نشریهٔ علمی باغ نظر، ۲۲(۱۴۶)، ۵۵-۷۲ / مرداد ۱۴۰۴
DOI: 10.22034/bagh.2025.511783.5783

ترجمهٔ انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
Daylight Control in Greenhouse Environments Using Kinetic Skin and Annual Energy Consumption Optimization
در همین شمارهٔ مجله به‌چاپ رسیده است.

مقالهٔ پژوهشی

کنترل نور روز در محیط گلخانه‌ای با استفاده از پوسته‌های متحرک و تعدیل مصرف انرژی سالانه*

پوریا عبدالی[۱]، یاسر گلدوست[۲]**، فریال احمدی[۳]

۱. گروه معماری، دانشکدهٔ هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.
۲. گروه معماری، دانشکدهٔ هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.
۳. دانشکدهٔ بهداشت عمومی، دانشگاه ممفیس، آمریکا.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

چکیده

بیان مسئله: گیاهان سایه‌دوست به نور زیاد حساس هستند و در محیط‌های کم‌نور رشد می‌کنند. این گیاهان که بخشی مهم از منظر سبز داخلی محسوب می‌شوند، برای رشد به شدت نوری بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس نیاز دارند. از سوی دیگر، گلخانه‌ها برای تأمین شرایط مطلوب رشد، وابسته به تجهیزات مکانیکی و الکترونیکی پرمصرف هستند که موجب افزایش مصرف انرژی می‌شود. ازاین‌رو، کنترل نور روز و همچنین کاهش مصرف انرژی در این واحدهای تولیدی اهمیت زیادی دارد. پوسته‌های متحرک به‌عنوان یکی از راهکارهای معماری پایدار، در این پژوهش استفاده شده و نقش مهمی در کنترل نور و کاهش مصرف انرژی دارند.

هدف پژوهش: هدف این پژوهش ارائهٔ پوستهٔ متحرک برای کنترل نور روز در گلخانه‌های مخصوص گیاهان سایه‌دوست و کاهش مصرف انرژی در شهر بابلسر است.

روش پژوهش: این پژوهش با روش شبه‌تجربی انجام شده است. ابتدا، مطالعات نظری با روش اسنادی بررسی شده و سپس مدل‌سازی نرم‌افزاری در Rhino و Grasshopper انجام شده است. پوستهٔ پیشنهادی با الگوبرداری از ارسی‌های سنتی معماری بومی مازندران طراحی شده و از سه هندسهٔ مربع، دایره و دوازده ضلعی تشکیل شده است. شبیه‌سازی‌های انرژی و نور با Honeybee و Ladybug صورت گرفته که بخش انرژی با موتور OpenStudio و نور با Radiance تحلیل شده است.

نتیجه‌گیری: در مقایسهٔ سه الگوی هندسی، الگوی مربع بهترین عملکرد را از نظر نورگیری و مصرف انرژی دارد. این پوسته، براساس شاخص UDI، در ۶۳/۲ تا ۹۱/۴ درصد مواقع نور مطلوب را تأمین کرده و نور بیش از ۱۰۰۰ لوکس را کمتر از سایر الگوها به گلخانه منتقل می‌کند. از نظر شاخص سالانه EUI، این الگو با ۱۵۴/۱۹ کیلووات‌ساعت‌برمترمربع کمترین مصرف انرژی را داشته و در مقایسه با مدل پایه، مصرف انرژی را ۱۳/۷۵ درصد کاهش داده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد هندسهٔ مربع، نسبت به دایره و دوازده ضلعی، در طراحی پنل‌های متحرک گلخانه‌ای عملکرد بهتری دارد.

واژگان کلیدی: *کنترل نور روز، پوسته‌های متحرک، محیط گلخانه‌ای، گیاهان سایه‌دوست، کاهش مصرف انرژی، شاخص‌های UDI و EUI.*

مقدمه و بیان مسئله

گلخانه‌ها در حفظ تنوع گونه‌های گیاهی در سراسر جهان اهمیت بالایی دارند. یکی از این‌گونه‌ها گیاهان سایه‌دوست هستند که در برابر شدت تابش آفتاب ضعیف بوده و نور بیش‌ازحد باعث اختلال در رشد و نابودی آن‌ها می‌شود. به همین دلیل، کنترل میزان نور خورشید برای این دسته از گیاهان ضروری است (حشمتی، ۱۳۹۸). از سوی دیگر، پیشرفت بشر در طول قرن بیستم باعث بروز بحران‌های زیست‌محیطی و انرژی شده که امروزه به یکی از مسائل اساسی در جوامع انسانی تبدیل شده است. در این راستا، معماری نیز نمی‌تواند نسبت به این مسئله بی‌تفاوت باشد، چراکه میزان مصرف انرژی در ساختمان‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر محیط‌زیست دارد (Huang et al., 2025؛ Saleh et al., 2022؛ Syam et al., 2023).

* این مقاله برگرفته از پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد «پوریا عبدالی» باعنوان «طراحی پوستهٔ متحرک جهت کنترل نور روز در محیط گلخانه؛ مطالعه موردی: شهر بابلسر» است که به راهنمایی دکتر «یاسر گلدوست» در بهمن ماه ۱۴۰۲ در دانشکدهٔ هنر و معماری دانشگاه مازندران بابلسر دفاع شده است.

** نویسندهٔ مسئول: ۰۹۱۲۲۸۵۷۳۶۱، y.goldust@umz.ac.ir.

دراین‌بین، گلخانه‌ها به‌عنوان واحدهای تولیدی یکی از مصرف‌کنندگان عمدهٔ انرژی محسوب می‌شوند. این فضاها به دلیل تولیدات خارج از فصل و فراهم‌آوردن شرایط محیطی خاص برای گونه‌های گیاهی، مصرف انرژی بالایی دارند. همچنین، ماهیت و کاربرد گلخانه‌ها آن‌ها را به محیط اطرافشان بسیار حساس کرده است. در این میان، نور روز یکی از مهم‌ترین عوامل اقلیمی مؤثر بر گلخانه است که کنترل آن در ساعات مختلف روز می‌تواند موجب بهبود عملکرد و بازدهی گلخانه شود (شکری، ۱۳۹۴؛ فتحی پیر کاشانی، ۱۳۹۹؛ مومنی و همکاران، ۱۳۹۱؛ حشمتی، ۱۳۹۸). پوسته‌های متحرک امروزه فراتر از یک نمای آرایشی معمولی عمل کرده و تا حد زیادی موجب ایجاد شرایط مطلوب داخلی و کاهش مصرف انرژی در معماری می‌شوند. این پوسته‌ها امکان کنترل میزان نور ورودی به داخل محیط را فراهم می‌کنند (Mengmeng et al., 2024؛ Zhang et al., 2022؛ Goharianetal.,2025؛Brzezicki,2024؛Gonçalvesetal.,2024؛ Yunitsyna & Sulaj, 2025). یکی از اجزای اساسی گلخانه، پوستهٔ آن است. اگرچه نور و گرمای خورشید در رشد و نمو گیاهان نقشی اساسی دارند، اما برخی از گونه‌های گیاهی به نور کمتری نیاز دارند و در واقع سایه‌پسند هستند. تنظیم میزان نور ورودی به گلخانه با پوسته‌های متحرک می‌تواند باعث بهبود رشد این گیاهان شود. هدف اصلی این پژوهش، «کنترل نور روز در محیط گلخانه برای گیاهان سایه‌دوست و کاهش مصرف انرژی» است. در این راستا، پژوهش به دنبال پاسخ به این پرسش است که «کدام الگو می‌تواند برای طراحی پوسته متحرک، به‌منظور کنترل نور روز در گلخانه‌های مخصوص گیاهان سایه‌دوست، مناسب باشد؟» ازاین‌رو، پژوهش در جستجوی ارائه یک الگوی مناسب هندسی برای پوستهٔ متحرک گلخانه‌ای است. برای دستیابی به این هدف، از هندسه ارسی‌ها به‌عنوان یکی از روش‌های سنتی کنترل نور در معماری ایران استفاده شده است. به همین منظور، از الگوی هندسی ارسی خانه‌های قدیمی استان مازندران الگوبرداری شده و با روش شبه‌تجربی در نرم‌افزار Rhino و افزونه Grasshopper مدل‌سازی انجام شده است. همچنین، شبیه‌سازی‌های نور و انرژی با استفاده از نرم‌افزارهای Honeybee و Ladybug انجام شده است. درنهایت، نتایج به‌دست‌آمده برای صحت‌سنجی با یک مدل پایه (متداول و مرسوم) مقایسه شده و از میان سه الگوی بررسی‌شده، الگوی سوم (هندسه مربع) به‌عنوان مناسب‌ترین الگو برای کنترل نور و کاهش مصرف انرژی در گلخانه انتخاب شده است. در ادامه، شرحی از پیشینهٔ مرتبط با پژوهش و چارچوب نظری آن ارائه شده است.

پیشینهٔ پژوهش

مطالعات پیشین در زمینهٔ طراحی پوسته‌های متحرک و کنترل نور روز نشان می‌دهد که بهره‌گیری از این پوسته‌ها در معماری، تأثیر بسزایی در بهینه‌سازی مصرف انرژی و کنترل نور دارد. در ادامه به برخی از پژوهش‌های مرتبط اشاره می‌شود: عابدینی و همکاران (Abedini et al., 2025, 45) در پژوهشی با هدف بهینه‌سازی چند هدفه سیستم‌های پنجره و سایه‌بان در ساختمان‌های اداری، نقش سایه‌بان‌های ثابت را به‌عنوان یک راهکار غیرفعال برای بهبود بهره‌وری انرژی، آسایش حرارتی و عملکرد نور روز بررسی کردند. این پژوهش که در اقلیم گرم و خشک قم انجام شده است، از ابزارهای شبیه‌سازی Honeybee، Grasshopper، Rhino و Ladybug برای ارزیابی استراتژی‌های سایه‌اندازی استفاده کرده است. نتایج نشان داد که سایه‌بان‌های خارجی ثابت می‌توانند شدت مصرف انرژی (EUI) را تا ۱۴/۹۵درصد کاهش دهند. همچنین، استفاده از پره‌های جانبی و لوورهای افقی توانست میزان قرارگیری در معرض نور بیش‌ازحد (ASE) را به‌ترتیب ۳۶/۲۵درصد و ۹/۳۸درصدکاهش دهد. علاوه‌بر این، شاخص Spatial Daylight Autonomy (sDA) در برخی از سیستم‌های سایه‌بان به ۱۰۰درصد رسید که نشان‌دهندهٔ تأثیر مثبت این روش‌ها بر کیفیت نور روز است. یونیتسینا و سولاژ (Yunitsyna & Sulaj, 2025, 73) در پژوهشی با هدف بهینه‌سازی نور روز در کلاس‌های معماری با استفاده از سیستم سایه‌اندازی متحرک مبتنی‌بر بیومیمتیک، تأثیر این سیستم‌ها را بر کنترل خیرگی و افزایش آسایش بصری بررسی کرده‌اند. این تحقیق با استفاده از ClimateStudio و Grasshopper for Rhino، سناریوهای مختلف را برای دستیابی به تعادل میان نور طبیعی و کنترل خیرگی ارزیابی کرده است. نتایج نشان داد که سامانه‌های تطبیق‌پذیر می‌توانند میزان خیرگی را کاهش داده و نور ورودی به فضا را تنظیم کنند. گوهریان و همکاران (Goharian et al., 2025, 90) بر طراحی و ارزیابی یک نمای متحرک تطبیقی برای بهینه‌سازی عملکرد نور روز در ساختمان‌های اداری تمرکز کرده‌اند. این پژوهش، نمای متحرکی مجهز به پنل‌های فتوولتائیک و پلکسی‌گلاس را معرفی کرده است که علاوه‌بر بهبود نورگیری و دید، مصرف انرژی را نیز بهینه می‌کند. این تحقیق از Radiance و روش پردازش پس‌پردازشی برای ارزیابی عملکرد نور روز استفاده کرده است. در این مطالعه، سه استراتژی آزمایش شد: مسدود کردن مستقیم تابش خورشید، دنبال‌کردن مسیر حرکتی خورشید و حداقل‌سازی حرکت نما. نتایج نشان داد که استراتژی مسدودسازی تابش مستقیم، شاخص UDI[1] (۳۰۰-۳۰۰۰ لوکس) را از ۴۹درصد به ۹۰درصد افزایش داده است. یارمحمدی و همکاران (Yarmahmoodi et al., 2023, 56) در پژوهشی تحت عنوان «طراحی الگوریتمیک نمای هوشمند ساختمان در جهت کنترل نور روز با الهام از الگوی حرکتی گل زنبق» دریافتند که حرکت گلبرگ‌های گل زنبق می‌تواند

