیشه‌های تک‌لایه تا الکتروکرومیک و منشوری) است. این رویکرد به‌طور مستقیم در کاهش خیرگی و مصرف انرژی مؤثر بوده است. در جایگاه دوم، سایه‌بان‌ها و لوورها با 49 مورد قرار دارند که عمدتاً برای کنترل تابش مستقیم و گرمای

جدول 14- شاخص‌های نور روز بررسی‌شده در مطالعات

Tab. 14 – Daylight Metrics used in Studies

شاخص‌ها	تعداد تکرار	درصد از کل مقالات
شدت روشنایی (Illuminance)	66	44 درصد
فاکتور نور روز Daylight Factor (DF)	46	30 درصد
نسبت یکنواختی Uniformity Ratio (U_0)	28	18 درصد
روشنایی مفید نور روز Useful Daylight Illuminance (UDI)	51	33 درصد
احتمال خیرگی ناراحت‌کننده Discomfort Glare Probability (DGP)	32	21 درصد
کفایت نور روز Daylight Autonomy (DA)	23	14 درصد
کفایت فضایی نور روز Spatial Daylight Autonomy (sDA)	42	28 درصد
تابش مستقیم سالانه Annual Sunlight Exposure (ASE)	31	20 درصد
شاخص‌های زیستی نور روز	9	6 درصد

در رده‌های بعدی، شاخص‌های روشنایی مفید نور روز (UDI) با 51 مورد (33 درصد) و فاکتور نور روز (DF) با 46 مورد (30 درصد) قرار دارند. پایداری حضور DF علی‌رغم محدودیت‌های شناخته‌شده‌اش مانند ماهیت ایستا و فرض آسمان ابری استاندارد CIE، بیانگر اینرسی علمی و اجرایی در گذار به شاخص‌های پویاتر است. شاخص‌های پویا نظیر DA (14 درصد) و sDA (28 درصد) که تغییرات زمانی-مکانی نور را بازتاب می‌دهند، هنوز فراوانی کمتری دارند؛ موضوعی که احتمالاً ناشی از پیچیدگی محاسبات، نیاز به داده‌های ساعتی و آشنایی محدود بخشی از جامعه علمی با استانداردهای جدیدی مانند نسخه 4 لیید و IES LM-83³¹ است.

شاخص تابش مستقیم سالانه (ASE) با 31 مورد (20 درصد) و احتمال خیرگی ناراحت‌کننده (DGP) با 32 مورد (21 درصد) نشان می‌دهند که کنترل خیرگی و نفوذ تابش مستقیم به‌تدریج وارد دستور کار پژوهشگران شده، اما هنوز به تکامل کافی نرسیده‌اند. در عین حال، نسبت یکنواختی (U_0) با 28 مورد، بیانگر توجه نسبی به توزیع متعادل روشنایی است، هرچند تمرکز کلی

ناخواسته، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم، به‌کار رفته‌اند. روشنایی طبیعی و کاهش وابستگی به نور مصنوعی جهت‌گیری ساختمان (43 مورد) و مصالح بازتابنده (48 مورد) نیز از راهبردهای پرکاربرد برای بهینه‌سازی هستند.

جدول 15- راهکارهای معماری و فناوری‌های کنترل نور روز در مطالعات
Tab. 15 – Architectural Strategies and Daylight Control Technologies in Studies

راهکار معماری	جزئیات	شماره مقالات مرتبط در منابع	تعداد تکرار	توضیحات
طراحی و تنظیم پنجره‌ها	تنظیم نسبت پنجره به دیوار، نسبت پنجره به کف، شیشه تک‌لایه، دوجداره، سه‌لایه، کم‌گسیل، شفاف، رنگی، بازتابنده، الکتروکرومیک، منشوری، کلراستوری، دوطرفه، مربعی، بلند، سرتاسری، ایروژل نانویی	[4, 8, 11, 12, 17, 19, 24-26, 28, 30, 32, 33-37, 41, 42, 46, 47, 49, 51, 57, 59, 61-63, 71-74, 76, 78, 80, 82, 84, 85, 87-89, 91, 92, 97-100, 103-106, 108, 110, 111, 115, 117, 118, 121, 123-131, 133, 135, 138, 139, 141-147].	82	بهینه‌سازی نور روز، کاهش خیرگی و مصرف انرژی با تنظیم WWR/WFR، استفاده از شیشه‌های با انتقال نور متغیر
سایه‌بان‌ها و لوورها	سایه‌بان‌های افقی، عمودی، ترکیبی، ثابت یا متحرک، قفسه نوری (تخت، زاویه‌دار، منحنی)، کرکره‌های افقی/عمودی، پرده‌های ثابت/متحرک/هوشمند، لوورهای بازتاب‌دهنده، گره‌چینی، پانل‌های متخلخل، بیومیمیکری، شبکه‌ای	[4, 10, 12, 15, 27, 30, 37, 38, 40, 41, 45, 49, 52, 57, 68-70, 72, 73, 75-78, 81, 82, 84, 86, 89, 90, 105-108, 113, 114, 116, 118, 122, 128, 131-136, 138-140, 147].	49	کاهش تابش مستقیم خورشید، خیرگی و گرمای ناخواسته، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم
نورگیرهای سقفی	نورگیرهای سقفی تخت، زاویه‌دار، عمودی، نیمه‌شفاف، نسبت نورگیر به سقف، لوله‌های نوری خورشیدی	[12, 30, 41, 71, 96, 137, 148].	7	افزایش توزیع یکنواخت نور روز، مناسب برای کلاس‌های عمیق‌تر
مصالح بازتابنده	دیوارها، سقف و کف با بازتابندگی بالا، رنگ‌های روشن (سفید، زرد، سبز، بژ، پاستیلی)، کاشی نیمه‌مات، بتن نورگذر	[4, 20, 23-26, 29, 32, 36, 40, 42, 46-50, 56-58, 64-66, 70, 75, 79, 80, 87, 92, 96, 99, 101, 102, 107, 110, 111, 116, 119, 121, 126, 127, 134, 136, 139, 144, 147-149].	48	بهبود توزیع نور و کاهش نیاز به روشنایی مصنوعی
جهت‌گیری ساختمان	جهت‌گیری شمالی، جنوبی، شرقی، غربی، ترکیبی (شمال شرق، شمال غرب)	[5, 12, 25, 28, 34-39, 41, 43, 44, 46, 49, 51, 55, 56, 58, 68, 69, 76, 78, 81, 83, 84, 87, 89, 104-106, 110, 111, 114, 115, 128, 130, 131, 138, 139, 150-152].	43	بهینه‌سازی دریافت نور روز و کاهش گرمای ناخواسته بر اساس اقلیم
طراحی پلان و هندسه	پلان‌های باز، فشرده، اشکال هندسی (L, C, H, F, E, I)، آتریوم‌ها، حیاط مرکزی، عمق و ارتفاع کلاس، چیدمان‌های گروهی/تکی	[11, 36, 37, 39, 42, 47, 53, 55, 58, 73, 79, 83, 91, 99, 102, 109, 120, 137, 139, 151, 152].	20	تأثیر بر توزیع نور، تهویه طبیعی و انعطاف‌پذیری فضا
کنترل‌های خودکار	حسگرهای نور محیط و حضور افراد، سامانه‌های مدیریت هوشمند ساختمان مبتنی بر KNX، کنترل تدریجی شدت نور (Dimming)	[7, 11, 27, 30, 40, 44, 68, 77, 88, 92, 105, 111, 116, 124-126, 135, 150].	18	تنظیم روشنایی و کاهش مصرف انرژی با پاسخ به شرایط نوری و حضور کاربران



