

Explaining the Optimization of Light Shelf Specifications in Semi-arid Climate Schools with Visual Comfort Approach and Energy Efficiency

Romina Khalilzadeh Aghdami ¹, PhD Candidate, Seyed Majid Mofidi Shemirani ², Assistant Professor, Mansoureh Tahbaz ³, Associate Professor

¹ Department of Art and Architecture, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Khalilzadeh.romina@wtiau.ac.ir

² Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and urban, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
S_m_mofidi@iust.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Architecture, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
m-tahbaz@sbu.ac.ir

Abstract:

The present study investigates the effect of optimizing light shelf specifications on improving light performance and reducing energy consumption in classrooms. In order to achieve the goal, Shahid Mahdavi Preschool in Tehran was selected as a research sample due to its features such as a light shelf, Trombe wall with light vents, ornamental design on the ceiling and diagonal atrium. Light measurement was done with Light meter in two classes as a reference and simulation scenario and the results analyzed with Climate Studio. The analysis process includes 19 different configurations for internal and external optical rack structures, which were evaluated in four stages. The independent variables were changed in each step and the results were compared with the basic model without light shelf. But in the final stage, the optimal model evaluated with the reference scenario and the base model. The LSPV4 model was selected as the optimal model. The results of the annual glare analysis show a decrease in this index with a growth rate of -62.58 % in the reference scenario and -60.49 % in the base model. Daylight uniformity values in the optimal model in the southeast and southwest classes have increased by 47.06 and 60.98% respectively, and compared to the base model by 59.57 and 17.86%, respectively. Therefore, based on simulation results, optimizing light shelf specifications in Tehran classroom in line with achieving visual comfort by providing optimal daylight and reducing glare, as well as energy efficiency by reducing energy consumption and electricity production required for lighting when necessary has been realized.

Keywords: Daylight, Educational Space, Energy Efficiency, Visual Comfort, Glare Disturbing Comfort

Received: 01 December 2023

Revised: 29 June 2024

Accepted: 13 July 2024

Corresponding Author: Dr. Seyed Majid Mofidi Shemirani

تبیین بهینه‌سازی مشخصات رف نوری در مدارس اقلیم نیمه گرم و خشک با رویکرد تامین آسایش بصری و بهره‌وری انرژی

رومینا خلیل زاده اقدمی^۱، دانشجوی دکتری تخصصی، سید مجید مفیدی شمیرانی^۲، استادیار، منصوره طاهباز^۳،
دانشیار

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
Khalilzadeh.romina@wtiau.ac.ir

۲- استادیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
S_m_mofidi@iust.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
m-tahbaz@sbu.ac.ir

این مقاله برگرفته از رساله دکتری نگارنده اول با عنوان "تبیین بهینه سازی مشخصات نورگذرهای فضاهای آموزشی مناطق گرم و خشک با رویکرد بهره‌وری انرژی"، به راهنمایی نگارنده دوم و مشاوره نگارنده سوم، در گروه معماری دانشگاه آزاد واحد تهران غرب می باشد.

چکیده: پژوهش حاضر به بررسی تاثیر بهینه‌سازی مشخصات رف نوری بر بهبود عملکرد نور روز و کاهش مصرف انرژی در کلاس‌های درس می‌پردازد. به منظور تحقق هدف، پیش دبستانی شهید مهدوی تهران، به سبب ویژگی‌هایی همچون رف نوری، دیوار ترومب به همراه دریچه‌های نور، شمسه در سقف و آتروپیم مورب به عنوان نمونه مورد پژوهی انتخاب شد. نورسنجی با ابزار سنجش روشنایی در دو کلاس به عنوان سناریوی مرجع و شبیه‌سازی و همچنین تحلیل نتایج با Climate Studio انجام شد. فرآیند تحلیل شامل ۱۹ پیکربندی متفاوت برای شاکله رف نوری داخلی و خارجی است که در چهار مرحله مورد ارزیابی قرار گرفتند. متغیرهای مستقل در هر مرحله تغییر داده شد و نتایج آن با مدل پایه بدون رف نوری قیاس شدند. اما در مرحله نهایی، مدل بهینه با سناریوی مرجع و مدل پایه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مدل LSPV4 به عنوان مدل بهینه انتخاب شد. نتایج حاصل از تحلیل خیرگی سالانه نشان دهنده کاهش این شاخص با نرخ رشد ۶۲/۵۸- درصدی در سناریوی مرجع و ۶۰/۴۹- درصدی در مدل پایه است. مقادیر یکنواختی نور روز در مدل بهینه در کلاس جنوب شرقی و جنوب غربی نسبت به سناریوی مرجع به ترتیب ۴۷/۰۶ و ۶۰/۹۸ درصد و نسبت به مدل پایه ۵۹/۵۷ و ۱۷/۸۶ درصد افزایش یافته است. بنابراین براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده، بهینه‌سازی مشخصات رف نوری در کلاس درس شهر تهران در جهت دستیابی به آسایش بصری با تامین نور روز مطلوب و کاهش خیرگی و همچنین بهره‌وری انرژی با کاهش مصرف انرژی و تولید برق مورد نیاز برای روشنایی در مواقع لزوم تحقق یافته است.

کلمات کلیدی: نور روز، فضای آموزشی، بهره‌وری انرژی، آسایش بصری، خیرگی مغل آسایش

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۰

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید مجید مفیدی شمیرانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران- دانشگاه علم و صنعت ایران- دانشکده معماری و شهرسازی- گروه معماری و شهرسازی

۱- مقدمه

نور روز همواره به عنوان یک عامل مهم در طراحی ساختمان‌های آموزشی در نظر گرفته می‌شود. سطح روشنایی روز علاوه بر ارتقا کیفیت محیط کلاس، بر شرایط سلامت جسم و ذهن افراد نیز موثر است. بعلاوه حضور در فضای فاقد نور روز برای مدت طولانی سبب بروز مشکلات روانشناختی خواهد شد [۱]. از این رو دریافت نور روز باید سبب تامین آسایش بصری کاربران شود و این عامل متأثر از عوامل مختلفی است. افزایش سطح بازشوها به منظور دریافت نور روز بیشتر منجر به بروز خیرگی محل آسایش و عدم یکنواختی و در نتیجه عدم آسایش بصری می‌شود. در پژوهش حاضر رف‌های نوری به عنوان عامل ورود نور روز به فضا در نظر گرفته شده‌اند تا ضمن افزایش عمق نفوذ نور سبب کاهش خیرگی و افزایش یکنواختی شده و شرایط محیطی مطلوبی برای کاربران فراهم شود. از طرف دیگر با توجه به بحران انرژی در دنیا، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و تامین آن از منبع انرژی‌های تجدیدپذیر منجر به کاهش مصرف انرژی در بنا می‌شود. برای این منظور طراحی صحیح ساختمان گامی مهم در جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی خواهد بود. براساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، ۱۴ درصد از برق مصرفی اتحادیه اروپا برای تامین روشنایی مصرف می‌شود [۲] این مقدار در ایران برابر ۳۰ درصد است [۳]. بنابراین بهره‌برداری از نور روز به عنوان عاملی مهم در کاهش مصرف انرژی در طراحی مدارس، مورد توجه قرار گرفته و رف نوری یکی از راهکارهای مناسب است. رف نوری یک سیستم روشنایی طبیعی است که روی پنجره نصب شده و با انعکاس نور روز از فضای بیرون توسط سطح بازتابنده رف نوری و سطح سقف فضای داخلی، ضمن تامین نور روز مورد نیاز، انرژی مصرف شده برای روشنایی را کاهش می‌دهد [۴]. علاوه بر این رف نوری با جلوگیری از ورود نور روز اضافی از پنجره، از توزیع نامتعادل نور روز جلوگیری کرده و سبب تامین آسایش بصری می‌شود. متغیرهای رف نوری که در عملکرد آن تاثیرگذارند شامل عمق، زاویه، ارتفاع و میزان بازتاب می‌شود. رف نوری متناسب با محل نصب، ممکن است دارای بخش داخلی یا خارجی باشد [۵]. رف نوری دارای سیستم انعطاف پذیری است که به راحتی قابل نصب بوده [۶]، و می‌تواند با شاکله‌های مختلف مانند مدل‌های صاف ثابت و سطوح بازتابی منحنی [۷]، طراحی سایبان پویا [۸، ۹] و به عنوان یک مدل خورشیدی یکپارچه طراحی شود [۱۰]. به همین منظور لازم است تا با بهره‌گیری از نور روز علاوه بر تامین رضایت، سلامت و افزایش کارایی دانش‌آموزان در محیط، تلاشی در جهت ایجاد بناهای پایدار و کاهش مصرف انرژی صورت پذیرد تا با کاهش مصرف روشنایی الکتریکی شاهد کاهش تقاضای انرژی و افزایش آگاهی و توجه نسبت به بحث انرژی و محیط زیست باشیم. به همین منظور هدف پژوهش حاضر دستیابی به مشخصات بهینه شاکله رف نوری مدارس در اقلیم نیمه گرم و خشک شهر تهران به منظور دستیابی به آسایش بصری است. سوال مورد نظر در این پژوهش آن است که: الگوهای بهینه‌سازی مشخصات رف نوری فضاهای آموزشی، به منظور دستیابی به بهره‌وری انرژی و آسایش بصری در شهر تهران کدام‌اند؟

۲- پیشینه تحقیق

استفاده از نور روز در طراحی مدارس، در طول سال‌ها مورد توجه طراحان بوده‌است [۱۱]. نور روز علاوه بر تاثیر مثبت بر عملکرد دانش‌آموزان و ارتقا شرایط زیستی سالم، سبب کاهش مصرف انرژی نیز می‌شود [۱۲]. سال‌های زیادی است که انرژی مصرفی در تمام جهان از منابع فسیلی تامین می‌شود. اما با توجه به پایان پذیر بودن این منابع و همچنین اثرات مخرب زیست محیطی آن‌ها که به واسطه‌ی سوختن این منابع ایجاد می‌شود، ضرورت صرفه‌جویی در مصرف انرژی و جایگزینی انرژی‌های تجدید پذیر جهت همراهی با محیط زیست و کاهش آلودگی وجود دارد. طبق گزارش سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)، میزان انرژی الکتریکی مصرفی برای روشنایی ۲۰ درصد و در ساعات اوج مصرف ۳۰ درصد برق مصرفی را به خود اختصاص داده است [۱۳]. این مقدار طبق گزارش صادر شده توسط IEA، ۱۴ درصد از مصرف برق در اتحادیه اروپا را شامل می‌شود [۱۴، ۲]. ایران به دلیل نزدیکی به خط استوا و تنوع آب و هوایی بالا، در بهترین شرایط برای دریافت تابش خورشیدی قرار دارد. به گزارش ایسنا ایران به صورت میانگین از ۳۶۵ روز سال، ۲۸۰ روز آفتابی دارد [۱۵]. براساس مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر، استقلال انرژی در ایران بدون بهره‌گیری از سوخت‌های فسیلی، تا سال ۲۰۳۰ یک گزینه قابل دستیابی است [۱۶]. بررسی هزینه چرخه عمر در ساختمان، نشان دهنده تاثیر سرمایه‌گذاری اولیه در طراحی پنجره‌ها بر هزینه کل چرخه عمر بنا حتی در طول عمر ۳۰ سال است [۱۷]. مطالعات نشان داده که ۴۰٪ کاهش در مصرف

انرژی روشنایی سبب ۱۷٪ کاهش در مصرف انرژی اولیه می‌شود [۱۸]. بنابراین استفاده از نور روز در مدارس یک گزینه بسیار مهم و بین‌المللی است [۱۹]. با توجه به معضلات مربوط به بحران انرژی در جهان، میزان مصرف انرژی باید کنترل شود و به منظور بهبود بهره‌گیری از نور روز، شیوه‌های مختلف دریافت روشنایی طبیعی همچون رف نوری [۲۰-۶] و انتقال نور [۲۱] در نظر گرفته شوند. نورگذرها عموماً تأثیرات متناقضی بر عملکرد نور روز و روشنایی، گرمایش و سرمایش دارند [۲۲]. بنابراین بازنگری کلی تناسبات و طراحی پنجره، می‌تواند عملکرد کلی ساختمان را بهبود بخشد [۲۳].