الهام‌بخش طراحی سایبان‌های هوشمند در نماهای ساختمانی باشد. این سایبان‌ها با تنظیم میزان نور ورودی، تابش خورشید و جذب حرارت را کاهش داده و به بهینه‌سازی مصرف انرژی کمک می‌کنند. مهیاری و همکاران (۱۴۰۱، ۸۲) در پژوهشی تحت عنوان «ارائهٔ یک پوسته تطبیق‌پذیر هوشمند با رویکرد بیومیمتیک جهت کاهش مصرف انرژی» نشان دادند که این پوسته‌های هوشمند می‌توانند بار حرارتی کل را ۲۸درصد، بار سرمایشی را ۵۶ درصد و احتمال خیرگی نور روز را ۲۳درصد کاهش دهند. این نتایج، بر اهمیت طراحی تطبیق‌پذیر و دینامیک در کنترل شرایط محیطی تأکید دارند. شیخی نشلجی (۱۴۰۱، ۶۳) در پژوهش «طراحی سایبان هوشمند برای ساختمان اداری جهت کنترل ورود نور مستقیم خورشید مبتنی‌بر کاهش بار سرمایشی با الگوبرداری از گره‌های ایرانی-اسلامی» دریافت که استفاده از گره‌های هندسی ایرانی-اسلامی در سایبان‌های متحرک می‌تواند کنترل بهتری بر نور ورودی داشته و منجر به کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های اداری شود. خطیبی و همکاران (Khatibi, 2022, 75) در پژوهشی تحت عنوان «بررسی رفتار حرارتی نماها باهدف تعیین گزینه مطلوب از نظر مصرف انرژی» به مقایسهٔ عملکرد نمای تک‌پوسته با سایبان ثابت، نمای دوپوسته شیشه‌ای، دوپوسته با سایبان متحرک و نمای متحرک پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که نماهای دارای سایبان متحرک، مصرف انرژی را بیش از سایر گزینه‌ها کاهش داده‌اند. نصر و همکاران (Nasr et al., 2020, 48) در پژوهش «تأثیر هندسه پوستهٔ متحرک بر بهینه‌سازی مصرف انرژی با الهام از الگوریتم حرکتی گیاه قهر و آشتی» دریافت که پوسته‌های هوشمند می‌توانند به‌طور خودکار میزان نور ورودی را تنظیم کنند و در اقلیم گرم شیراز، از ورود بیش‌ازحد نور خورشید در فصل تابستان جلوگیری کنند. مادن و کیزیلورنلی (Maden & Kizilorenli, 2023, 66) در پژوهش «طرح‌های نمای پاسخگو مدولار برای کنترل نور روز و آسایش بصری» نشان دادند که نماهای پاسخگو، قادر به کاهش مصرف انرژی و بهبود نور روز در ساختمان‌ها هستند. آزدمیر و کاکمک (Ozdemir & Cakmak, 2022, 38) در پژوهش «ارزیابی کیفیت نور روز و تابش نور فضاهای اداری با نماهای تخت و سیستم سایه‌انداز دینامیک در اقلیم گرم و خشک» نشان دادند که سیستم‌های سایه‌انداز پویا (متحرک) قادرند براساس موقعیت خورشید تنظیم شوند و خروجی‌هایی مطابق با استاندارد لیید ارائه دهند. میرممتاز و همکاران (۱۴۰۲)، با هدف نقش سایبان‌های متحرک در بهینه‌سازی همزمان نور طبیعی و مصرف انرژی در طراحی ساختمان‌های اداری بررسی کردند. در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در نرم‌افزار Ladybug Tools، سه حالت طراحی شامل بدون سایبان، سایبان پیرامونی و سایبان متحرک بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سایبان‌های متحرک تطبیقی در اقلیم گرم و خشک اصفهان می‌تواند تا بیش از ۲۰درصد سطح مفید نور روز را افزایش داده و مصرف انرژی سالانه را بیش از ۴۸درصد کاهش دهد. ذبیحی و همکاران (۲۰۲۵)، در پژوهشی نقش مؤثر عنصر معماری سنتی ایرانی، یعنی شباک، در بهبود کیفیت روشنایی طبیعی و کاهش خیرگی در فضای اداری بررسی کرده است. در این تحقیق با بهره‌گیری از ابزارهای شبیه‌سازی پیشرفته مانند Grasshopper، Honeybee، Ladybug و الگوریتم ژنتیک Galapagos، الگوی بهینه‌ای برای هندسهٔ شباک طراحی شد. نتایج نشان داد که این الگو توانسته است میزان روشنایی مفید نور روز (UDI) را تا ۵۴ درصد افزایش و شاخص خیرگی سالانه را تا۱۵/۶درصد کاهش دهد. این مطالعه نشان می‌دهد که عناصر معماری بومی می‌توانند با رویکردهای به‌روز طراحی و به‌طور مؤثری در بهینه‌سازی عملکرد نوری ساختمان‌های معاصر نقش ایفا کنند.

مبانی نظری

• نور روز و کنترل آن

نور روز به نوری گفته می‌شود که از خورشید به سطح زمین می‌رسد و شامل نور مستقیم خورشید و نور پراکنده آسمان است. یکی از مباحث اساسی در معماری و طراحی فضاهای داخلی، کنترل نور روز به‌منظور بهینه‌سازی روشنایی و کاهش مصرف انرژی است. این کنترل به دو شیوه انجام می‌شود: سامانه‌های ثابت و متحرک. سامانه‌های متحرک، برخلاف سامانه‌های ثابت، قادرند میزان نور ورودی را متناسب با تغییرات جوی و موقعیت خورشید تنظیم کنند (Edwards & Torcellini, 2002؛ Reinhart, 2014؛ Lee et al., 2022؛ Atamewan, 2022؛ Li, 2024). در پژوهش حاضر، استفاده از پوسته‌های متحرک به‌عنوان راهکاری برای کنترل نور در محیط گلخانه‌ای بررسی خواهد شد.

• پوسته‌های متحرک و نقش آن‌ها در کنترل نور

پوسته‌های متحرک به سازه‌هایی گفته می‌شود که قابلیت تغییر وضعیت در واکنش به شرایط محیطی را دارند و می‌توانند میزان نور، حرارت و جریان هوا را کنترل کنند. این پوسته‌ها در معماری معاصر به‌عنوان راهکاری برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و ارتقای کیفیت محیطی شناخته می‌شوند. یکی از کاربردهای کلیدی پوسته‌های متحرک، تنظیم نور روز در فضاهای داخلی و گلخانه‌ها است، به‌گونه‌ای که نور کافی برای رشد گیاهان تأمین شود و در عین حال، از ورود بیش‌ازحد نور مضر جلوگیری شود (Bahri et al., 2025; Takhmasib et al., 2023; Sharaidin, 2014; Nashaat & Waseef, 2017؛ Hosseini et al., 2019;Mahmoud & Elghazi, 2016). در

این پژوهش، طراحی پوسته متحرک با الهام از ارسی‌های سنتی مازندران انجام شده است. ارسی‌ها، که نوعی از پنجره‌های سنتی ایرانی محسوب می‌شوند، به دلیل قابلیت تنظیم نور و تهویه طبیعی، الگویی مناسب برای طراحی سامانه‌های نوین کنترل نور به‌شمار می‌روند.

• اهمیت نور در گلخانه و گیاهان سایه‌دوست

گلخانه فضایی کنترل‌شده است که امکان تنظیم شرایط محیطی مناسب برای رشد گیاهان را فراهم می‌کند. نور خورشید یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر رشد گیاهان گلخانه‌ای است. هر گیاه، بسته به نیاز فتوسنتزی خود، به میزان مشخصی نور نیاز دارد که از نظر شدت، کیفیت و مدت تابش متفاوت است. در میان گونه‌های گیاهی، گیاهان سایه‌دوست (تصویر ۱) به شدت نور محدودتری نیاز دارند و نسبت به نور مستقیم خورشید حساس‌اند. میزان نور مطلوب برای این گیاهان بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس تعریف شده است و قرار گرفتن در معرض شدت نوری فراتر از این مقدار، می‌تواند باعث کاهش رشد و آسیب به برگ‌های آن‌ها شود (Yano, 2001; Yeang, 2013). ازاین‌رو، کنترل دقیق نور روز در گلخانه‌های ویژه گیاهان سایه‌دوست (جدول ۱)، عاملی ضروری در بهینه‌سازی رشد گیاهان و جلوگیری از آسیب نوری محسوب می‌شود.

شکاف تحقیقاتی و مبنای پژوهش حاضر

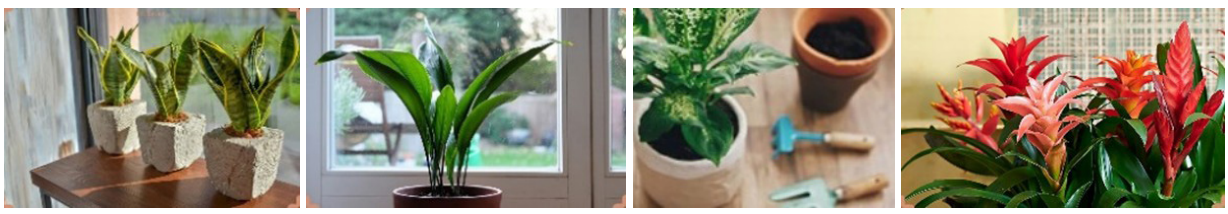
پژوهش حاضر با هدف پر کردن خلأ مطالعاتی در زمینهٔ کنترل نور روز در گلخانه‌های مخصوص گیاهان سایه‌دوست انجام شده است. بررسی پیشینهٔ پژوهش نشان می‌دهد که تاکنون استاندارد مشخصی برای میزان نور مطلوب در گلخانه‌های گیاهان سایه‌دوست ارائه نشده است. بیشتر پژوهش‌های پیشین بر کنترل نور روز در ساختمان‌های مسکونی، اداری و آموزشی تمرکز داشته‌اند (Cakmak & Ozdemir, 2022؛ Maden & Kızılorenli, 2023)، درحالی‌که شاخص‌های کنترل نور در محیط‌های غیرمسکونی مانند گلخانه‌ها، کمتر بررسی شده‌اند. در این پژوهش، با تعریف شاخص UDI در سه بازهٔ نوری کمتر از ۳۰۰ لوکس، ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس، و بیش از ۱۰۰۰ لوکس، میزان نور مطلوب برای گیاهان سایه‌دوست تعیین شده است. این شاخص، مبنای طراحی پوسته متحرک گلخانه‌ای قرار گرفته است که قادر است میزان نور ورودی را براساس نیاز گیاهان و شرایط محیطی بهینه‌سازی کند. هدف اصلی این طراحی، بهینه‌سازی نور روز در گلخانه و کاهش مصرف انرژی از طریق یک سیستم تطبیق‌پذیر است که بتواند متناسب با تغییرات محیطی، نور را تنظیم کند.

روش پژوهش

هدف این پژوهش، کنترل نور روز در محیط گلخانه برای گیاهان سایه‌دوست و بهینه‌سازی مصرف انرژی از طریق طراحی پوسته‌های متحرک است. به‌منظور دستیابی به این هدف، پژوهش حاضر از رویکردی ترکیبی شامل روش اسنادی، تحلیل تطبیقی و شبیه‌سازی رایانشی بهره گرفته است. در مرحله نخست، با استفاده از روش اسنادی، مبانی نظری مرتبط با کنترل نور روز و طراحی پوسته‌های متحرک بررسی شد. این مطالعات، مبنای تحلیلی طراحی پوسته‌های متحرک در پژوهش حاضر را تشکیل داده‌اند. در مرحله دوم، به‌منظور طراحی الگوی پوسته متحرک، از هندسه به‌کاررفته در معماری تاریخی ایران، به‌ویژه ارسی‌های سنتی، الگوبرداری شد. با توجه به اینکه محدودهٔ مطالعاتی پژوهش، شهر بابلسر در استان مازندران که دارای اقلیم معتدل و مرطوب است، خانه‌های تاریخی ثبت‌شده در میراث فرهنگی این منطقه بررسی شد و نتایج این بررسی‌ها نشان داد که، مشابه معماری مناطق مرکزی ایران، در این خانه‌ها نیز از راهکارهای غیرفعال برای کنترل نور و بهینه‌سازی مصرف انرژی استفاده شده است. ازآنجاکه گلخانه‌ها دارای جداره‌های شفاف وسیع هستند، در این پژوهش از الگوی ارسی‌های سنتی در طراحی پنل‌های متحرک گلخانه بهره گرفته شده است. در مرحله سوم، برای شناسایی و استخراج الگوهای ارسی مناسب، اسناد معماری مرتبط با ۱۱ خانه تاریخی مازندران از طریق اداره کل میراث فرهنگی استان مازندران گردآوری شد. این الگوها از نظر هندسی مورد تحلیل تطبیقی قرار گرفت و نتایج حاصل از این بخش، در جدول ۲ ارائه شده است.

پس از بررسی هندسهٔ ارسی خانه‌های سنتی استان مازندران، سه الگوی اصلی تصویر ۲ که بیشترین تکرار و اشتراک را در میان نمونه‌های مطالعه شده داشته‌اند، به‌عنوان پایهٔ طراحی پوسته متحرک گلخانه‌ای انتخاب شدند. این سه الگو، مبتنی‌بر هندسه‌های سنتی ایرانی و قابلیت‌های تطبیق‌پذیری آن‌ها با شرایط نوری و محیطی گلخانه‌ها هستند.