راهکار معماری	جزئیات	شماره مقالات مرتبط در منابع	تعداد تکرار	توضیحات
	کرکره‌ها و پرده‌های هوشمند، فوتودایمر (کنترل نور بر اساس شدت روشنایی محیط)، سامانه‌های الهام گرفته از طبیعت (Biomimicry Systems)، کنترلرهای متن‌باز مانند Arduino، شیشه‌ها و پوشش‌های الکتروکرومیک (تغییر شفافیت با جریان الکتریکی)			
فیلم‌ها و لایه‌های نوری	فیلم‌های منشوری، لایه‌های پخش‌کننده نور	[131, 26]	2	کاهش خیرگی و بهبود توزیع نور در کلاس‌ها
فضای سبز و طراحی خارجی	فضای سبز در نمای بیرونی، راهروهای عریض، پله‌های مارپیچ رنگی، ارتباط بصری با حیاط	[143, 47, 46, 29, 10]	5	تقویت تعامل اجتماعی و بهبود کیفیت بصری محیط
چیدمان داخلی	بازتنظیم چیدمان صندلی‌ها، میزهای فردی، حذف سقف کاذب، چیدمان گروهی، زون‌بندی فضاها	[153, 119, 111, 47, 42, 29]	6	کاهش خیرگی و افزایش انعطاف‌پذیری فضا
تهویه طبیعی	بازشوهای هدفمند، نماهای دوپوسته، تهویه مکانیکی (MVS)، پنجره‌های کشویی	[132, 131, 109, 101, 96, 37, 34, 148]	8	بهبود کیفیت هوا و تعادل حرارتی
سایر فناوری‌ها	هلیواستات تک‌محوره، دیوار جمع‌کننده حرارت خورشیدی، مکانیزم ایریس برای تنظیم گذردهی نور، پنل فتوولتائیک، بتن نورگذر، سامانه هدایت نور آنیدولیک، سامانه فتوولتائیک نیمه‌شفاف یکپارچه (BITPV)	[11, 14, 25, 41, 50, 54, 67, 73, 75, 125, 124, 115, 104, 96, 94, 93, 149, 146, 136]	18	استفاده محدود برای هدایت نور و مدیریت حرارتی

هستند که غالباً نقش تکمیلی داشته و در ترکیب با راهبردهای اصلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مرور نظام‌مند مطالعات نشان می‌دهد که بهینه‌سازی نور روز در محیط‌های آموزشی، طیفی از مداخلات کالبدی غیر فعال و فعال را در بر می‌گیرد. اگرچه این تنوع رویکردی، انعطاف‌پذیری بالای موضوع را منعکس می‌کند، اما توزیع آن‌ها حاکی از غلبه چشمگیر راهکارهای کالبدی سنتی و کم‌توجهی به فناوری‌های نوین و ترکیبی است. این عدم توازن، هم بر عمق تحلیلی مطالعات و هم بر قابلیت تعمیم نتایج تأثیرگذار بوده است.

• غلبه مداخلات کالبدی بر سایر رویکردها

راهبردهای دیگر مانند طراحی پلان و هندسه (20 مورد) و نورگیرهای سقفی (7 مورد) بیشتر در پروژه‌هایی با عمق زیاد یا نیاز به نورگیری یکنواخت در کل فضا استفاده شده‌اند. کنترلرهای خودکار (18 مورد) اگرچه کمتر از راهکارهای صرفاً معماری به کار رفته‌اند، اما با بهره‌گیری از حسگرها، سیستم‌های هوشمند و شیشه‌های با شفافیت متغیر، امکان تنظیم پویا و دقیق نور روز را فراهم می‌کنند. راهکارهای با فراوانی کمتر شامل فیلم‌ها و لایه‌های نوری، فضای سبز و طراحی خارجی، چیدمان داخلی، تهویه طبیعی و سایر فناوری‌ها (مانند هلیواستات و سامانه‌های فتوولتائیک نیمه‌شفاف)

پنجره‌ها (82 مطالعه) همچنان مهم‌ترین محور مداخلات بوده‌اند؛ چه در قالب اصلاح نسبت پنجره به دیوار³² (WWR) و نسبت پنجره به کف³³ (WFR) و چه در انتخاب انواع شیشه‌ها از تک‌لایه و دوجداره تا کم‌گسیل و الکتروکرومیک. این انتخاب منطقی است، زیرا پنجره‌ها اصلی‌ترین رابط فیزیکی میان نور روز و فضای داخلی محسوب می‌شوند. با این حال، تمرکز اغلب پژوهش‌ها صرفاً بر تحلیل هندسه و جنس شیشه بوده و ارزیابی هم‌زمان اثرات آن‌ها بر شاخص‌های شناختی، کیفیت تجربه کاربر یا شاخص‌های سلامت بسیار محدود بوده است.

سایه‌بان‌ها و لوورها (49 مطالعه) در کنترل تابش مستقیم، کاهش خیرگی و تعدیل حرارت نقش مهمی ایفا کرده‌اند. حضور نمونه‌هایی با الهام از الگوهای بومی و بیومیمیکری نشان‌دهنده تلاش برای هم‌راستا کردن عملکرد فنی با ارزش‌های فرهنگی و زیبایی‌شناختی است، اما کمبود سنجش کمی و شواهد تجربی، دامنه استدلال‌های ارائه‌شده را محدود کرده است.

• راهبردهای مکمل با نقش غیرمستقیم

مصالح بازتابنده (48 مطالعه) و جهت‌گیری ساختمان (43 مطالعه) به‌ویژه در مطالعات شبیه‌سازی‌محور، نقش کلیدی در بهبود غیرمستقیم کیفیت نور ایفا کرده‌اند. تغییر پارامترهای بازتابندگی یا تنظیم موقعیت بنا در این مطالعات اغلب به عنوان سناریوهای بهینه‌سازی تعریف شده است.

نورگیرهای سقفی (7 مطالعه) و طراحی پلان و هندسه (20 مطالعه) عمدتاً در پروژه‌هایی با محدودیت فیزیکی (عمق زیاد کلاس یا محدودیت جداره‌های شفاف جانبی) پیشنهاد شده‌اند. با وجود پتانسیل بالا، ارزیابی میدانی اثر این مداخلات بر کاربران واقعی بسیار نادر است و یافته‌ها بیشتر بر داده‌های مدل‌سازی یا شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی تکیه دارند.

• حضور کم‌رنگ فناوری‌های پویا و هوشمند

کنترل‌های خودکار شامل حسگرهای نور، سیستم‌های تنظیم نور³⁴ و کرکره‌های هوشمند (18 مطالعه) با وجود ظرفیت بالای خود برای انطباق با تغییرات محیطی و

کاهش مصرف انرژی، سهم اندکی در ادبیات بررسی‌شده داشته‌اند. اغلب این مطالعات محدود به ارزیابی فنی یا شبیه‌سازی بوده و تحلیل اثرات این فناوری‌ها بر آسایش ادراکی و عملکرد شناختی کاربران به ندرت انجام شده است.

• رویکردهای نوآورانه و کم‌کاربرد

فیلم‌ها و لایه‌های نوری، فضای سبز و طراحی خارجی، چیدمان داخلی و تهویه طبیعی در مجموع سهم اندکی داشته است. این مداخلات هرچند از منظر ارتقای تجربه ادراکی، کاهش خیرگی و بهبود کیفیت دیداری پتانسیل بالایی دارند، اما شواهد کمی از آزمون جامع و در شرایط واقعی آن‌ها در دسترس است.

شکل غالب ادبیات موجود نشان می‌دهد که بیشتر مداخلات به صورت منفرد و عمدتاً در حوزه کالبدی بررسی شده‌اند و استفاده از ترکیب‌های هم‌زمان و یکپارچه معماری - فناوری نادر است. همچنین، وابستگی شدید به داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری فیزیکی، و غیبت گسترده سنجش شاخص‌های انسانی (عملکرد شناختی، خستگی بصری، نشانگرهای فیزیولوژیک) موجب شده است که بسیاری از نتایج فاقد پشتوانه انسانی مستقیم باشند. این خلأ، به‌ویژه در ارزیابی اثر نور روز بر یادگیری و تمرکز، محدودیتی اساسی ایجاد می‌کند.

در نتیجه، مسیر آینده پژوهش در این حوزه باید بر توسعه و ارزیابی راهبردهای چندبعدی و ترکیبی متمرکز شود؛ راهکارهایی که تنظیمات کالبدی، کنترل‌های هوشمند، مصالح نوین و طراحی تعاملی را با سنجش هم‌زمان شاخص‌های فیزیکی و انسانی ادغام می‌کنند. چنین رویکردی می‌تواند نه تنها کیفیت نور روز، بلکه عملکرد شناختی، آسایش و سلامت پایدار کاربران در فضاهای آموزشی را به شکل معناداری ارتقا دهد.

