



Optimization of Daylight in Residential Spaces to Enhance Indoor Green Landscape Quality and Improve Visual Comfort

Pouria Abdali¹ and Mehdi Khakzand²

Received 06/Sep/2025

Revised 13/Oct/2025

Accepted: 16/Nov/2025

(PP.: 253-274)

Introduction: In recent decades, rapid population growth, urban density, and the reduction of per capita green space have posed significant challenges to the environmental quality of residential units. Balconies, as one of the few semi-open spaces in apartments, can, if designed intelligently, serve as platforms for indoor green landscapes, enhancing user comfort and plant productivity. In the hot-arid climate of Qom, intense solar radiation not only causes glare and reduces visual comfort but also damages indoor plants. Therefore, optimizing daylight through the application of Adaptive Kinetic Skins presents a practical approach to simultaneously meeting plant lighting needs and improving the visual quality of space.

Research Method: This study adopts a mixed field–simulation approach. In the fieldwork phase, natural illuminance was measured at four points within the balcony and its adjacent bedroom from January to July 2025, at three daily time intervals, and processed using Python along with Pandas, NumPy, and Matplotlib libraries. In the simulation phase, a base model and three Adaptive Kinetic Skins with triangular, square, and hexagonal geometries—each in five opening ratios (30% to 70%)—were evaluated using Honeybee, Ladybug, and the Radiance engine. Key performance metrics included SDA, ASE, UDI, and annual hourly analysis.

Results and Discussion: Findings revealed that although the base model achieved a high SDA, its excessive ASE resulted in severe glare and unsuitable lighting conditions for plants. The square model with 40% opening achieved the highest SDA (0.60) and the greatest UDI within the target range. The hexagonal model with 30% opening recorded the lowest ASE (0.00), eliminating glare, albeit with lower UDI. Annual hourly analysis indicated that 30% and 40% openings across all geometries provided the best balance between adequate daylight and minimizing excessive solar exposure in the hot-arid climate of Qom.

Conclusion: The proposed final configurations are the square geometry with 40% opening and the hexagonal geometry with 30% opening, as they achieve the optimal balance between plant lighting requirements and user visual comfort, while being most compatible with the hot-arid climate and southeast-facing balconies. This climate-responsive design approach can be applied as a practical solution for daylight optimization in semi-open residential spaces. The results confirm that the designed Adaptive Kinetic Skins effectively regulate daylight within the desired range while simultaneously enhancing visual comfort and providing favorable lighting conditions for plants.

Keywords: Daylighting, Adaptive Kinetic Skins, Green Balcony, Hot and Dry Climate, Visual Comfort.

¹M.A. in Architecture, Faculty of Arts and Architecture, Uni. of Mazandaran, Babolsar, Iran.

²Associate Prof., Department of Landscape Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran Uni. of Science and Technology, Tehran, Iran, mkhakzand@iust.ac.ir

بهینه‌سازی نور روز در فضاهای مسکونی به منظور ارتقای کیفیت منظر سبز داخلی و افزایش آسایش بصری

پوریا عبدالی¹ و مهدی خاک‌زند²

تاریخ پذیرش: 1404/آبان/25	تاریخ بازنگری: 1404/مهر/21	تاریخ دریافت: 1404/شهریور/15
(صفحات: 253-274)		

چکیده

مقدمه: در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت، تراکم شهری و کاهش سرانه فضای سبز، کیفیت زیست‌محیطی واحدهای مسکونی را به چالش کشیده است. تراس‌ها، به‌عنوان محدود فضاهای نیمه‌باز آپارتمان‌ها، در صورت طراحی هوشمندانه می‌توانند به بستر منظر سبز داخلی و ارتقای آسایش کاربران و بهره‌وری گیاهان تبدیل شوند. در اقلیم گرم‌وخشک قم، شدت تابش خورشید علاوه بر ایجاد خیرگی و کاهش آسایش بصری، سبب آسیب به گیاهان آپارتمانی می‌شود. از این رو، بهینه‌سازی نور روز با استفاده از پوسته‌های متحرک، رویکردی کارآمد برای تأمین هم‌زمان نیاز نوری گیاهان و ارتقای کیفیت بصری فضا است.

روش تحقیق: پژوهش حاضر با رویکرد ترکیبی میدانی - شبیه‌سازی انجام شده است. در بخش میدانی، شدت روشنایی طبیعی در چهار نقطه تراس و اتاق خواب مجاور طی دی 1403 تا تیر 1404، در سه نوبت زمانی روزانه اندازه‌گیری و با استفاده از زبان Python و کتابخانه‌های NumPy، Pandas و Matplotlib پردازش شده است. در بخش شبیه‌سازی، مدل پایه و سه پوسته متحرک با سه هندسه (مثلثی، مربعی و شش‌ضلعی) در پنج سطح گشودگی مختلف (30 تا 70 درصد) با بهره‌گیری از افزونه Ladybug، Honeybee و موتور Radiance ارزیابی شده‌اند. شاخص‌های ASE، SDA، UDI و تحلیل ساعتی سالانه به عنوان معیارهای اصلی تحلیل انتخاب شدند.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد مدل پایه، هرچند SDA بالایی دارد، اما به دلیل ASE بسیار زیاد، دچار خیرگی شدید و شرایط نوری نامطلوب برای گیاهان است. مدل مربعی با گشودگی 40% بالاترین SDA (0.60) و بیشترین UDI در محدوده مطلوب را ثبت کرد. مدل شش‌ضلعی با گشودگی 30% کمترین ASE (0.00) را داشت و خیرگی را به‌طور کامل کنترل نمود، هرچند UDI آن کمتر بوده است. تحلیل ساعتی نشان داد گشودگی‌های 30% و 40% در هر سه هندسه بهترین تعادل میان نور کافی و کاهش تابش بیش‌ازحد را در اقلیم گرم‌وخشک (شهر قم) فراهم می‌کنند.

نتیجه‌گیری: مدل نهایی پیشنهادی، پوسته مربعی و پوسته شش‌ضلعی است که با ایجاد تعادل میان نیازهای نوری گیاهان و آسایش بصری کاربران، بیشترین سازگاری را با شرایط اقلیم گرم‌وخشک و تراس‌های جنوب شرقی دارند. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان راهکار طراحی اقلیمی در بهینه‌سازی نور روز فضاهای نیمه‌باز مسکونی مورد استفاده قرار گیرند. نتایج نشان داد پوسته‌های متحرک طراحی‌شده توانستند به‌طور مؤثر نور روز را در محدوده مطلوب کنترل کرده و هم‌زمان آسایش بصری و شرایط نوری مناسب برای گیاهان را فراهم کنند.

واژگان کلیدی: نور روز، پوسته متحرک، تراس سبز، اقلیم گرم‌وخشک، آسایش بصری.

¹ کارشناسی ارشد معماری، دانشکده هنر و معماری دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

² دانشیار، گروه معماری منظر، دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، (نویسنده مسئول)

1- مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش بی‌رویه جمعیت، توسعه عمودی شهرها، و کاهش سرانه فضای سبز در کلان‌شهرها و نواحی پرتراکم، منجر به گسترش فضاهای مسکونی کوچک و فشرده شده است (Grover et al., 2024). این شرایط، امکان اختصاص فضاهای مستقل برای خلق منظر سبز داخلی را به‌طور چشم‌گیری کاهش داده و در نتیجه، کیفیت زیست‌محیطی واحدهای مسکونی و سلامت جسمی و روانی ساکنان با چالش‌هایی جدی مواجه شده است (Dong et al., 2024). مطالعات متعدد بر تأثیر مثبت فضای سبز بر کاهش استرس، بهبود عملکرد روانی، ارتقای حس تعلق به مکان، و حتی کاهش اضطراب‌های اجتماعی در شرایط بحرانی نظیر دوران اپیدمی کووید-19، تأکید دارند (Qu et al., 2024). با این حال، تحقق آثار مثبت فضاهای سبز، مستلزم وجود شرایط فیزیکی مطلوب برای زیست و رشد گیاهان در محیط‌های داخلی است (Sugano et al., 2024). از سوی دیگر، در بسیاری از واحدهای مسکونی شهری، به‌ویژه در آپارتمان‌های متراکم، تراس‌ها به‌عنوان یکی از محدود فضاهای نیمه‌باز موجود، غالباً فاقد عملکرد زیست‌محیطی تعریف شده‌اند و یا به‌عنوان انباری یا فضای بی‌استفاده رها شده‌اند (Quaglio et al., 2021). در حالی‌که، تراس‌ها در صورت طراحی هوشمندانه می‌توانند به بسترهایی پویا برای توسعه منظر سبز داخلی تبدیل شوند و به‌طور هم‌زمان کیفیت فضایی، آسایش کاربران و بهره‌وری زیستی گیاهان را ارتقاء بخشند (Amani-Beni et al., 2022). در میان عوامل محیطی مؤثر بر رشد و دوام گیاهان در فضاهای نیمه‌باز، نور طبیعی از اساسی‌ترین عناصر به‌شمار می‌رود (Jung & Arar, 2023). گیاهان آپارتمانی، برخلاف نیاز کمتر نسبت به گونه‌های فضای باز، برای انجام فرآیند فتوسنتز به میزان مشخص و کنترل‌شده‌ای از نور نیاز دارند (Sugano et al., 2024). دریافت بیش از اندازه نور منجر به سوختگی برگ‌ها، تبخیر شدید آب از خاک، و کاهش کیفیت زیستی گیاهان می‌شود (Kallio et al., 2025). از سوی دیگر، شدت بالای تابش آفتاب از جبهه جنوبی که اصلی‌ترین جبهه نورگیر در ایران است که موجب

ایجاد خیرگی، افزایش دمای سطحی و کاهش آسایش بصری در فضای داخلی می‌شود (Khastar, & Taleghani, 2024). بر این اساس، بهینه‌سازی نور روز نه تنها باید بر مبنای نیازهای منظر سبز داخلی انجام گیرد، بلکه باید در راستای ارتقای آسایش بصری انسان نیز تنظیم شود. در این میان، استفاده از پوسته‌های متحرک به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین در طراحی معماری پایدار، راهکاری کارآمد برای مدیریت هم‌زمان تابش، سایه‌اندازی، و کنترل شدت نور در فضاهای نیمه‌باز به‌شمار می‌رود (Goharian et al., 2025). این سامانه‌ها با قابلیت تغییر شکل یا بازشو، می‌توانند میزان نفوذ نور را در ساعات مختلف روز و فصول سال تنظیم کرده و محیطی مطلوب برای رشد گیاهان و آسایش بصری ساکنان فراهم آورند (Hosseini et al., 2019). این پژوهش با هدف بهره‌برداری کارآمد از تراس‌های جنوبی واحدهای مسکونی در اقلیم گرم‌وخشک ایران، به بررسی نقش پوسته‌های متحرک در بهینه‌سازی نور روز می‌پردازد. تمرکز مطالعه بر ایجاد تعادل میان نیاز نوری گیاهان (با شاخص‌هایی مانند UDI^1 و DA^2) و آسایش بصری انسان (با معیارهایی چون SDA^3 و ASE^4) است تا هم کیفیت منظر سبز داخلی ارتقا یابد و هم شرایط مطلوب دیداری برای ساکنان فراهم شود. پژوهش از روش ترکیبی شامل برداشت داده‌های میدانی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری بهره‌برده است. در این پژوهش منظور از آسایش گیاهان، تأمین محدوده شدت نور مطلوب برای گونه‌های آپارتمانی سایه‌دوست است (در حدود 300 تا 1000 لوکس). گونه‌های خاص گیاهی در مدل به‌صورت مستقیم وارد نشده‌اند، اما شاخص‌های نوری محیط با نیاز نوری این گروه از گیاهان مقایسه شده است.