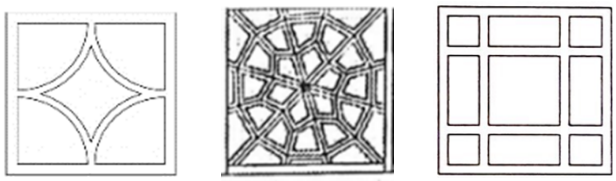
با مشخص کردن قسمت نور گذر (دیافراگم ورود نور هنگام باز



تصویر ۱. به ترتیب از راست: گازمانیا- برگ عبایی- دیفن باخیا- سانسوریا. مأخذ: www. pinteres.com.

جدول ۱. گیاهان سایه دوست. مأخذ: نگارندگان.

ردیف	اسم فارسی	اسم لاتین (علمی)	ردیف	اسم فارسی	اسم لاتین (علمی)
۱	گازمانیا	Guzmania	۱۳	پپرومیا	Peperomia
۲	آگلونما	Aglaonema	۱۴	فیلودندرون	Philodendron
۳	برگ عبایی	Aspidistra elatior	۱۵	پوتوس	Epipremnum aureum
۴	زاموفیلیا	Zamiifolia	۱۶	مارانتا لوکونورا	Maranta leuconeura
۵	دیفن باخیا	Dieffenbachia	۱۷	سانسوریا	Sansevieria
۶	پاپیتال	Hedera helix	۱۸	پلاتی‌سریوم	Platycerium
۷	پرسیاوشان	Adiantum capillus-veneris	۱۹	دراسنا	Dracaena
۸	شامادورا الگانس	Chamaedorea elegans	۲۰	لاکی بامبو	Deracaena Sanderiana
۹	اسپاتی فیلوم	Spathiphyllum	۲۱	کالانکوئه	Kalanchoe
۱۰	کالاتیا ماکویانا	Calathea makoyana	۲۲	ترادسکانتیا	Tradescantia
۱۱	برگ عبایی	Aspidistra elatior	۲۳	انجیر چسب	Ficus Pumila
۱۲	کریپتانتوس بروملیادس	Bromeliad	۲۴	بامبو	Bambusoideae



تصویر ۲. هندسه سه الگو نهایی در پنل پوسته. نگارندگان.

شدن پوسته)، قسمت متحرک و قسمت ثابت (غیر نور گذر) الگو نهایی پنل پوسته متحرک در تصویر ۳ ارائه شد.

پوسته‌های متحرک پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار Grasshopper به‌صورت پارامتریک طراحی شدند تا نور روز را برای گیاهان سایه‌دوست در بازهٔ ۱۰۰۰- ۳۰۰ لوکس بهینه کنند. الگوریتم تنظیم پوسته‌ها براساس دو پارامتر اصلی شدت نور (Illuminance) و زاویه تابش خورشید (Solar Incidence Angle) تعریف شد. در این الگوریتم، داده‌های شدت نور از شبیه‌سازی‌های Radiance (مبتنی‌بر شرایط اقلیمی بابلسر) استخراج شده و به‌عنوان ورودی به Grasshopper وارد شدند. زاویهٔ پنل‌های پوسته بین ۰ تا ۴۵ درجه به‌صورت پویا تنظیم می‌شود تا در صورت افزایش شدت نور بیش از ۱۰۰۰ لوکس، پنل‌ها بسته‌تر شوند و نور ورودی کاهش یابد. همچنین، زاویه تابش خورشید (محاسبه‌شده از داده‌های Ladybug) برای بهینه‌سازی موقعیت پنل‌ها در ساعات مختلف روز استفاده شد. این فرایند پویا، با استفاده از افزونه Honeybee، هماهنگ با شبیه‌سازی‌های انرژی انجام شد تا همزمان با کنترل نور، مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی کاهش یابد. این رویکرد امکان انطباق لحظه‌ای پوسته‌ها با تغییرات نور و اقلیم را فراهم کرد و عملکرد بهتری نسبت به سیستم‌های ثابت یا نیمه‌پویا نشان داد. در گام بعدی با استفاده از نرم‌افزار راینو (نسخهٔ ۷) و افزونه گرس‌هاپر (ورژن ۳) شبیه سازی انجام و در جدول ۳ ارائه شد.

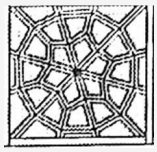
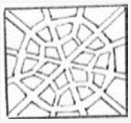
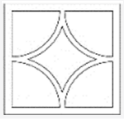
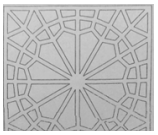
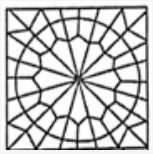
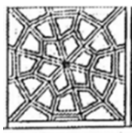
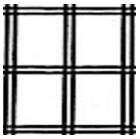
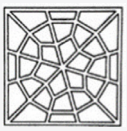
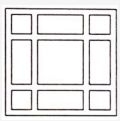
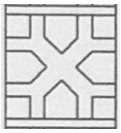
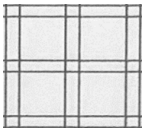
مشخصات مدل پایه و فرایند شبیه‌سازی

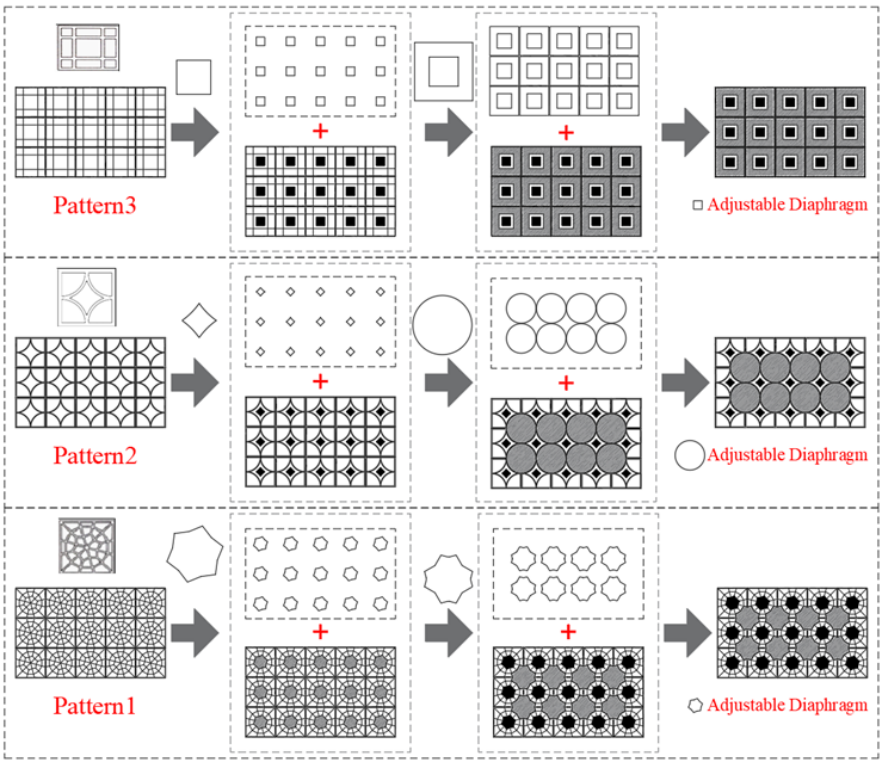
در این پژوهش، یک مدل پایه برای گلخانه طراحی شده است. تا امکان مقایسهٔ عملکرد پوسته متحرک پیشنهادی با روش‌های متداول کنترل نور فراهم شود. این مدل براساس ضوابط، استانداردها و اصول طراحی گلخانه در ایران تدوین شده و مشخصات آن به شرح زیر است:

- سقف شیبدار نیمه‌دوطرفه با زاویه ۲۵ تا ۶۵ درجه.
- ارتفاع گلخانه: ۴ متر تا زیر ناودانی، ۷ متر تا تاج گلخانه و ۳ متر برای ارتفاع درب ورودی.
- ابعاد کلی: عرض ۸ متر و طول ۳۲/۲۰ متر (تصویر ۴، نمای گلخانه).
- جهت‌گیری مدل، کشیدگی در راستای محور شمالی-جنوبی با ورودی در ضلع جنوبی.

در این مدل، جهت کنترل نور روز از توری‌های محافظ گلخانه (تصویر ۴، توری کنترل نور در گلخانه) که در سیستم‌های رایج به‌صورت پرده‌ای متحرک به کار می‌روند، استفاده شده

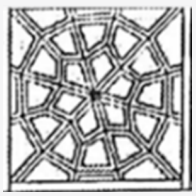
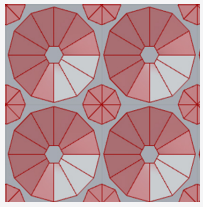
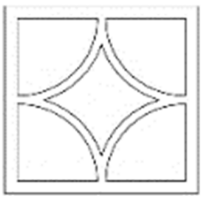
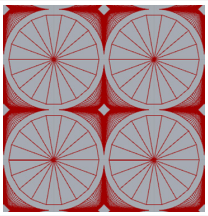
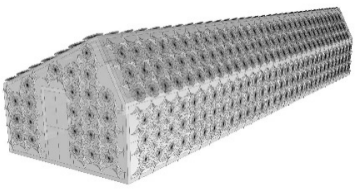
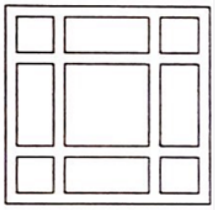
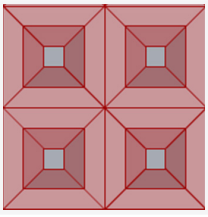
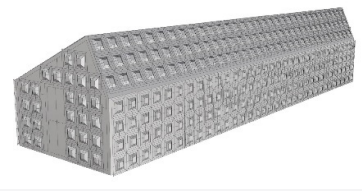
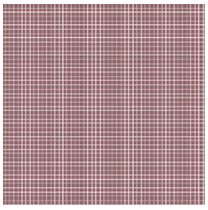
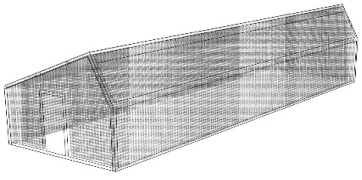
جدول ۲. الگو هندسی مورد استفاده در ارسی خانه‌های سنتی استان مازندران. نگارندگان.

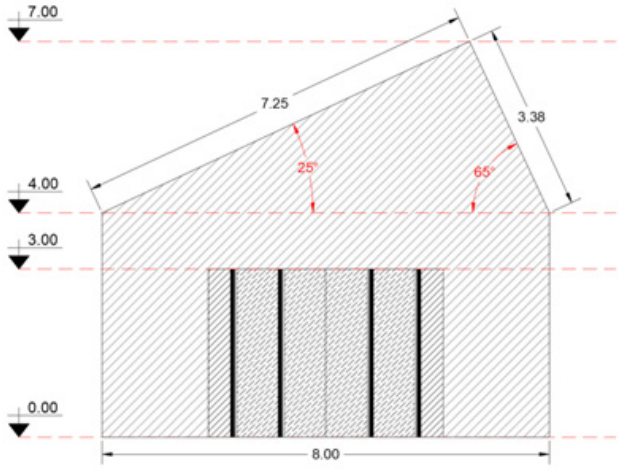
ردیف	اسم خانه	الگو استفاده شده در ارسی	شکل هندسی
۱	افغان‌نژاد، بهشهر		دوازده ضلعی + دایره
۲	قریشی، آمل		دایره
۳	رمدانی، ساری		دوازده ضلعی
۴	نیما یوشیج، نور		دوازده ضلعی
۵	فاضلی، ساری		دایره
۶	گرنا نادری، لاریجان		دایره
۷	هزارجریبی، بهشهر		دایره
۸	کلبادی، ساری	 	دوازده ضلعی + مربع
۹	منوچهری، آمل	 	دوازده ضلعی + دایره + مربع
۱۰	آقاجانسب، بابل	 	دایره + مربع
۱۱	نجفی، بابل		دایره + مربع



تصویر ۳. فرایند طراحی سه الگو نهایی جهت طراحی پنل پوسته. مأخذ: نگارندگان.

جدول ۳. فرایند مدلسازی پوسته برای کنترل نور در گلخانه. نگارندگان.

الگوی کنترل کنندهٔ نور در گلخانه	مدلسازی (راینو+گرسهاپر)	مدل نهایی	ابعاد پنل
الگوی اول (۱۲ضلعی)			۵۰ سانتی‌متر * ۵۰ سانتی‌متر
الگوی دوم (دایره)			 ۵۰ سانتی‌متر * ۵۰ سانتی‌متر
الگوی سوم (مربع)			 ۵۰ سانتی‌متر * ۵۰ سانتی‌متر
توری (مدل پایه)			 ۲ سانتی‌متر * ۲ سانتی‌متر



تصویر ۴. به ترتیب از راست: نما مدل پایه، توری سایبان برای تنظیم نور گلخانه. مأخذ: نگارندگان.