4- نتیجه‌گیری

مرور نظام‌مند حاضر نشان داد که پژوهش‌های نور روز در فضاهای آموزشی، اگرچه از نظر کمی و تنوع روش‌شناختی پیشرفت قابل‌توجهی داشته‌اند، اما با چالش‌های ساختاری و شکاف‌های پژوهشی مهمی مواجه

در اقلیم‌های کمتر مطالعه‌شده (مانند اقلیم‌های سرد، بیابانی سرد و استوایی مرطوب) انجام شود. ایجاد کنسرسیوم‌های منطقه‌ای برای تبادل داده‌های اقلیمی و توسعه پایگاه‌های داده استاندارد (مانند فایل‌های EPW بومی) می‌تواند این روند را تسهیل کند.

- توسعه شاخص‌های زیستی و پویا: تحقیقات آینده باید بر ادغام شاخص‌های زیستی (مانند تأثیر نور روز بر ریتم شبانه‌روزی و عملکرد شناختی) و معیارهای پویا تمرکز کنند. استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند EEG، fNIRS و Eye-tracking برای سنجش اثرات نور روز بر کاربران در شرایط واقعی، می‌تواند شواهد علمی دقیق‌تری ارائه دهد.

- تقویت مطالعات میدانی: افزایش سهم مطالعات میدانی، به‌ویژه در فضاهای متنوع آموزشی (مانند مهدکودک‌ها و مدارس دینی) و ترکیب آن‌ها با داده‌های شبیه‌سازی، می‌تواند اعتبار عملیاتی نتایج را بهبود بخشد و از ساده‌سازی بیش‌ازحد واقعیت‌ها جلوگیری کند.

- ادغام فناوری‌های هوشمند و ترکیبی: تحقیقات آینده باید بر ارزیابی مداخلات ترکیبی تمرکز کنند تا راهکارهای انعطاف‌پذیر و اقلیم‌محور ارائه شود. این امر نیازمند توسعه چارچوب‌های شبیه‌سازی یکپارچه است که نور روز، انرژی و آسایش حرارتی را به‌صورت هم‌زمان تحلیل کنند.

- رویکردهای چندرشته‌ای و داده‌محور: بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و بهینه‌سازی چندهدفه (مانند NSGA-II) در کنار همکاری میان‌رشته‌ای با حوزه‌های علوم اعصاب، روان‌شناسی و پزشکی، می‌تواند به پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد فضاها و طراحی‌های مبتنی بر شواهد منجر شود.

- توجه به تنوع فرهنگی و سنی: تحقیقات آینده باید نیازهای نوری فضاهای آموزشی متنوع (مانند مدارس دینی و مهدکودک‌ها) را با در نظر گرفتن تفاوت‌های فرهنگی و سنی بررسی کنند تا راهکارهای طراحی فراگیرتری ارائه شود.

هستند. توزیع نابرابر جغرافیایی مطالعات، با تمرکز بر اقلیم‌های گرم و مرطوب و کمبود داده از اقلیم‌های سرد و خاص، به همراه غلبه شاخص‌های بصری سنتی و کم‌توجهی به معیارهای زیستی و پویا، تصویری از یک حوزه علمی نامتوازن ارائه می‌دهد. این عدم توازن در کنار وابستگی بیش‌ازحد به ابزارهای شبیه‌سازی و فقدان نسبی مطالعات میدانی و استفاده از روش‌های پیشرفته پایش عصبی - فیزیولوژیک، توانایی ادبیات موجود را در ارائه راهکارهای جامع و اقلیم‌محور برای طراحی فضاهای آموزشی محدود کرده است. از منظر مداخلات معماری، پنجره‌ها، سایه‌بان‌ها و مصالح بازتابنده همچنان غالب هستند، در حالی که فناوری‌های پویا و هوشمند و رویکردهای ترکیبی به‌ندرت مورد توجه قرار گرفته‌اند. این الگوها نشان‌دهنده نیاز مبرم به رویکردهای یکپارچه‌تر است که نه‌تنها آسایش بصری و بهره‌وری انرژی، بلکه اثرات غیربصری نور روز بر سلامت و عملکرد شناختی را نیز در بر گیرند.

نور روز در فضاهای آموزشی فراتر از یک ابزار برای کاهش مصرف انرژی یا بهبود آسایش بصری، عنصری کلیدی در ارتقای سلامت جسمی و روانی، عملکرد شناختی و پایداری محیطی است. با این حال، تمرکز کنونی پژوهش‌ها بر شاخص‌های سنتی و اقلیم‌های پرمطالعه، همراه با کم‌توجهی به تنوع فرهنگی، سنی و اقلیمی، خطر ارائه راهکارهای غیرمتناسب و ناکارآمد را افزایش می‌دهد. دستیابی به طراحی‌های پایدار و انسان‌محور در فضاهای آموزشی نیازمند گذار به چارچوب‌های پژوهشی چندرشته‌ای و چندبعدی است که داده‌های اقلیمی، شبیه‌سازی‌های پیشرفته، سنجش‌های میدانی و پایش شاخص‌های زیستی را به‌صورت هم‌زمان ادغام کنند. این گذار نه‌تنها به توسعه استانداردهای جهانی عادلانه‌تر کمک می‌کند، بلکه عدالت محیطی را در طراحی فضاهای آموزشی تضمین می‌کند.

بر این اساس، پیشنهادی زیر با هدف رفع شکاف‌های شناسایی‌شده و جهت‌دهی به مسیر پژوهش‌های آینده ارائه می‌شوند:

- گسترش پوشش جغرافیایی و اقلیمی: برای کاهش شکاف جغرافیایی، لازم است پژوهش‌های بیشتری

Abdelhakim, M., Lim, Y. W., & Kandar, M. Z. (2019). Optimum glazing configurations for visual performance in Algerian classrooms under mediterranean climate. *Journal of Daylighting*, 6(1), 11-22.

<http://dx.doi.org/10.15627/jd.2019.2>. [106]

Adel Ahmed Mahmoud, M., Dorra, M., Nassar, K., Hassan El Hakea, A., & Shaltot, M. (2021). Optimum daylighting and thermal comfort simulation framework for school buildings in hot arid climate. In *Building Simulation 2021* (Vol. 17, pp. 2929-2937). IBPSA. <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.31132>. [28]

Affa Nur, Y., Yoon, G., & Sato, T. (2022). Energy savings for a junior high school classroom that actively uses daylighting and sensitivity study on the effect of the building envelope thermal performance. *Japan Architectural Review*, 5(4), 609-620.

[https://doi.org/10.1002/2475-](https://doi.org/10.1002/2475-8876.12281?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle)

[8876.12281?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle](https://doi.org/10.1002/2475-8876.12281?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle). [92]

Aghamohammadiha, S., & Dehghan, N. (2024). Optimum geometry of double-skin self-shading facade of classrooms with the aim of creating energy saving and visual comfort in Isfahan Province, Iran. *Journal of Daylighting*, 11(2), 372-390.

<https://dx.doi.org/10.15627/jd.2024.25>. [93]

Ahmed, E. B. (2021). Utilizing dynamic shading system to achieve daylight performance according to LEED standards V. 4: case study, university classrooms in Egypt. *HBRC Journal*, 17(1), 177-200.

<https://doi.org/10.1080/16874048.2021.1920138>. [77]

Ali Al-Rudainy, A. S., & Raoof Mahjoob, A. M. (2024). Using building information modelling to optimise design quality of natural lighting in Iraqi school buildings. *Organization, technology & management in construction: an international journal*, 16(1), 52-62. <https://hrcak.srce.hr/file/464071>. [141]

Alkhatatbeh, B. J., Kurdi, Y., & Asadi, S. (2023). Enhancing learning Environments: Exploring optimal classroom design connected to Double-Loaded corridors across the US Climate zones. *Energy and Buildings*, 298, 113562. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113562>. [63]

• توسعه استانداردها و دستورالعمل‌های بومی: ایجاد شاخص‌ها و استانداردهای بومی‌سازی‌شده برای اقلیم‌های مختلف و تقویت پیوند میان پژوهش‌های علمی و آیین‌نامه‌های طراحی، می‌تواند به کاهش تعارض میان استانداردهای جهانی (مانند لیید) و نیازهای محلی کمک کند.

این پیشنهادات، با هدف پر کردن شکاف‌های شناسایی‌شده و ارتقای کیفیت طراحی فضاهای آموزشی، مسیری برای پژوهش‌های آینده ترسیم می‌کنند که نه تنها به پایداری محیطی، بلکه به سلامت و بهره‌وری کاربران نیز توجه ویژه‌ای دارند.