1-1- مروری بر پیشینه پژوهش

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تمرکز پژوهش‌ها بر بهینه‌سازی نور طبیعی، آسایش بصری و طراحی اقلیمی با استفاده از پوسته‌های متحرک و نماهای تطبیقی بوده است. گوهریان و همکاران با نمای متحرک NKAF متشکل از پنل‌های فتوولتائیک و پلکسی‌گلاس، بهبود چشمگیری در شاخص UDI ایجاد کردند

(Goharian et al., 2025). یونیتسینا و سولاژ سیستم سایه‌بان زیست‌الهام‌گرفته‌ای ارائه دادند که تعادل میان بهره‌گیری از نور روز و کاهش خیرگی را فراهم ساخت (Yunitsyna & Sulaj, 2025). البهراوی با بهینه‌سازی صفحات خورشیدی مشبک در اقلیم گرم‌وخشک، کاهش قابل‌توجهی در نواحی بیش‌نور و خیرگی گزارش کرد (El-Bahrawy, 2025). قزل‌لورنلی و اورخون با طراحی نمای اورینگامی‌گونه، ASE را به حداقل و SDA را به سطح بالایی رساندند (Kızılörenli & Orhon, 2025). مرور نظام‌مند گونزالس و همکاران نیز کارایی بالای پوسته‌های متحرک در ارتقای آسایش حرارتی و نور روز را تأیید، اما کمبود مطالعات میدانی را برجسته کرد (Gonçalves et al., 2024). غلامی و طلایی نشان دادند که مدل ترکیبی تغییر بازشو و زاویه سایه‌بان در اقلیم سردونیمه‌خشک بهترین عملکرد را دارد (Gholami & Talaei, 2024). حسینی و همکاران با الهام از بال پروانه، فرم «Bookshelf» را در کنترل خیرگی مؤثرتر یافتند (Hosseini et al., 2024). فلاحی و همکاران نمایی الهام‌گرفته از گیاهان روزبلند طراحی کردند که همزمان تأمین نور کافی و کاهش خیرگی را ممکن ساخت (Fallahi et al., 2024). در نهایت، ژانگ و همکاران سامانه دوپوسته‌ای معرفی کردند که با افزایش UDI و ایجاد نور فیلترشده، شرایط مناسبی برای گیاهان آپارتمانی فراهم آورد (Zhang et al., 2022). مرور مطالعات پیشین نشان داد که بیشتر پژوهش‌ها بر فضاهای اداری و آموزشی متمرکز بوده و به تراس‌های مسکونی به‌ویژه در اقلیم‌های پرتابش کمتر توجه کرده‌اند. همچنین، اغلب تحقیقات تنها بر آسایش بصری انسان تمرکز داشته و نیازهای نوری گیاهان را نادیده گرفته‌اند. در این پژوهش، با تلفیق داده‌های میدانی و شبیه‌سازی، هر دو بعد انسانی و زیستی مدنظر قرار گرفته و محدوده مطلوب نوری گیاهان آپارتمانی (300 تا 1000 لوکس) به‌عنوان معیار اصلی تحلیل تعریف شده است. نوآوری این تحقیق در استفاده همزمان از شاخص‌های UDI و DA برای تراس و SDA و ASE برای فضای داخلی است تا شرایط نور روز بهینه برای گیاهان و ارتقای آسایش بصری کاربران به‌طور توأمان ارزیابی گردد. به

بیان دیگر تفاوت اصلی این پژوهش با مطالعات مشابه در تمرکز بر ارتباط شاخص‌های نوری انسان‌محور (SDA و ASE) با محدوده‌های نوری مطلوب برای گیاهان آپارتمانی در اقلیم گرم‌وخشک ایران است. از این‌رو، نوآوری پژوهش حاضر در یکپارچه‌سازی دو رویکرد انسان‌محور و طبیعت‌محور در طراحی فضاهای داخلی است.

1-2- چارچوب نظری

1-2-1- نور روز در معماری و منظر سبز داخلی

نور روز یکی از عناصر کلیدی معماری پایدار است که در کاهش مصرف انرژی، بهبود کیفیت فضا و ارتقای سلامت کاربران نقش دارد (Li et al., 2024). بهره‌گیری مناسب از آن می‌تواند وابستگی به روشنایی مصنوعی را کاهش داده و انتشار گازهای گلخانه‌ای را محدود کند (Reinhart, 2014). هدف اصلی در طراحی پایدار، ایجاد تعادل در شدت، یکنواختی و کیفیت روشنایی است تا دید مطلوب فراهم شده و از خیرگی و افزایش بار سرمایشی جلوگیری شود (Garcia-Fernandez & Omar, 2023). این مهم با به‌کارگیری راهبردهایی چون جهت‌گیری صحیح، کنترل تابش، استفاده از سطوح بازتابنده و فناوری‌های واکنش‌پذیر مانند پوسته‌های متحرک محقق می‌شود. در چنین رویکردی، نور طبیعی علاوه بر روشنایی، به‌عنوان ابزاری برای ارتقای آسایش حرارتی و بصری و کیفیت فضایی در راستای توسعه پایدار مطرح است (Kızılörenli & Orhon, 2025؛ Liu et al., 2024). از طرفی نور طبیعی عامل کلیدی در رشد و سلامت گیاهان آپارتمانی است و کیفیت، شدت و مدت دریافت آن تأثیر مستقیم بر فتوسنتز و پایداری زیستی دارد. در این پژوهش، محدوده بهینه روشنایی برای گیاهان بین 300 تا 1000 لوکس بر حسب UDI تعیین شده است تا نیاز فتوسنتزی تأمین شده و از کمبود یا مازاد نور جلوگیری شود (Navvab, 2011؛ Tan et al., 2017).

1-2-2- آسایش بصری و کنترل نور با پوسته متحرک

آسایش بصری حالتی است که کاربران بدون خستگی یا خیرگی قادر به انجام فعالیت‌های خود باشند و تحت

آسایش حرارتی و بصری در فضاهای داخلی ضرورت دارد (Talaei & Sangin, 2024؛ Abedini et al., 2025)، (شکل 1).

داده‌های شدت روشنایی طبیعی با دستگاه لوکس‌متر در یک واحد مسکونی در شهر قم برداشت شده است. این فرآیند طی دی 1403 تا تیر 1404 (ژانویه تا ژوئن 2025) و در واحدی با چرخش 26 درجه به سمت شرق از محور جنوب انجام گرفته. اندازه‌گیری‌ها در چهار نقطه شامل داخل تراس (50 سانتی‌متر از دیوار)، داخل اتاق (50 سانتی‌متر از پنجره)، مرکز اتاق و یک‌متری دیوار انتهایی انجام شده است. تمامی داده‌ها برای کاهش خطا در ارتفاع ثابت یک متر از سطح زمین ثبت گردیده (شکل 2). داده‌های میدانی این پژوهش که شامل مقادیر شدت نور طبیعی (لوکس) در چهار موقعیت فضایی از یک تراس جنوبی-شرقی در اقلیم گرم‌وخشک قم بودند، با زبان برنامه‌نویسی Python تحلیل شدند. برای پردازش و تحلیل، از کتابخانه‌های Pandas (مدیریت داده)، NumPy (محاسبات عددی) و Matplotlib (ترسیم نمودار) استفاده شد. پس از پیش‌پردازش و تبدیل داده‌های متنی (ماه، روز، ساعت) به مقادیر عددی، ستون «کد ترکیبی ماه-ساعت» ایجاد شد تا دسته‌بندی و مقایسه تسهیل شود. این داده‌ها مبنای ترسیم نمودارهای خطی در مرحله بعد قرار گرفتند. در مرحله دوم پژوهش، به‌منظور تحلیل عمیق و کمی عملکرد نوری پوسته‌های متحرک، مدل‌سازی دیجیتال فضای پروژه در نرم‌افزار Rhinoceros 3D انجام شده و با بهره‌گیری از محیط پارامتریک Grasshopper و افزونه‌های تخصصی Honeybee و Ladybug، شبیه‌سازی تابش نور روز در سناریوهای مختلف انجام شده است، (شکل 3).

در این مرحله، مدل سب‌بعدی واحد مسکونی و تراس جنوبی آن طراحی و داده‌های اقلیمی معتبر (EPW) شهر قم در شبیه‌سازی وارد شد. پوسته‌های متحرک با هندسه‌های مثلثی، مربعی و شش‌ضلعی در پنج سطح بازشدگی (30% تا 70%) پیاده‌سازی گردیدند تا اثر آن‌ها بر توزیع نور روز، کنترل تابش مستقیم و کاهش خیرگی بررسی شود.

تأثیر عواملی مانند شدت و یکنواختی نور، دمای رنگ، توزیع روشنایی و کنترل خیرگی قرار دارد (Zheng et al., 2025). در معماری پایدار، علاوه بر بهره‌گیری از نور طبیعی، جلوگیری از تابش مستقیم شدید آفتاب ضروری است (Ploycharoen et al., 2024). این موضوع در اقلیم‌های گرم‌وخشک اهمیت بیشتری دارد، زیرا شدت نور می‌تواند موجب خیرگی و کاهش بهره‌وری شود (Mehrvarz et al., 2024). سامانه‌های کنترلی مانند پوسته‌های متحرک و سایه‌بان‌های هوشمند امکان تنظیم میزان و زاویه ورود نور را فراهم کرده و تعادلی میان کیفیت روشنایی، دید به بیرون و حفاظت در برابر خیرگی ایجاد می‌کنند (Bina & Zabi, 2021). از طرف دیگر پوسته‌های متحرک به عناصر بیرونی ساختمان گفته می‌شود که قابلیت تغییر شکل، زاویه یا میزان بازشو را در واکنش به شرایط محیطی یا نیازهای داخلی فضا دارند (Takhmasib et al., 2023). این سامانه‌ها به‌عنوان بخشی از راهبرد معماری پاسخ‌گو، نقش مهمی در بهینه‌سازی نور روز، کنترل خیرگی، کاهش بار سرمایشی و گرمایشی و ارتقای آسایش حرارتی و بصری ایفا می‌کنند (Bahri et al., 2025). طراحی موفق این پوسته‌ها نیازمند در نظر گرفتن عوامل اقلیمی، کاربری فضا، الزامات زیبایی‌شناختی و مصرف انرژی است (Globa et al., 2022).

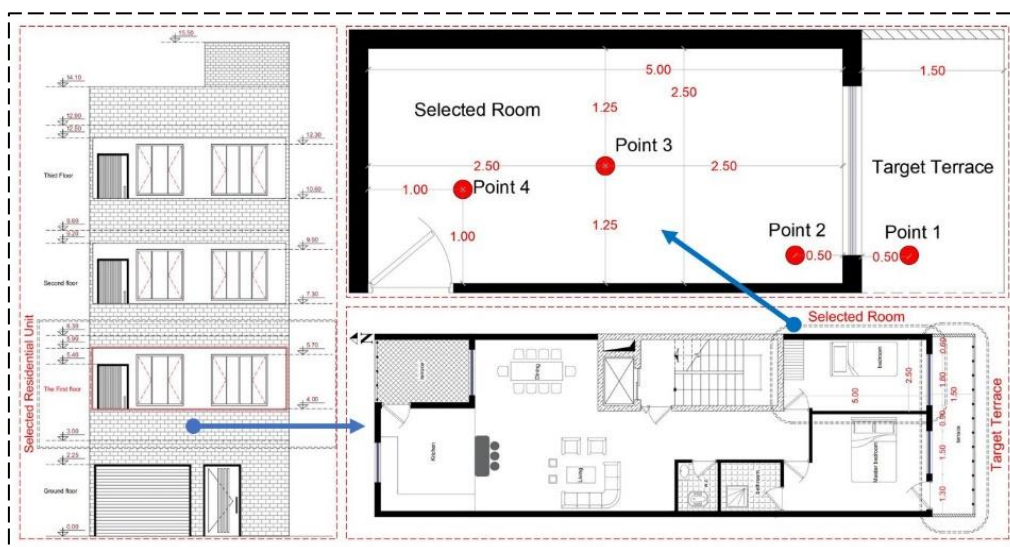
2- روش تحقیق

این پژوهش در دو بخش اصلی انجام شده است: نخست، برداشت میدانی که در آن شرایط واقعی محیط با ابزارهای سنجش بررسی شد تا ضرورت انجام تحقیق روشن شود؛ دوم، شبیه‌سازی نرم‌افزاری که با مدل‌سازی رایانه‌ای برای ارزیابی و بهینه‌سازی نور روز، کنترل خیرگی و ارتقای کیفیت بصری صورت گرفته است. مطالعه در شهر قم با اقلیم گرم‌وخشک انجام شده است؛ اقلیمی با تابستان‌های طولانی و گرم، زمستان‌های کوتاه، رطوبت اندک و نوسانات دمایی شدید. شدت بالای تابش خورشید در جبهه‌های جنوبی موجب افزایش دما و خیرگی می‌شود و کنترل نور و گرما برای دستیابی به



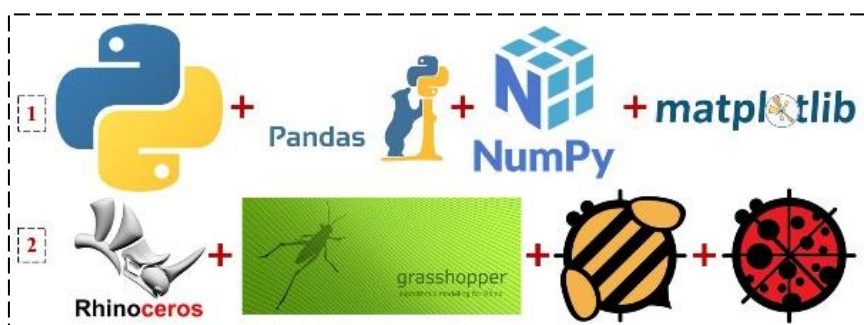
شکل 1- محدوده مطالعاتی و اقلیمی پژوهش (Abedini et al., 2025; Soffaei et al., 2016)