است. این توری‌ها که از جنس الیاف پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن ساخته شده‌اند، به منظور تنظیم شدت نور ورودی به گلخانه استفاده شده است. در این پژوهش، عملکرد روش سنتی کنترل نور با پوسته متحرک پیشنهادی مقایسه شده است تا تأثیرگذاری هر یک در کنترل نور روز و کاهش مصرف انرژی ارزیابی شود.

فرایند شبیه‌سازی

این پژوهش با هدف مقایسهٔ نتایج مدل پایه با سه الگوی مختلف کنترل نور در گلخانه انجام شده است. برای دستیابی به شرایط نوری مطلوب برای گیاهان سایه‌دوست، پوسته متحرک در تمامی جهات گلخانه نصب شد و عملکرد آن در هر یک از الگوهای پیشنهادی بررسی شد. سپس، نتایج شبیه‌سازی‌ها با یکدیگر مقایسه شده و بهینه‌ترین الگو برای طراحی پنل‌های پوسته متحرک به‌منظور کنترل نور روز انتخاب شد. شبیه‌سازی‌های مرتبط با انرژی و نور روز، با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی انجام شده است. در این راستا، از افزونه‌های Honeybee (نسخهٔ ۷/۱) و Ladybug (نسخهٔ ۷/۱) جهت تحلیل و پردازش داده‌ها استفاده شده است. همچنین، موتور OpenStudio (نسخهٔ ۶/۳) برای شبیه‌سازی انرژی و نرم‌افزار Radiance (نسخهٔ ۴/۵) برای تحلیل نور روز به کار گرفته شده است. متغیر اصلی در این پژوهش، میزان گشودگی پوسته متحرک است که به‌صورت داینامیک و متناسب با شدت نور ورودی تنظیم می‌شود. الگوریتم شبیه‌سازی نور و انرژی در تصویر ۵ ارائه شده است.

تحلیل داده‌ها

• شاخص روشنایی مفید نور روز (UDI)

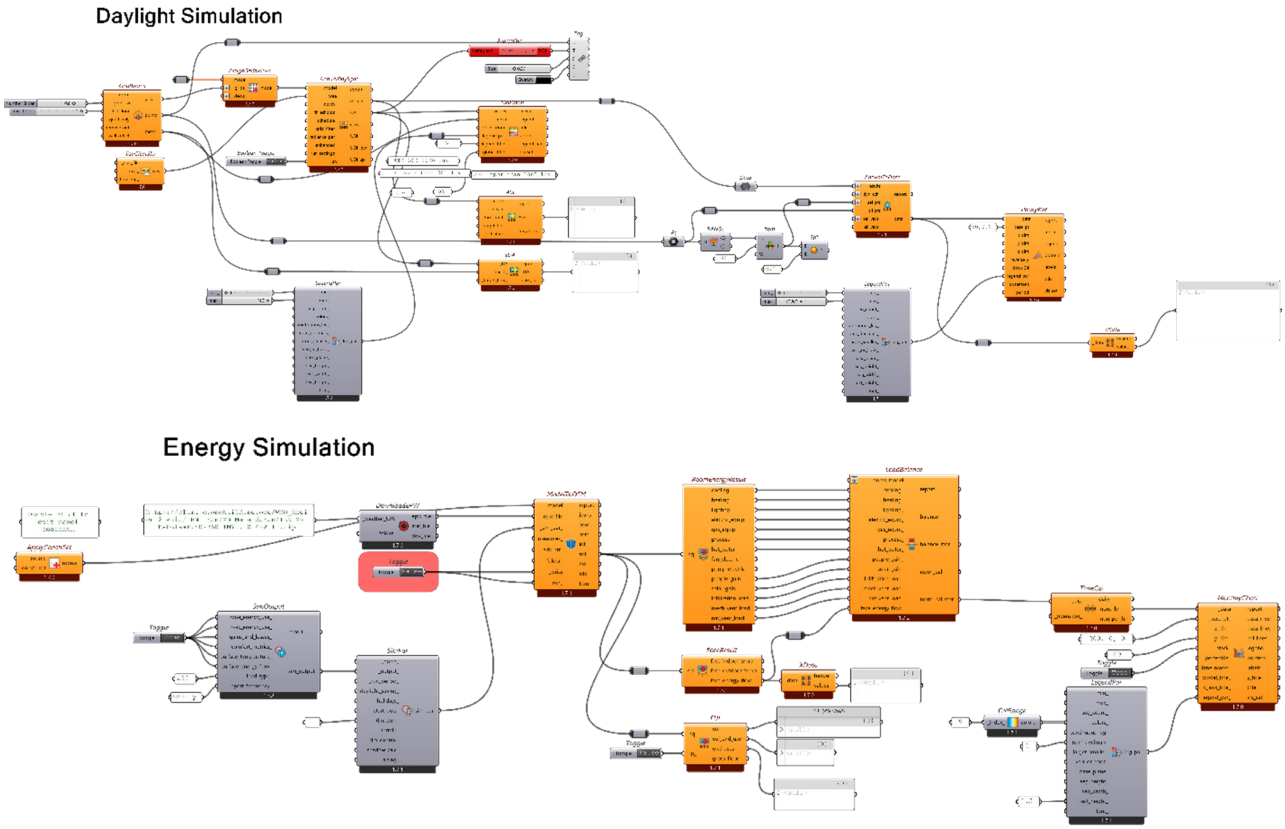
شاخص UDI براساس مقادیر مطلق روشنایی نور روز در طول یک سال محاسبه شده و به‌عنوان درصد ساعاتی که یک فضا در طول سال اشغال شده و روشنایی افقی داخلی آن در محدوده آسایش نوری قرار دارد، تعریف می‌شود (Mardaljevic et al., 2009; Nabil & Mardaljevic, 2005). این شاخص نه‌تنها میزان تکرار سطوح مفید روشنایی نور روز را در یک نقطهٔ مشخص ارزیابی می‌کند، بلکه بروز سطوح بیش‌ازحد نور روز که ممکن است منجر به خیرگی و عدم آسایش شود را نیز نمایش می‌دهد. شاخص UDI محدوده‌ای از روشنایی را مشخص می‌سازد که نه بیش‌ازحد روشن (بیش از ۱۰۰۰ لوکس) و نه بسیار تاریک (کمتر از ۳۰۰ لوکس) باشد. در این پژوهش که بر کنترل نور روز در گلخانه‌های مخصوص گیاهان سایه‌دوست متمرکز است، مقادیر UDI براساس نیازهای نوری این گیاهان تعریف شده است. محدوده‌های موردنظر شامل:

- کمتر از ۳۰۰ لوکس (نور ناکافی برای رشد گیاهان سایه‌دوست)
- ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس (محدودهٔ بهینه و مطلوب)
- بیش از ۱۰۰۰ لوکس (نور بیش‌ازحد که ممکن است رشد گیاهان را مختل کند)

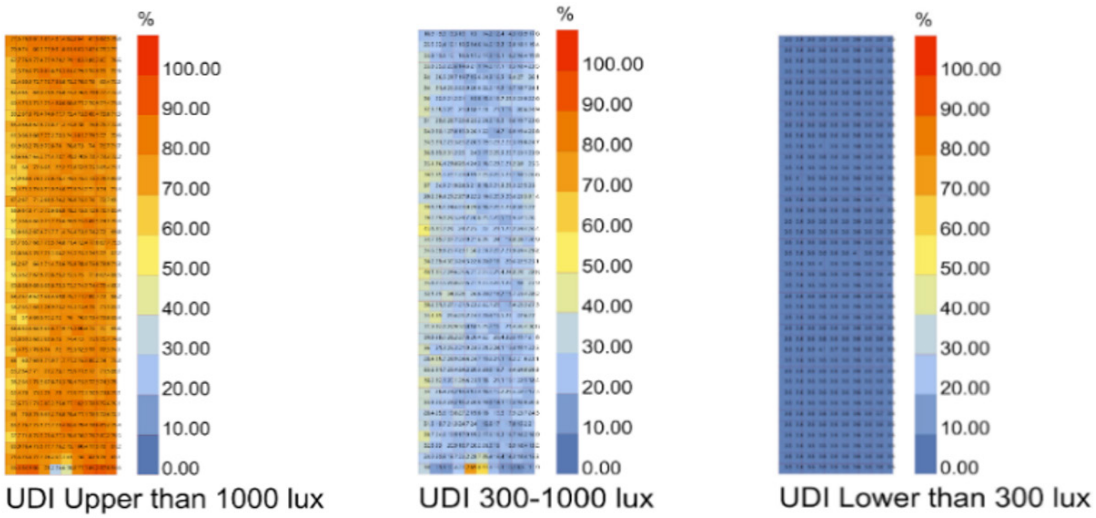
هدف این پژوهش، تأمین شرایط نوری مطلوب در بازهٔ ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس برای گیاهان سایه‌دوست است، زیرا مقادیر بالاتر از ۱۰۰۰ لوکس می‌تواند موجب اختلال در رشد این گیاهان شود. ازاین‌رو، کنترل دقیق نور روز در گلخانه‌های مخصوص این گونه‌های گیاهی، امری ضروری تلقی می‌شود.

• شاخص UDI در الگوی اول (۱۲ ضلعی)

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میزان نور دریافتی مفید طبق شاخص UDI در بازهٔ بالاتر از ۱۰۰۰ لوکس، بین ۶/ ۲۶ درصد تا ۸/ ۷۸ درصد از ساعات سال در این محدوده قرار دارد. در بازهٔ ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس، که محدودهٔ مطلوب و هدف اصلی پژوهش محسوب می‌شود، میزان نور ورودی به فضا بین ۲/ ۱۰ درصد تا ۶/ ۵۷ درصد متغیر است. همچنین، در بازهٔ کمتر از ۳۰۰ لوکس، مقدار نور دریافتی ۶/ ۳ محاسبه شده است (تصویر ۶).



تصویر۵. الگوریتم شبیه‌سازی‌های نور و انرژی. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۶. نمودارهای شاخص UDI در گلخانه با الگو اول. مأخذ: نگارندگان.

• شاخص UDI در الگوی دوم (دایره)

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که طبق شاخص UDI، میزان نور دریافتی در بازه بالاتر از ۱۰۰۰ لوکس، که فراتر از حد نیاز گیاهان سایه‌دوست است، بین ۸/ ۲۳ درصد تا ۲/ ۷۹ درصد از ساعات سال قرار دارد. مقدار UDI در بازهٔ ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس، که محدودهٔ مطلوب برای رشد گیاهان محسوب می‌شود، بین ۶/ ۲۲ درصد تا ۸/ ۷۳ درصد متغیر است. همچنین، میزان UDI کمتر از ۳۰۰ لوکس در این الگو بین ۶/ ۳ درصد تا۶/ ۷ درصد ثبت شده است (تصویر ۷).

• شاخص UDI در الگوی سوم (مربع)

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میزان نور دریافتی در بازهٔ بالاتر

از ۱۰۰۰ لوکس در این الگو به حداقل رسیده است، به‌طوری‌که تنها ۱ درصد تا ۱۰ درصد از فضای گلخانه در معرض نور بیش از حد قرار دارد. در مقابل، بازهٔ ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس، که محدودهٔ مطلوب برای رشد گیاهان سایه‌دوست محسوب می‌شود، بین ۶۳/۲ درصد تا ۹۹۱/۴ درصد از فضای گلخانه را پوشش می‌دهد. این مقدار در مقایسه با دو الگوی دیگر، بیشترین میزان نور مطلوب را ارائه می‌دهد. بااین‌حال، در بازهٔ کمتر از ۳۰۰ لوکس، میزان نور دریافتی بین ۳/۶ درصد تا ۳۱/۶ درصد متغیر است، که نشان می‌دهد در برخی ساعات، بخشی از محیط کشت گلخانه نور کافی دریافت نمی‌کند (تصویر ۸).