پی‌نوشت

¹ Daylight

² Scopus

³ Web of Science

⁴ EndNote

⁵ DOI (Digital Object Identifier)

⁶ ASySD (Automated Systematic Search Deduplicator)

⁷ Rayyan

⁸ Köppen–Geiger Climate Classification System

⁹ Likert scale

¹⁰ Sustainable Post-Occupancy Evaluation Survey (SPOES)

¹¹ Daylighting Knowledge in Europe (DAYKE)

¹² Visual Analogue Scales (VAS)

¹³ Visual Light Sensitivity Test (VLS)

¹⁴ Balsam Alabdulkader-Leat

¹⁵ IVS-201A Perimeter

¹⁶ Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for salivary cortisol (ELISA)

¹⁷ Autorefractor

¹⁸ Intraocular Lens Master (IOL Master)

¹⁹ Snellen chart

²⁰ Electroencephalography

²¹ Functional Near-Infrared Spectroscopy

²² Eye-Tracking Technology

²³ Heart Rate Variability

²⁴ NSGA-II: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

²⁵ BREEAM

²⁶ EnergyPlus Weather (EPW)

²⁷ genBSDF

²⁸ LBNL Window

²⁹ CBE Thermal Comfort Tool

³⁰ PyTorch

³¹ Illuminating Engineering Society (IES)

³² Window-to-Wall Ratio (WWR)

³³ Window-to-Floor Ratio (WFR)

³⁴ Dimming Systems

References



Communication Systems (ICACCS) (Vol. 1, pp. 2365-2370). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICACCS57279.2023.10112984>. [58]

Apriliawan, I., Fadhila, N. S., & Alkadri, M. F. (2023). Implementation of light shelves and WWR to improve daylight performance in university classroom. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1267, No. 1, p. 012028). IOP Publishing.
doi:10.1088/1755-1315/1267/1/012028. [139]

Aritonang, S. R., Mangkuto, R. A., Atthailah, & Prasetyo, I. (2025). Daylighting Design Optimization of Complex Fenestration Systems with External Shading and Horizontal Slats in Tropical Elementary School Classrooms. *Journal of Architectural Engineering*, 31(1), 04025001.
<https://doi.org/10.1061/JAEIED.AEENG-1894>. [70]

Arquimbau, A. L. D. R. G., & Arranz, B. A. (2020). Comprehensive Evaluation of Daylighting, Air Quality and Thermal Comfort as Renovation Impact in a Madrid Classroom. *In Planning Post Carbon Cities: 35th PLEA Conference on Passive and Low Energy Architecture, A Coruña, 1st-3rd September 2020: Proceedings* (pp. 163-168). Universidade da Coruña.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8170049>. [30]

Ashrafian, T., & Moazzen, N. (2019). The impact of glazing ratio and window configuration on occupants' comfort and energy demand: The case study of a school building in Eskisehir, Turkey. *Sustainable Cities and Society*, 47, 101483.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101483>. [117]

Atthailah, A., Mangkuto, R. A., Koerniawan, M. D., Hensen, J. L., & Yuliarto, B. (2022). Optimization of daylighting design using self-shading mechanism in tropical school classrooms with bilateral openings. *Journal of Daylighting*, 9(2), 117-136.
<https://dx.doi.org/10.15627/jd.2022.10>. [56]

Atthailah, A., Mangkuto, R. A., Subramaniam, S., & Yuliarto, B. (2024). Daylighting design validation and optimisation of tropical school classrooms with asymmetrical bilateral opening typology. *Indoor and Built Environment*, 33(3), 551-570.
<https://doi.org/10.1177/1420326X231204513>. [89]

Alkhatatbeh, B. J., Kurdi, Y., & Asadi, S. (2023). Multi-objective optimization of classrooms' daylight performance and energy use in US Climate Zones. *Energy and Buildings*, 297, 113468.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113468>. [62]

AL-Mowallad, E. A. M. S., & Li, X. (2023). The Influence of Glazing types on improving daylight factor and reducing glare in classrooms based on numerical simulations. *In 2023 8th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP)* (pp. 575-579). IEEE.
doi: 10.1109/ICSP58490.2023.10248889. [85]

AL-Mowallad, E. A. M. S., Huang, X., Lu, Z., Li, X., Wu, K., Zhu, Z., & Liu, G. (2024). Assessment and Improvement of Daylighting Quality in Classrooms with Double-Side Windows. *Buildings*, 14(11), 3501.
<https://doi.org/10.3390/buildings14113501>. [4]

Alwetaishi, M., & Benjeddou, O. (2021). Impact of window to wall ratio on energy loads in hot regions: A study of building energy performance. *Energies*, 14(4), 1080.
<https://doi.org/10.3390/en14041080>. [35]

Alwetaishi, M., Al-Khatiri, H., Benjeddou, O., Shamseldin, A., 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>. [27]

Alwi, N. M., Flor, J. F., Anuar, N. H., Mohamad, J., Hanafi, N. N. H., Muhammad, N. H., ... & Nasir, M. R. M. (2022). Retrofitting measures for climate resilience: Enhancing the solar performance of Malaysian school buildings with passive design concepts. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1102, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
doi:10.1088/1755-1315/1102/1/012014. [133]

Andersen, M., Mardaljevic, J., & Lockley, S. W. (2012). A framework for predicting the non-visual effects of daylight-Part I: photobiology-based model. *Lighting research & technology*, 44(1), 37-53.
<https://doi.org/10.1177/1477153511435961>. [1]

Aneja, A. (2023). Improving Efficient Daytime Luminance and Improvement of Daylight Feasibility Using Google Net Convolutional Neural Network. *In 2023 9th International Conference on Advanced Computing and*



performance in European schoolchildren. *International journal of environmental research and public health*, 18(1), 258.
<https://doi.org/10.3390/ijerph18010258>. [8]

Bian, Y., Chen, Y., Luo, J., & Sun, Y. (2023). Contrast-based evaluation of the reflected daylight glare on the blackboard in a classroom with complex fenestration systems. *Journal of Building Engineering*, 64, 105622.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105622>. [60]

Bian, Y., Chen, Y., Sun, Y., Ma, Y., Yu, D., & Leng, T. (2023). Simulation of daylight availability, visual comfort and view clarity for a novel window system with switchable blinds in classrooms. *Building and Environment*, 235, 110243.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110243>. [61]

Bian, Y., Luo, J., Luo, T., & Leng, T. (2022). Contrast demand on the blackboard in typical secondary school classrooms of China: Effects of daylight reflections on text legibility. *Energy and Buildings*, 261, 111974 .
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111974>. [15]

Boutet, M. L., & Hernández, A. L. (2021). Generic proposal for the determination of optimal glazed areas for school buildings in the Northeast Region of Argentina. *Energy and Buildings*, 243, 110988.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110988>. [79]

Boutet, M. L., Hernández, A. L., & Jacobo, G. J. (2020). Methodology of quantitative analysis and diagnosis of hicro-thermal and lighting monitoring for school buildings in a hot-humid mid-latitude climate. *Renewable energy*, 145, 2463-2476.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.009>. [37]

Brembilla, E., Drosou, N. C., & Mardaljevic, J. (2022). Assessing daylight performance in use: A comparison between long-term daylight measurements and simulations. *Energy and Buildings*, 262, 111989.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111989>. [54]

Cabeza-Lainez, J., Almodovar-Melendo, J. M., & Dominguez, I. (2019). Daylight and architectural simulation of the Egebjerg School (Denmark):

Atthailah, Mangkuto, R. A., & Koerniawan, M. D. (2022). Investigation of direct sunlight in existing classroom design in indonesia: case study of Lhokseumawe. In *Advances in Civil Engineering Materials: Selected Articles from the International Conference on Architecture and Civil Engineering (ICACE2021)* (pp. 135-144). Singapore: Springer Nature Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-16-8667-2_16. [138]

Atthailah, Mangkuto, R. A., Koerniawan, M. D., & Yuliarto, B. (2022). On the interaction between the depth and elevation of external shading devices in tropical daylit classrooms with symmetrical bilateral openings. *Buildings*, 12(6), 818.
<https://doi.org/10.3390/buildings12060818>. [81]

Atthakorn, S. (2021). Natural light reception in semi-open halls for sustainability: A case study of educational buildings in suburban Bangkok. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies (JARS)*, 18 (1), 153-169. . [102]

Ávila-Zamora, A., & Murillo-Quirós, N. (2020). Effect of light distribution in a scale model due to different light shelves. *Tecnología en marcha*, 33(Escuela), 17-25.
<https://www.redalyc.org/pdf/6998/699878648004.pdf>. [137]