Fig.1 – Study area and climatic context of the research; Source (Soffaei et al., 2016; Abedini et al., 2025)



شکل 2- موقعیت نقاط اندازه‌گیری شدت روشنایی طبیعی در تراس و اتاق خواب واحد مسکونی مورد مطالعه

Fig.2 – Locations of natural daylight intensity measurement points in the balcony and bedroom of the studied residential unit



شکل 3- چهارچوب کدنویسی، تحلیل داده‌های میدانی و نرم افزارهای مورد استفاده در بخش شبیه سازی‌های نوری

Fig.3 – Coding framework, field data analysis, and software used in the daylight simulations

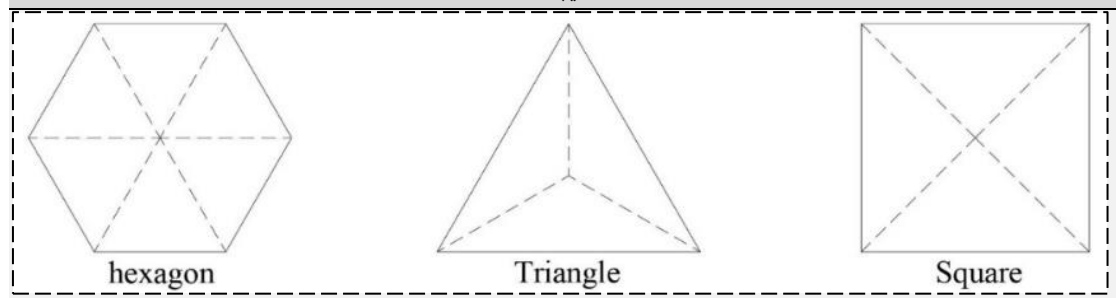
< 10% ایده‌آل، 10%-20% قابل قبول، < 20% پرخطر> انجام شد. برای طراحی پنل‌ها، پژوهش‌های 2020-2025 بررسی شد و سه هندسه اصلی مثلث، مربع و شش ضلعی که بیشترین کاربرد را داشتند، انتخاب شدند (جدول 1).

ارزیابی بر اساس شاخص‌های UDI (روشنایی مطلوب 300-1000 لوکس)، DA (دسترس‌پذیری نور روز)، SDA (حداقل 50% زمان با روشنایی کافی ≤ 300 لوکس؛ مقادیر < 55% قابل قبول و < 75% مطلوب) و ASE (بیش از 250 ساعت در سال نور مستقیم < 1000 لوکس؛

جدول 1- هندسه مورد استفاده در طراحی پوسته‌های متحرک توسط سایر پژوهشگران
Tab.1 – Geometries used in the design of dynamic façades by other researchers

ردیف	نویسندگان / سال	عنوان	هندسه
1	Hosseini et al. (2020)	Integrating interactive kinetic façade design with colored glass to improve daylight performance based on occupants' position	مثلثی
2	Ningsih et al. (2022)	Hexagonal Responsive Facade Prototype in Responding Sunlight	شش ضلعی
3	Hosseini & Heidari. (2022)	General morphological analysis of Orosi windows and morpho butterfly wing's principles for improving occupant's daylight performance through interactive kinetic façade	شش ضلعی
4	Şenel et al. (2023)	Using KRF Structures as an Adaptive Facade and Evaluation of Daylight Performance Based on Geometry: A Case Study in Ankara	شش ضلعی
5	Depari, (2023)	Enhancing Sustainability in Smart Buildings: Exploring Kinetic Facade Design Through Algorithmic Strategies.	شش ضلعی
6	Takhmasib et al. (2023)	Machine-learned kinetic Façade: Construction and artificial intelligence enabled predictive control for visual comfort	مثلثی
7	Sureshkumar Jayakumari et al. (2024)	Energy and Daylighting Performance of Kinetic Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) Façade	شش ضلعی
8	Kim et al. (2024)	Optimizing the Shading Device Configuration of Kinetic Façades through Daylighting Performance Assessment	مثلثی
9	Brzezicki. (2024)	Enhancing Daylight Comfort with Climate-Responsive Kinetic Shading: A Simulation and Experimental Study of a Horizontal Fin System	مربعی
10	Brzezicki. (2024)	A Systematic Review of the Most Recent Concepts in Kinetic Shading Systems with a Focus on Biomimetics: A Motion/Deformation Analysis	شش ضلعی
11	Hosseini et al. (2024)	Biomimetic kinetic façade as a real-time daylight control: complex form versus simple form with proper kinetic behavior	مربعی
12	Torres et al. (2024)	Kinetic architecture as a response to adaptive behavior to climate, a case study through virtual models	مثلثی
13	Andrade et al. (2024)	Kinetic module in bimetal: A biomimetic approach adapting the kinetic behavior of bimetal for adaptive Façades	مثلثی
14	Sommese, (2024)	Light-responsive kinetic façade system inspired by the Gazania flower: A biomimetic approach in parametric design for daylighting	مثلثی
15	Dervishaj & Gudmundsson (2024)	Parametric design workflow for solar, context-adaptive and reusable facades in changing urban environments	مربعی
16	Sangtarash et al. (2025)	Utilizing Kinematic Models of Kinetic Facades to Obtain Optimal Natural Lighting in an Office Building	مربعی
17	Bahri et al. (2025)	Kinetic facades as a solution for educational buildings: A multi-objective optimization simulation-based study	مثلثی
18	Kamalabadi, (2025)	Integration of bio-inspired adaptive systems for optimizing daylight performance and glare control	شش ضلعی
19	Yunitsyna, (2025)	Daylight Optimization of the South-Faced Architecture Classrooms Using Biomimicry-Based Kinetic Facade Shading System	شش ضلعی
20	El-Bahrawy, (2025)	Balancing the Parameters of Perforated Solar Screens to Optimize Daylight and Glare Performance in Office Buildings	مثلثی

نتیجه



همچنین لازم به ذکر است که ارزیابی روشی داخلی بر مبنای شاخص‌های سالانه انجام شده است و از آنجا که هدف، تحلیل توزیع نور روز در مقیاس کلی و سالانه

در این پژوهش، هر سه هندسه تحت شرایط یکسان ارزیابی شدند تا بهترین هندسه و درصد بازشدگی برای عملکرد بهینه نور روز و آسایش بصری تعیین شود.

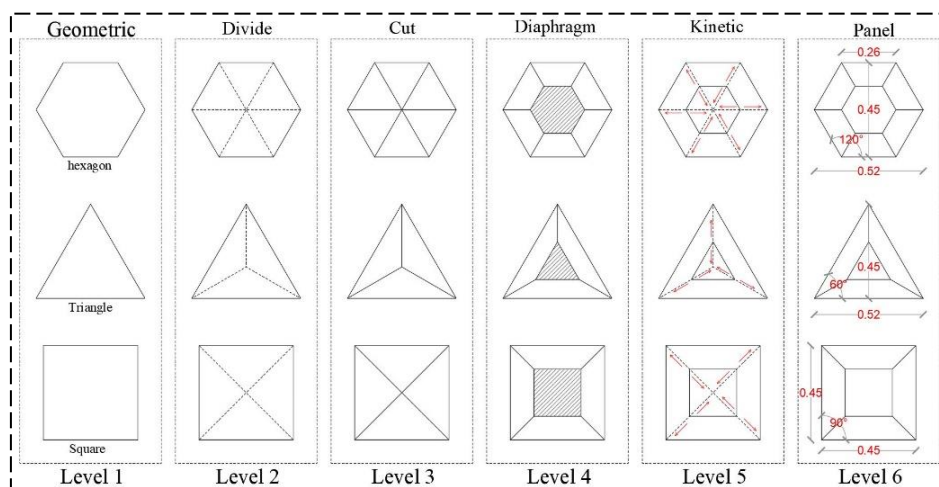
داده‌های واقعی و منابع استاندارد تعیین و در نرم‌افزار شبیه‌سازی وارد شد. پارامترهای کلیدی شامل مقاومت حرارتی (R-value)، بازتاب نور (Reflectance)، عبور نور (Transmittance)، ضریب شکست (Refract)، ضریب کسب حرارت خورشیدی (SHGC) و عبور نور مرئی (T-vis) است. خلاصه مقادیر این مشخصات در (جدول 2) ارائه شده است.

محدودیت‌های این پژوهش شامل استفاده از یک نمونه ساختمانی در شهر قم و دوره زمانی محدود اندازه‌گیری (دی تا تیر) است. خطای ابزار لوکس‌متر مورد استفاده مطابق دفترچه فنی در حدود $\pm 5\%$ برآورد می‌شود که ممکن است بر نتایج در سطوح نور کم اثر بگذارد. همچنین مدل‌سازی گیاهان در نرم‌افزار Honeybee به‌صورت داده‌های نوری انجام شد و پارامترهای زیست‌فیزیولوژیک (نوع برگ، ضریب جذب و رطوبت نهفته در برگ‌ها) در مدل لحاظ نشده‌اند که می‌تواند بر دقت تحلیل تأثیرگذار باشد.

است، محل ناظر لحظه‌ای (DGP) در مدل تعریف نشده و شاخص‌های SDA و ASE برای کل سطح اتاق محاسبه گردیدند. بنابراین ارزیابی خیرگی موضعی یا دید لحظه‌ای در محدوده این پژوهش قرار نداشته و شاخص ASE بیانگر نواحی با تابش مستقیم بیش از 1000 لوکس در بیش از 250 ساعت سال به عنوان شاخصی از مواجهه نوری فضا استفاده شده است.

برای طراحی پنل‌های پوسته متحرک، هندسه‌های انتخابی با سازوکار حرکتی یکسان مدل‌سازی شدند و نحوه حرکت هر سه به‌صورت رفت‌وبرگشتی (باز و بسته شدن) در نظر گرفته شد تا تحلیل صرفاً بر اساس تفاوت هندسه انجام گیرد. مطابق (شکل 4)، ابعاد تمامی پنل‌ها یکسان و برابر با 45×45 سانتی‌متر تعیین شد. زاویه داخلی مثلث 60 درجه، مربع 90 درجه و شش‌ضلعی 120 درجه در نظر گرفته شده است.

مشخصات فیزیکی و نوری مصالح تراس و فضای داخلی (کف، سقف، دیوار، پنجره و پوسته متحرک) بر اساس



شکل 4- فرایند طراحی پنل‌های پوسته‌ی متحرک

Fig.4 – Design process of Adaptive Kinetic Skin panels

جدول 2- مشخصات مصالح مورد استفاده در شبیه‌سازی

Tab.2 – Material specifications used in the simulation

T-vis	SHGC	Refract	trans	Reflect	R-value	عنصر ساختمانی
-	-	-	-	0.2	1.96	دیوار
-	-	-	-	0.4	1.82	سقف
-	-	-	-	0.2	1.31	کف
0.76	0.46	-	0.8	1.6	2.04	پنجره
-	-	1.8	0.2	-	-	پوسته

همچنان کم‌نور باقی مانده است. از فروردین تا خرداد شدت و یکنواختی تابش افزایش یافته و به اوج خود می‌رسد، به‌گونه‌ای که حتی مرکز اتاق نیز بیش از حد روشن می‌شود و خطر خیرگی و گرمایش بالا می‌رود. تیرماه نیز الگوی مشابه خرداد را نشان می‌دهد. این یافته‌ها بیانگر توزیع ناهمگن نور روز و ضرورت به‌کارگیری پوسته‌های متحرک برای کاهش نور اضافی در تراس و تقویت روشنایی در عمق اتاق هستند تا هم نیاز نوری گیاهان و هم آسایش بصری کاربران تأمین شود، (جدول 3).