- **شاخص UDI در مدل پایه**

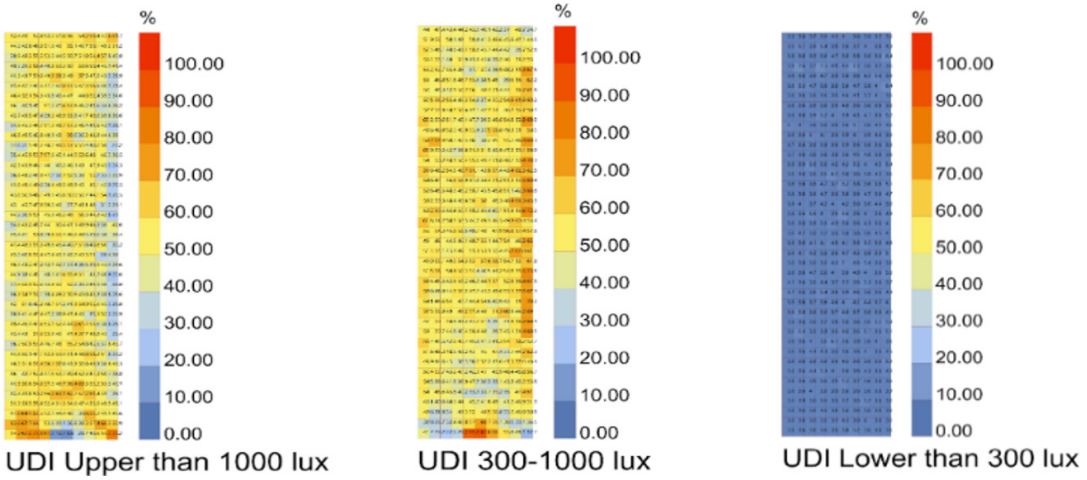
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میزان نور دریافتی مفید طبق شاخص UDI در بازهٔ بالاتر از ۱۰۰۰ لوکس، بین ۴۷/۲ درصد تا ۸۹/۳ درصد از ساعات سال در این محدوده قرار دارد. در بازهٔ ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس، که محدودهٔ مطلوب و هدف اصلی پژوهش محسوب می‌شود، میزان نور ورودی به فضا بین ۷/۲ درصد تا ۲۸/۹ درصد متغیر است. همچنین، در بازهٔ کمتر از ۳۰۰ لوکس، مقدار نور دریافتی ۳/۶ درصد تا ۵ درصد محاسبه شده است (تصویر ۹).

مقایسهٔ مدل پایه و سه الگوی پوستهٔ متحرک از نظر شاخص UDI

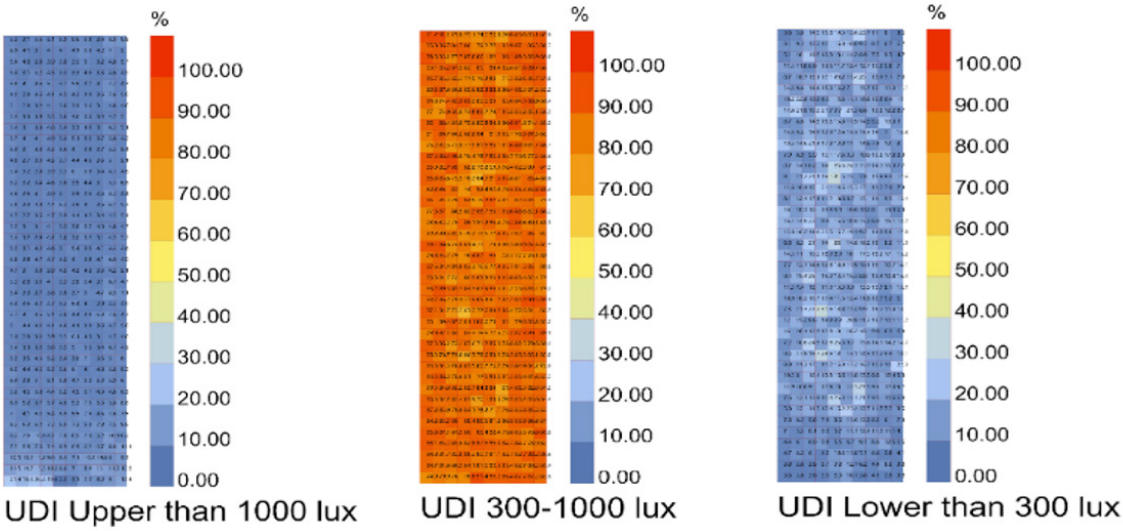
- **نور بیش از حد (بالاتر از ۱۰۰۰ لوکس)**

– الگوی اول: ۲۶/۶ درصد تا ۸۷/۸ درصد از ساعات سال در معرض نور بیش از ۱۰۰۰ لوکس قرار دارد.

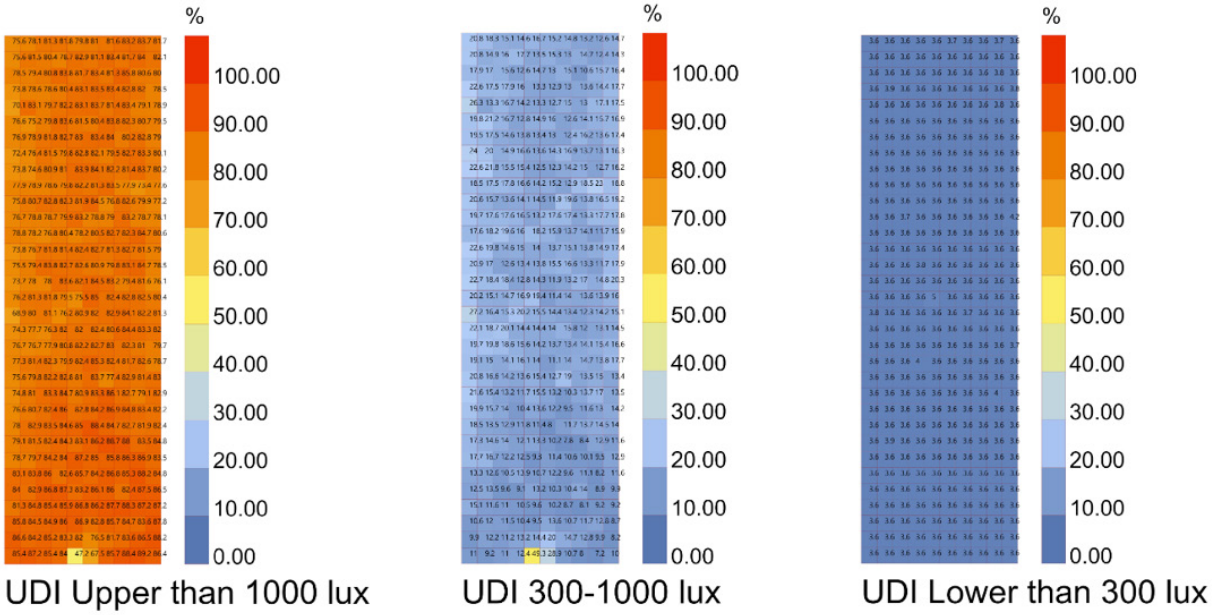
– الگوی دوم: ۲۳/۸ درصد تا ۷۹/۲ درصد که نسبت به الگوی اول کاهش یافته است.



تصویر ۷. نمودارهای شاخص UDI در گلخانه با الگو دوم. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۸. نمودارهای شاخص UDI در گلخانه با الگو سوم. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۹. نمودارهای شاخص UDI در گلخانه با حالت توری نورگیر. مأخذ: نگارندگان.

- الگوی سوم: ۱ درصد تا ۱۰ درصد که کمترین مقدار را در بین سه الگو دارد.

- مدل پایه (توری نورگیر): ۲/ ۴۷ درصد تا ۳/ ۸۹ درصد از ساعات سال در معرض نور بیش از حد قرار دارد.

نتیجه: الگوی سوم بهترین عملکرد را در کاهش نور بیش از حد دارد، درحالی‌که الگوی اول بیشترین میزان نور اضافی را دریافت می‌کند.

- **نور مطلوب (۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس)**

- الگوی اول: میزان نور مطلوب بین ۲/ ۱۰ درصد تا ۶/ ۵۷ درصد متغیر است.

- الگوی دوم: مقدار UDI در این محدوده بین ۶/ ۲۲ درصد تا ۸/ ۷۳ درصد قرار دارد.

- الگوی سوم: بیشترین مقدار را داشته و بین ۲/ ۶ درصد تا ۴/ ۹۱ درصد از فضای گلخانه را پوشش می‌دهد.

- مدل پایه: تنها ۲/ ۷ درصد تا ۹/ ۲۸ درصد از فضای گلخانه در این محدوده قرار دارد.

- **نور ناکافی (کمتر از ۳۰۰ لوکس)**

- الگوی اول: ۶/ ۳ درصد از ساعات سال در این بازه قرار دارد.

- الگوی دوم: ۶/ ۳ درصد تا ۶/ ۷ درصد از فضای گلخانه دارای نور ناکافی است.

- الگوی سوم: ۶/ ۳ درصد تا ۶/ ۳۱ درصد که بیشترین مقدار را در این بازه دارد.

- مدل پایه: مقدار نور ناکافی بین ۶/ ۳ تا ۵ درصد ثبت شده است.

نتیجه: الگوی سوم اگرچه نور مطلوب بیشتری دارد، اما در برخی ساعات، بخش‌هایی از فضای گلخانه دچار کمبود نور می‌شود. این در حالی است که الگوی اول کمترین میزان نور ناکافی را دارد.

بحث

مدل پایه (توری نورگیر): بیشترین نور بیش از حد، کمترین میزان نور مطلوب، اما کمترین نور ناکافی.

- الگوی اول: کاهش جزئی نور بیش از حد، افزایش نسبی نور مطلوب، و حداقل تغییر در نور ناکافی.

- الگوی دوم: بهبود چشمگیر در افزایش نور مطلوب و کاهش نور بیش از حد، اما کمی افزایش در نور ناکافی.

- الگوی سوم: بهترین عملکرد در کاهش نور بیش از حد و افزایش نور مطلوب، اما بیشترین میزان نور ناکافی در برخی ساعات.

در نهایت الگوی سوم بهینه‌ترین طراحی برای تأمین نور مطلوب در گلخانه‌های گیاهان سایه‌دوست است، اما برای کاهش نور ناکافی در برخی ساعات، نیاز به تنظیمات تکمیلی دارد. مدل پایه (توری نورگیر) ضعیف‌ترین عملکرد را در تأمین نور مطلوب داشته و بیشترین میزان نور بیش از حد را فراهم می‌کند.

- **نور دریافتی محیط براساس نمودار ساعتی سالانه**

نمودارهای ارائه‌شده میزان دریافت نور روز (بر حسب لوکس) در گلخانه طی ساعات مختلف روز در ماه‌های مختلف سال را نمایش می‌دهند. این نمودارها شامل سه محور اصلی هستندکه محور افقی (پایین نمودار) ماه‌های سال (ژانویه تا دسامبر)، که تغییرات نور در فصول مختلف را نشان می‌دهد، محور عمودی سمت چپ ساعات روز (۰۰: ۰۰ تا ۲۴:۰۰)، که روند تغییر شدت نور را در طول شبانه‌روز نمایش می‌دهد و محور عمودی سمت راست شدت نور دریافتی (بر حسب لوکس) که مقدار نور ورودی به گلخانه را نشان می‌دهد.

• **مدل پایه (توری نورگیر گلخانه)**

بررسی تغییرات ماهانه نشان می دهد که در ماه‌های تابستان (خرداد، تیر و مرداد)، میزان نور دریافتی به‌شدت افزایش می‌یابد، درحالی‌که در زمستان (آذر، دی و بهمن)، شدت نور کاهش می‌یابد اما همچنان در ساعات ظهر مقدار قابل‌توجهی نور دریافت می‌شود. همچنین بیشترین میزان نور بین ساعت ۱۲:۰۰ تا ۱۴:۰۰ با حداکثر مقدار ۳۵۰۰۰ تا ۴۵۰۰۰ لوکس، که به‌شدت از محدودهٔ مطلوب برای گیاهان سایه‌دوست فراتر می‌رود و کمترین میزان نور بین ساعت ۰۶:۰۰ تا ۰۸:۰۰ و ۱۸:۰۰ تا ۲۰:۰۰ با مقدار ۲۰۰ تا ۵۰۰ لوکس، که در محدودهٔ پایین‌تر از حد مطلوب قرار دارد. در بررسی شدت نور دریافتی مقدار نور در بسیاری از ساعات روز بیش از ۱۰۰۰ لوکس است، که از محدودهٔ مطلوب برای گیاهان سایه‌دوست فراتر می‌رود. در ساعات صبحگاهی و عصرگاهی، مقدار نور در برخی مواقع به محدودهٔ ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس نزدیک می‌شود اما همچنان درصد کمی از روز را شامل می‌شود. در نتیجه مدل پایه کنترل مناسبی بر نور ورودی ندارد و در بیشتر ساعات ظهر، شدت نور بیش از حد مجاز برای گیاهان سایه‌دوست است (تصویر ۱۰).