پژوهش‌های زیادی درباره عملکرد رف‌های نوری دارای چندین پیکربندی (ابعاد، هندسه، زاویه‌ها و مصالح) با استفاده از بررسی‌های میدانی در شرایط مختلف آسمان و یا از طریق شبیه‌سازی انجام شده‌است. همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، مطالعات متعددی در مورد بهبود عملکرد نور روز و آسایش بصری داخل ساختمان انجام شده‌است. بسیاری از مطالعات ارتفاع و زاویه رف نوری را به منظور بهبود عملکرد نور روز تغییر داده‌اند [۲۳-۲۶، ۱۴]. با این وجود تغییر سطح انعکاس دهنده با توجه به وابسته بودن آن به تغییر زاویه یا ارتفاع رف نوری را هنگام طراحی در نظر گرفته‌اند. اگر انعکاس رف نوری بالا باشد، عملکرد نور روز بهبود می‌یابد، زیرا نور بیشتری از طریق انعکاس وارد فضای داخلی می‌شود و این موضوع در برخی موارد می‌تواند سبب خیرگی محل آسایش برای کاربران شود [۲۷]. از طرف دیگر اگر میزان انعکاس رف نوری کم باشد، مقدار نور روز وارد شده از رف نوری کاهش می‌یابد و عملکرد نور بدتر می‌شود.

پژوهش‌های پیشین در درجه اول به بهینه‌سازی شاکله رف نوری به منظور افزایش نور روز در فضا و همچنین بهبود آسایش بصری پرداخته است. با این وجود تحقیقات خاصی در مورد یک رف نوری وجود داشت که عرض و طول آن با جداسازی سطح بازتابنده رف نوری در بخش بالا و پایین، اصلاح شد [۲۵]. چندین پژوهش ادغام فناوری‌های پوسته‌های ساختمانی مانند لوور [۲۸]، پنل خورشیدی در بخش داخلی [۲۳] و سامانه سایبان [۲۶] را برای تسهیل کاهش انرژی مورد نیاز ساختمان تجزیه و تحلیل کردند. هوانگ و همکاران [۲۹] ویژگی‌های سیستم رف نوری را با استفاده از پنل خورشیدی داخلی با پوشش رف نوری بیرونی با پنل خورشیدی در جهت جنوبی، در زوایای مختلف مورد بررسی قرار داد. از این رو پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد بهینه ترکیب رف‌های نوری داخلی و خارجی با استفاده از پنل‌های خورشیدی به منظور تسهیل توزیع نور روز در فضای آموزشی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در مناطق نیمه گرم و خشک مانند شهر تهران انجام می‌شود. در پژوهش حاضر، از پنل خورشیدی علاوه بر سازوکار اصلی خود، به منظور یک منعکس کننده نور به فضای داخلی بر روی بخش خارجی رف نوری استفاده شده که جنبه بدیع بودن موضوع را بیان می‌کند.

جدول (۱): مطالعات انجام شده درباره عملکرد رف نوری در نور روز

نویسنده	متغیرهای رف نوری در راستای بهبود عملکرد	شبیه‌سازی نور روز	استفاده از پنل خورشیدی
Soler and Oteiza, 1996-1997	متغیرهای رف نوری ثابت	-	-
Claros and Soler, 2001	متغیرهای رف نوری ثابت	-	-
Claros and Soler, 2002	عرض، زاویه، ارتفاع، انعکاس	-	-
Freewan et al., 2008	متغیرهای رف نوری ثابت	-	-
Freewan, 2010	هندسه، انحنای مصالح سقف	بله	-
Raphael, 2011	زاویه	-	-
Hwang, Kim and Chung, 2014	سطح رف با پوشش کامل پنل خورشیدی	بله	بله
Berardi and Anaraki, 2015	عرض، عمق، ارتفاع	بله	-
Lim and Ahmad, 2015	ارتفاع، شکل	-	-
Meresi, 2016	مصالح، زاویه، ترکیب با لوور	بله	-
Moazzeni and Ghiabaklou, 2016	تناسبات، زاویه، جهت‌گیری	بله	-
Lim and Heng, 2016	شکل، ارتفاع، عرض	-	-
Moazzeni and Ghiabaklou, 2016	عرض و زاویه	-	-
Mangkuto et al., 2016	عرض، زاویه و انعکاس	-	-
Lee et al., 2017	میزان انعکاس سطح، زاویه و عرض	-	-
Berardi and Anaraki, 2018	متغیرهای رف نوری ثابت	-	-

Lee, Jang and Seo, 2018	زاویه، سیستم سایه‌بان	بله	-
Lee, Park and Seo, 2018	قابلیت تنظیم عرض	-	-
Kim et al., 2019	زاویه	بله	-
Lee, 2019	زاویه، پوشش پنل خورشیدی	بله	بله
Zazzini et al., 2020	زاویه، انحنای رف نوری و استفاده از مصالح بازتابنده	-	-
Bahdad, Fadzil and Taib, 2020	زاویه، عرض، نسبت عمق، ارتفاع، مصالح بازتابنده	بله	-
Lee and Seo, 2020	استفاده از ورق‌های منشوری با زاویه	-	-

۳- مواد و روش‌ها - روش تحقیق

پژوهش حاضر در پی دستیابی به هدف آسایش بصری در مدارس تهران، به کمک بهینه‌سازی مشخصات رف نوری برنامه‌ریزی شده است، بنابراین بنیادین و کاربردی است. ماهیت داده‌ها از نوع کیفی و کمی است. مطالعات در بخشی از کار به صورت کتابخانه‌ای و در بخش دیگر مطالعات میدانی در یک نمونه مدرسه است. داده‌ها و اطلاعات از طریق برداشت میدانی، مشاهده، مصاحبه و پس از آن تحلیل‌های نرم‌افزاری جمع‌آوری شده است. با توجه به ماهیت پژوهش که نیاز به اطلاعات نگر وجود دارد، یک مدرسه در تهران که به صورت همزمان دارای طاقچه نوری، دیوار ترومب، آتریوم مورب و ششمه در سقف است به عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب شده و در دو کلاس جنوبی آن برداشت نور در طول یک روز و شرایط مختلف انجام شده و سپس در نرم افزار رویت مدل‌سازی شده و پس از انتقال به راینو و انجام مدل‌سازی‌های تکمیلی، سنجش نور روز در کلایمیت استودیو انجام گرفته و استنتاج و تحلیل داده‌ها براساس مقایسه و استقرا انجام می‌شود. تحقیق شبیه‌سازی به ارائه مدل‌هایی متناسب با یک محیط به صورت بهبود یافته می‌پردازد تا به این ترتیب به دید گسترده‌ای برای استدلال منطقی و تحلیل استقرایی رسیده و بتوان با تحلیل و استنتاج صحیح به یک حکم علمی دست یافت.

۳-۱- متغیرهای مستقل و وابسته پژوهش

در این مرحله براساس اهداف پژوهش حاضر، متغیرهای مستقل و وابسته پژوهش تبیین می‌شوند. به این منظور ویژگی‌های مرتبط با شاخصه رف‌های نوری در کلاس‌های درس جنوبی به عنوان متغیرهای مستقل و معیارهای عملکرد نور روز و خیرگی به عنوان متغیرهای وابسته پژوهش در نظر گرفته می‌شوند (جدول ۲).

جدول (۲): متغیرهای مستقل و وابسته پژوهش

متغیرهای مستقل	متغیرهای وابسته
متغیرهای شاخصه رف نوری	معیارهای عملکردی نور روز
ارتفاع رف نوری (LS Height)	معیارهای خیرگی نور روز
عمق بخش داخلی رف نوری (LS Int)	احتمال خیرگی نور روز (DGP)
عمق بخش بیرونی رف نوری (LS Ext)	شاخص تابش سالانه (ASE)
زاویه بخش داخلی رف نوری (LS Curve)	خیرگی مخل آسایش سالانه (sDG)
زاویه بخش بیرونی رف نوری به همراه پنل PV	روشنایی مفید نور روز (UDI)

۳-۲- فرآیند شبیه‌سازی نهایی به منظور دستیابی به مدل بهینه

فرآیند بهینه‌سازی در چهار مرحله انجام می‌گیرد. پژوهش حاضر تحلیل‌های کمی و کیفی در شبیه‌سازی پارامترهای عددی را به عنوان سازوکاری برای جمع‌آوری داده‌های سه فازی در نظر گرفته است. منظور از پارامترهای عددی، متغیرهای مستقل مربوط به ارتفاع رف نوری، عمق بخش داخلی و بیرونی آن، زاویه بخش داخلی رف نوری و همچنین زاویه بخش خارجی آن همراه با نصب پنل PV است که بخش بیرونی رف نوری با درصدهای مختلفی توسط پنل‌های خورشیدی پوشیده شده‌است. در ادامه توضیحات مربوط به شبیه‌سازی و تنظیمات رف نوری که در تحلیل نمونه موردی استفاده شده و همچنین معیارهای ارزیابی در این پژوهش ارائه می‌گردد. سایر ابعاد و تناسبات سناریوی مرجع یکسان در نظر گرفته شده‌است. جدول ۳ فرآیند شبیه‌سازی نهایی را نمایش می‌دهد.

۳-۳- شاکله رف نوری

در فرآیند پژوهش حاضر، 19 پیکربندی متفاوت برای شاکله رف نوری داخلی و خارجی با استفاده از شبیه‌سازی نور روز در چهار مرحله توسط نرم افزار کلایمت استودیو مورد ارزیابی قرار گرفتند. در جدول ۴ تنظیمات مربوط به هر مدل در چهار فاز اصلی ارزیابی شده معرفی شد. نتایج در هر مرحله با مدل پایه LS1H1 که بدون رف نوری مدلسازی شد مقایسه می‌شوند اما در مرحله نهایی، مدل بهینه با سناریوی مرجع مورد قیاس قرار می‌گیرد.