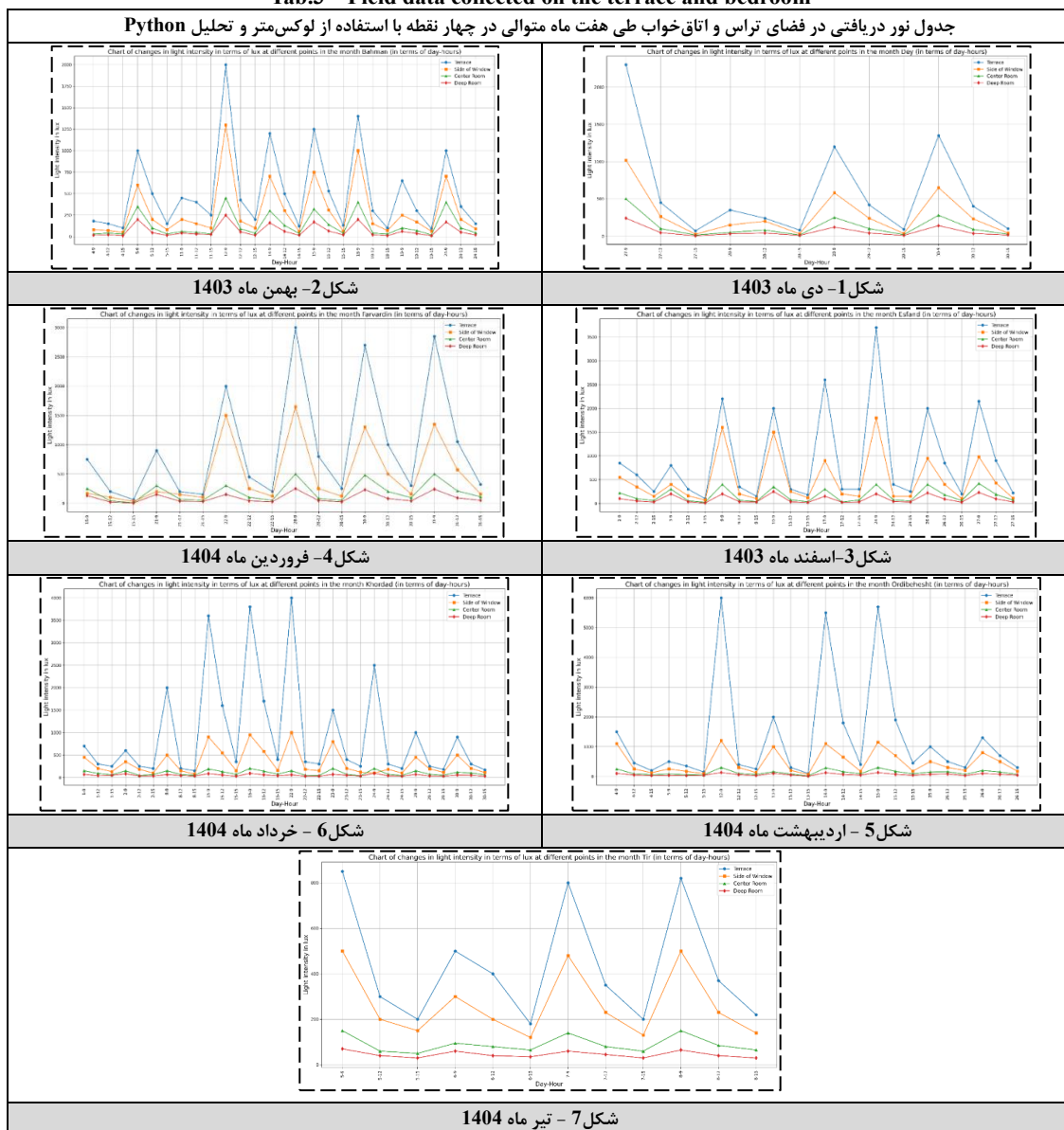
3- نتایج و بحث

3-1 داده‌های میدانی

داده‌های میدانی نور روز در تراس یک واحد مسکونی جنوب‌شرقی در شهر قم طی دی 1403 تا تیر 1404 و در سه نوبت روزانه (9، 12 و 15) در چهار نقطه برداشت شد. نتایج نشان داد در اغلب ماه‌ها، تراس و بخش نزدیک پنجره با شدت نوری بالاتر از محدوده مطلوب (300-1000 لوکس) و خطر خیرگی مواجه‌اند، در حالی که عمق اتاق دچار کمبود نور است. در ماه‌های زمستانی، نور صبحگاهی تراس از حد بهینه فراتر رفته و عمق اتاق

جدول 3- داده‌های میدانی دریافتی در تراس و اتاق خواب

Tab.3 – Field data collected on the terrace and bedroom



2-3- مدل پایه

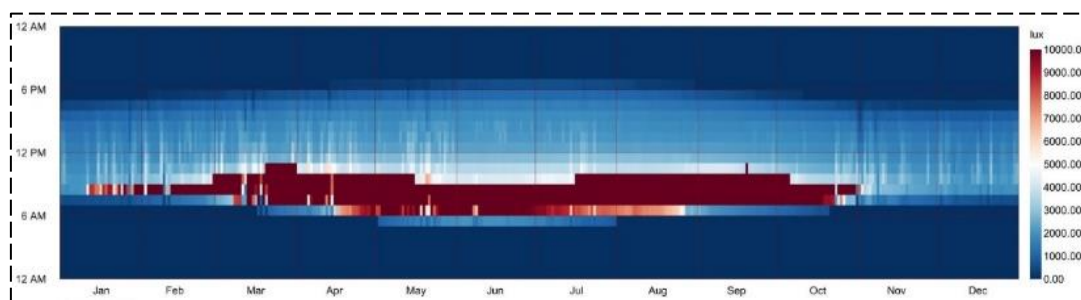
بررسی شاخص‌های UDI و DA در تراس نشان داد که از دی تا اوایل آبان و مهر، شدت نور صبحگاهی بین 4000 تا 10000 لوکس است و در زمستان عمدتاً ساعت 9 صبح متمرکز است. از اسفند به بعد، شدت و مدت تابش افزایش یافته و در آبان و آذر به 3000-5000 لوکس کاهش می‌یابد، اما هنوز بیشتر از محدوده هدف (300-1000 لوکس) است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تراس در بخش عمده سال نور بیش از حد دریافت می‌کند و استفاده از سامانه‌های کنترلی برای کاهش خیرگی و بهبود شرایط زیستی گیاهان ضروری است (شکل 5).
نتایج شاخص UDI نشان می‌دهد که نور کمتر از 100 لوکس در تراس حدود 3% و در عمق اتاق خواب تا 69% است، که گردایان روشنایی از تراس به داخل را نشان می‌دهد. در بازه 100-1000 لوکس، بخش میانی اتاق بیشترین نورگیری را دارد، در حالی که تراس و نواحی نزدیک پنجره به دلیل تابش شدید، کمتر در این محدوده قرار می‌گیرند. در بازه بیش از 1000 لوکس، تراس و لبه پنجره بیشترین شدت تابش را تجربه می‌کنند که می‌تواند منجر به خیرگی و تنش نوری شود، در حالی که عمق اتاق تقریباً بدون این مشکل است. این الگو ضرورت

استفاده از تمهیدات کنترلی در نواحی مرزی پنجره و تراس را تأیید می‌کند (شکل 6).
نتایج شاخص‌های ASE و SDA در مدل پایه نشان داد که تراس با ASE برابر 100% بیش از 250 ساعت در سال تابش مستقیم بیش از 1000 لوکس دریافت می‌کند که بسیار بالاتر از حد مجاز IES ($\geq 10\%$) است و خطر خیرگی و مشکلات حرارتی دارد، در حالی که SDA تراس نیز 100% و بیانگر دسترسی کامل به نور طبیعی است، اما نیاز به کنترل خیرگی دارد. در اتاق خواب، ASE برابر 36.16% (بالاتر از حد مطلوب) و SDA برابر 49% (کمتر از آستانه 55%) است، که هم‌زمان کمبود نور مفید و بروز خیرگی را نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر ضرورت استفاده از راهکارهای کنترلی مانند پوسته‌های متحرک یا سایه‌اندازها برای تعادل بین بهره‌گیری از نور روز و پیش‌گیری از خیرگی هستند (جدول 4).

جدول 4- مقدار شاخص‌های ASE و SDA در مدل پایه

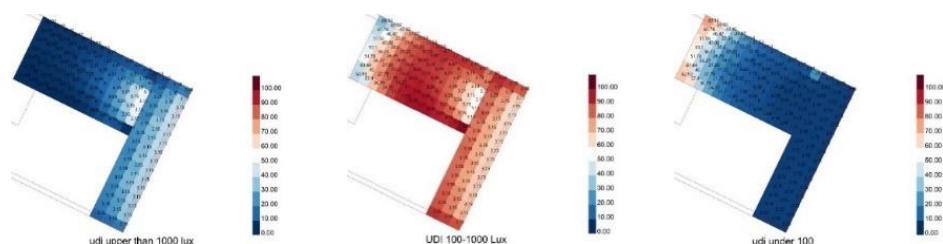
Tab.4 – ASE and SDA index values in the base model

شاخص	تراس	اتاق خواب
ASE	100	36.16
SDA	1	0.49



شکل 5- نمودار ساعتی سالانه مدل پایه در تراس

Fig.5 – Annual hourly diagram of the base model in the balcony



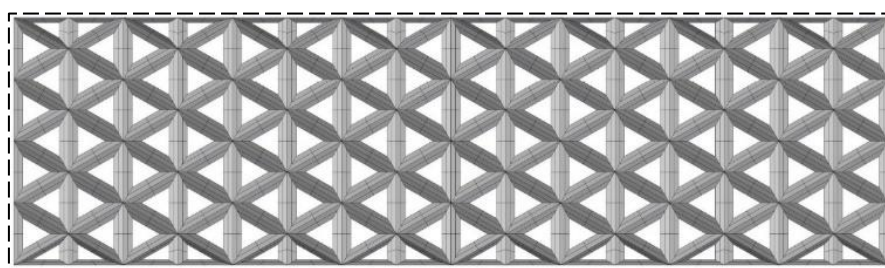
شکل 6- شاخص UDI در مدل پایه

Fig.6 – UDI index in the base model

3-3- هندسه مثلث

در گام دوم، مدل پوسته متحرک با الگوی هندسی مثلثی برای کنترل تابش مستقیم خورشید در ساعات پرشدت و حفظ نور طبیعی مفید طراحی و شبیه‌سازی شد (شکل 7). ساختار مثلثی به دلیل تقارن ساده و قابلیت تکرار، گزینه رایجی در پوسته‌هاست. بر اساس (جدول 5)، هندسه مثلثی با گشودگی‌های 30 و 40 درصد شدت نور مزاحم را در تراس و اتاق خواب کاهش داده و نور را عمدتاً در بازه 100-1000 لوکس،

هم‌پوشان با محدوده مطلوب 300-1000 لوکس، نگه می‌دارد؛ در گشودگی 40 درصد، 60%-80 و در 30 درصد، 70%-90 ساعات سال در این بازه قرار دارند. گشودگی‌های 50 و 60 درصد اگرچه در تراس مناسب‌اند، اما در اتاق خواب خیرگی ایجاد می‌کنند و گشودگی 70 درصد در هر دو فضا شدت نور را فراتر از حد مطلوب برده و خیرگی و آلودگی نوری ایجاد می‌کند، که پایداری منظر سبز داخلی را مختل می‌سازد.



شکل 7- پوسته مدل سازی شده جهت کنترل نور در تراس با الگو هندسی مثلث

Fig.7 – Simulated façade for daylight control in the balcony with triangular geometry