• **الگوی اول (۱۲ ضلعی)**

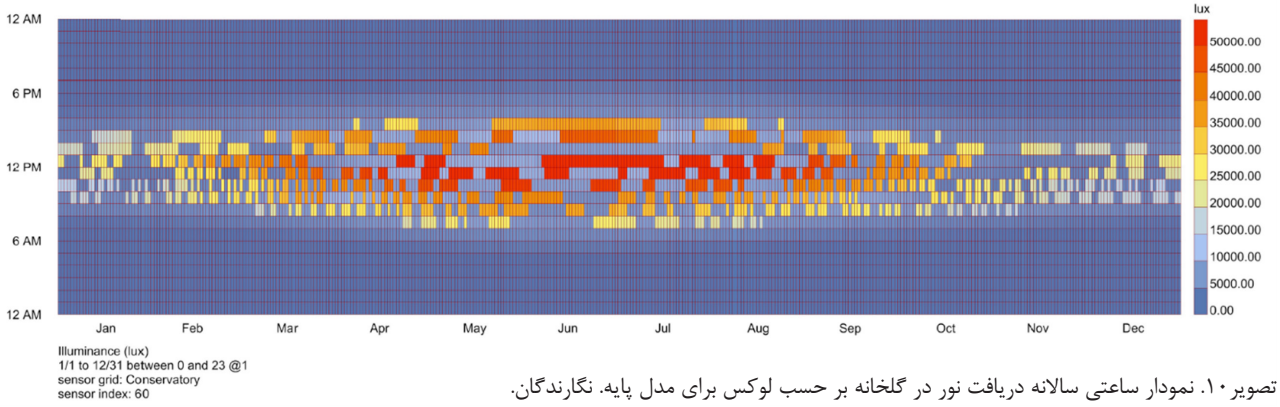
در بررسی تغییرات ماهانه در ماه‌های گرم‌تر، میزان نور بیش از حد کاهش یافته است اما در برخی ساعات ظهر همچنان مقادیر بالایی دریافت می‌شود. اما بررسی تغییرات ساعتی نشان می‌دهد بیشترین میزان نور بین ساعت ۱۱:۰۰ تا ۱۴:۰۰ با مقدار ۲۵۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰ لوکس، که نسبت به مدل پایه کاهش یافته اما همچنان در برخی ساعات از حد مجاز فراتر می‌رود و کمترین میزان نور بین ساعت ۰۶:۰۰ تا ۰۸:۰۰ و ۱۷:۰۰ تا ۱۹:۰۰ با مقدار ۴۰۰ تا ۷۰۰ لوکس، که نسبت به مدل پایه افزایش یافته است. در بررسی شدت نور دریافتی، شدت نور در برخی ساعات ظهر همچنان بیش از ۱۰۰۰ لوکس است، اما نسبت به مدل پایه مقدار آن کاهش پیدا کرده است. میزان نور در بازهٔ ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس افزایش یافته اما هنوز در برخی ساعات روز کافی نیست. در نتیجه الگوی اول تا حدودی نور بیش از حد را کاهش داده و درصد نور مطلوب را افزایش داده است، اما هنوز در برخی ساعات ظهر شدت نور زیاد است (تصویر ۱۱).

• **الگوی دوم (هندسه دایره‌ای)**

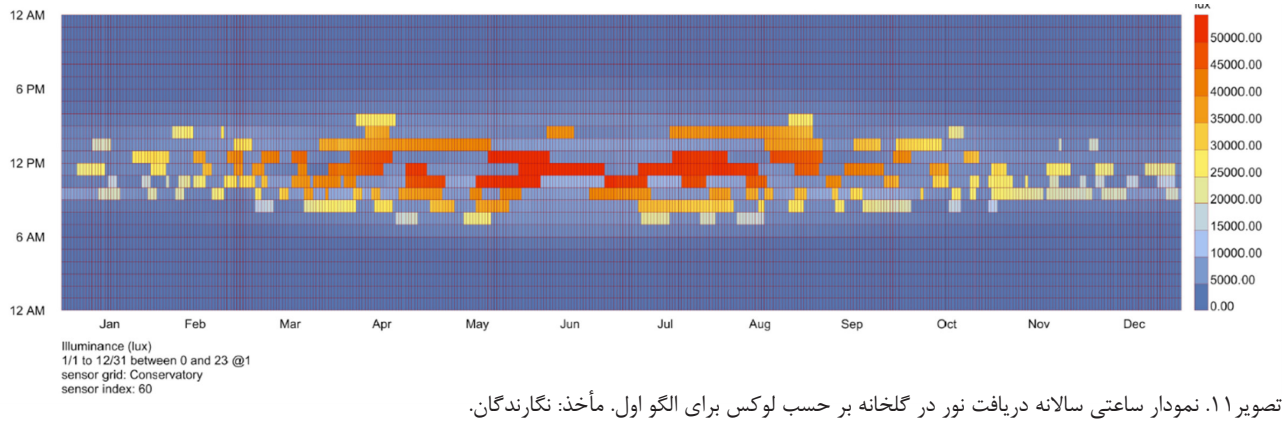
در بررسی تغییرات ماهانهٔ میزان نور بیش از حد در تابستان نسبت به الگوی اول کاهش یافته و مقدار نور مطلوب در تمام ماه‌های سال بهتر حفظ شده است. در بررسی تغییرات ساعتی بیشترین میزان نور بین ساعت ۱۱:۰۰ تا ۱۴:۰۰ با مقدار ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ لوکس، که نسبت به دو مدل قبل کاهش بیشتری داشته است و کمترین میزان نور بین ساعت ۰۶:۰۰ تا ۰۸:۰۰ و ۱۸:۰۰ تا ۲۰:۰۰ با مقدار ۵۰۰۰ تا ۹۰۰۰ لوکس، که به محدودهٔ مطلوب نزدیک‌تر است. طی بررسی شدت نور دریافتی مقدار نور بیش از ۱۰۰۰ لوکس نسبت به دو مدل قبل کمتر شده و میزان ساعات قرارگیری در بازهٔ ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس افزایش یافته است. در برخی ساعات صبحگاهی و عصرگاهی، مقدار نور در بازهٔ کمتر از ۳۰۰ لوکس قرار می‌گیرد. در نتیجه الگوی دوم نسبت به مدل پایه و الگوی اول، کنترل بهتری بر میزان نور دارد و تعادل مناسبی میان کاهش نور بیش از حد و افزایش نور مطلوب ایجاد کرده است (تصویر ۱۲).

• **الگوی سوم (هندسه مربعی)**

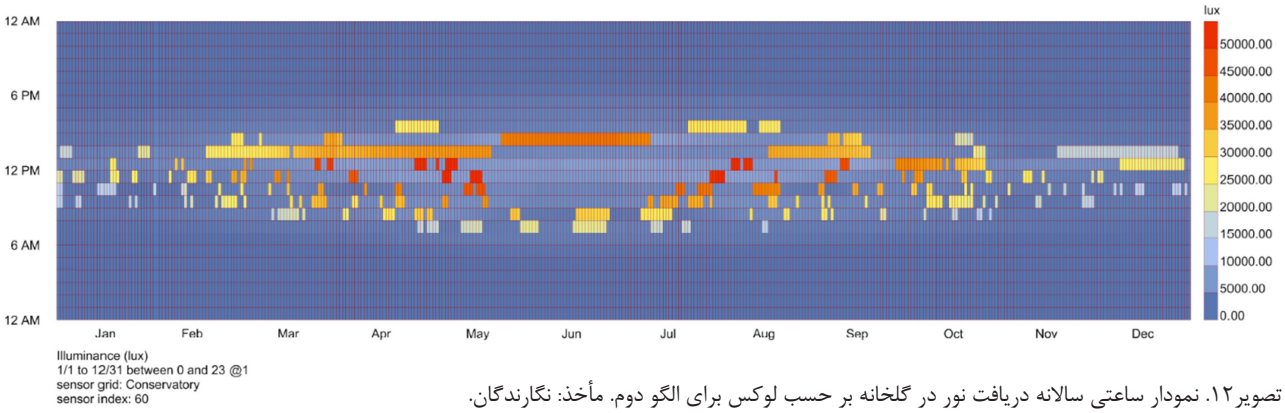
در بررسی تغییرات ماهانه این الگو در تمام ماه‌های سال، نور ورودی به گلخانه را به بهترین شکل تنظیم کرده است. در بررسی تغییرات ساعتی بیشترین میزان نور بین ساعت ۱۲:۰۰ تا ۱۴:۰۰ با مقدار ۱۰۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ لوکس، که کمترین میزان نور بیش از حد را در بین تمامی الگوها دارد و کمترین میزان نور بین ساعت ۰۶:۰۰ تا ۰۸:۰۰ و ۱۸:۰۰ تا ۲۰:۰۰ با مقدار ۶۰۰ تا ۱۱۰۰ لوکس، که کاملاً در محدودهٔ مطلوب قرار دارد. در بررسی شدت نور دریافتی مقدار نور بیش از ۱۰۰۰ لوکس به حداقل رسیده و بیشترین میزان نور دریافتی در بازهٔ ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس قرار دارد. در نتیجه الگوی سوم بهترین عملکرد را در کنترل نور ارائه داده و در تمامی ساعات، میزان نور دریافتی را در محدودهٔ مطلوب نگه داشته است (تصویر ۱۳).



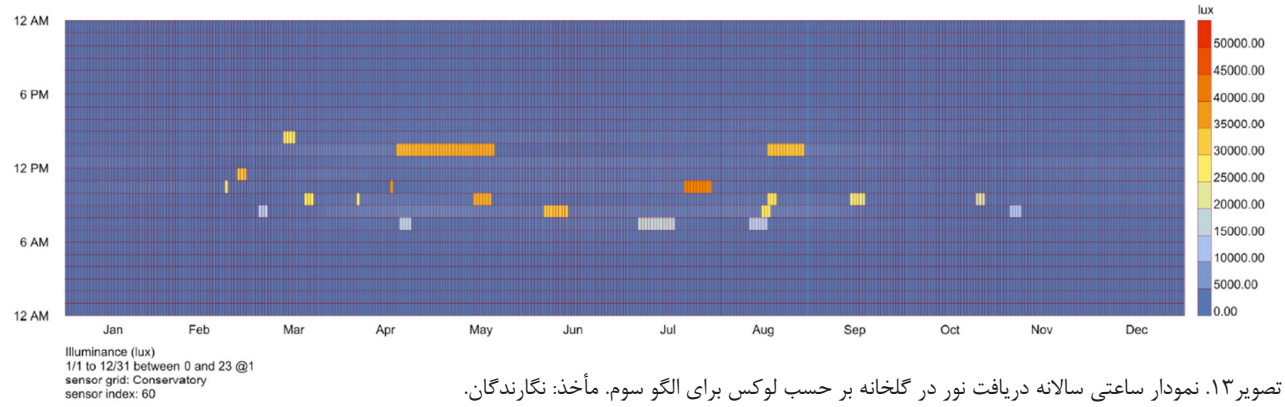
تصویر ۱۰. نمودار ساعتی سالانه دریافت نور در گلخانه بر حسب لوکس برای مدل پایه. نگارندگان.



تصویر ۱۱. نمودار ساعتی سالانه دریافت نور در گلخانه بر حسب لوکس برای الگو اول. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۱۲. نمودار ساعتی سالانه دریافت نور در گلخانه بر حسب لوکس برای الگو دوم. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۱۳. نمودار ساعتی سالانه دریافت نور در گلخانه بر حسب لوکس برای الگو سوم. مأخذ: نگارندگان.

مقایسهٔ نهایی مدل پایه و الگوهای پوستهٔ متحرک

با توجه به جدول ۳ الگوی سوم بهینه‌ترین گزینه برای گلخانه‌های گیاهان سایه‌دوست است، زیرا در تمام ماه‌های سال، شدت نور را تنظیم کرده، ساعات نور مطلوب را افزایش داده و از ورود نور بیش از حد جلوگیری کرده است.

مصرف انرژی طبق شاخص سالانه (EUI)

شاخص EUI یکی از شاخص‌های سنجش مصرف انرژی در ساختمان‌ها است که میزان انرژی مصرفی را بر حسب کیلووات‌ساعت بر مترمربع (kWh/m^2) مشخص می‌کند. این شاخص از طریق تقسیم بار کل انرژی بر مساحت منطقه مورد مطالعه محاسبه‌شده و نشان‌دهندهٔ میزان انرژی مصرف‌شده در یک بازهٔ زمانی مشخص است (Gonçalves, 2024؛ Mardaljevic et al., 2009؛ Abedini et al., 2025؛ Ma & Cheng, 2016؛ Nabil et al., 2009). در جدول ۴، میزان مصرف انرژی برای مدل پایه و سه الگوی پیشنهادی قابل مشاهده است. مصرف انرژی در گلخانه براساس داده‌های ارائه‌شده نشان می‌دهد که الگوی سوم بهینه‌ترین گزینه از نظر کاهش مصرف انرژی است، در حالی که مدل پایه بیشترین میزان مصرف را دارد. بررسی بخش‌های مختلف مصرف انرژی حاکی از آن است که سیستم گرمایش تشعشعی در الگوی سوم بیشترین مصرف را با مقدار ۳۴/۰۵ kWh/m^2

جدول۳. مقایسهٔ مدل پایه و الگوهای پوسته متحرک براساس دریافت نور سالانه. مأخذ: نگارندگان.