جدول (۳): فرآیند شبیه‌سازی نهایی مدل بهینه

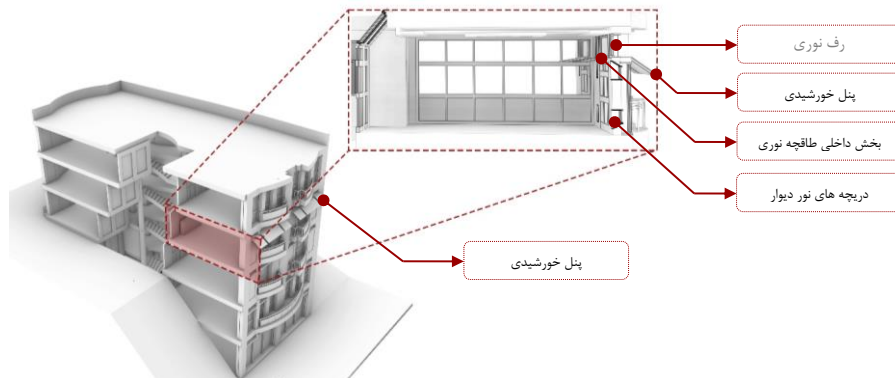
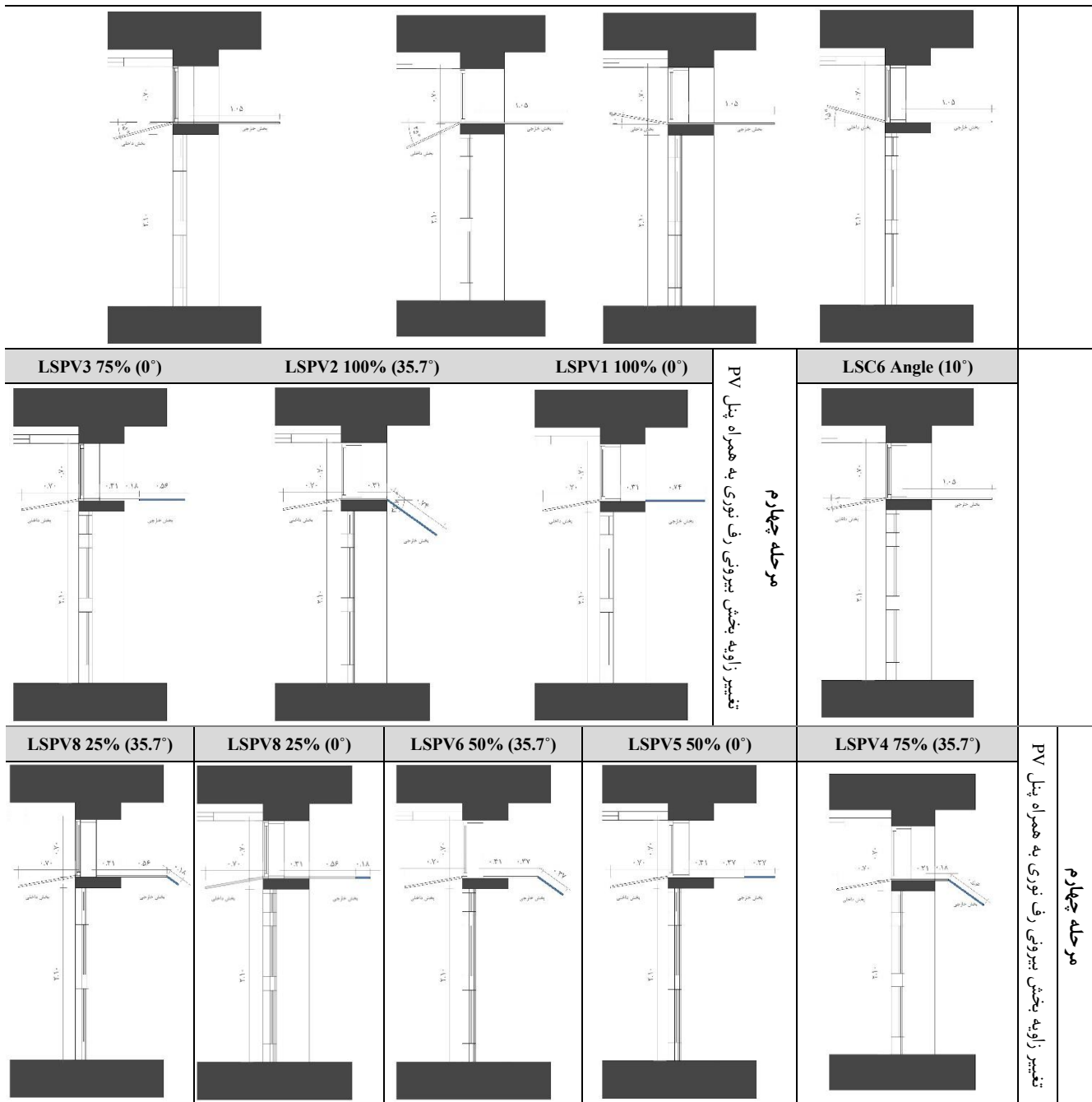
سناریوی مرجع: کلاس درس جنوبی ساختمان پیش دبستانی شهید مهدوی			
شبیه‌سازی نور روز و روشنایی جهت گیری جنوبی CIE Clear, IRN_Tehran-Mehrabad.407540_ITMY	مدلسازی تناسبات رف نوری	مدلسازی کلاس درس پایه ابعاد کلاس: $7/30 \times 5/93 \times 2/89$ ضریب انعکاس سطوح: سقف، دیوار، کف	Architecture, اطلاعات ورودی
	مرحله اول تغییر ارتفاع و عرض داخلی رف نوری در ۴ پیکر بندی ((۰، ۰)) - (۰، ۴۰) - (۶۰، ۷۰) - (۱۰۵، ۷۰) - (۱۲۵، ۱۰۰) و مقایسه نتایج و انتخاب بهترین مدل برای مرحله بعد	نسبت مساحت پنجره به دیوار: ۳۱٪	
	مرحله دوم تغییر مصالح سطح رف نوری به مصالح انعکاس دهنده جهت افزایش عمق نفوذ نور و مقایسه نتایج با مرحله قبل	ضریب عبور نور مرئی از شیشه: ۰۶	
	مرحله سوم تغییر زاویه بخش داخلی رف نوری در ۶ زاویه مختلف (۲۵، -۱۵، -۱۰، ۲۵، ۱۵، ۱۰) و مقایسه نتایج با مرحله قبل	ضریب بازتاب پنل PV ۵/۶٪ بهره‌وری پنل PV ۱۰٪	
انقلاب تابستانی، انقلاب زمستانی و اعتدال بهاری، 9AM, 12PM, 3PM ۵۶ نقطه در کلاس جنوب غربی و ۶۰ نقطه در جنوب شرقی با فاصله نقاط ۷۸ سانتی متر	مرحله چهارم پوشش سطح خارجی رف نوری با پنل خورشیدی: ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪، ۱۰۰٪ زاویه دار کردن بخش خارجی رف نوری: ۳۵/۷ درجه	دستیابی به مدل بهینه شاکله رف نوری براساس نتایج چهار مرحله قبل	
روشنایی مفید نور روز (UDI)	یکنواختی نور روز دریافتی (Uniformity)	احتمال بروز خیرگی (DGP)	اطلاعات خروجی

مرحله اول: براساس مطالعات انجام شده، چهار مدل رف نوری افقی با تناسبات عمق داخلی و خارجی و ارتفاع متفاوت در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه دیوارهای جنوبی سناریوی مرجع از نوع ترومب طراحی شده، دارای ضخامت ۵۶ سانتی متر است. براین اساس باید برای محاسبه ابعاد بخش داخلی و خارجی رف نوری، بخشی از ضخامت دیوار به عمق آن اضافه شود. بنابراین عمق بخش داخلی رف برابر با ارتفاع طاقچه نوری و عمق بخش خارجی آن ۱/۵ برابر آن بعلاوه ضخامت دیوار مازاد در نظر گرفته شد. در اولین نمونه LS1H1 طاقچه به صورت کامل حذف شد. نمونه های LS2H2، LS3H3، LS4H4 به ترتیب با ارتفاع طاقچه ۰/۴، ۰/۷ و ۱ متر و عمق طاقچه بیرونی از میانه دیوار ۰/۶۰، ۱/۰۵ و ۱/۲۵ متر، مدلسازی شدند.

مرحله دوم: پس از آنالیز مرحله قبل، براساس میانگین روشنایی دریافتی و همچنین میزان یکنواختی نور روز، بهترین ابعاد رف نوری برای مدل پایه کلاس درس انتخاب شد. در این مرحله مصالح مورد استفاده در سطح رف نوری، به یک ماده بازتابنده تغییر یافت تا به این ترتیب روشنایی در عمق کلاس افزایش یابد و نتایج با مدل مرجع کلاس مورد قیاس قرار گرفت.

مرحله سوم: شش طاقچه نوری رو به پایین و بالا در بخش داخلی، دارای زوایای ۲۵°، -۱۵°، -۱۰°، ۱۰°، ۱۵° و ۲۵° مدلسازی (LSC1, LSC2, LSC3, LSC4, LSC5, LSC6) و از نظر میانگین نور روز دریافتی و میزان یکنواختی تحلیل و بررسی شده و نتایج با حالت افقی آن در مرحله دوم مورد قیاس قرار گرفتند.