جدول 5- میزان شاخص UDI در هندسه مثلث

Tab.5 – UDI index values in the triangular geometry

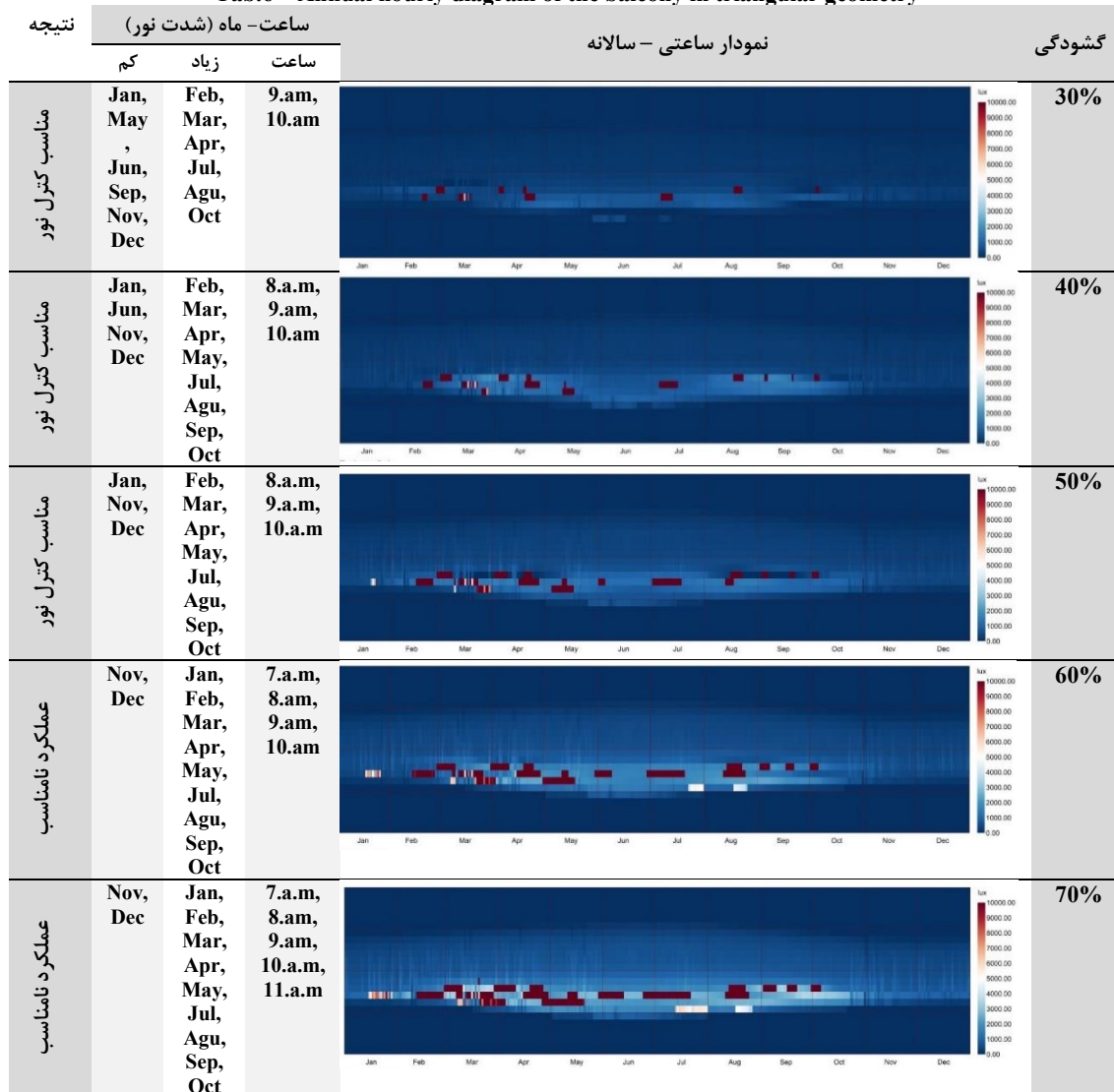
نتیجه	UDI>1000	UDI 100-1000	UDI<100	گشودگی
مناسب کنترل نور در تراس و اتاق خواب				30%
مناسب کنترل نور در تراس و اتاق خواب				40%
مناسب کنترل نور در تراس				50%
مناسب کنترل نور در تراس				60%
نامناسب کنترل نور تراس و اتاق خواب				70%

تحلیل نمودارهای ساعتی سالانه نشان می‌دهد که گشودگی‌های 30% و 40% مؤثرترین عملکرد را در کنترل شدت نور صبحگاهی دارند و بازه اوج تابش را به ساعات 9 تا 10 صبح محدود کرده و در ماه‌های پرنور، نور را در محدوده هدف پژوهش (300-1000 لوکس) نگه می‌دارند. در مقابل، گشودگی‌های 60% و 70% تابش شدید بین 7 تا 11 صبح ایجاد کرده و نور را فراتر از حد مطلوب می‌برند، به‌ویژه در 70% که موجب آلودگی نوری و تنش برای گیاهان می‌شود. بنابراین، گشودگی‌های 30% و 40% به‌عنوان بهینه‌ترین گزینه‌ها برای طراحی پوسته متحرک تراس در اقلیم گرم‌و‌خشک پیشنهاد می‌شوند (جدول 6).

نتایج شاخص‌های ASE و SDA در مدل مثلی نشان می‌دهد که ASE اتاق‌خواب نسبت به مدل پایه کاهش یافته و بین 14.7 در گشودگی 30% تا 31.10 در 70% متغیر است، بدون عبور از آستانه بحرانی 50، که کاهش خطر خیرگی و نور مزاحم را نشان می‌دهد. SDA بین 0.45 تا 0.47 باقی مانده و مشابه مدل پایه و نزدیک حد پایین استاندارد (0.50) است. این هندسه با کاهش شدید ASE در تراس و بهبود تدریجی SDA در گشودگی‌های بالاتر، تعادل مطلوبی میان کنترل تابش، تأمین نور مناسب برای گیاهان و ارتقای کیفیت بصری داخلی ایجاد کرده است (جدول 7).

جدول 6- نمودار ساعتی سالانه تراس در هندسه مثلث

Tab.6 – Annual hourly diagram of the balcony in triangular geometry



گشودگی‌های 50% و 60%، تراس مناسب است اما احتمال خیرگی در اتاق خواب افزایش می‌یابد و گشودگی 70% با تابش بیش از حد، خیرگی و کاهش کیفیت نور در هر دو فضا ایجاد می‌کند و نامناسب است (جدول 8). تحلیل داده‌های ساعتی سالانه تراس در هندسه مربعی نشان داد که گشودگی‌های 30% و 40% با تمرکز نور در بازه صبحگاهی محدود، بهترین تعادل را میان نور مفید و جلوگیری از تنش نوری ایجاد می‌کنند. از گشودگی 40% به بالا، توزیع زمانی تابش گسترش یافته و در ماه‌های پرنور منجر به افزایش شدت نور و خیرگی می‌شود. بنابراین، تنها گشودگی‌های 30% و 40% در این اقلیم قادر به کنترل مؤثر نور هستند و مقادیر بالاتر نیازمند مداخلات ثانویه برای بهینه‌سازی است، (جدول 9).

شاخص ASE و SDA در هندسه مربع: در اتاق خواب، شاخص SDA بین 0.42 تا 0.47 و کمی کمتر از حد مطلوب 0.50 بوده، اما نسبت به مدل پایه به‌طور پایدار حفظ شده است. این مقادیر بیانگر تأمین نسبی نور طبیعی و نیاز احتمالی به نور مصنوعی در بخش‌های عمیق فضا هستند. شاخص ASE نیز در همه سطوح گشودگی زیر آستانه 50 باقی مانده (از 12.09 در 30% تا 29.76 در 70%)، که نشان می‌دهد خیرگی در سطح قابل قبولی کنترل شده و خطر بحرانی وجود ندارد، (جدول 10).

جدول 7- مقدار شاخص‌های ASE و SDA در پوسته با

هندسه مثلث

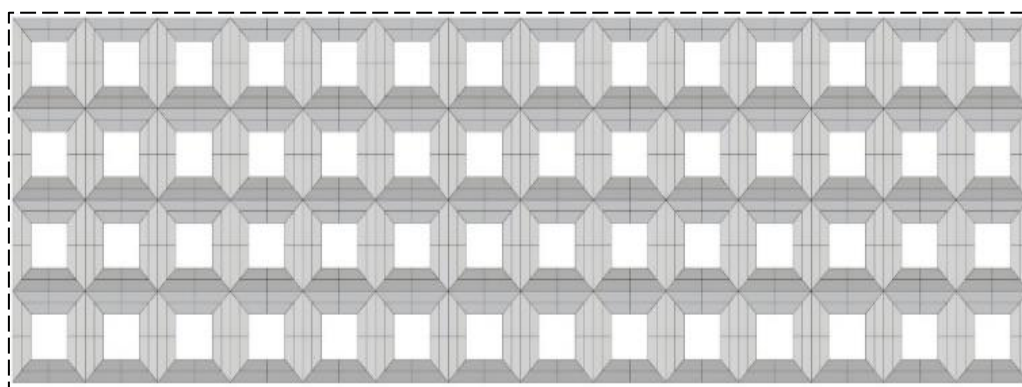
Tab.7 – ASE and SDA index values in the triangular façade

ASE	SDA	کاربری	گشودگی
18.20	0.22	تراس	30%
14.70	0.45	اتاق خواب	
28.90	0.35	تراس	40%
19.50	0.46	اتاق خواب	
43.70	0.45	تراس	50%
23.16	0.46	اتاق خواب	
60.20	0.87	تراس	60%
27.80	0.46	اتاق خواب	
78.50	0.93	تراس	70%
31.10	0.47	اتاق خواب	

4-3- هندسه مربع

مدل پوسته متحرک با الگوی هندسی مربعی به‌دلیل نظم ساختاری، قابلیت تکرار ماژولار و تغییر تراکم، به‌عنوان گزینه‌ای رایج در طراحی پوسته‌های اقلیمی بررسی شد، (شکل 8).

بررسی شاخص UDI در هندسه مربعی با سطوح گشودگی 30%-70% نشان داد که بازشدگی‌های 30% و 40% بهترین تعادل را میان تأمین نور کافی (1000-100 لوکس) و جلوگیری از تابش مزاحم برقرار کرده و در تراس و اتاق خواب عملکرد مطلوب دارند. در

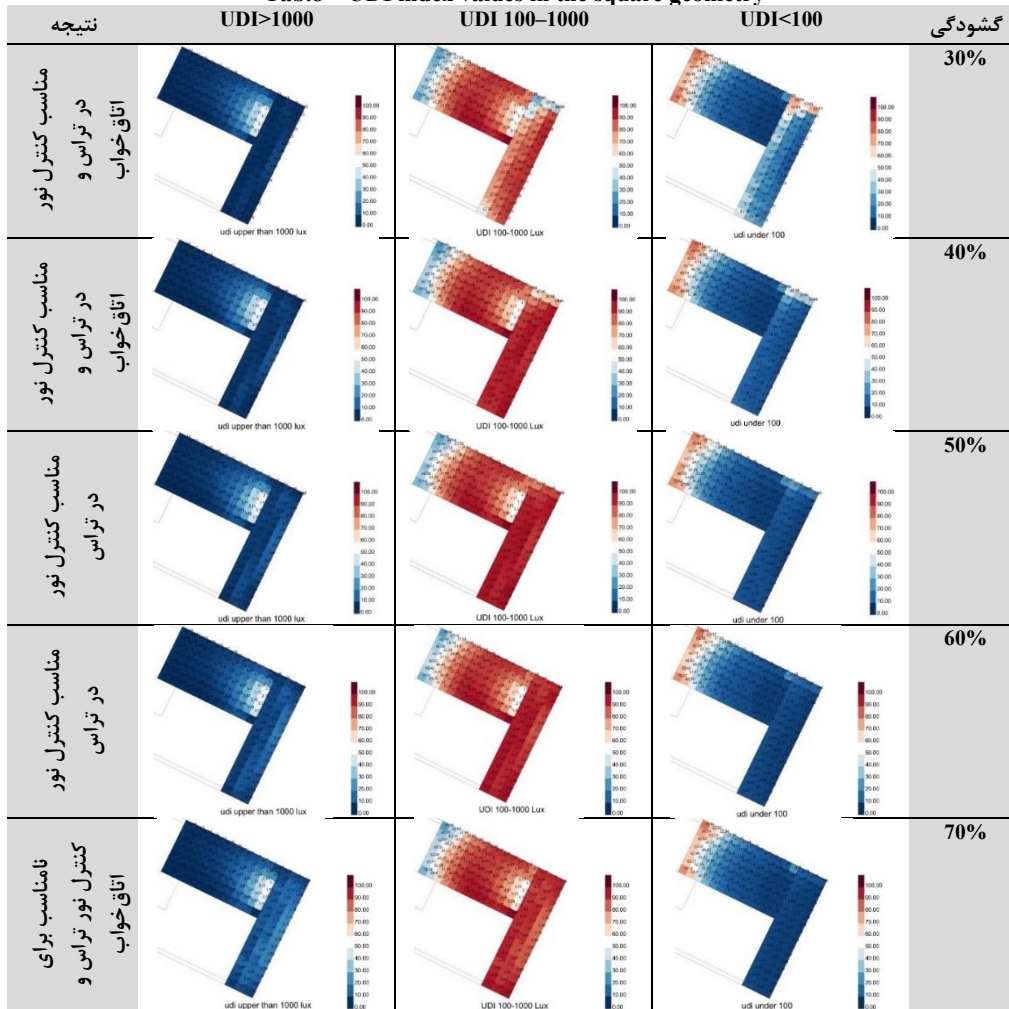


شکل 8- پوسته مدل سازی شده جهت کنترل نور در تراس با الگو هندسی مربع

Fig.8 – Simulated façade for daylight control in the balcony with square geometry