Bae, S., Martin, C. S., & Asojo, A. O. (2021). Higher education students' indoor environmental quality satisfaction benchmark. *Building Research & Information*, 49(6), 679-694.
<https://doi.org/10.1080/09613218.2020.1813012>. [7]

Bae, S., Martin, C. S., & Asojo, A. O. (2021). Higher education students' indoor environmental quality satisfaction benchmark. *Building Research & Information*, 49(6), 679-694.
<https://doi.org/10.1080/09613218.2020.1813012>. [153]

Baja, F. D., Bajracharya, S. A. I. N. A. Z., Freeman, M. A., Gray, A. J., Haglund, B. T., Kuipers, H. R., & Opatola, O. R. (2019). Leed gold but not equal: Two case study buildings. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 14(1), 52-62. 10.2495/DNE-V14-N1-52-62. [10]

Baloch, R. M., Nichole Maesano, C., Christoffersen, J., Mandin, C., Csobod, E., de Oliveira Fernandes, E., ... & Sinfonhie Consortium. (2021). Daylight and school



Journal of Architectural Engineering, 28(2), 04022013.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000544](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000544). [25]

Dolnikova, E., Katunsky, D., Vertal, M., & Zozulak, M. (2020). Influence of roof windows area changes on the classroom indoor climate in the attic space: a case study. *Sustainability*, 12(12), 5046. doi:10.3390/su12125046. [101]

Effendy, E. J., Hakim, F. N., Mangkuto, R. A., Koerniawan, M. D., & Ramadhani, D. (2023). Daylight optimization in a hypothetical classroom using single-objective optimization methods: Case study in Lhokseumawe, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1157, No. 1, p. 012002). IOP Publishing.
doi:10.1088/1755-1315/1157/1/012002. [57]

Elzeyadi, I., & Abboushi, B. (2019). Daylighting Performance In Schools Between Simulation Predictions And Field Verifications—A Factor of Reality Analysis. In *Building Simulation 2019* (Vol. 16, pp. 4361-4368). IBPSA.
<https://doi.org/10.26868/25222708.2019.211353>. [31]

Erdemir Şendur, G., & Köknel Yener, A. (2023). Climate-responsive daylight system design for primary schools in Türkiye. *Megaron*, 18(4).
<https://doi.org/10.14744/megaron.2023.65289>. [46]

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. *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, 21(133), 5-20.
.2024.418024.5458BAGH10.22034/ :DOI. [114]

Fakhari, M., Vahabi, V., & Fayaz, R. (2021). A study on the factors simultaneously affecting visual comfort in classrooms: A structural equation modeling approach. *Energy and Buildings*, 249, 111232.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111232>. [9]

Fakıbbaba Dedeoğlu, E., & Yalçın, M. (2025). A Proposal for the Improvement of Daylight Integration and Distribution in the Educational Interior Space Through a (Pro-Sun) Ceiling

Sustainable features of a new type of skylight. *Sustainability*, 11(21), 5878.
<https://doi.org/10.3390/su11215878>. [148]

Calama-González, C. M., Suárez, R., León-Rodríguez, Á. L., & Ferrari, S. (2019). Assessment of indoor environmental quality for retrofitting classrooms with an egg-crate shading device in a hot climate. *Sustainability*, 11(4), 1078. <https://doi.org/10.3390/su11041078>. [38]

Callejas, L., Pereira, L., Reyes, A., Torres, P., & Piderit, B. (2020). Optimization of natural lighting design for visual comfort in modular classrooms: Temuco case. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 503, No. 1, p. 012007). IOP Publishing.
doi:10.1088/1755-1315/503/1/012007. [96]

Chaturvedi, P., Kumar, N., Lamba, R., & Nachan, P. (2023). Effect of building form on daylight and energy efficiency for educational building in composite climate. *International Solar Energy Society SWC 2023*, 1-11.
<https://doi.org/10.18086/swc.2023.06.03>. [64]

Chi, D. A. (2024). Design Adjustments For Daylighting and Visual Comfort in a Classroom with Conventional Shadings. *Journal of Daylighting*, 11(1), 165-180.
<https://dx.doi.org/10.15627/jd.2024.10>. [113]

Dagher, S., Akhazheya, B., & Slimani, H. (2022). Energy analysis studying the effect of solar shading on daylight factors and cooling hours in an extreme weather. *Energy Reports*, 8, 443-448.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.231>. [108]

de Ahumada, L. F., Torres-Roldán, M., Osuna-Mérida, M., Ramírez-Faz, J. C., López-Luque, R., & Varo-Martínez, M. (2022). Daylighting system based on single-axis polar heliostat. *RE&PQJ*, 20(1).
<https://doi.org/10.24084/repqj20.235>. [149]

Demozzi, G., Zaniboni, L., Pernigotto, G., & Gasparella, A. (2023). Impact of visual, thermal and indoor air quality conditions on students' wellbeing and learning performance in a primary school of Bolzano, Italy. *Building Simulation Applications BSA 2022*, 489-497.
<https://bia.unibz.it/esploro/outputs/conferenceProceeding/Impact-of-visual-thermal-and-Indoor/991006612498601241>. [34]

Diker, F., & Erkan, İ. (2022). The fuzzy logic method in assessing window design for the visual comfort of classrooms at the early design stage.



algorithm. In *Building Simulation 2023* (Vol. 18, pp. 1462-1469). IBPSA. <https://doi.org/10.26868/25222708.2023.1190>. [84]

Helaly, N. E., Abdelkader, M., Sabry, H., & Nessim, A. (2023). Evaluating Daylighting Performance Within Existing Schools Expansion in Egypt. In *International Conference on "Health & Environmental Resilience and Livability in Cities-The challenge of climate change"* (pp. 129-142). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54911-3_9. [87]

Ho, C., & Peters, T. (2024). Lighting Analyses of a University Classroom Learning Space. In *International Association of Building Physics* (pp. 365-370). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8317-5_53. [111]

Hraška, J., & Čurpek, J. (2024). The practical implications of the EN 1737 minimum target daylight factor for building design and urban daylight in several European countries. *Heliyon*, 10(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23297>. [127]

Idrus, I., Rahim, R., Hamzah, B., & Jamala, N. (2020). An Alternative Approach in Assessing Visual Comfort Based on Students' Perceptions in Daylit Classrooms in the Tropics. *Civil Engineering and Architecture*, 8(5), 801-813. DOI: 10.13189/cea.2020.080507. [6]

Indrawan, S. E., Iswanto, R., & Gondoputranto, O. (2024). Framework for Daylight Optimization Using Iris Mechanisms and Genetic Algorithms. DOI: 10.13189/cea.2024.120533. [67]

Irnawaty, I., Rahim, M. R., Hamzah, B., & Jamala, N. (2019, November). Daylight intensity analysis of secondary school buildings for environmental development. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 382, No. 1, p. 012022). IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/382/1/012022. [143]

Ishac, M., & Nadim, W. (2021). Standardization of optimization methodology of daylighting and shading strategy :a case study of an architectural design studio-the German University in Cairo, Egypt. *Journal of Building Performance Simulation*, 14(1), 52-77. <https://doi.org/10.3390/buildings14082574>. [146]

Design with Curved Surfaces. *Sustainability*, 17(3), 1096. <https://doi.org/10.3390/su17031096>. [99]

Fang, Y., Luo, X., & Lu, J. (2023). A review of research on the impact of the classroom physical environment on schoolchildren's health. *Journal of Building Engineering*, 65, 105430. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105430>. [3]
Fani, M., Sharp, N., Anaraki, M., & Shahverdi, A. F. (2023). Evaluation of the influence of interior design parameters on circadian daylighting of design-studio classrooms. In *Building Simulation 2023* (Vol. 18, pp. 221-229). IBPSA. <https://doi.org/10.26868/25222708.2023.1323>. [119]

Freewan, A. A., & Al Dalala, J. A. (2020). Assessment of daylight performance of advanced daylighting strategies in large university classrooms; case study classrooms at JUST. *Alexandria Engineering Journal*, 59(2), 791-802. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.12.049>. [75]

Galal, K. S. (2019). The impact of classroom orientation on daylight and heat-gain performance in the Lebanese Coastal zone. *Alexandria Engineering Journal*, 58(3), 827-839. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.07.003>. [128]