مرحله چهارم: بخش خارجی طاقچه نوری با چهار نسبت و دو زاویه مختلف توسط پنل خورشیدی پوشیده شد. LSPV1 الی LSPV8 به گونه‌ای طراحی شدند که بخش خارجی طاقچه نوری به صورت ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصدی با پنل خورشیدی



شکل (۱): مقطع مدل بهینه براساس تغییرات شاکله در چهار مرحله و محل قرارگیری پنل های خورشیدی بر روی بخش خارجی رف نوری
 ۴-۳- شرح نمونه مورد پژوهی و شرایط اقلیمی

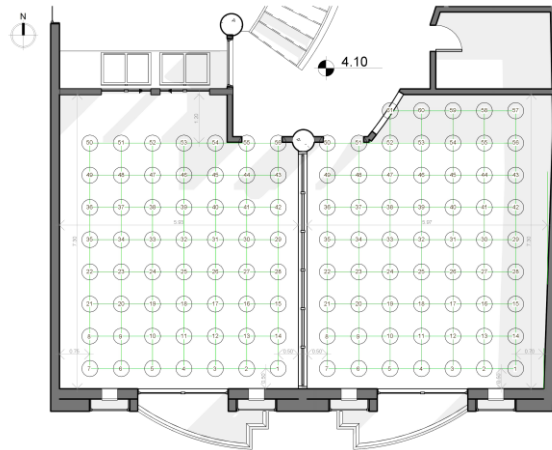
مقاله حاضر بر ارزیابی عملکرد نور روز و آسایش بصری تاکید داشته و برای این منظور بنای پیش دبستانی شهید مهدوی تهران به عنوان سناریوی مرجع مورد ارزیابی قرار گرفت. این بنا در شمال غرب شهر تهران، منطقه زعفرانیه واقع شده و در سال ۱۳۸۹ الی ۱۳۹۱ توسط آقای دکتر سید مجید مفیدی شمیرانی طراحی و اجرا شده است. در شکل ۲ موقعیت مکانی نمونه مورد پژوهی ارائه شده است. کلاس‌های این نمونه به سبب ویژگی‌هایی همچون رف نوری، دیوار ترومب به همراه دریچه‌های نور، شمشه در سقف و آتریوم مورب نسبت به سایر فضاهای آموزشی متمایز بوده و بنای ارزشمندی جهت بررسی به عنوان نمونه موردی است. دو کلاس جنوبی در این پژوهش مورد آزمون قرار گرفتند. کلاس‌های جنوب شرقی از طریق پنجره‌ها و رف نورهای خورشیدی در سمت جنوب کلاس، نور روز را دریافت می‌کنند، کلاس‌های جنوبی غربی علاوه بر نور مستقیم جنوب، از نور غیرمستقیم آتریوم مرکزی بنا در شمال کلاس نیز بهره می‌گیرند.



شکل (۲): موقعیت مکانی پیش‌دبستانی شهید مهدوی (راست)، نمای جنوبی ساختمان پیش‌دبستانی (چپ)

داده‌های آب و هوای عمومی سالیانه هواشناسی از ایستگاه سینوپتیک شمیرانات واقع در شمال تهران در ارتفاع ۱۵۴۹ متر از سطح دریا برای شبیه‌سازی در این پژوهش به کار گرفته شده است. سناریوی مرجع با ارتفاع ۱۱۹۱ متر از سطح دریا، عرض جغرافیایی ۵۱/۳۸ و طول جغرافیایی ۳۵/۷ در شمال غرب تهران قرار گرفته و براساس مقیاس کوپن^۲ در گروه Bsk دسته بندی شده است. براساس آمار هواشناسی گزارش شده توسط ایستگاه هواشناسی تهران (epw)، آسمان تهران در طول یک سال ۶۷٪ صاف، ۲۴٪ نیمه ابری، ۹٪ ابری است [۳۰]. به منظور دستیابی به اهداف پژوهش، دو کلاس جنوبی در محیط نرم‌افزار رویت^۲ به صورت دقیق مدلسازی شد، پس از تکمیل حجم ساختمان در نرم‌افزار راینو^۳، از پلاگین کلایمت استودیو^۵ برای شبیه‌سازی و دریافت خروجی‌ها و اطلاعات مورد نظر و همچنین تحلیل و ارزیابی وضعیت‌های مختلف استفاده شد. ویژگی‌های نوری سطوح مختلف طبق برداشت میدانی، و ضریب انعکاس و انتقال نور مربوط به شیشه و سطوح به شیشه که برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند به ترتیب در جدول ۵ و ۶ در ارائه شده است.

جدول (۶): ویژگی‌های نوری سطوح		جدول (۵): ویژگی‌های نوری برداشت شده در محیط	
عناصر ساختمانی	ویژگی‌های سطوح	سطح مورد نظر	میزان درخشندگی (cd/m ²) RGB سطوح
شیشه دوجداره خارجی ۴mm	۷۴٪ انتقال نور	میز و صندلی	R603- G461- B283
شیشه ساده داخلی ۴ mm	۹۵٪ انتقال نور	زمین	R338- G213- B120
سقف	۸۵٪ ضریب انعکاس	دیوار سفید	R1023- G1023- B1023
دیوار داخلی	۷۵٪ ضریب انعکاس	دیوار کاغذ دیواری	R663- G672- B613
دیوار خارجی	۴۵٪ ضریب انعکاس	سقف	R1023- G1023- B1023



شکل (۳): پلان شبکه‌بندی کلاس‌ها

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تحلیل مدل بهینه

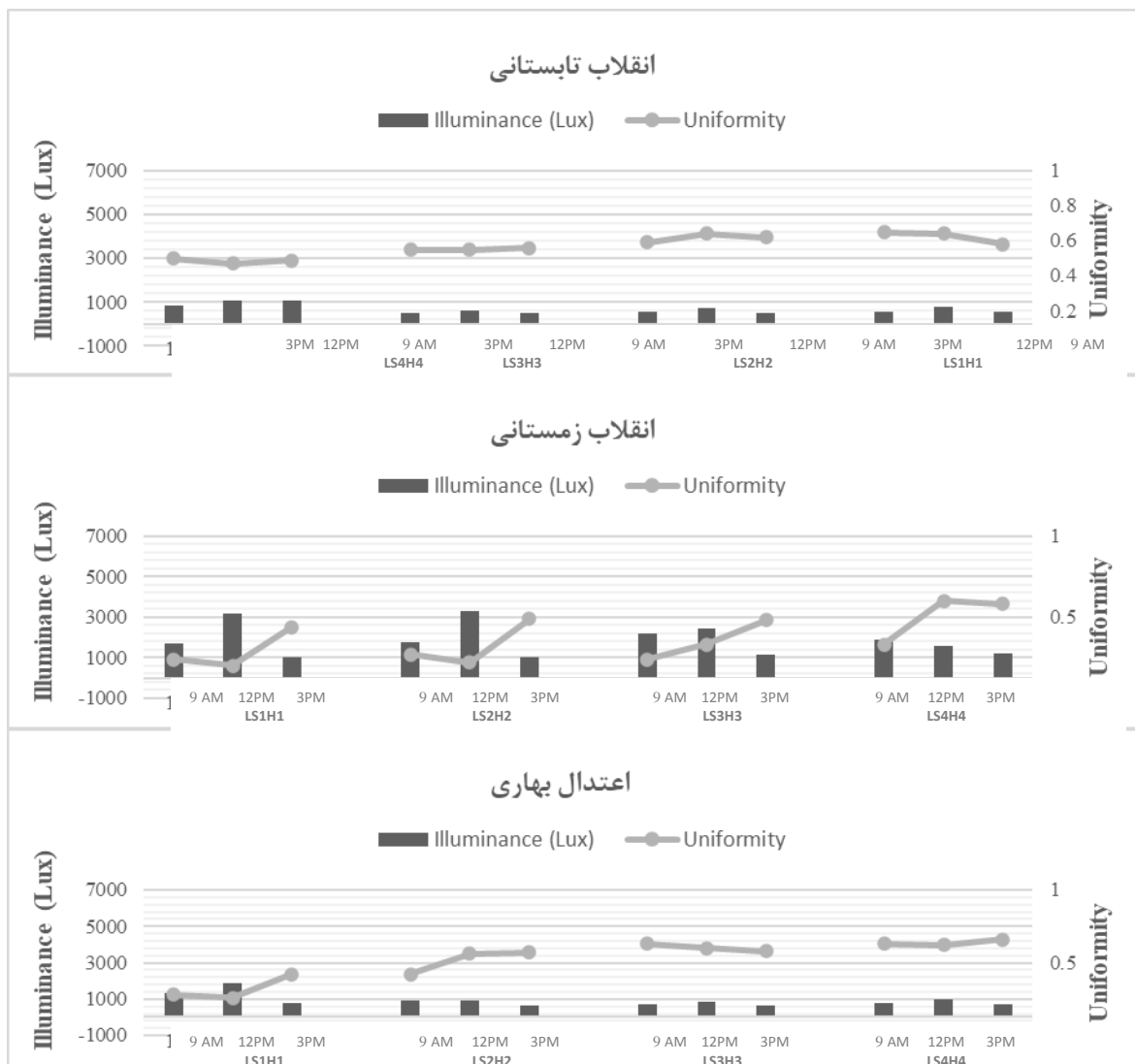
۴-۱-۱- رویکرد مدلسازی و معیارهای ارزیابی و تحلیل نمونه

مقادیر روشنایی در سطح کار با ارتفاع ۵۶ سانتی‌متر (برای میز کار کودک) ارزیابی شد. برای این منظور شبکه‌ای مطابق شکل ۳ در هر کلاس ایجاد شد. نقاط به فاصله ۵۰ سانتی‌متر از دیوارها و ۷۸ سانتی از هم در نظر گرفته شد. به منظور تحلیل تغییرات سالانه و همچنین بررسی شرایط بحرانی در طول سال جهت دستیابی به نتایج مطلوب، شبیه‌سازی در انقلاب تابستانی (21 June)، انقلاب زمستانی (21 December) و اعتدال بهاری (21 March) در ساعت‌های ۹ صبح، ۱۲ ظهر و ۳ بعد از ظهر انجام گرفت که مقادیر آن در جداول ۶ الی ۱۰ قابل بررسی است. همچنین به منظور سنجش کیفیت توزیع نور روز از شاخص یکنواختی^۶ (U) نور روز داخلی استفاده شد که نسبت روشنایی حداقل به روشنایی متوسط دریافت شده را نشان می‌دهد. براساس استاندارد سازمان آموزش و اشتغال انگلستان (نشریه شماره ۹۰ ساختمان) و استاندارد بریم^۷، محدوده قابل قبول یکنواختی نور روز در استاندارد انگلستان ۰/۳ و در استاندارد بریم ۰/۴ است. به منظور تجزیه و تحلیل نمونه‌ها، علاوه بر یکنواختی نور روز، معیارهای نور روز مبتنی بر آب و هوا و همچنین معیارهای خیرگی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

۴-۲- تحلیل و بررسی مدل‌های شبیه‌سازی شده شاخصه رف نوری

۴-۲-۱- تحلیل و بررسی مرحله اول

میزان تاثیر شاخصه رف نوری، شامل عمق بخش داخلی و خارجی و همچنین ارتفاع آن بر مقادیر معیار یکنواختی روشنایی روز، میانگین و حداقل و حداکثر روشنایی نور روز دریافتی در زمان‌های بحرانی (انقلاب تابستانی، زمستانی و اعتدال بهاری، ساعت ۹ صبح، ۱۲ ظهر و ۳ بعد از ظهر) در این مرحله مورد ارزیابی قرار گرفتند. از نتایج حاصل می‌توان به میزان اثرگذاری این تناسب بر عملکرد نور روز دست یافت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آنالیز توسط نرم‌افزار کلایمت استودیو در جدول ۷ و شکل ۴ ارائه شده‌است.