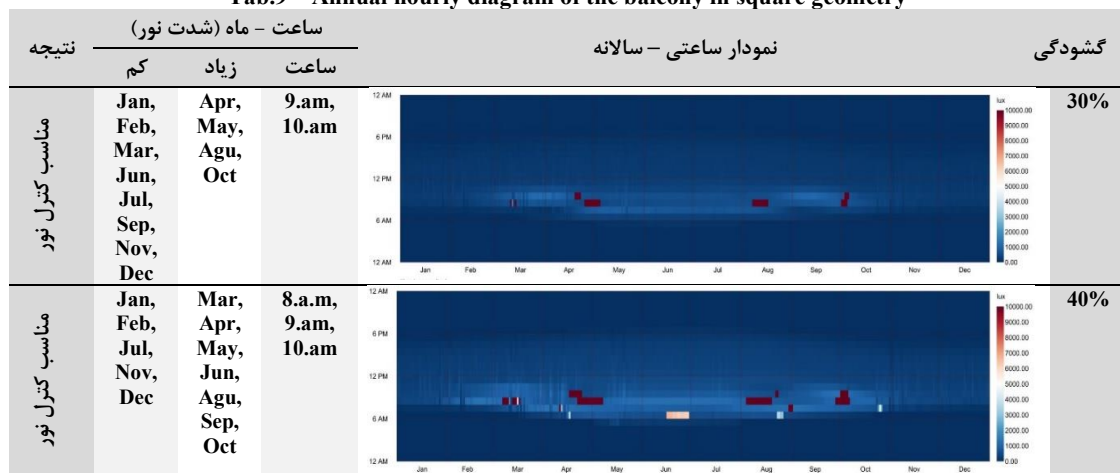
جدول 8- میزان شاخص UDI در هندسه مربع

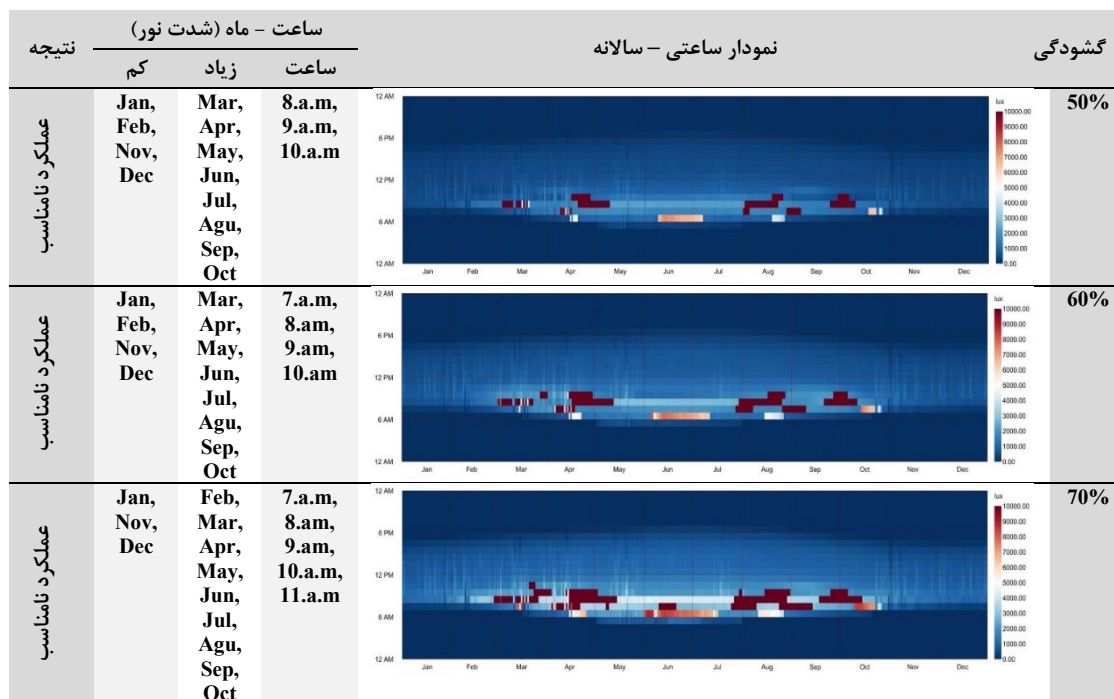
Tab.8 – UDI index values in the square geometry



جدول 9- نمودار ساعتی سالانه تراس در هندسه مربع

Tab.9 – Annual hourly diagram of the balcony in square geometry





نور مطلوب (100-1000 لوکس) و کاهش تابش کمتر از 100 یا بیش از 1000 لوکس دارند، به طوری که شرایط مناسب برای گیاهان تراس و آسایش بصری اتاق خواب حفظ می شود. گشودگی های 50% و 60% نور مفید را حفظ می کنند اما سهم تابش شدید افزایش می یابد و بازشدگی 70% موجب خیرگی و آلودگی نوری می شود. بنابراین، بازشدگی های 30% و 40% بیشترین تعادل نوری را در این اقلیم فراهم می کنند (جدول 11).

تحلیل داده های ساعتی سالانه تراس در مدل شش ضلعی نشان می دهد که بازشدگی های 30% و 40% با محدود کردن تابش به بازه صبحگاهی (8 تا 10) و کاهش ماه های پرت شدت به چهار ماه، کنترل مطلوبی بر نور ورودی دارند و از خیرگی و تنش نوری گیاهان جلوگیری می کنند. در مقابل، بازشدگی های 50% به بالا موجب گسترش زمان تابش تا 7 تا 11 صبح و افزایش تعداد ماه های پر نور می شوند؛ به ویژه در 70% که تقریباً کل سال را شامل می شود. این امر منجر به عبور کنترل نشده نور، خیرگی، افزایش دما و آلودگی نوری شده و برای اهداف طراحی اقلیمی نامناسب است، (جدول 12).

جدول 10- مقدار شاخص های ASE و SDA در پوسته با

هندسه مربع

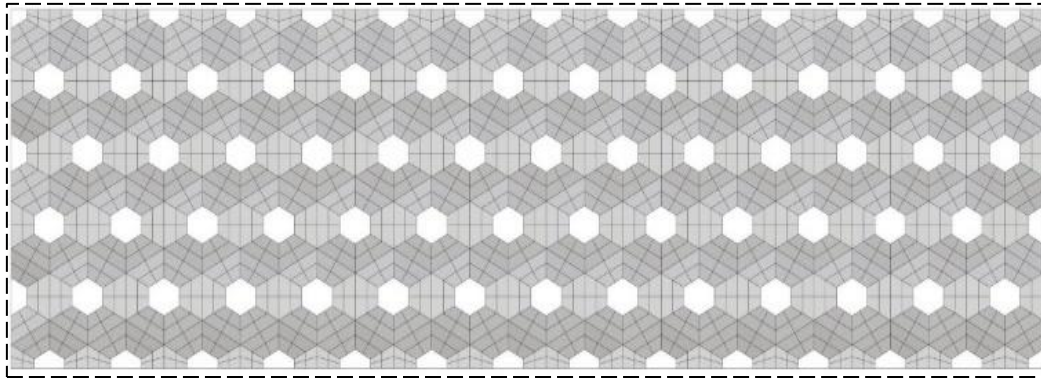
Tab.10 – ASE and SDA index values in the square façade

گشودگی	کاربری	SDA	ASE
30%	تراس	0.46	6.25
	اتاق خواب	0.42	12.09
40%	تراس	0.60	18.40
	اتاق خواب	0.44	16.70
50%	تراس	0.82	32.10
	اتاق خواب	0.45	21.35
60%	تراس	0.95	44.85
	اتاق خواب	0.46	25.60
70%	تراس	1.00	52.08
	اتاق خواب	0.47	29.76

3-5- هندسه شش ضلعی

مدل پوسته متحرک با هندسه شش ضلعی به دلیل پوشش پیوسته، انعطاف پذیری و توزیع متعادل نور یکی دیگر از هندسه های مورد استفاده توسط سایر پژوهشگران برای اهداف مشابه است، (شکل 9).

بررسی شاخص UDI در هندسه شش ضلعی نشان داد که بازشدگی های 30% و 40% بهترین عملکرد را در تأمین



شکل 9- پوسته مدل سازی شده جهت کنترل نور در تراس با الگو هندسی شش ضلعی

Fig.9 – Simulated façade for daylight control in the balcony with hexagonal geometry

جدول 11- میزان شاخص UDI در شش ضلعی

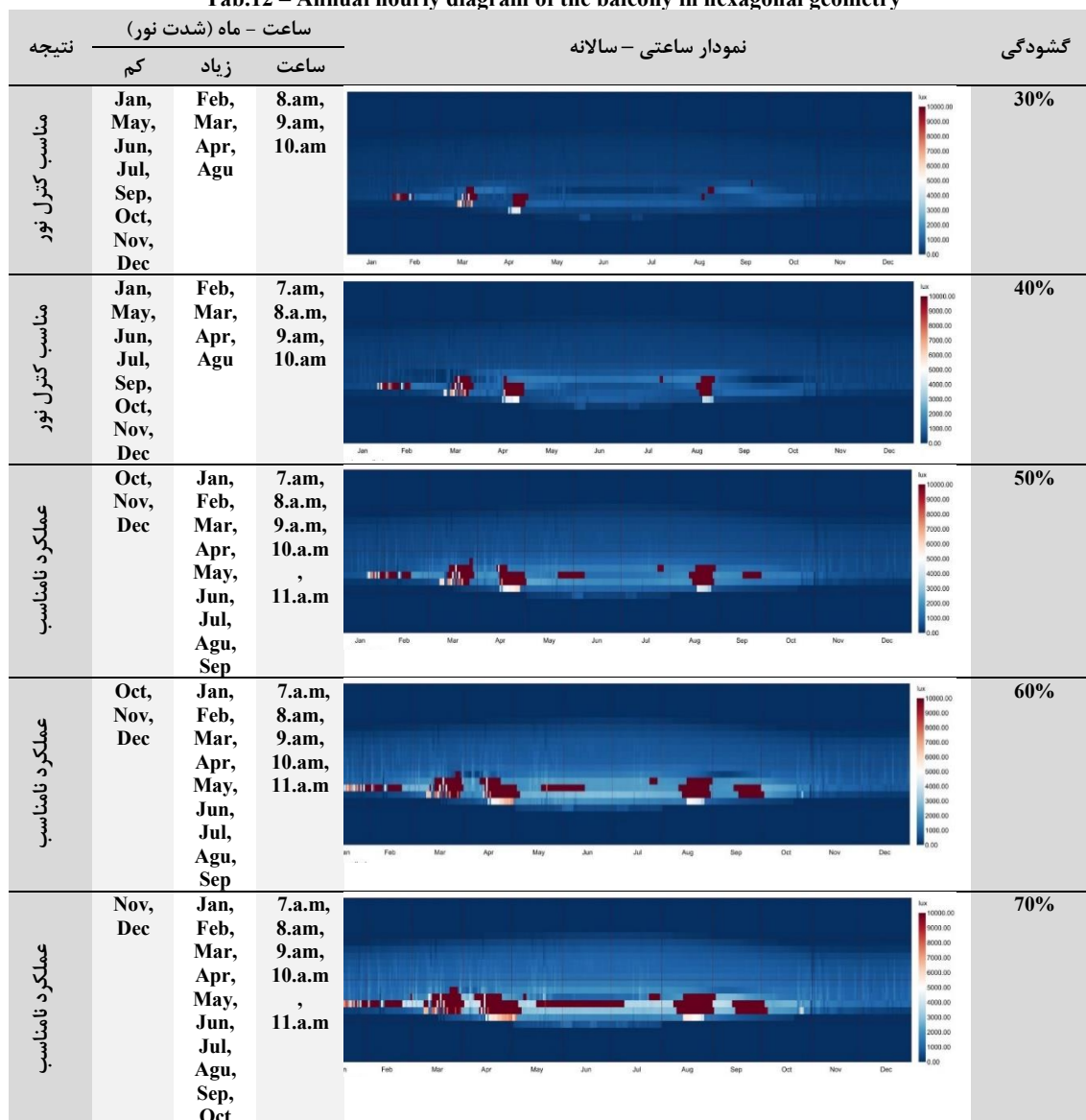
Tab.11 – UDI index values in the hexagonal geometry

نتیجه	UDI>1000	UDI 100-1000	UDI<100	گشودگی
مناسب کنترل نور در تراس و اتاق خواب				30%
مناسب کنترل نور در تراس و اتاق خواب				40%
مناسب کنترل نور در تراس				50%
مناسب کنترل نور در تراس				60%
نامناسب کنترل نور برای اتاق خواب				70%