Guan, Y., Yan, Y., He, S., & Zhang, B. (2020). Annual Daylight Quality of Typical Classrooms in Sun-Deficient Areas. *Planning*, 15(5), 665-671. <https://doi.org/10.18280/ijssdp.150509>. [43]

Hajji, A. M., Satria, S. Y., & Alfianto, I. (2024). The Analysis of Natural Lighting-based Visual Comfort for Classrooms Building by Using Velux Daylight Visualizer. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 576, p. 05002). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202457605002>. [95]

Hakim, F. N., Muhamadinah, Y., Mangkuto, R. A., & Sudarsono, A. S. (2021). Building Envelope Design Optimization of a Hypothetical Classroom Considering Energy Consumption, Daylight, and Thermal Comfort: Case Study in Lhokseumawe, Indonesia. *International Journal of Technology*, 12(6). <https://dx.doi.org/10.14716/IJTECH.V12I6.5203>. [49]

Hakim, F. N., Ramadhani, D., Rachman, A. P., Mangkuto, R. A., Pradipta, J., & Aritionang, S. R. (2023). Daylighting design optimization of symmetrical bilateral openings with internal blinds in tropical classrooms using RBFOpt



designs. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 352, No. 1, p. 012059). IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/352/1/012059. [76]

Kristiansen, T., Thiis, T., Burud, I., & Petersen, A. J. (2024). Measurements of spectral daylight variation in spaces: A case study. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 562, p. 01002). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456201002>. [142]

Kumar Maurya, A., Kumar, R., & Kumar, A. (2024). Evaluation of daylight performance in classrooms through retrofitting in the composite climate of Eastern India. *Civ. Eng. Archit*, 12(2), 917-936. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120218>. [66]

Kunduracı, A. C., & Kızılörenli, E. (2024). A Design Proposal for Improving Daylight Availability of a Deep-Plan Classroom by Using Tubular Daylight Guidance Systems and Movable Shading Devices. *Politeknik Dergisi*, 27(4), 1305-1316. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1266467>. [73]

Lakhdari, K., Sriti, L., & Painter, B. (2021). Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions. *Building and Environment*, 204, 108173. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108173>. [51]

Lee, S., & Lee, K. S. (2019). A Study on the improvement of the evaluation scale of discomfort glare in educational facilities. *Energies*, 12(17), 3265. <https://doi.org/10.3390/en12173265>. [45]

Liberska, M., & Maierová, L. (2021, November). Daylighting provision and visual comfort in unilaterally and bilaterally illuminated classrooms. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2042, No. 1, p. 012134). IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/2042/1/012134. [105]

Liu, B., Liu, Y., Deng, Q., & Hu, K. (2023). A study on daylighting metrics related to the subjective evaluation of daylight and visual comfort of students in China. *Energy and Buildings*, 287, 113001. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113001>. [18]

Jab, S. A., & Murad, M. M. (2022). The impact of natural lighting on energy consumption in educational spaces through simulation: Faculty of Engineering, Sohag University as a case study. *Journal of Engineering Sciences*, 50(4). <https://doi.org/10.20431/2456-4931.071013>. [126]

Jebril, T., Chen, Y., Hamed, S., & Hajjaj, A. (2023, March). The Effect of Geometry Parameters on Daylighting of School Buildings in the Gaza Strip. In *International Civil Engineering and Architecture Conference* (pp. 553-561). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6368-3_46. [112]

Jia, Y., Liu, Z., Fang, Y., Zhang, H., Zhao, C., & Cai, X. (2023). Effect of interior space and window geometry on daylighting performance for terrace classrooms of universities in severe cold regions: A case study of Shenyang, China. *Buildings*, 13(3), 603. <https://doi.org/10.3390/buildings13030603>. [59]

Kaminska, A. (2020). Impact of building orientation on daylight availability and energy savings potential in an academic classroom. *Energies*, 13(18), 4916. <https://doi.org/10.3390/en13184916>. [150]

Katunský, D., Vertaľ, M., Dolníková, E., Zozuláková, S., Hutkai, K., & Dická, Z. (2022). Mutual Interaction of Daylight and Overheating in the Attic Space in Summer Time. *Sustainability*, 14(23), 15634. <https://doi.org/10.3390/su142315634>. [135]

Khani, A., Khakzand, M., & Faizi, M. (2022). Multi-objective optimization for energy consumption, visual and thermal comfort performance of educational building (case study: Qeshm Island, Iran). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54, 102872. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102872>. [83]

Kharat, T., & Dhamankar, N. (2023). Investigating Student's Perception of Visual Comfort in Architecture Studios and Its Impact on Their Work Output. In *Asian Conference on Indoor Environmental Quality* (pp. 119-144). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4681-5_12. [22]

Kiil, M., Simson, R., De Luca, F., Thalfeldt, M., & Kurnitski, J. (2019). Overheating and daylighting evaluation for free-running classroom



- House International*, 47(1), 167-187.
<https://doi.org/10.1108/OHI-05-2021-0099>. [116]
- Mangkuto, R. A., Koerniawan, M. D., & Soelami, F. N. (2021). Daylight Annual Illuminance Investigation in Elementary School Classrooms for the Tropic of Lhokseumawe, Indonesia. *Journal of Applied Science and Engineering*, 25(1), 129-139.
[https://doi.org/10.6180/jase.202202_25\(1\).0013](https://doi.org/10.6180/jase.202202_25(1).0013). [82]
- Mangkuto, R. A., Koerniawan, M. D., Subramaniam, S., & Yuliarto, B. (2024). Formulation of climate-based daylighting design prediction model for high performance tropical school classrooms. *Energy and Buildings*, 304, 113849.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113849>. [88]
- Maurya, A. K., Kumar, R., & Kumar, A. (2023). Assessing Window Design's Impact on Daylight Uniformity in Classrooms in Patna, India. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13(5), 11898-11903.
<https://doi.org/10.48084/etasr.6212>. [129]
- Meenu, A. H., Madhusudhanan, S., Priya, R. S., & Nallusamy, S. (2024). Variations in wall fenestrations for institutional buildings to achieve optimal daylighting - A simulation-based approach, case of Chennai, India. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, 11(9), 39-53.
<https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V11I9P104>. [121]
- Mesloub, A., Alnaim, M. M., Albaqawy, G., Elkhayat, K., Hafnaoui, R., Ghosh, A., & Mayhoub, M. S. (2024). The Daylighting Optimization of Integrated Suspended Particle Devices Glazing in Different School Typologies. *Buildings*, 14(8), 2574.
<https://doi.org/10.3390/buildings14082574>. [145]
- Mirdamadi, M. S., Zomorodian, Z. S., & Tahsildoost, M. (2023). Evaluation of occupants' visual perception in day lit scenes: a virtual reality experiment. *Journal of Daylighting*, 10(1), 45-59.
<https://dx.doi.org/10.15627/jd.2023.4>. [20]
- Mo, H., Zhou, Y., & Song, Y. (2022). Parametric Design and Spatial Optimization of East-West-Oriented Teaching Spaces in Shanghai. *Buildings*, 12(9), 1333.
<https://doi.org/10.3390/buildings12091333>. [55]
- Liu, G., Qu, G., Ren, L., Zhang, Y., Zang, X., & Dang, R. (2022). The influence mechanism of daylight visual evaluation in college classrooms under visual field physiological characteristics of student group: Case study. *Building and Environment*, 209, 108655.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108655>. [13]
- Liu, J., Li, Z., Zhong, Q., Wu, J., & Xie, L. (2024). Multi-objective optimization of daylighting performance and energy consumption of educational buildings in different climatic zones of China. *Journal of Building Engineering*, 95, 110322.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110322>. [39]
- Liu, Y., Chen, K., Ni, E., & Deng, Q. (2023). Optimizing classroom modularity and combinations to enhance daylighting performance and outdoor platform through ANN acceleration in the post-epidemic era. *Heliyon*, 9(11).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21598>. [137]
- Ma, J., & Yang, Q. (2023). Optimizing annual daylighting performance for atrium-based classrooms of primary and secondary schools in Nanjing, China. *Buildings*, 13(1), 11.
<https://doi.org/10.3390/buildings13010011>. [152]
- Ma'bdeh, S., & Al-Khatatbeh, B. (2019). Daylighting retrofit methods as a tool for enhancing daylight provision in existing educational spaces—A case study. *Buildings*, 9(7), 159.
<https://doi.org/10.3390/buildings9070159>. [50]
- Ma'bdeh, S., & Matar, H. (2020). Designing a dynamic fenestration to improve visual performance in educational spaces using daylight. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 8(3), 1898-1910.
<https://doi.org/10.21533/pen.v8.i3.1222>. [74]
- Mahya Cheshmeh Noor, Fatemeh Mehdizadeh Saradj, Seyed-Abbas Yazdanfar, Optimal daylighting design for standard photopic and melanopic equivalent daylight illuminance, and glare minimization in Tehran classrooms, *Journal of Building Engineering*, Volume 105, 2025, 112104.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112104>. [42]
- Mahyuddin, N., Samzadeh, M., Zaid, S. M., & Ab Ghafar, N. (2022). Towards nearly zero energy building concept—visual comfort and energy efficiency assessments in a classroom. *Open*



comparative study in the four climate zones in Greece using Daylight Factor values. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 899, No. 1, p. 012036). IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/899/1/012036. [52]