شکل (۴): نمودار تاثیر موقعیت رف نوری داخلی و خارجی بر میانگین روشنایی نور روز دریافتی و همچنین میزان یکنواختی نور روز از بررسی نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که تناسب ارتفاع و عمق طاقچه نوری چگونه بر عملکرد نور روز در آن تاثیر می‌گذارد. براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی، حداقل میانگین روشنایی دریافتی در سطح میز کار ۴۷۰ لوکس است که برای فعالیت‌های مربوط به کلاس درس مطلوب است. براساس استاندارد بریم، شاخص یکنواختی در ۹ صبح انقلاب زمستانی در هر چهار مدل غیرقابل قبول و طبق استاندارد بولتن ساختمانی ۹۰، مدل LS4H4 میزان یکنواختی نور روز قابل قبولی را دریافت می‌کند. بنابراین مدل LS3H3 در تمام زمان‌ها به جز انقلاب زمستانی و LS4H4 در تمام زمان‌ها، یکنواختی نور روز قابل قبول دریافت می‌کند. در مرحله قیاس میان دو مدل ۳ و ۴ توجه به عرض بخش خارجی آن بر تصمیم‌گیری نهایی تاثیرگذار خواهد بود. عمق رف نوری در بخش خارجی بر میزان برق تولیدی در مرحله آخر تاثیر گذار است اما به لحاظ امنیت آن در مقابل فشار باد نگرانی‌هایی وجود دارد، از این رو شاکله LS3H3 در این مرحله انتخاب شد تا بر اساس مطالعات پیشین در ادامه مراحل به عنوان مدل پایه برای تغییر زوایای بخش داخلی رف نوری مورد استفاده قرار گیرد.

جدول (۷): مقادیر حداقل، میانگین روشنایی و میزان یکنواختی نور روز طبق شبیه‌سازی در نرم‌افزار کلایمت استودیو

LS4H4	LS3H3	LS2H2	LS1H1	LS4H4	LS3H3	LS2H2	LS1H1	LS4H4	LS3H3	LS2H2	LS1H1
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

	اعتدال بهاری			انقلاب زمستانی				انقلاب تابستانی					
	21 March			21 December				21 June					
9:00 AM	757	682	884	1298	1910	2222	1769	1715	581	532	490	823	Mean
	477	429	372	368	626	544	475	420	379	316	271	410	Min
	1082	1244	26142	26258	14861	14676	14520	14456	972	971	1027	1762	Max
	0/63	0/63	0/42	0/28	0/33	0/24	0/27	0/24	0/65	0/59	0/55	0/50	Uo
12:00 PM	995	881	890	1857	1566	2460	3272	3204	776	699	632	1091	Mean
	620	526	500	477	945	817	713	641	496	448	346	512	Min
	1314	1608	2062	40125	2232	24444	24459	24362	1164	1208	1351	2350	Max
	0/62	0/60	0/56	0/26	0/60	0/33	0/22	0/20	0/64	0/64	0/55	0/47	Uo
3:00 PM	713	639	621	778	1219	1145	1043	992	539	506	470	1067	Mean
	473	370	352	326	611	544	514	441	315	312	262	518	Min
	957	1145	1441	19517	7311	7348	7520	7397	906	886	850	2617	Max
	0/66	0/58	0/57	0/42	0/50	0/48	0/49	0/44	0/58	0/62	0/56	0/49	Uo
میانگین	821	734	798	1311	1565	1942	2028	1970	632	579	530	993	Mean
	0/63	0/60	0/51	0/32	0/47	0/35	0/32	0/21	0/62	0/61	0/55	0/48	Uo

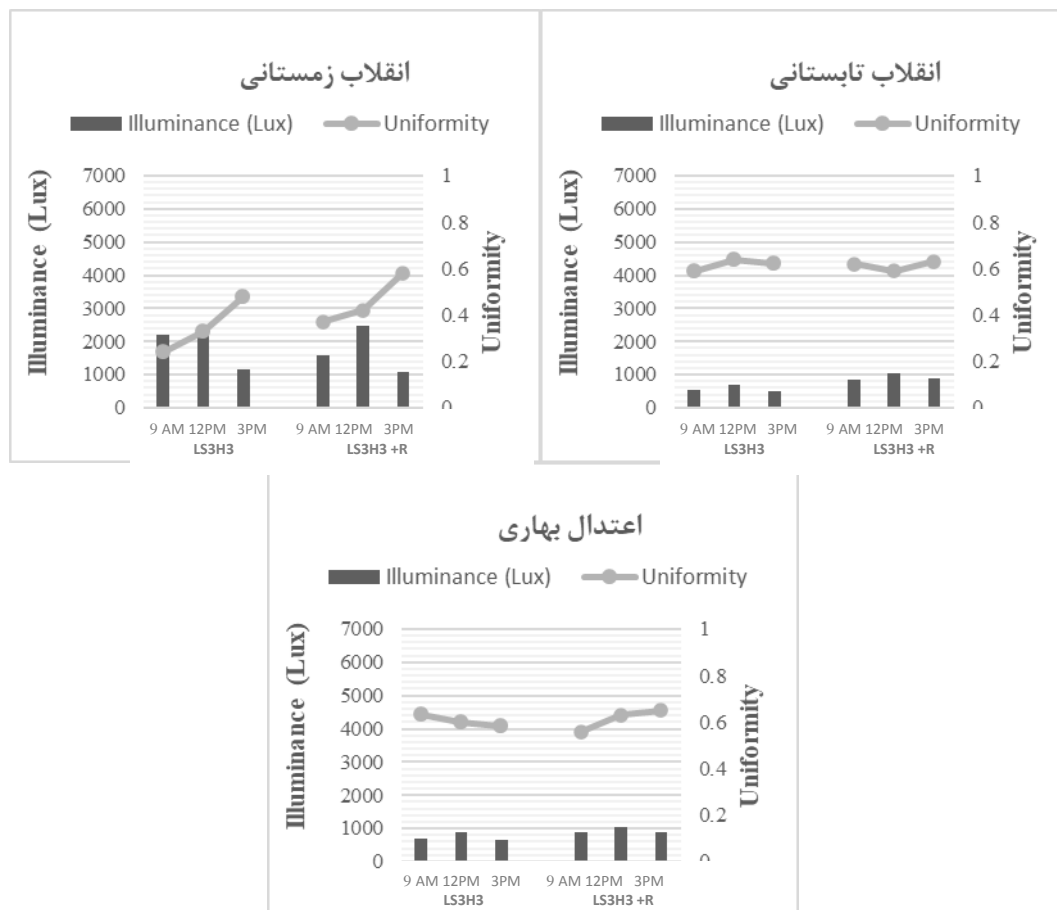
۲-۲-۴- تحلیل و بررسی مرحله دوم

جدول ۸ و شکل ۵ تاثیر بهره‌گیری از مصالح بازتابنده بر روی سطح رف نوری در مقایسه با مدل LS3H3 را نشان می‌دهد. باتوجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی نور روز، شاخص یکنواختی در تمام روزهای مورد بررسی به جز ساعت ۹ صبح انقلاب زمستانی (براساس استاندارد بریم) بهبود یافته، که البته این زمان هم بر اساس بولتن ساختمانی ۹۰ در محدوده قابل قبول قرار دارد. بررسی میانگین نور روز دریافتی و همچنین یکنواختی آن در انقلابین و اعتدالین نشان دهنده بهبود کیفیت نور روز دریافتی است. بنابراین استفاده از سطح بازتابنده بر روی رف نوری در مقایسه با مدل LS3H3 برای دریافت نور روز مفید خواهد بود. نتایج به دست آمده با مطالعات انجام شده توسط مسلوب و گوش^{۳۱} و همچنین زازینی و همکاران [۱۳] همسو است. با توجه به افزایش میزان نور روز دریافتی بررسی خیرگی محل آسایش حائز اهمیت است. به همین سبب شبیه‌سازی خیرگی انجام شد.

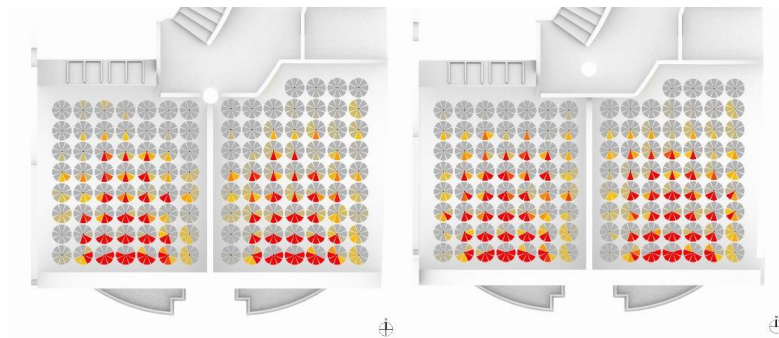
جدول (۸): مقایسه مقادیر حداقل، میانگین روشنایی و میزان یکنواختی نور روز در دو حالت LS3H3 و به همراه مصالح بازتابنده

	اعتدال بهاری		انقلاب زمستانی		انقلاب تابستانی						
	21 March		21 December		21 June						
9:00 AM	LS3H3+R	905	LS3H3	682	LS3H3+R	1586	2222	LS3H3+R	851	532	Mean
	LS3H3	511	LS3H3	429	LS3H3+R	591	544	LS3H3	534	316	Min
	LS3H3+R	1860	LS3H3	1244	LS3H3+R	9585	14676	LS3H3+R	1603	971	Max
	LS3H3	0/56	LS3H3+R	0/63	LS3H3	0/37	0/24	LS3H3+R	0/62	0/59	Uo
12:00 PM	LS3H3+R	1048	LS3H3	881	LS3H3+R	2468	2460	LS3H3+R	1029	699	Mean
	LS3H3	669	LS3H3	526	LS3H3+R	1061	817	LS3H3	612	448	Min
	LS3H3+R	2531	LS3H3	1608	LS3H3+R	3585	24444	LS3H3+R	2181	1208	Max
	LS3H3	0/63	LS3H3+R	0/60	LS3H3	0/42	0/33	LS3H3+R	0/59	0/64	Uo
3:00 PM	LS3H3+R	897	LS3H3	639	LS3H3+R	1084	1145	LS3H3+R	894	506	Mean
	LS3H3	584	LS3H3	370	LS3H3+R	633	544	LS3H3	564	312	Min

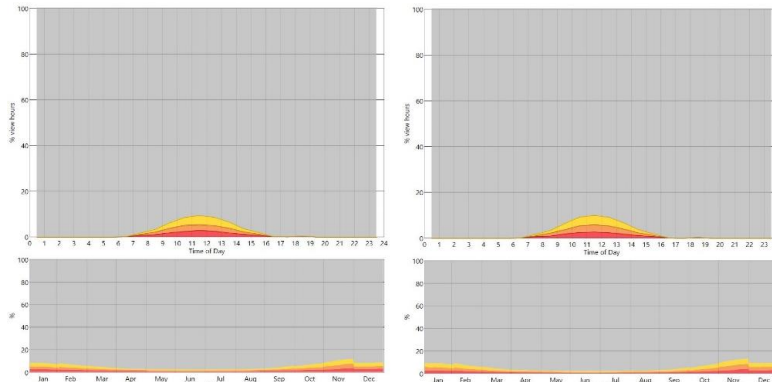
۱۶۴۷	۱۱۴۵	۴۲۶۱	۷۳۴۸	۱۷۷۰	۸۸۶	Max
۰/۶۵	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۴۸	۰/۶۳	۰/۶۲	Uo
۹۵۰	۷۳۴	۵۱۳۸	۱۹۴۲	۹۲۴	۵۷۹	میانگین نور روز دریافتی
۰/۶۱	۰/۶۰	۰/۴۵	۰/۳۵	۰/۶۱	۰/۶۱	Uniformity