جدول 12- نمودار ساعتی سالانه تراس در هندسه شش ضلعی

Tab.12 – Annual hourly diagram of the balcony in hexagonal geometry



جدول 13- مقدار شاخص های ASE و SDA در پوسته با هندسه

شش ضلعی

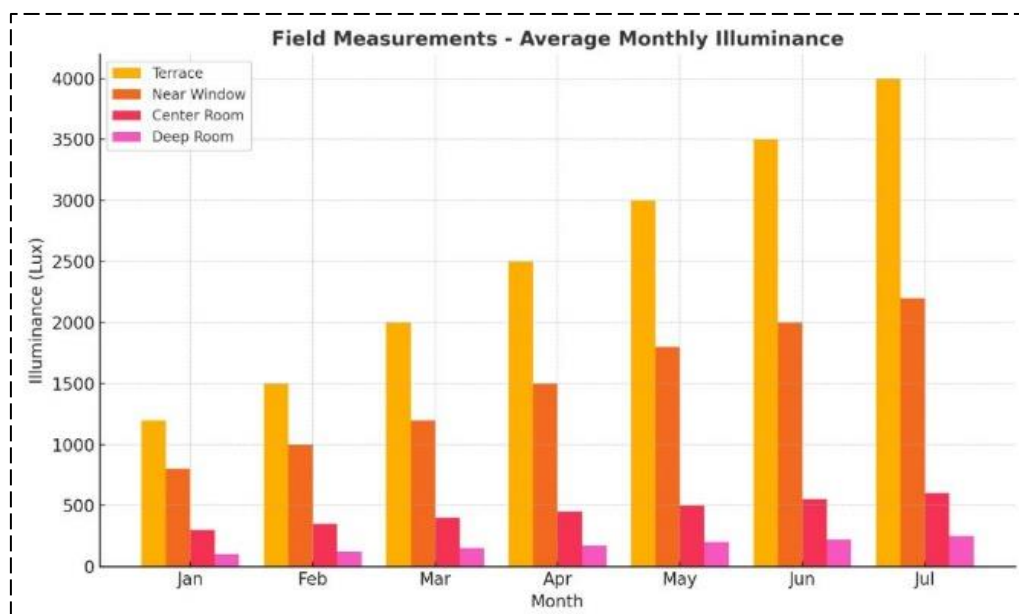
Tab.13 – ASE and SDA index values in the hexagonal façade

ASE	SDA	کاربری	
0.00	0.25	تراس	30%
0.00	0.20	اتاق خواب	
2.08	0.54	تراس	40%
1.00	0.35	اتاق خواب	
18.75	0.91	تراس	50%
12.09	0.45	اتاق خواب	
39.58	0.97	تراس	60%
25.03	0.47	اتاق خواب	
58.33	1.00	تراس	70%
29.76	0.49	اتاق خواب	

شاخص ASE و SDA در هندسه شش ضلعی: در مدل شش ضلعی، شاخص SDA در اتاق خواب از 0.20 در گشودگی 30% تا 0.49 در گشودگی 70% افزایش یافته و سطحی قابل قبول از نور طبیعی را بدون رسیدن به خیرگی شدید حفظ کرده است. شاخص ASE نیز از صفر تا 29.76 تغییر کرده و در تمام حالات زیر آستانه بحرانی 50 باقی مانده است، که بیانگر کنترل مناسب نور مزاحم است. به طور کلی، گشودگی های 40% و 50% بهترین توازن را میان تأمین نور مفید در تراس و حفظ آسایش بصری ساکنان در اتاق خواب ارائه می دهند، (جدول 13).

40% بهترین تأمین نور طبیعی را دارد ($SDA=0.60$) و بالاترین میزان قرارگیری در محدوده مطلوب UDI (300-1000 لوکس) را فراهم می‌کند، به‌ویژه نزدیک پنجره (70%-80% زمان‌ها). مدل مثلثی 30% ضعیف‌ترین عملکرد SDA (0.22) و مدل پایه $SDA=1.00$ با تابش کنترل‌نشده داشت. در شاخص ASE، مدل شش‌ضلعی 30% بهترین عملکرد (0.00) و مدل پایه بیشترین خیرگی (100%) را نشان داد؛ مدل مربعی 30% ASE پایینی (6.25) داشت. تحلیل ساعتی سالانه بیانگر شدت‌های نامتوازن و خطر خیرگی بالا در مدل پایه و توازن مناسب در مدل‌های مربعی و شش‌ضلعی با بازشدگی 40% بود. به‌طور کلی، مدل مربعی 40% برای بیشینه‌سازی بهره‌گیری از نور مفید و رشد گیاهان، و مدل شش‌ضلعی 30% برای حذف خیرگی بهترین عملکرد را در اقلیم گرم‌وخشک ارائه می‌دهند. مدل مربعی 40% به‌عنوان گزینه بهینه برای تأمین نور مفید و حفظ پایداری نوری سالانه انتخاب می‌شود، در حالی که شش‌ضلعی 30% برای حذف کامل خیرگی توصیه می‌د، هرچند میزان نور مفید کاهش می‌یابد.

بر اساس نمودار (شکل 10) که میانگین شدت روشنایی (Lux) در هفت ماه دی تا تیر و چهار نقطه را نشان می‌دهد، شدت نور تراس در تمام ماه‌ها به‌طور قابل‌توجهی فراتر از محدوده مطلوب منظر سبز داخلی (300-1000 لوکس) است؛ به‌ویژه در زمستان (دی و بهمن) بیش از 1500 لوکس و در خرداد و تیر شدت بیشتری مشاهده می‌شود، که خطر خیرگی، افزایش دمای ناخواسته و کاهش رشد گیاهان را به همراه دارد. کنار پنجره نیز مقادیری نزدیک یا بالاتر از آستانه خیرگی (1000 لوکس) داشته و موجب آزار بصری و تنش نوری برای گیاهان می‌شود. در مرکز اتاق، شدت نور در زمستان کمتر از 300 لوکس و کمبود روشنایی وجود دارد، در تابستان گاهی به محدوده مطلوب نزدیک می‌شود و حتی در برخی ساعات بیش‌تابش رخ می‌دهد. عمق اتاق همواره کمبود مزمن نور دارد و شدت کمتر از 300 لوکس باقی می‌ماند که تنها با بازتاب‌دهنده‌ها، سطوح روشن یا نور مصنوعی ویژه گیاهان قابل جبران است. به‌طور کلی، توزیع نور نامتعادل است؛ بخش‌های جلویی (تراس و کنار پنجره) بیش‌تابش و بخش‌های پشتی کمبود نور دارند. تحلیل شاخص‌ها نشان داد که مدل مربعی با بازشدگی



شکل 10- نمودار هفت ماهه داده‌های میدانی

Fig.10 – Seven-month diagram of field data

4- نتیجه گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که استفاده از پوسته‌های متحرک با هندسه‌های متفاوت می‌تواند به‌طور مؤثر شرایط نوری تراس‌های سبز و فضاهای داخلی متصل به آن‌ها را در اقلیم گرم‌وخشک بهینه‌سازی کند. تحلیل داده‌های میدانی در بازه دی 1403 تا تیر 1404 و شبیه‌سازی‌های دقیق نوری با موتور Radiance نشان داد که مدل پایه، برخلاف تأمین کامل نور طبیعی، دچار تابش بیش‌ازحد، خیرگی شدید، و ایجاد استرس نوری برای گیاهان است. نتایج شبیه‌سازی سه هندسه مثلثی، مربعی و شش‌ضلعی در سطوح مختلف گشودگی (30% تا 70%) بیانگر آن بود که انتخاب هندسه و درصد بازشدگی نقش تعیین‌کننده‌ای در ایجاد تعادل بین تأمین نور کافی و جلوگیری از خیرگی دارد. مدل مربعی با بازشدگی 40% بالاترین SDA و UDI را در بازه مطلوب 300 تا 1000 لوکس فراهم آورد و درعین‌حال، خطر خیرگی را در حد قابل‌قبولی نگه داشت. از سوی دیگر، مدل شش‌ضلعی با بازشدگی 30% کمترین مقدار ASE را ثبت کرد و بهترین عملکرد را در حذف خیرگی داشت، هرچند میزان UDI آن کمتر از مدل مربعی بود. مقایسه تحلیل ساعتی سالانه نشان داد که مدل‌های مربعی و شش‌ضلعی با بازشدگی 40% پایداری نوری بیشتری در ساعات میانی روز ایجاد کرده و برای رشد گیاهان آپارتمانی و آسایش بصری کاربران مناسب‌تر هستند. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه تأیید می‌کند که طراحی هوشمند پوسته‌های متحرک با انتخاب دقیق هندسه و میزان بازشدگی، می‌تواند هم‌زمان اهداف زیست‌محیطی، کارکردی و زیبایی‌شناختی را محقق سازد. این رویکرد نه‌تنها خطر خیرگی و آسیب به گیاهان را کاهش می‌دهد، بلکه با بهینه‌سازی بهره‌گیری از نور طبیعی، موجب ارتقاء کیفیت زیستی تراس‌های سبز در اقلیم‌های گرم‌وخشک می‌شود. پوشش گیاهی داخلی علاوه بر نقش تزئینی، می‌تواند با جذب بخشی از نور مستقیم و افزایش رطوبت نسبی، شرایط نوری ملایم‌تری در فضا ایجاد کند. هرچند مدل حاضر نوع گیاه را به‌صورت پارامتریک لحاظ نکرده است، اما محدوده نوری مناسب برای رشد آن‌ها مبنای تحلیل قرار گرفته و پیشنهاد می‌شود در

پژوهش‌های آینده، مدل سه‌بعدی گیاهان با ویژگی برگ واقعی وارد تحلیل شود. در ادامه، بهره‌گیری از ارزیابی‌های میدانی و توسعه سامانه‌های خودکار تنظیم بازشدگی پوسته‌ها می‌تواند زمینه‌ساز عملکرد بهینه‌تر این سیستم‌ها در شرایط واقعی باشد. نتایج این پژوهش در خصوص شاخص SDA و ASE با یافته‌های Brzezicki (2024) و Hosseini et al., (2023) که بر کارایی بازشوهای متقارن در بهبود توزیع روشنائی تأکید داشته‌اند هم‌خوانی دارد. درحالی‌که تفاوت در مقدار ASE نسبت به El-Bahrawy (2022) می‌تواند ناشی از تفاوت در بازتاب مصالح و نسبت گشودگی پوسته باشد. این مقایسه نشان می‌دهد که استفاده از بازشوهای بازشدگی کمتر در اقلیم گرم و خشک، تعادل بهتری میان آسایش بصری و کاهش خیرگی ایجاد می‌کند. این پژوهش با محدودیت‌هایی همراه بود؛ از جمله دشواری دسترسی به ابزارهای دقیق و پرهزینه بودن برداشت‌های میدانی بلندمدت، محدودیت زمانی و مکانی در شرایط جوی خاص، نبود امکان آزمون اثر نور طبیعی بر گیاهان واقعی یا دیوار سبز در محیط کنترل‌شده، کمبود منابع داخلی در حوزه منظر داخلی و گیاهان سایه‌دوست، و عدم امکان ارزیابی سالانه همه مدل‌ها. برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود: طراحی و ارزیابی دیوارهای سبز در ترکیب با پوسته‌های متحرک در محیط‌های اداری، بهینه‌سازی نور طبیعی در فضاهای نیمه‌باز مسکونی با بهره‌گیری از هندسه و پترن‌های ایرانی-اسلامی در قالب رویکرد ایستا، و تحلیل تطبیقی عملکرد پوسته‌های متحرک در اقلیم‌های مختلف ایران به‌ویژه اقلیم سرد و کوهستانی. در این پژوهش تحلیل حساسیت عددی انجام نشد، زیرا تمرکز بر ارزیابی رفتار سالانه روشنائی و مقایسه سناریوهای پوسته بود. با این حال، بررسی نتایج نشان داد که تغییرات پارامترهای اصلی مدل در بازه‌های متعارف (نظیر ضرایب بازتاب و بازشدگی پوسته) تأثیر معناداری بر روند کلی نتایج نداشت. بنابراین می‌توان پایداری نسبی مدل را در محدوده پارامترهای بررسی‌شده فرض کرد. انجام تحلیل حساسیت دقیق‌تر در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.



Journal of Building Performance Simulation, 18(2), 161-190.