Noémi Zetz, D., & Kistelegdi, I. (2020). Comfort simulation supported sketch plan optimization of the University of Pécs, Medical School extension. *Pollack Periodica*, 15(2), 166-177. <https://doi.org/10.1556/606.2020.15.2.15>. [134]

Noorzai, E., Bakmohammadi, P., & Garmaroudi, M. A. (2023). Optimizing daylight, energy and occupant comfort performance of classrooms with photovoltaic integrated vertical shading devices. *Architectural Engineering and Design Management*, 19(4), 394-418. <https://doi.org/10.1080/17452007.2022.2080173>. [86]

Oppusunggu, R. E., & Santoso, C. K. (2022). Let It Be Light for Children Passive Design Study of School Natural Lighting for Children's Visual Comfort and Well-Being. In *International Conference on Sustainability in Creative Industries* (pp. 79-88). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50894-3_9. [144]

Oraby, H. A. E. A. A., Elborombaly, H. E. D. H., & Mohamed, M. A. E. F. (2022). Optimizing Daylighting Performance for Educational Buildings in Cairo by Using Parametric Material System. In *International conference on Climate Change and Environmental Sustainability* (pp. 27-48). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65088-8_4. [65]

Piparsania, K. R., Vaidya, P., & Kalita, P. C. (2020). Evaluation of daylight performance of classroom spaces in Ahmedabad. *DS 101: Proceedings of NordDesign*, 1-12. <https://doi.org/10.35199/NORDDESIGN2020.29>. [47]

Prasertseree, L., & Tuaycharoen, N. (2025). The Effect of Curved Light Shelves, Ceiling and Window Characteristics on Daylighting in Thai Classrooms. *Journal of Daylighting*, 12(1), 21-39. <https://dx.doi.org/10.15627/jd.2025.2>. [118]

Qu, G., Ren, L., Yuan, Y., Liu, G., Zang, X., & Zhang, Y. (2020). The influence mechanism of

Mohamed, A. F., Amir, A. A., & Ragab, A. (2024). The effect of aerogel glazing on daylight and heat gain in school buildings in hot and dry climate. *Environment, Development and Sustainability*, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04963-1>. [130]

Mohelníková, J., Novotný, M., & Mocová, P. (2020). Evaluation of school building energy performance and classroom indoor environment. *Energies*, 13(10), 2489. <https://doi.org/10.3390/en13102489>. [100]

Mumthas, U. N., & Sushanth, S. J. (2024). Optimization of Classroom Design for Improved Comfort—Warm and Humid Climate. In *International Conference on Trends in Architecture and Construction* (pp. 985-1000). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4988-1_54. [69]

Muñoz-Viveros, C., Bellido, C. R., & Pérez-Fargallo, A. (2024). Evaluation of energy and lighting in schools considering solar protections. *Energy Reports*, 12, 1157-1177. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.07.017>. [122]

Mushtaha, E., Eiz, H., Janbih, L., & Rifai, R. E. (2019). Analyzing and Improving Natural Daylight in Educational Buildings Using Skylights, Victoria International School of Sharjah as a Case Study. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 385, No. 1, p. 012013). IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/385/1/012013. [71]

Natalia, S., & Suharjanto, G. (2022). The openings and lighting design strategies of primary school in Jakarta. In *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 998, No. 1, p. 012036). IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/998/1/012036. [97]

Neberich, M., Gerner, N., Romodow, C., Freidl, A. (2022). Positive effects of advanced daylight supply of buildings on schoolchildren—A controlled, single-blinded, longitudinal, clinical trial with real constructive implementation. *Buildings*, 12(5), 600. <https://doi.org/10.3390/buildings12050600>. [14]

Nikolaou, G. I., & Meresi, A. K. (2021). Shading and daylighting strategies in classrooms: a

optimization of shading devices, window size, and orientation for educational spaces in Tehran, Iran. *Journal of Architectural Engineering*, 27(2), 04021011.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000466](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000466). [78]

Seftyarizki, D., Hakim, A. H., & Razali, M. R. (2020). Identification of visual and thermal comfort in classroom. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 874, No. 1, p. 012036). IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/874/1/012036. [131]

Seftyarizki, D., Prihatiningrum, A., & Ramawangsa, A. (2021). Thermal and Visual Comfort Analysis Using CBE Tools And Velux Simulation of Classroom in R. 21 in Gedung Kuliah Bersama V University of Bengkulu. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 738, No. 1, p. 012007). IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/738/1/012007. [103]

Şenyiğit, V., & Memduhoğlu, H. B. (2020). End-user preferences in school design: A qualitative study based on student perspective. *Building and Environment*, 185, 107294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107294>. [29]

Shamseldin, A., Alwetaishi, M., & Alzaed, A. (2021). Visual comfort achievement in compliance with thermal comfort recommendations in educational buildings in Taif City, KSA. *In 2021 International Conference of Women in Data Science at Taif University (WiDSTaif)* (pp. 1-6). IEEE. doi: 10.1109/WiDSTaif52235.2021.9430251. [147]

Song, Y., & Wang, H. (2024). Optimization Potential of Side-Lit Windows for Energy and Daylight Performance of University Classrooms in Shanghai. *Buildings*, 14(12), 3947. <https://doi.org/10.3390/buildings14123947>. [68]

Suh, Y. W., Ha, S. G., & Kim, S. H. (2022). Effect of classroom illuminance on the development and progression of myopia in school children. *Korean Journal of Ophthalmology: KJO*, 36(3), 194. <https://doi.org/10.3341/kjo.2021.0170>. [16]

Susan, S., Zakaria, S. A. B., Fairuz, S., & Fadzil, S. M. (2024). Optimization of the building-integrated transparent photovoltaic configuration based on daylight and energy performance in

daylight on visual comfort under different behavior modes in university classrooms. *In The 16th Conference of the International Society of Indoor Air Quality & Climate*. [5]

Rezaee, R., Marshall, T., Bernal, M., Sana, N., & Haymaker, J. (2019). Constructing and exploring building configurations based on design and multi performance criteria. *In 16th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, Building Simulation 2019* (Vol. 5, pp. 2990-2997). https://publications.ibpsa.org/proceedings/bs/2019/papers/BS2019_210827.pdf. [120]

Ruiz, A., Campano, M. Á., Acosta, I., & Luque, Ó. (2021). Partial daylight autonomy (DAP): A new lighting dynamic metric to optimize the Design of Windows for seasonal use spaces. *Applied Sciences*, 11(17), 8228. <https://doi.org/10.3390/app11178228>. [80]

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>. [140]

Salameh, M., & Touqan, B. (2023). Courtyard'design as a sustainable tool for classrooms' lighting and thermal performance. *In Advances in civil engineering materials: selected articles from the 6th international conference on architecture and civil engineering (ICACE 2022)*, August 2022, kuala lumpur, Malaysia (pp. 355-366). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8024-4_30. [109]

Salomon, D., & Avalos-Ambroggio, S. (2022). Optimization of classroom design: use of natural light for visual comfort in Villa Maria, Argentina; Optimización del diseño de aulas: aprovechamiento de la luz natural para confort visual en Villa María, Argentina. *Revista Habitat Sustentable*, 12(1), 74-89. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2024EnRep..12.1157M/doi:10.1016/j.egyr.2024.07.017. [98]

Sanchez-Cano, A., Orduna-Hospital, E., & Aporta, J. (2024). Photopic and Melanopic Analysis of Daylight Through Glazing in Indoor Environments. *Buildings*, 14(10), 3291. <https://doi.org/10.3390/buildings14103291>. [115]