شکل (۵): نمودار تاثیر استفاده از مصالح بازتابنده بر میانگین روشنایی نور روز دریافتی و همچنین میزان یکنواختی نور روز بررسی شاخص sDG در جدول ۹ بیانگر احتمال بروز خیرگی است. برای LS3H3 و LS3H3+R به ترتیب برابر ۱۰/۷۹ درصد و ۱۲/۵۳ درصد محاسبه شد. تصاویر ۶ و ۷ مربوط به توزیع خیرگی سالانه در دو مدل این مرحله است که به صورت نقطه‌ای در سطح کلاس و برای هر نقطه در ۸ جهت مختلف بررسی می‌شود. بررسی گراف حاصل از مطالعه خیرگی نشان دهنده تغییر اندک در میزان خیرگی است. نتایج افزایش ۱۶/۱۳ درصدی sDG در شرایط اضافه شدن بازتابنده را نشان می‌دهد. حداکثر مقدار قابل قبول برای این معیار ۵ درصد است و با توجه به بیشتر بودن آن در هر دو مدل، باید از عوامل کنترل خیرگی بهره گرفت. برای این منظور زاویه بخش داخلی رف نوری تغییر داده شد که در مرحله سوم به آن پرداخته می‌شود.



شکل (۶) گراف توزیع خیرگی در مدل LS3H3 (راست)، LS3H3+R (چپ)



شکل (۷): نمودار میانگین سالانه خیرگی در طول ساعات یک روز (بالا) و در طول ماه‌های سال (پایین) در دو مدل LS3H3 (راست)، LS3H3+R (چپ)

جدول (۹): مقایسه احتمال بروز خیرگی در دو مدل LS3H3 و LS3H3+R

LS3H3+R	LS3H3	sDG
12/53 %	10/79 %	

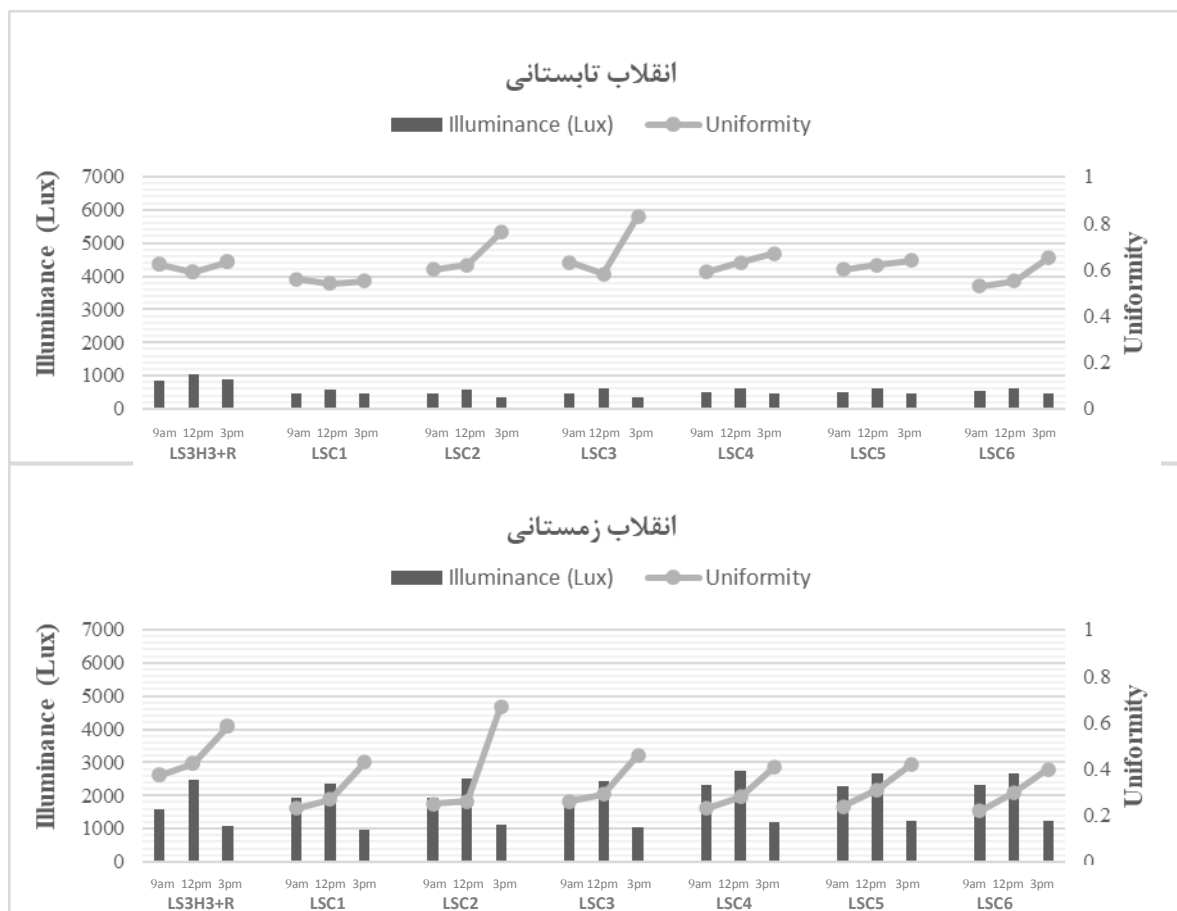
۳-۲-۴- تحلیل و بررسی مرحله سوم

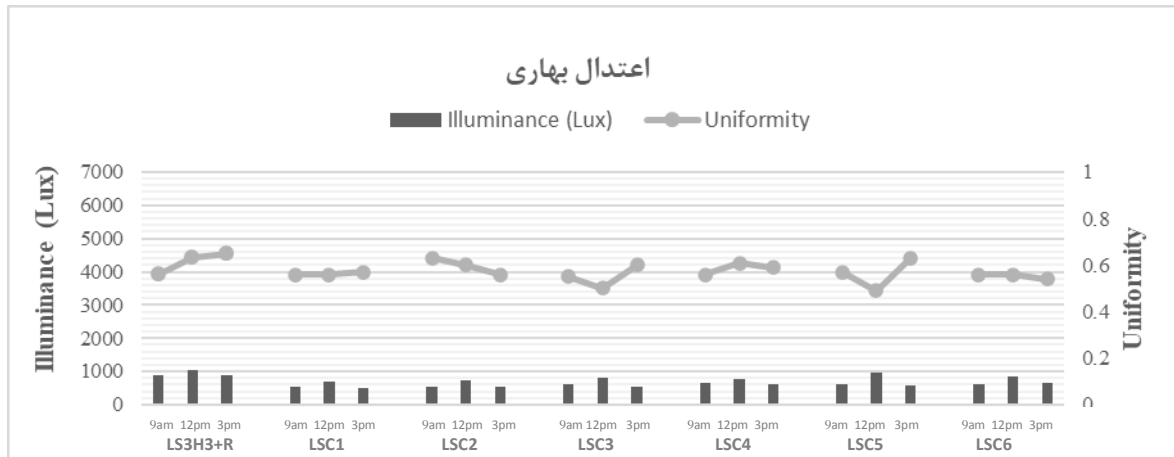
به منظور کنترل خیرگی و همچنین بهبود عملکرد نور روز در فضای کلاس، ۶ زاویه مختلف برای بخش داخلی رف نوری در نظر گرفته شد. جدول ۱۰ و شکل ۸ مقادیر حاصل از شبیه‌سازی نور روز در شش زاویه داخلی ۱۰-، ۱۵-، ۲۵-، ۲۵، ۱۵، ۱۰ درجه در مقایسه با رف نوری افقی را در تاریخ‌های ذکر شده نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که رف نوری با زاویه داخلی ۱۰+ درجه (LSC6) در تمام ساعات انقلاب تابستانی و ساعات ۱۲ و ۳ بعد از ظهر اعتدال بهاری و همچنین ساعت ۹ صبح انقلاب زمستانی بیشترین میانگین روشنایی دریافتی را به خود اختصاص داده است. علاوه بر این یکنواختی نور روز در تمام ساعات انقلاب تابستانی و اعتدال بهاری و ساعت ۳ بعد از ظهر انقلاب زمستانی در وضعیت قابل قبول قرار دارد. این معیار در ساعت ۹ صبح تمام زوایا غیرقابل قبول ارزیابی شد. در ساعت ۱۲ ظهر انقلاب زمستانی فقط دو مدل LSC5 و LSC6 از نظر استاندارد بولتن ساختمانی ۹۰ قابل قبول‌اند. کم‌ترین یکنواختی نور روز و میانگین روشنایی مربوط به زاویه ۲۵- درجه است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد زاویه شیب بهینه برای تمام فصول ۱۰+ درجه (LSC6) است.

جدول (۱۰): مقایسه مقادیر حداقل، میانگین روشنایی و میزان یکنواختی نور روز در رف نوری با ۶ زاویه مختلف و حالت LS3H3+R

9:00 AM	Mean	انقلاب تابستانی			انقلاب زمستانی			اعتدال بهاری						
		21 June			21 December			21 March						
		LS3H3+R	LSC1	LSC2	LSC3	LSC4	LSC5	LSC6	LS3H3+R	LSC1	LSC2	LSC3	LSC4	LSC5
851	۴۵۸	۴۵۵	۴۶۱	۴۹۵	۵۰۲	۵۴۴	۱۵۸۶	۱۹۲۶	۱۹۲۹	۱۸۷۰	۲۳۰۲	۲۲۷۰	۲۳۰۵	۹۰۵
534	۲۵۶	۲۷۴	۲۸۹	۲۹۲	۲۹۹	۲۸۸	۵۹۱	۴۴۶	۴۸۱	۴۸۷	۵۳۳	۵۴۵	۵۱۶	۵۱۱