<https://doi.org/10.1080/19401493.2024.2432916>

Dong, T., Zhong, Q., & Yue, B. (2024). How Green Space Justice in urban built-up areas affects public mental health: a moderated chain mediation model. *Frontiers in Public Health*, 12, 1442182. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1442182>

El-Bahrawy, A. M. (2025). Balancing the Parameters of Perforated Solar Screens to Optimize Daylight and Glare Performance in Office Buildings. *Journal of Daylighting*, 12(1), 167-189. <https://dx.doi.org/10.15627/jd.2025.10>

Fallahi, F., Ahmadi, F., Khakzand, M., & Shahbazi, Y. (2025). Designing a Kinetic Façade to Control Glare: Inspiration of Long-Day Plants Pattern. *Journal of Daylighting*, 12(2), 265-277. <https://dx.doi.org/10.15627/jd.2025.18>

Garcia-Fernandez, B., & Omar, O. (2023). Sustainable performance in public buildings supported by daylighting technology. *Solar Energy*, 264, 112068. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112068>

Gholami, H., & Talaei, M. (2024). Synergistic Strategies: Comparing Energy Performance in Climate-Adaptive Building Envelopes for Iran's Cold Semi-Arid Climate. *Journal of Daylighting*, 11(2), 181-202. <https://dx.doi.org/10.15627/jd.2024.14>

Globa, A., Costin, G., Tokede, O., Wang, R., Khoo, C. K., & Moloney, J. (2022). Hybrid kinetic facade: fabrication and feasibility evaluation of full-scale prototypes. *Architectural Engineering and Design Management*, 18(6), 791-811. <https://doi.org/10.1080/17452007.2021.1941739>

Goharian, A., Mahdaveinejad, M., Ghazazani, S., Hosseini, M., Zamani, Z., Yavari, H., ... & Shoghi, F. (2025). Designing Adaptability Strategy to a Novel Kinetic Adaptive Façade (NKAF); Toward a Pioneering Method in Dynamic-objects Daylight Simulation (Post-Processing). *Journal of Daylighting*, 12, 69-90. <https://dx.doi.org/10.15627/jd.2025.5>

Gonçalves, M., Figueiredo, A., Almeida, R. M. S. F., & Vicente, R. (2024). Dynamic façades in buildings: A systematic review across thermal comfort, energy efficiency and daylight performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114474. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114474>

Grover, S., Varadharajan, N., & Venu, S. (2024). Urbanization and psychosis: an update of recent evidence. *Current Opinion in Psychiatry*, 37(3), 191-201. <https://doi.org/10.1097/YCO.0000000000000931>

Hosseini, M., Mohammadi, M., & Guerra-Santin, O. (2019). Interactive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's

¹ UDI (Useful Daylight Illuminance)

² DA (Daylight Autonomy)

³ SDA (Spatial Daylight Autonomy)

⁴ ASE (Annual Sunlight Exposure)

References

Abedini, M. H., Gholami, H., & Sangin, H. (2025). Multi-objective optimization of window and shading systems for enhanced office Building performance: A case study in Qom, Iran. *Journal of Daylighting*, 12(1), 91-110. <https://dx.doi.org/10.15627/jd.2025.6>

Amani-Beni, M., Xie, G., Yang, Q., Russo, A., & Khalilnezhad, M. R. (2022). Socio-Cultural Appropriateness of the Use of Historic Persian Gardens for Modern Urban Edible Gardens. *Land*, 11(1), 38. <https://doi.org/10.3390/land11010038>

Andrade, T., Beirão, J., Arruda, A., & Vinagre, N. (2024). Kinetic module in bimetal: A biomimetic approach adapting the kinetic behavior of bimetal for adaptive Façades. *Materials & Design*, 239, 112807. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112807>

Bahri, S. Y., Forment, M. A., Riera, A. S., Heiranipour, M., & Hosseini, S. N. (2025). Kinetic facades as a solution for educational buildings: A multi-objective optimization simulation-based study. *Energy Reports*, 13, 3915-3928. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.03.021>

Bahri, S. Y., Forment, M. A., Riera, A. S., Heiranipour, M., & Hosseini, S. N. (2025). Kinetic facades as a solution for educational buildings: A multi-objective optimization simulation-based study. *Energy Reports*, 13, 3915-3928. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.03.021>

Bina, M., & Zabi, Z. (2021). Optimization of office building window lighting in Ahvaz. *Journal of Solar Energy Research*, 6(1), 634-647. <https://doi.org/10.22059/jsr.2021.311868.1182>

Brzezicki, M. (2024). A Systematic Review of the Most Recent Concepts in Kinetic Shading Systems with a Focus on Biomimetics: A Motion/Deformation Analysis. *Sustainability*, 16(13), 5697. <https://doi.org/10.3390/su16135697>

Brzezicki, M. (2024). Enhancing Daylight Comfort with Climate-Responsive Kinetic Shading: A Simulation and Experimental Study of a Horizontal Fin System. *Sustainability*, 16(18), 8156. <https://doi.org/10.3390/su16188156>

Depari, A. S. (2023). Enhancing Sustainability in Smart Buildings: Exploring Kinetic Facade Design Through Algorithmic Strategies. *Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 2(04), 9-18. <https://doi.org/10.56127/jukim.v2i04.750>

Dervishaj, A., & Gudmundsson, K. (2025). Parametric design workflow for solar, context-adaptive and reusable facades in changing urban environments.



Daylighting and Exposure Optimization: Assessing Different Movement Approaches. *Journal of Daylighting*, 12(2), 252-264.
<https://dx.doi.org/10.15627/jd.2025.17>

Li, H., Jia, J., Yu, H., & Wang, X. (2024). Research on the daylighting metrics of college classrooms based on visual comfort in China. *Journal of Building Engineering*, 98, 111178.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111178>

Liu, L., Sun, C., Liu, Y., Leng, H., & Yang, Y. (2024). Optimized design research on daylighting performance of cold land buildings based on improved neural network. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1). <https://doi.org/10.2478/amns-2024-0730>

Mehrvarz, F., Bemanian, M., Nasr, T., Mansoori, R., AL-Kazee, M. F., Khudhayer, W. A., & Mahdavinjad, M. (2024). Designerly approach to design responsive façade for occupant visual comfort in different latitudes. *Journal of Daylighting*, 11(1), 149-164.
<https://dx.doi.org/10.15627/jd.2024.9>

Navvab, M. (2011). Lighting Aspects for Plant Growth in Controlled. 27th Sess. CIE South Africa, (430-440). https://www.researchgate.net/publication/259043807_Plant_Lighting_Aspects_for_Plant_Growth_in_Controlled_Environments

Ploycharoen, N., Borisuit, A., & Suriyothin, P. (2024). Daylight performance for work-from-home workstation: A case study of a residential condominium unit in Bangkok. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1361, No. 1, p. 012052). IOP Publishing.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1361/1/012052/meta>

Qu, S., & Ma, R. (2024). Exploring Multi-Sensory Approaches for Psychological Well-Being in Urban Green Spaces: Evidence from Edinburgh's Diverse Urban Environments. *Land*, 13(9), 1536.
<https://doi.org/10.3390/land13091536>

Quaglio, C., Todella, E., & Lami, I. M. (2021). Adequate Housing and COVID-19: Assessing the Potential for Value Creation through the Project. *Sustainability*, 13(19), 10563.
<https://doi.org/10.3390/su131910563>

Reinhart, C. F. (2014). *Daylighting handbook I: Fundamentals, designing with the sun*.
https://www.researchgate.net/publication/309661177_Daylighting_Handbook_I

Sangtarash, F., Nikghadam, N., Fayaz, R., & Matini, M. R. (2025). Utilizing Kinematic Models of Kinetic Facades to Obtain Optimal Natural Lighting in an Office Building. *Journal of Architectural Engineering*, 31(1), 04024050.
<https://doi.org/10.1061/JAEIED.AEENG-1705>

positions by 2D and 3D shape changes. *Building and Environment*, 165, 106396.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106396>

Hosseini, S. M., & Heidari, S. (2022). General morphological analysis of Orosi windows and morpho butterfly wing's principles for improving occupant's daylight performance through interactive kinetic façade. *Journal of Building Engineering*, 59, 105027.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105027>

Hosseini, S. M., Heidari, S., Attia, S., Wang, J., & Triantafyllidis, G. (2024). Biomimetic kinetic façade as a real-time daylight control: complex form versus simple form with proper kinetic behavior. *Smart and Sustainable Built Environment*.
<https://doi.org/10.1108/SASBE-03-2024-0090>

Hosseini, S. M., Heidari, S., Attia, S., Wang, J., & Triantafyllidis, G. (2024). Biomimetic kinetic façade as a real-time daylight control: complex form versus simple form with proper kinetic behavior. *Smart and Sustainable Built Environment*.
<https://doi.org/10.1108/SASBE-03-2024-0090>

Hosseini, S. M., Mohammadi, M., Schröder, T., & Guerra-Santin, O. (2020). Integrating interactive kinetic façade design with colored glass to improve daylight performance based on occupants' position. *Journal of Building Engineering*, 31, 101404.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101404>

Jung, C., & Arar, M. (2023). Natural vs. Artificial Light: A Study on the Influence of Light Source on Chlorophyll Content and Photosynthetic Rates on Indoor Plants. *Buildings*, 13(6), 1482.
<https://doi.org/10.3390/buildings13061482>

Kallio, P., Konert, G., Pyytövaara, S., & Tikkanen, M. (2025). Molecular Photosynthesis Research Facilitating Technology Development Towards Enhanced Indoor Farming. *Physiologia Plantarum*, 177(4), e70407.
<https://doi.org/10.1111/ppl.70407>

Kamalabadi, S. T., Hosseini, S. M., & Azmoodeh, M. (2025). Integration of bio-inspired adaptive systems for optimizing daylight performance and glare control. *Journal of Building Engineering*, 105, 112415.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112415>

Khastar, S., & Taleghani, M. (2024). Thermal conditions and daylight availability in different zones of courtyard buildings; a study in Iran. *Advances in Building Energy Research*, 18(4), 384-402.
<https://doi.org/10.1080/17512549.2024.2363878>

Kim, D. H., Luong, H. T., & Nguyen, T. T. (2024). Optimizing the shading device configuration of kinetic façades through daylighting performance assessment. *Buildings*, 14(4), 1038.
<https://doi.org/10.3390/buildings14041038>

Kızılörenli, E., & Orhon, A. V. (2025). Tessellation-Based Origami-Inspired Movable Façade for

Takhmasib, M., Lee, H. J., & Yi, H. (2023). Machine-learned kinetic Façade: Construction and artificial intelligence enabled predictive control for visual comfort. *Automation in Construction*, 156, 105093. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105093>

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>

Tan, C. L., Wong, N. H., Tan, P. Y., Ismail, M., & Wee, L. Y. (2017). Growth light provision for indoor greenery: A case study. *Energy and Buildings*, 144, 207-217. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.044>

Torres, M., Aguirre-Maldonado, E. D., Cuenca, F., & Ordóñez-Salazar, S. (2024). Kinetic architecture as a response to adaptive behavior to climate, a case study through virtual models. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, 11, 1. [http://www.doi.org/10.14455/ISEC.2024.11\(1\).AAE-10](http://www.doi.org/10.14455/ISEC.2024.11(1).AAE-10)

Yunitsyna, A., & Sulaj, E. (2025). Daylight Optimization of the South-Faced Architecture Classrooms Using Biomimicry-Based Kinetic Façade Shading System. *Journal of Daylighting*, 12(1), 1-20. <https://dx.doi.org/10.15627/jd.2025.1>

Zhang, Y., Zhang, Y., & Li, Z. (2022). A novel productive double skin façade for residential buildings: Concept, design and daylighting performance investigation. *Building and Environment*, 212, 108817. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108817>

Zheng, Y., Wu, J., Zhang, H., Lin, C., Li, Y., Cui, X., & Shen, P. (2025). A novel sun-shading design for indoor visual comfort and energy saving in typical office space in Shenzhen. *Energy and Buildings*, 328, 115083. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115083>

Şenel, H. A., İlerisoy, Z. Y., & Soyluk, A. (2024). Using KRF Structures as an Adaptive Façade and Evaluation of Daylight Performance Based on Geometry: A Case Study in Ankara. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 11(1), 1-13. <https://doi.org/10.11113/ijbes.v11.n1.1128>

Soflaei, F., Shokouhian, M., & Shemirani, S. M. M. (2016). Investigation of Iranian traditional courtyard as passive cooling strategy (a field study on BS climate). *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1), 99-113. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2015.12.001>

Sommese, F., Hosseini, S. M., Badarnah, L., Capozzi, F., Giordano, S., Ambrogio, V., & Ausiello, G. (2024). Light-responsive kinetic façade system inspired by the Gazania flower: A biomimetic approach in parametric design for daylighting. *Building and Environment*, 247, 111052. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111052>

Sugano, S., Ishii, M., & Tanabe, S. I. (2024). Adaptation of indoor ornamental plants to various lighting levels in growth chambers simulating workplace environments. *Scientific reports*, 14(1), 17424. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67877-y>

Sureshkumar Jayakumari, S. D., Imalka, S. T., Yang, R. J., Liu, C., Yang, S., Marschall, M., ... & Williams, N. (2024). Energy and Daylighting Performance of Kinetic Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) Façade. *Sustainability*, 16(22), 9739. <https://doi.org/10.3390/su16229739>

Sureshkumar Jayakumari, S. D., Imalka, S. T., Yang, R. J., Liu, C., Yang, S., Marschall, M., Corradini, P. S., Benito, A. F., & Williams, N. (2024). Energy and Daylighting Performance of Kinetic Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) Façade. *Sustainability*, 16(22), 9739. <https://doi.org/10.3390/su16229739>