مدل/ الگو	تغییرات ماهانه (دی-آذر)	تغییرات ساعتی (۰۰:۰۰-۲۴:۰۰)	شدت نور دریافتی (لوکس)	نتیجه کلی
مدل پایه	بیشترین میزان نور در تابستان، کمترین در زمستان	بیشترین نور از ۱۰:۰۰ تا ۱۶:۰۰، نور کمتر در صبح و غروب	بیش از ۱۰۰۰ لوکس در اکثر ساعات، نور مطلوب محدود	کنترل ضعیف، نور بیش از حد زیاد، نور مطلوب کم
الگوی اول	کنترل نور در تابستان بهتر شده، اما همچنان در برخی ماه‌ها نور بیش از حد وجود دارد.	کاهش نسبی نور در ساعات ۱۰:۰۰ تا ۱۶:۰۰، اما هنوز برخی ساعات نور زیاد است.	کاهش نور بیش از حد، اما نور مطلوب هنوز نیاز به بهینه‌سازی دارد.	بهبود نسبی، اما هنوز نور ظهر زیاد است.
الگوی دوم	کنترل بهتر نور در تابستان، حفظ نور در زمستان	بهینه‌تر شدن ساعات نور مطلوب از ۱۰:۰۰ تا ۱۶:۰۰	افزایش نور مطلوب، کاهش نور بیش از حد	کنترل بهتر، افزایش نور مطلوب، کاهش نور بیش از حد
الگوی سوم	بهترین کنترل نور در تمام ماه‌های سال	تنظیم ایده‌آل نور در ساعات ۱۰:۰۰ تا ۱۶:۰۰	بیشترین میزان نور مطلوب (۳۰۰-۱۰۰۰ لوکس)، کمترین میزان نور بیش از حد	بهترین عملکرد، بیشترین نور مطلوب، کمترین نور بیش از حد

جدول ۴. مصرف انرژی در گلخانه. مأخذ: نگارندگان.

مصرف‌کنندهٔ انرژی	نوع تجهیزات	الگوی اول	الگوی دوم	الگوی سوم	مدل پایه	بیشترین	کمترین
گرمایش	گرمایش تشعشعی	۲۲/۲۲	۲۷/۶۱	۳۴/۰۵	۲۱/۸۲	الگو سوم	مدل پایه
خنک‌کننده/سرمایش	فن خنک‌کننده محیط	۵۱/۰۹	۴۰/۸۱	۳۲/۱۷	۵۳/۳۹	مدل پایه	الگوی سوم
نورپردازی داخلی	لامپ وال واشر رشد گیاه	۶/۰۵	۵/۸۵	۵/۱۵	۷/۲۳	مدل پایه	الگوی سوم
تجهیزات الکتریکی	شامل وسایل الکتریکی	۷۵/۱۷	۷۳/۲۹	۶۸/۳۳	۸۱/۰۶	مدل پایه	الگوی سوم
سیستم فن‌ها	فن تهویه	۲/۹۳	۳/۸۰	۴/۵۲	۲/۹۱	الگو سوم	مدل پایه
پمپ‌ها	پمپ‌های آب صنعتی	۷/۸۷	۷/۵۳	۶/۹۷	۱۰/۵۲	مدل پایه	الگوی سوم
شاخص کل (EUI) بر حسب (kwh/m۲)		۱۶۵/۳۳	۱۵۸/۸۹	۱۵۴/۱۹	۱۷۶/۹۳	مدل پایه	الگو سوم

دارد، در حالی که مدل پایه با ۲۱/۸۲ kWh/m² کمترین میزانِ مصرف را نشان می‌دهد. این افزایش در الگوی سوم احتمالاً ناشی از نیاز به تأمین شرایط دمایی مطلوب‌تر برای رشد گیاهان است. در مقابل، مصرف انرژی سیستم سرمایشی در الگوی سوم به کمترین میزان یعنی ۳۲/۱۷ kWh/m² کاهش یافته است که می‌تواند نتیجهٔ بهینه‌سازی در سیستم تهویه، کاهش وابستگی به سرمایش مکانیکی و استفاده از تهویهٔ طبیعی باشد. مصرف انرژی مربوط به نورپردازی داخلی در الگوی سوم برابر ۵/۱۵ kWh/m² است که نسبت به مدل پایه ۷/۲۳ kWh/m² کاهش چشمگیری داشته و نشان می‌دهد بهینه‌سازی طراحی نورپردازی، استفاده از لامپ‌های LED کم‌مصرف و بهره‌گیری از نور طبیعی در این کاهش مؤثر بوده است. در بخش تجهیزات الکتریکی نیز مدل پایه بیشترین مصرف را با ۸۱/۰۶ kWh/m² داشته، در حالی که الگوی سوم با ۶۸/۳۳ kWh/m² کمترین مقدار را نشان می‌دهد که احتمالاً نتیجهٔ مدیریت بهتر بارهای الکتریکی و بهینه‌سازی تجهیزات مصرفی بوده است. مصرف انرژی سیستم فن‌های تهویه در الگوی سوم با ۴/۵۲ kWh/m² به بیشترین مقدار رسیده است که نسبت به مدل پایه افزایش دارد. این افزایش ممکن است به دلیل استفاده مداوم‌تر از سیستم‌های تهویهٔ مکانیکی یا کاهش وابستگی به سرمایش فعال باشد. از سوی دیگر، مصرف انرژی پمپ‌های آب در الگوی سوم ۶/۹۷ kWh/m² است که نسبت به مدل پایه (۱۰/۵۲ kWh/m²) کاهش محسوسی داشته و نشان‌دهندهٔ بهینه‌سازی در سامانه‌های آبیاری و بازچرخانی آب است. در نهایت، شاخص کلی مصرف انرژی (EUI) در مدل پایه برابر ۱۷۶/۹۳ kWh/m² است که در الگوی سوم به ۱۵۴/۱۹ kWh/m² کاهش یافته است. این کاهش ۱۲/۸۵ درصدی در مصرف کل انرژی نشان می‌دهد که الگوی سوم کارآمدترین گزینه از نظر مدیریت انرژی در گلخانه است. با این حال، افزایش مصرف انرژی در بخش گرمایش و تهویه در برخی الگوها نشان می‌دهد که کاهش مصرف در یک

بخش می‌تواند موجب افزایش مصرف در بخش‌های دیگر شود، بنابراین یکپارچه‌سازی و متعادل‌سازی سیستم‌های مدیریت انرژی برای دستیابی به بهره‌وری حداکثری ضروری است.

جمع‌بندی نهایی از نظر نور و انرژی

با توجه به این که هدف اصلی این پژوهش کنترل نور در محیط گلخانه برای گیاهان سایه‌دوست است و طبق مطالعات انجام‌شده، مقدار نور موردنیاز برای این گیاهان در بازهٔ ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس قرار دارد، بنابراین با استناد به شاخص UDI در این بازه، مقایسه‌ای بین الگوهای اول، دوم، سوم و مدل پایه (حالت متداول و مرسوم) انجام شده است. طبق جدول۵، بهترین الگو برای رسیدن به هدف مذکور، الگوی شماره سه است.

همچنین، بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی انرژی نشان می‌دهد که در میان سه الگو، کمترین مقدار مصرف انرژی سالانه متعلق به الگوی سوم است، در حالی که بیشترین مقدار مصرف انرژی به الگوی اول مربوط می‌شود. با این حال، در مقایسه با مدل پایه، بیشترین مصرف انرژی به مدل پایه اختصاص دارد. بهینه‌ترین الگو برای مصرف انرژی، مطابق با تصویر ۱۴ الگوی شماره ۳ است که کمترین مصرف انرژی را در بین همهٔ الگوها دارد. نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهد که به‌طور کلی، الگوی سوم بهترین عملکرد را در میان سایر الگوها دارد. از آن‌جایی که هندسه الگو سوم مربع‌شکل و بدون منحنی است، این ویژگی باعث شده که این الگو نسبت به دو الگوی دیگر از نظر نوری و انرژی کارایی بهتری داشته باشد.

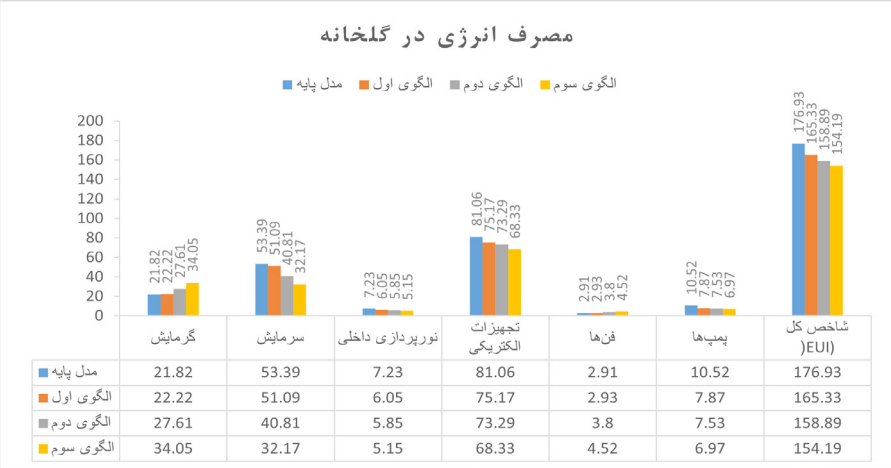
نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف کنترل نور روز در محیط گلخانه برای گیاهان سایه‌دوست انجام شده است و یافته‌های آن نشان می‌دهد که استفاده از پوستهٔ متحرک می‌تواند به‌طور مؤثر در این زمینه عمل کند. به‌منظور دستیابی به این هدف، از روش‌های معماری سنتی ایران بهره گرفته شده و طراحی پنل پوسته متحرک، با الهام از ارسی‌های سنتی خانه‌های قدیمی استان مازندران انجام شده است. در شبیه‌سازی‌های این پژوهش، دو هندسه مربع و دوازده ضلعی بررسی شد که نتایج نشان دادند الگوی هندسی مربعی، عملکرد مطلوب‌تری در تنظیم نور محیط گلخانه و کاهش مصرف انرژی دارد. نوآوری این پژوهش در تعریف شاخص نوری برای محیط‌های غیرانسانی و کنترل نور در گلخانه‌ها است. در این راستا، شاخص UDI، متناسب با نیاز نوری گیاهان سایه‌دوست، برای محیط گلخانه تعریف شده است. مقایسهٔ نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پوسته‌های متحرک، مشابه سایر کاربری‌های معماری (مسکونی، اداری، آموزشی و ...)، توانایی کنترل نور روز و کاهش مصرف انرژی را دارند. از نظر کنترل نور روز، پژوهش عابدینی و همکاران (Abedini et al., 2025) نشان داد که سایه‌بان‌های ثابت، نور بیش‌ازحد (ASE) را کاهش داده و کیفیت نور روز را بهبود می‌بخشند. یونیتسیا و سولاژ (Yunitsyna & Sulaj, 2025) در تحقیق خود، از سیستم سایه‌انداز متحرک با الهام از بیومیمتیک استفاده کردند و دریافتند که سامانه‌های تطبیق‌پذیر می‌توانند میزان خیرگی را کاهش داده و توزیع نور را بهینه کنند. گوهریان و همکاران (Goharian et al., 2025) با طراحی نمای متحرک تطبیقی، توانستند شاخص UDI را از ۴۹درصد به ۹۰درصد افزایش دهند و تأثیر مثبت سیستم‌های متحرک در تنظیم نور روز را تأیید کردند. نتایج پژوهش حاضر نیز نشان می‌دهد که پوسته‌های متحرک، مشابه سایه‌بان‌های هوشمند و نماهای تطبیقی در تحقیقات پیشین، توانایی کنترل نور روز را دارند. به‌ویژه، در مقایسه با سیستم‌های سایه‌انداز ثابت (Abedini et al., 2025)، پوسته‌های متحرک توانایی تطبیق بیشتری با تغییرات نور خورشید داشته و محدوده‌ی مطلوبی برای گیاهان سایه‌دوست فراهم می‌کنند. علاوه‌بر این، نتایج این پژوهش مشابه یافته‌های گوهریان و همکاران (Goharian et al., 2025) تأثیر طراحی تطبیق‌پذیر را در افزایش میزان نور مطلوب تأیید کرده است، به‌طوری که الگوی سوم (هندسهٔ مربعی) در این پژوهش، بالاترین میزان نور مفید را برای گیاهان سایه‌دوست فراهم کرده است. این پژوهش تأیید می‌کند که استفاده از پوسته‌های متحرک، مشابه سیستم‌های تطبیق‌پذیر ساختمانی، می‌تواند در گلخانه‌ها نیز کنترل مؤثری بر نور داشته باشد.

از نظر کاهش مصرف انرژی، مهیاری و همکاران (۱۴۰۱) نشان دادند که پوسته‌های تطبیق‌پذیر توانسته‌اند بار سرمایشی را تا ۵۶ درصد کاهش دهند. مادن و کیزیلورنلی (Maden & Kızılorenli, 2023) دریافتند که نماهای مدولار پاسخگو، تأثیر بسزایی در کاهش مصرف انرژی دارند. خطیبی و همکاران (۱۴۰۰) اثبات کردند که نماهای مجهز به سایبان‌های متحرک، مصرف انرژی را در مقایسه با سایر گزینه‌ها به میزان بیشتری کاهش می‌دهند. نتایج پژوهش حاضر نیز نشان داد که الگوی سوم (هندسه مربعی)، در مقایسه با مدل

جدول ۵. مقایسهٔ شاخص UDI در گلخانه. مأخذ: نگارندگان.