Max	Lo	12:00 PM					3:00 PM					میانگین نور روز دریافتی	Uniformity
		Mean	Min	Max	Lo	Mean	Min	Max	Lo				
1603	0.93	1029	612	2181	0.59	894	554	1770	0.93	924	0.91		
1232	0.56	574	311	2070	0.54	453	250	1267	0.55	495	0.55		
907	0.90	566	349	1117	0.62	336	257	834	0.76	452	0.76		
909	0.93	608	353	2915	0.58	332	274	801	0.83	467	0.83		
1958	0.59	623	390	4062	0.63	458	306	824	0.67	525	0.67		
1133	0.90	606	374	1302	0.62	465	297	845	0.64	524	0.64		
2515	0.53	635	352	1742	0.55	465	302	860	0.65	548	0.65		
9885	0.37	2468	1051	2588	0.42	1084	633	4361	0.58	5128	0.45		
19344	0.23	2350	629	2553	0.27	984	478	7036	0.43	1753	0.43		
17623	0.25	2499	662	22169	0.26	1123	747	14123	0.67	1850	0.67		
15112	0.26	2439	713	22143	0.29	1048	484	7157	0.46	1785	0.46		
14623	0.23	2757	777	22335	0.28	1210	492	7529	0.41	2089	0.41		
14859	0.24	2661	823	21822	0.31	1248	519	7595	0.42	2059	0.42		
14709	0.22	2659	785	25396	0.30	1231	490	7545	0.40	2065	0.40		
1850	0.55	1048	669	2531	0.63	897	584	1647	0.65	950	0.61		
1179	0.55	696	390	1222	0.56	520	297	1672	0.57	583	0.57		
2417	0.63	7271	400	3219	0.60	532	299	1265	0.56	2787	0.56		
4444	0.55	812	408	5425	0.50	548	328	2641	0.60	656	0.60		
9850	0.55	766	470	2042	0.61	599	254	5754	0.59	676	0.59		
4213	0.57	976	481	5149	0.49	584	366	1456	0.63	729	0.63		
1744	0.55	832	463	2902	0.56	675	363	831	0.54	709	0.54		





شکل (۸): نمودار تاثیر تغییر زاویه بخش داخلی رف نوری بر میانگین روشنایی نور روز دریافتی و همچنین میزان یکنواختی نور روز

۴-۲-۴- ارزیابی عملکرد تناسب رف نوری همراه با پنل خورشیدی (LSPV) در مرحله چهارم در جدول ۱۱ و شکل ۹ مقادیر میانگین، حداقل و حداکثر نور روز دریافتی و همچنین شاخص یکنواختی را در شرایط آسمان صاف CIE در روزهای بحرانی و سه ساعت برای LSC6، مدل بهینه مرحله سوم و همچنین LSPV1 الی LSPV8 با هشت شاکله مختلف رف نوری همراه با پنل خورشیدی ارائه شد. در انقلاب تابستانی و اعتدال بهاری، شاخص یکنواختی برای تمام مدل‌ها قابل قبول است. این شاخص در انقلاب زمستانی برای LSPV2، LSPV4، LSPV6، LSPV8 و تمام ساعات قابل قبول است. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود مقدار میانگین نور روز دریافتی در LSPV2 کمتر از سه مورد دیگر است. با بررسی‌های انجام شده در مرحله چهارم LSPV2، LSPV4، LSPV6 و LSPV2 نسبت به سایر مدل‌ها مناسب‌تر بوده و سبب بهبود نور روز دریافتی و یکنواختی می‌شوند. اما به منظور انتخاب قطعی مدل بهینه رف نوری همراه با پنل خورشیدی بررسی سایر معیارهای عملکردی نور روز و خیرگی مورد نیاز است. بنابراین در بخش ۴-۳ به بررسی این معیارهای پرداخته شده است.

جدول (۱۱): مقایسه مقادیر حداقل، میانگین روشنایی و میزان یکنواختی نور روز در رف نوری به همراه پنل خورشیدی در ۸ مدل

LSC6 LSPV1 LSPV2 LSPV3 LSPV4 LSPV5 LSPV6 LSPV7 LSPV8	9:00 AM				12:00 PM				3:00 PM
	Mean	Min	Max	Uo	Mean	Min	Max	Uo	Mean
	انقلاب تابستانی 21 June				انقلاب زمستانی 21 December				اعتدال بهاری 21 March
LSC6	۵۴۴	۲۸۸	۲۵۱۵	۰/۵۳	۶۳۵	۲۵۲	۲۵۳۹۶	۰/۵۵	۴۶۵
LSPV1	۴۲۲	۲۵۱	۶۸۲	۰/۵۹	۵۱۸	۳۱۷	۷۹۶	۰/۶۱	۴۱۲
LSPV2	۳۰	۴۵۵	۱۳۰	۰/۶۲	۸۸۵	۵۸۳	۱۵۰۶	۰/۶۵	۷۸۵
LSPV3	۴۲۵	۲۸۱	۷۴۲	۰/۶۶	۵۲۳	۳۴۷	۸۷۹	۰/۶۶	۴۱۷
LSPV4	۷۲۵	۴۷۸	۱۲۸۵	۰/۶۵	۸۸۱	۵۸۴	۱۶۹۳	۰/۶۶	۷۷۴
LSPV5	۴۴۰	۲۷۶	۶۸۴	۰/۶۳	۵۴۶	۳۷۳	۹۷۸	۰/۶۸	۴۲۷
LSPV6	۷۵۳	۵۱۱	۱۱۵۹	۰/۶۷	۹۲۴	۵۶۹	۱۴۶۸	۰/۶۱	۸۰۴
LSPV7	۴۵۸	۲۷۷	۸۴۳	۰/۶۰	۵۷۸	۲۵۵	۱۱۵۷	۰/۶۱	۴۴۳
LSPV8	۷۹۹	۵۲۷	۱۴۱۲	۰/۵۹	۹۷۸	۶۴۶	۱۷۸۳	۰/۶۵	۸۵۷
LSC6	۲۳۰۵	۵۱۶	۱۴۷۰۹	۰/۲۲	۲۶۵۹	۷۸۵	۲۵۳۹۶	۰/۳۰	۱۲۳۱
LSPV1	۲۱۱۱	۵۱۶	۱۴۵۵۸	۰/۲۴	۲۲۸۴	۷۳۴	۲۴۱۵۲	۰/۳۲	۱۰۳۴
LSPV2	۱۱۴۹	۴۸۴	۷۰۰۵	۰/۴۲	۱۴۷۹	۹۱۵	۲۸۴۱	۰/۶۱	۹۱۶
LSPV3	۲۱۲۶	۵۰۱	۱۴۶۳۵	۰/۲۴	۲۳۷۶	۷۷۱	۲۴۲۱۹	۰/۳۲	۱۰۴۲
LSPV4	۱۱۸۹	۵۱۳	۷۴۳۱	۰/۴۳	۱۴۷۰	۹۱۲	۴۸۶۳	۰/۶۲	۹۰۴
LSPV5	۲۲۹۰	۴۷۹	۱۵۳۲۴	۰/۲۱	۲۷۲۴	۷۶۹	۲۶۲۹۳	۰/۲۸	۱۱۲۹
LSPV6	۱۲۳۸	۵۲۰	۷۱۲۹	۰/۴۲	۱۵۸۷	۹۵۱	۳۳۲۹	۰/۵۹	۹۶۵
LSPV7	۲۴۱۱	۵۲۹	۱۶۰۹۹	۰/۲۲	۲۶۳۶	۷۶۳	۲۱۱۷۷	۰/۲۹	۱۱۶۳
LSPV8	۱۲۶۳	۵۷۸	۸۴۳۱	۰/۴۲	۱۸۰۰	۱۱۳۱	۴۵۵۲	۰/۶۲	۱۰۵۱
LSC6	۶۲۲	۳۴۷	۱۷۲۴	۰/۵۶	۸۳۳	۴۶۳	۲۹۰۲	۰/۵۶	۶۷۵
LSPV1	۴۹۴	۳۱۸	۸۵۶	۰/۶۴	۶۲۹	۴۱۳	۱۰۹۰	۰/۶۶	۴۸۰
LSPV2	۷۵۴	۴۷۶	۱۳۲۳	۰/۶۳	۱۱۵۳	۷۳۱	۱۹۸۱	۰/۶۳	۸۳۹
LSPV3	۵۰۱	۳۰	۹۲۴	۰/۶۶	۷۰۱	۴۱۶	۱۱۲۸	۰/۵۹	۴۸۷
LSPV4	۷۴۵	۴۹۶	۱۵۳۱	۰/۶۶	۱۱۰۷	۷۴۴	۱۹۷۱	۰/۶۷	۸۲۸
LSPV5	۵۳۲	۳۲۷	۹۷۱	۰/۶۱	۷۱۰	۴۴۸	۱۲۰۷	۰/۶۳	۵۰۴
LSPV6	۸۰۷	۵۱۴	۱۵۷۶	۰/۶۳	۱۱۷۵	۷۶۵	۲۱۳۸	۰/۶۵	۸۸۸
LSPV7	۵۹۶	۲۵۵	۱۰۳۰	۰/۶۰	۷۵۷	۴۲۶	۱۴۸۷	۰/۵۶	۵۵۴
LSPV8	۸۹۳	۵۶۱	۲۰۹۰	۰/۶۲	۱۲۹۱	۸۳۲	۲۳۶۱	۰/۶۴	۹۸۴

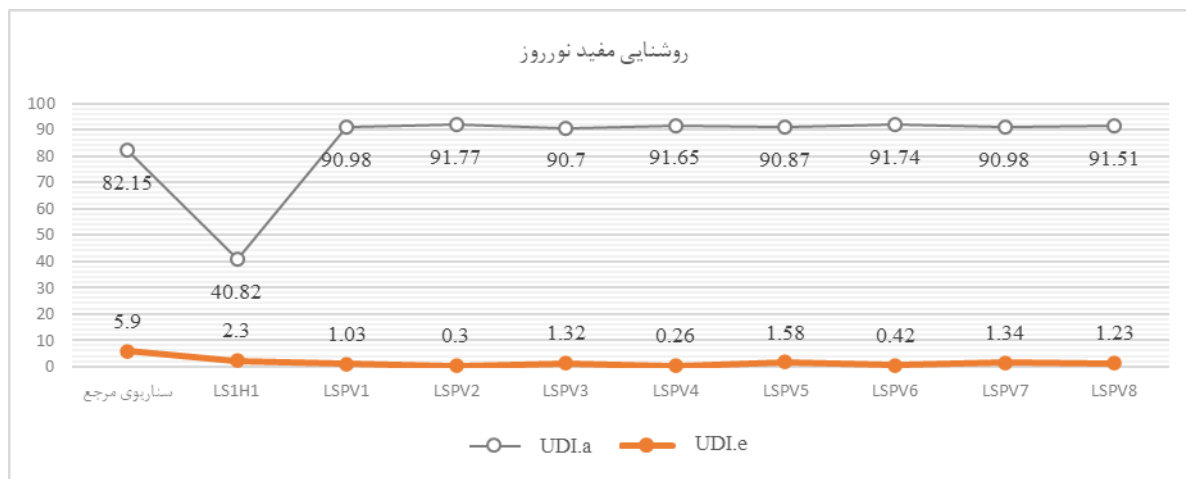
۴-۳- تجزیه و تحلیل معیارهای نور روز و خیرگی