Sedaghatnia, M., Faizi, M., Khakzand, M., & Sanaieian, H. (2021). Energy and daylight



- Verma, T., & Valdaris, B. (2019). Evaluating the Daylighting Performance of Lecture Halls: A Simulation-Based Approach. *In 53rd International Conference of the Architectural Science Association* (pp. 303-312). https://www.researchgate.net/publication/365775012_Evaluating_the_Daylighting_Performance_of_Lecture_Halls_A_Simulation-Based_Approach. [44]
- Verso, V. L., Giuliani, F., Caffaro, F., Basile, F., Peron, F., Dalla Mora, T., ... & Costanzo, V. (2021). Questionnaires and simulations to assess daylighting in Italian university classrooms for IEQ and energy issues. *Energy and Buildings*, 252, 111433. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111433>. [11]
- Viula, R., Bokel, R., & Tenpierik, M. (2023). Prediction of discomfort from glare from daylight in classrooms. *Lighting Research & Technology*, 55(7-8), 712-729. <https://doi.org/10.1177/14771535231173291>. [21]
- Wang, M., Cao, S., Chen, D., Ji, G., Ma, Q., & Ren, Y. (2022). Research on design framework of middle school teaching building based on performance optimization and prediction in the scheme design stage. *Buildings*, 12(11), 1897. <https://doi.org/10.3390/buildings12111897>. [94]
- Wang, M., Chen, D. X., Zhang, Z. H., Ma, Q., & Ren, Y. C. (2022). Research on parametric optimization of daylighting in university teaching building. *In 2022 5th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE)* (pp. 541-544). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AEMCSE55572.2022.00111>. [91]
- Wang, M., Peng, X., & Cai, Y. (2025). A multi-metric evaluation of classroom daylighting: Integrating myopia prevention and visual comfort. *Journal of Building Engineering*, 99, 111616. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111616>. [41]
- Wang, Y., Yang, W., & Wang, Q. (2022). Multi-objective parametric optimization of the composite external shading for the classroom based on lighting, energy consumption, and visual comfort. *Energy and Buildings*, 275, 112441. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112441>. [72]
- school buildings in the tropics. *Architecture and Engineering*, 9(1), 29-43. doi: 10.23968/2500-0055-2024-9-1-29-43. [104]
- Szentesi-Nejur, S., De Luca, F., & Flamand, K. (2022). Simulation based daylight uniformity optimizations for elementary school projects in Quebec province. *In Proceedings of the 40th eCAADe Conference* (pp. 13-16). https://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2022_248.pdf. [12]
- Talaei, M., & Sangin, H. (2024). Multi-objective optimization of energy and daylight performance for school envelopes in desert, semi-arid, and mediterranean climates of Iran. *Building and Environment*, 255, 111424. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111424>. [90]
- Tharim, A. H. A., Abdullah, W. N. H. W., Ismail, A. & Ahmad, A. C. (2022). Determination of design solutions to overcome the daylighting design failure observed in existing educational building. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 13(2), 153-167. <https://journal.uthm.edu.my/index.php/IJSCET/article/view/11290>. [36]
- Tian, Z., Lin, P., He, Y., & Jonsson, J. C. (2021). A study of luminous environment with prism daylight redirecting fenestrations in classrooms. *Indoor and Built Environment*, 30(4), 461-475. <https://doi.org/10.1177/1420326X19895566>. [26]
- Utsman, S., Rachmawan, B., & Mohammad, K. R. (2021). Analysis and evaluation of the effect of reflectance values on internal walls, internal roofs, and light shelf on optimal illumination levels in the diploma economics and business building of the vocational school UGM, Yogyakarta. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 927, No. 1, p. 012030). IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/927/1/012030. [107]
- Vasquez, N. G., Callejas, L. F., & Díaz, L. A. (2021). A daily-based approach to study daylighting performance of openwork façades of classrooms in hot-humid climates: glare protection, daylight sufficiency and circadian potential. *In Building Simulation 2021 Conference*. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/a-daily-based-approach-to-study-daylighting-performance-of-openwo/>. [110]



- Yazit, R. N. S. R. M., Husini, E. M., Khamis, M. K., & Dodo, Y. A. (2021). Assessment on Accuracy of Design Science Research (DSR) Framework as a Daylighting Measurement Tool for Islamic Religious School. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 6(17), 81-91. <https://doi.org/10.21834/ebpj.v6i17.2877>. [24]
- Yazit, R. N. S. R. M., Husini, E. M., Khamis, M. K., Zolkefli, M. F., & Dodo, Y. A. (2020). Illuminance Level Measurement at Lower Working Plane Height in Islamic Religious School. *Asian Journal of University Education*, 16(3), 125-137. <https://eric.ed.gov/?id=EJ1274281>. [32]
- Yazit, R. N. S. R. M., Husini, E. M., Sulong, A. H. B. A., & Bakar, R. B. A. (2022). The Method of Measuring Students' Arabic Handwriting Performances in Classrooms. In *Advances in Civil Engineering Materials: Selected Articles from the International Conference on Architecture and Civil Engineering (ICACE2021)* (pp. 71-77). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8667-2_9. [33]
- Yunitsyna, A., & Sulaj, E. (2025). Daylight Optimization of the South-Faced Architecture Classrooms Using Biomimicry-Based Kinetic Facade Shading System. *Journal of Daylighting*, 12(1), 1-20. <https://dx.doi.org/10.15627/jd.2025.1>. [23]
- Yunitsyna, A., & Toska, A. (2023). Evaluation of the visual comfort and daylight performance of the visual art classrooms. *Journal of Daylighting*, 10(1), 117-135. <https://dx.doi.org/10.15627/jd.2023.9>. [19]
- Zhou, H., & Bai, X. (2023). A review of the role of the school spatial environment in promoting the visual health of minors. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2), 1006. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021006>. [2]
- Zhu, F., Xu, Y., & Jiang, Y. (2023). Design optimization of daylighting for kindergarten in different light climate zones in China. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 22(5), 2977-2993. <https://doi.org/10.1080/13467581.2023.2171735>. [17]
- Zou, Y., Zhan, Q., & Xiang, K. (2021). A comprehensive method for optimizing the design of a regular architectural space to improve
- Wizaka, W., Santoso, T., & Prawata, A. G. (2021). Study of daylight optimization for autism school in Cempaka Putih, Jakarta. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 794, No. 1, p. 012206). IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/794/1/012206. [151]
- Xiao-qian, H., & Misheng, L. (2020). Optimal evaluation of shading components for educational buildings in hot and humid areas. In *2020 7th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)* (pp. 945-950). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICISCE50968.2020.00195>. [132]
- Xu, Y., Yan, C., Pan, Y., Zhao, K., Li, M., Zhu, F., & Jiang, Y. (2022). A three-stage optimization method for the classroom envelope in primary and secondary schools in China. *Journal of Building Engineering*, 52, 104487. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104487>. [124]
- Xu, Y., Yan, C., Qian, H., Sun, L., Wang, G., & Jiang, Y. (2021). A novel optimization method for conventional primary and secondary school classrooms in Southern China considering energy demand, thermal comfort and daylighting. *Sustainability*, 13(23), 13119. <https://doi.org/10.3390/su132313119>. [123]
- Xu, Y., Yan, C., Wang, D., Li, J., Shi, J., Lu, Z., ... & Jiang, Y. (2022). Coordinated optimal design of school building envelope and energy system. *Solar Energy*, 244, 19-30. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.035>. [125]
- Yalçın Koçak, N. S., Tastemir, I. A., Koymen, E. &. Yasa, E. (2024). Daylight and Energy Performance Relationship of Classrooms and Office Spaces: Comparative Study of Istanbul Ticaret University Kucukyali Campus Building. In *International Association of Building Physics* (pp. 332-343). Singapore: Springer Nature Singapore. <https://hdl.handle.net/20.500.12436/8042>. [40]
- Yao, Q., Cai, W., Li, M., Hu, Z., Xue, P., & Dai, Q. (2020). Efficient circadian daylighting: A proposed equation, experimental validation, and the consequent importance of room surface reflectance. *Energy and Buildings*, 210, 109784. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109784>. [48]



<https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.097>. [53]

building performance. *Energy Reports*, 7, 981-996.



سال سیزدهم / شماره دوم / پاییز ۱۴۰۴