گلخانه	UDI ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ بر حسب درصد	میانگین
الگوی یک	۱۰/۲ تا ۵۷/۶	۳۳/۹
الگوی دو	۲۲/۶ تا ۷۳/۸	۴۸/۲
الگوی سه	۶۳/۲ تا ۹۱/۴	۷۷/۳
مدل پایه	۷/۲ تا ۲۸/۹	۱۸/۰۵



	گرمایش	سرمایش	نورپردازی داخلی	تجهیزات الکتریکی	فن‌ها	پمپ‌ها	شاخص کل (EUI)
مدل پایه	21.82	53.39	7.23	81.06	2.91	10.52	176.93
الگوی اول	22.22	51.09	6.05	75.17	2.93	7.87	165.33
الگوی دوم	27.61	40.81	5.85	73.29	3.8	7.53	158.89
الگوی سوم	34.05	32.17	5.15	68.33	4.52	6.97	154.19

تصویر ۱۴. نمودار مصرف انرژی در گلخانه. مأخذ: نگارندگان.

پایه و سایر الگوها، کمترین میزان مصرف انرژی را داشته است. یافته‌های این پژوهش، مشابه پژوهش مهیاری و همکاران (۱۴۰۱)، نشان می‌دهد که استفاده از پوسته‌های متحرک، به‌ویژه در طراحی گلخانه‌ها، می‌تواند کاهش قابل‌توجهی در مصرف انرژی ایجاد کند. علاوه‌بر این، پژوهش حاضر با مطالعات مادن و کیزیلورنلی (Maden & Kızılorenli, 2023) هم‌راستا است، زیرا تأکید دارد که سیستم‌های پاسخگو و تطبیق‌پذیر، حتی در محیط‌های گلخانه‌ای، می‌توانند تأثیر مثبتی بر کاهش وابستگی به انرژی مصنوعی داشته باشند. پژوهش حاضر تأیید می‌کند که پوسته‌های متحرک، مشابه تحقیقات پیشین، می‌توانند به کاهش قابل‌توجه مصرف انرژی منجر شوند.

از نظر نوآوری، پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر ساختمان‌های مسکونی، اداری و آموزشی تمرکز داشته‌اند و به کنترل نور در محیط‌های انسان‌محور پرداخته‌اند و تاکنون شاخص مشخصی برای کنترل نور در گلخانه‌های مخصوص گیاهان سایه‌دوست تعریف نشده است. این پژوهش با تعریف شاخص UDI برای اولین‌بار معیار مشخصی برای کنترل نور در گلخانه‌ها ارائه کرده است. درحالی‌که مطالعات گذشته به نور مطلوب برای انسان‌ها پرداخته‌اند، این تحقیق ثابت کرده است که اصول مشابه در گلخانه‌ها نیز قابل‌اجرا است و همچنین طراحی پوسته متحرک الهام‌گرفته از ارسی‌های سنتی، یک نوآوری در استفاده از عناصر بومی برای کنترل نور در معماری پایدار محسوب می‌شود. پژوهش حاضر تفاوت اصلی خود را در تمرکز بر محیط‌های غیرانسانی (گلخانه‌ها) و ارائه شاخص نوری مخصوص گیاهان سایه‌دوست نشان می‌دهد که در مطالعات پیشین کمتر به آن پرداخته شده است.

با وجود یافته‌های قابل توجه، این پژوهش نیز دارای محدودیت‌هایی است که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. نخست آنکه مطالعهٔ حاضر در اقلیم معتدل و مرطوب و در شهر بابلسر انجام شده است، از این‌رو تعمیم‌پذیری نتایج به اقلیم‌های دیگر از جمله گرم و خشک یا سرد، نیازمند مطالعات تکمیلی در شرایط متفاوت اقلیمی است. دوم آنکه نوع گیاهان مورد بررسی، عمدتاً گیاهان آپارتمانی سایه‌دوست بوده‌اند و نتایج ممکن است برای سایر گونه‌های گیاهی با نیازهای نوری متفاوت صادق نباشد. همچنین، پژوهش بر شاخص‌های نوری و انرژی متمرکز بوده و بررسی جامع‌تری از عوامل اقتصادی یا زیستی مانند هزینه‌های نگهداری یا شرایط رطوبتی و دمایی صورت نگرفته است. این موارد می‌توانند در تحقیقات آتی مورد بررسی دقیق‌تر قرار گیرند تا ارزیابی کامل‌تری از عملکرد پوسته‌های متحرک در فضاهای گلخانه‌ای ارائه شود.

پی‌نوشت‌ها

۱. UDI: Useful Daylight Illuminance

۲. EUI: Energy Use Intensity

فهرست‌منابع

• حشمتی، پریسا. (۱۳۹۸). *طراحی پوسته تغییرپذیر هوشمند با الهام از گیاهان برای تنظیم شرایط محیطی داخل فضا، طراحی باغ و مرکز تحقیقات گیاهشناسی در تهران*. [پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد، موسسه آموزش عالی معماری و هنر پارس]. https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/fed338a3b701873cc34f6c868d4d67e8

• شکری، آزاده. (۱۳۹۴). *طراحی نمای متحرک درراستای کنترل نور خورشید در ساختمان اداری*. [پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد، دانشگاه مازندران]. https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/d0403163635c20c454aa8e3671d28b79

• شیخی نشلجی، مهدی و مهدی‌زاده سراج، فاطمه. (۱۴۰۱). طراحی سایبان هوشمند برای ساختمان اداری جهت کنترل ورود نور مستقیم خورشید مبتنی‌بر کاهش بار سرمایشی با الگوبرداری از گره‌های ایرانی‌اسلامی. *مجله علمی پژوهش‌های معماری نوین*، ۲(۱)، ۷-۲۶. https://dorl.net/dor/20.1001.1.28209818.1401.2.1.1.6

• فتحی پیر کاشانی، سهیل. (۱۳۹۹). *طراحی ساختمان بلندمرتبه با هدف بهینه سازی مصرف انرژی از طریق پوسته‌های هوشمند* [پایان‌نامهٔ منتشر نشدهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی].

• مهیاری، حسین. زرکش، افسانه و مهدوی‌نژاد، محمدجواد. (۱۴۰۱).

ارائهٔ یک پوستهٔ تطبیق‌پذیر هوشمند با رویکرد بیومیمتیک جهت کاهش مصرف انرژی. *هویت شهر*، ۵۲(۱۶)، ۲۳-۳۸.

• 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

• Atamewan, E. E. (2022). Appraisal of Day-lighting in Sustainable Housing Development in Developing Countries. *Journal of Studies in Science and Engineering, 2*(2), 59-75. https://doi.org/10.53898/josse2022225

• 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

• 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

• Edwards, L., & Torcellini, P. (2002). *Literature review of the effects of natural light on building occupants*. https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/30769.pdf

• Goharian, A., Mahdavinejad, M. J., Ghazazani, S., Hosseini, S. M., Zamani, Z., Yavari, Y., Ghafarpoor, F., & Shoghid, 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*(1), 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

• Hosseini, S. M., Mohammadi, M., & Guerra-Santin, O. (2019). Interactive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by 2D and 3D shape changes. *Building and Environment, 165*, 106396. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106396

• Huang, T., Huang, W., Zhang, B., Chen, W., & Pan, X. (2025). Optimizing energy consumption in centralized and distributed cloud architectures with a comparative study to increase stability and efficiency. *Energy and Buildings, 333*, 115454. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115454

• Khatibi, A., Shahbazi, M., & Torabi, Z. (2022). Analyzing the thermal behavior of facades in order to determine the optimal performance of energy consumption (Case study: An office building in Tehran). *Journal of Renewable and New Energy, 9*(2), 121-129. https://doi.org/20.1001.1.24234931.1401.9.2.13.6

• Maden, F., & Kızılörenli, E. (2023). Modular responsive facade proposals based on semi-regular and demi-regular tessellation: Daylighting and visual comfort. *Frontiers of Architectural Research, 12*(4), 601-612. https://doi.org/10.1016/j.foar.2023.02.005

• Lee, E. S., Matusiak, B. S., Geisler-Moroder, D., Selkowitz, S. E., & Heschong, L. (2022). Advocating for view and daylight in buildings: Next steps. *Energy and Buildings, 265*, 112079. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112079

• Li, L. (2024). Research on daylighting optimization of building space layout based on parametric design. *Sustainable Buildings, 7*(3). https://doi.org/10.1051/sbuild/2024003

• Ma, J., & Cheng, J. C. (2016). Estimation of the building energy use intensity in the urban scale by integrating GIS and big data technology. *Applied Energy, 183*, 182-192. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.079

• Mahmoud, A. H. A., & Elghazi, Y. (2016). Parametric-based designs for kinetic facades to optimize daylight performance: Comparing rotation and translation kinetic motion for hexagonal facade patterns. *Solar Energy, 126*, 111-127. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.039

• Mardaljevic, J., Heschong, L., & Lee, E. (2009). Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research & Technology, 41*(3), 261-283. https://doi.org/10.1177/1477153509339703

• Mengmeng, W. A. N. G., Zhuoying, J. I. A., & Lulu, T. A. O. (2024). Review of dynamic façade typologies, physical performance and control methods: Towards smarter and cleaner zero-energy buildings. *Journal of Building Engineering, 98*, 111310. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111310

• Mirmomtaz, S. M. M., Baharvand, M., Dehghan, N., & Safikhani, T. (2025). Multi-objective Optimization of Two Types of Kinetic Shading Devices to Enhance Energy Efficiency and Daylighting. *Sustainable Development of Geographical Enviroment, 6*(11), 41-58. https://doi.org/10.48308/sdge.2024.234834.1187

• Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2005). Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research & Technology, 37*(1), 41-57. https://doi.org/10.1191/1365782805li128oa

• Nashaat, B., & Waseef, A. (2017). *Responsive kinetic façades: an effective solution for enhancing indoor environmental quality in buildings*. In The First Memaryat International Conference (MIC 2017) Architecture of the Future: Challenges and Visions. Saudi Arabia. https://www.researchgate.net/publication/330347504_Responsive_Kinetic_Facades_An_Effective_Solution_for_Enhancing_Indoor_Environmental_Quality_in_Buildings?utm_source=chatgpt.com

• Nasr, T., Yarmahmoodi, Z., & Ahmadi, S. (2020). The Effect of Kinetic Shell's Geometry on Energy Efficiency Optimization Inspired by Kinetic Algorithm of Mimosa pudic. *Naqshejahan, 10*(3), 219-230. https://doi.org/20.1001.1.23224991.1399.10.3.3.3

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

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

• Saleh, M. T., Mansour, Y., Kamel, S., Dewidar, K., & Farid, A. A. (2022). *Towards a Taxonomy of The 21st century Architectural Practices in the age of Sustainability and Technology. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1056, No. 1, p. 012011). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1056/1/012011

• Sharaidin, K. (2014). *Kinetic facades: towards design for environmental performance* [Doctoral dissertation, RMIT University]. https://core.ac.uk/outputs/32229184/

• Syam, F. H., Wisdianti, D., Sajar, S., & Bahri, S. (2023). Study of sustainable architecture concepts. *International Journal of Research and Review, 10*(4), 419-424. https://doi.org/10.52403/ijrr.20230450

• 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

• Yano, M., Kojima, S., Takahashi, Y., Lin, H., & Sasaki, T. (2001). Genetic control of flowering time in rice, a short-day plant. *Plant Physiology, 127*(4), 1425-1429. https://doi.org/10.1104/pp.010710

• Yarmahmoodi, Z., Nasr, T., & Moztarzadeh, H. (2023). Algorithmic Design of Building Intelligent Facade to Control the Daylight Inspired by the Rafflesia Flower Kinetic Pattern. *Naqshejahan, 13*(2), 1-21.

• Yeang, H. Y. (2013). Solar rhythm in the regulation of photoperiodic flowering of long-day and short-day plants. *Journal of Experimental Botany, 64*(10), 2643-2652. https://doi.org/10.1093/jxb/ert130

• 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

• Zabihi, A., Mirzaei, R., Yazhari Kermani, A., & Heidari, A. (In -press). Optimizing the geometric pattern of light reception in the Sabak element to enhance the Optimal daylight level and use in the office building of Kerman. *Journal of Urban Ecology Researches*.https://doi.org/10.30473/grup.2025.70487.2833

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

• Zhang, G., & Shi, L. (2018). Improving the performance of solar chimney by addressing the designing factors. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 168*(1), 012010.

• Zhao, Z., Li, L., Zhang, G., Chew, M. Y. L., Wu, Q., Wang, Q., & Shi, L. (2024). Solar chimney applications in multi-storey buildings: A critical review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 70,* 103936. https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103936

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

نحوهٔ ارجاع به این مقاله:
عبدالی، پوریا؛ گلدوست، یاسر و احمدی، فریال. (۱۴۰۴). کنترل نور روز در محیط گلخانه‌ای با استفاده از پوسته‌های متحرک و تعدیل مصرف انرژی سالانه. *باغ نظر*، ۲۲(۱۴۶)، ۵۵-۷۲.

DOI: 10.22034/bagh.2025.511783.5783
URL: https://www.bagh-sj.com/article_222785.html