۱-۱-۱- معیارهای عملکردی نور روز

نتایج حاصل از شبیه‌سازی نور روز برای هر هشت مدل دارای پنل خورشیدی و همچنین سناریوی مرجع و مدل پایه LS1H1 در جدول ۱۲ ارائه شده است. از آنجا که دو کلاس جنوبی مدلسازی شده به لحاظ نورگیری از شمال دارای شرایط متفاوتی هستند، به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر در این بخش از شبیه‌سازی، نتایج حاصل برای هر یک از دو کلاس به صورت مجزا در جداول ارائه شده است. براساس نتایج حاصل از مرحله قبل، بررسی و قیاس میان سه مدل LSPV2، LSPV4 و LSPV6 انجام گرفت. براساس شاخص اتونومی نور روز (DA)، مدل پایه (LS1H1) در وضعیت روشنایی روز کافی قرار دارد اما سایر مدل‌ها و همچنین سناریوی مرجع عملکرد تقریباً یکسانی داشته و از این منظر می‌توانند به عنوان فضای آموزشی با نور بسیار عالی توصیف شوند. بیشترین مقدار اتونومی نور روز در میان ۳ مدل مورد نظر مربوط به LSPV6 است. تغییر شاکله رف نوری LSPV6 نسبت به سناریوی مرجع SE و SW به ترتیب سبب ۵/۵ درصد و ۳/۷۵ درصد افزایش و نسبت به مدل پایه SE و SW به ترتیب سبب ۹۹/۱۱۸ درصد و ۸۱/۱۰۸ درصد افزایش در میزان اتونومی نور روز شده است. بررسی میانگین روشنایی دریافتی نشان دهنده کاهش در مدل پایه است که به دلیل حذف رف نوری در این مدل رخ داده است. مقایسه دو کلاس جنوب شرقی و جنوب غربی در تمام معیارها بیانگر تاثیر مثبت نورگیری کلاس جنوب غربی از شمال به واسطه وجود آتریوم مورب مرکزی است. این موضوع سبب بهبود یکنواختی نور روز دریافتی و همچنین افزایش میانگین نور روز دریافتی بدون خیرگی در این کلاس شده است. مقادیر روشنایی مفید نور روز در جدول ۱۳ نشان دهنده مطلوب بودن شرایط است اما بررسی چهار وضعیت روشنایی مفید نور روز در جهت شناسایی مدل بهینه کمک کننده خواهد بود. تفسیر روشنایی مفید نور روز در جدول ۱۳ و شکل ۱۰ ارائه شده است. هرچقدر UDI.e و UDI.f در فضای مورد نظر کمتر و UDI.a بیشتر باشد، نتایج مطلوب‌تری خواهیم داشت. مقدار میانگین UDI.a در مدل‌های LSPV2، LSPV4 و LSPV6 به ترتیب ۹۱/۷۷، ۹۱/۶۵ و ۹۱/۷۴ درصد است. LSPV2 درصد بیشتری از ساعات اشغال شده فضا در طول سال را روشنایی روز کافی، بیش از ۳۰۰ لوکس و کمتر از ۳۰۰۰ لوکس دریافت می‌کند. از طرفی مقدار میانگین UDI.e در این سه مدل به ترتیب ۰/۳، ۰/۲۶ و ۰/۴۲ درصد است که بیانگر درصد ساعات اشغال شده در سال است که بیش از ۳۰۰۰ لوکس روشنایی دریافت می‌کند و منجر به خیرگی می‌شود. LSPV4 کمترین مقدار خیرگی را در طول سال دریافت می‌کند. مقادیر مرتبط با روشنایی نور روز منجر به خیرگی نسبت به سناریوی مرجع و همچنین مدل پایه کاهش قابل توجهی داشته است.

جدول (۱۲): مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی نور روز در مدل‌های دارای پنل خورشیدی، سناریوی مرجع و مدل پایه LS1H1

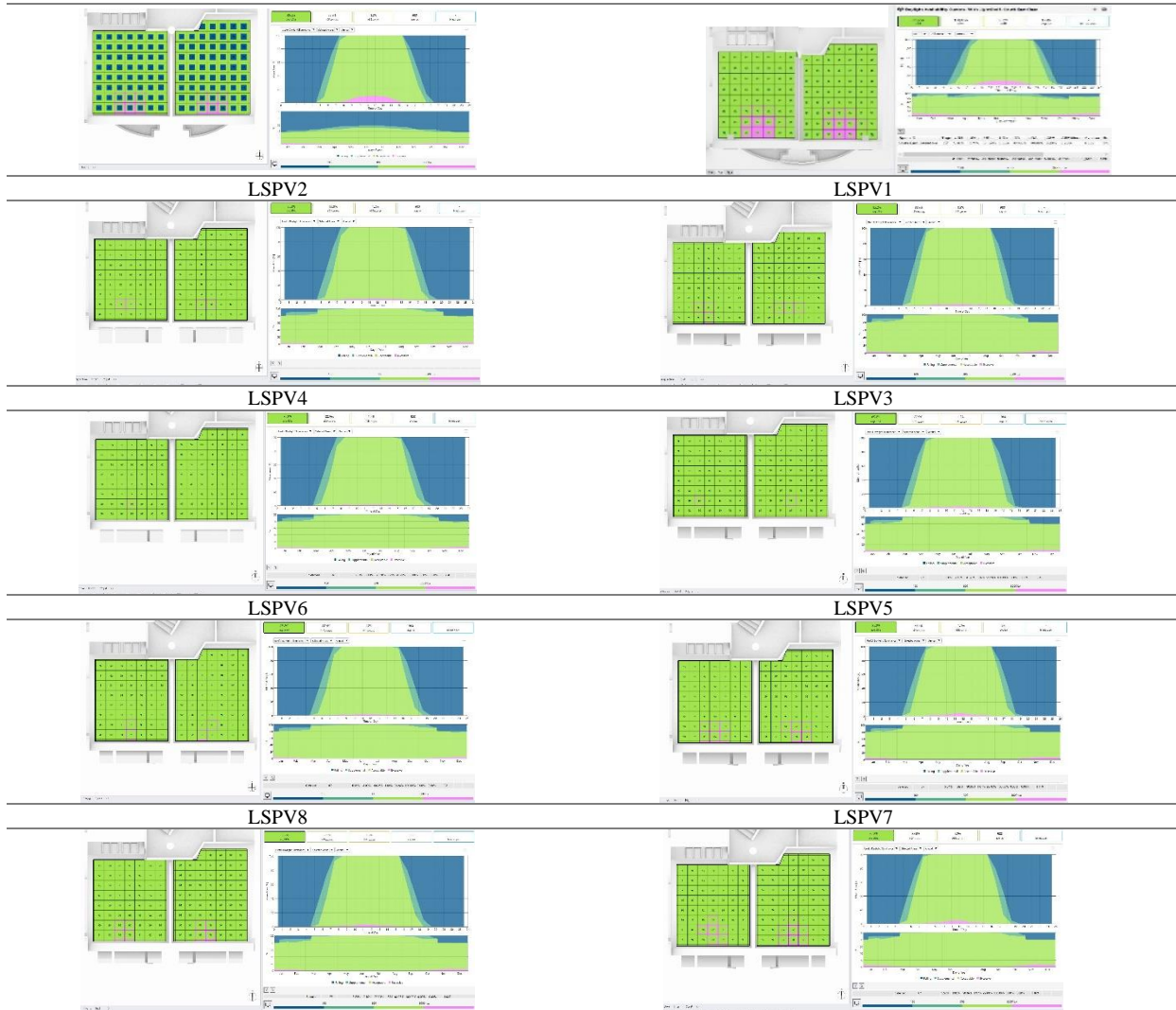
گزینه‌های طراحی														معیارهای نور روز		
سناریوی مرجع LS1H1												سناریوی مرجع				
LSPV8	LSPV7	LSPV6	LSPV5	LSPV4	LSPV3	LSPV2	LSPV1	LS1H1	W	E	W	E				
درصد (% ساعات مطلوب در طول سال)																
																اتونومی نور روز (DA)
																%
																اتونومی نور روز در حالت فضایی (sDA)
																%
																میانگین روشنایی (Avg Lux)
																۱۳۳۹
																۱۴۷۹
																۸۷/۸
																۳۹/۷۹
																۴۱/۸۶
																۹۰/۸۱
																۹۱/۱۵
																۹۱/۵۵
																۹۲
																۹۰/۴۲
																۹۰/۹۸
																۹۱/۳۸
																۹۱/۹۳
																۱۰۰۵
																۸۴۶
																۱۱۲۸
																۹۶۰
																۱۰۱۹
																۸۵۹
																۱۱۰۰
																۹۲/۲۲
																۹۱/۸۱
																۹۲/۳۴
																۹۱/۶۳
																۹۲/۳۲
																۹۱/۶۳
																۹۲/۴۲
																۹۲/۵۰
																۹۱/۹۱
																۹۲/۴۴
																۹۲/۱۰
																۹۲/۵۶
																۹۲/۶۷
																۹۲/۸۳
																۱۰۹۳
																۱۰۶۰
																۱۰۹۳
																۱۲۵۳
																۱۰۱۵
																۹۱/۵۸
																۹۱/۴۵



شکل (۱۰): نمودار روشنایی مفید نور روز (UDI.a) و روشنایی روز منجر به خیرگی (UDI.e)

جدول (۱۳): تفسیر روشنایی مفید نور روز در مدل‌های دارای پنل خورشیدی، سناریوی مرجع و مدل پایه LS1H1

UDI.e	UDI.a	UDIs	UDIf	UDI	جهت گیری	گزینه‌های طراحی
خیرگی	مناسب	ناکافی	کم			
>۳۰۰۰	۳۰۰-۳۰۰۰	۱۰۰-۳۰۰	<۱۰۰			
% ۵/۵۵	% ۸۱/۵۳	% ۷/۷۵	% ۵/۱۶	% ۸۱/۵	SE	سناریوی مرجع
% ۶/۲۵	% ۸۲/۸۵	% ۶/۰۹	% ۴/۸۱	% ۸۲/۸	SW	
% ۲/۱۹	% ۳۹/۷۹	% ۵/۶۷	% ۵۲/۳۶	% ۳۹/۷۹	SE	LS1H1
% ۲/۴۱	% ۴۱/۸۶	% ۴/۰۳	% ۵۱/۷	% ۴۱/۸۶	SW	
% ۰/۹۹	% ۹۰/۸۱	% ۲/۶۵	% ۵۶/۵	% ۹۰/۸۱	SE	LSPV1
% ۱/۰۷	% ۹۱/۱۵	% ۲/۱۹	% ۵/۵۹	% ۹۱/۱۵	SW	
% ۰/۲۶	% ۹۱/۵۵	% ۲/۶۲	% ۵/۵۷	% ۹۱/۵۵	SE	LSPV2
% ۰/۳۴	% ۹۲	% ۲/۰۹	% ۵/۵۷	% ۹۲	SW	
% ۱/۳۱	% ۹۰/۴۲	% ۲/۷۰	% ۵/۷۵	% ۹۰/۴۲	SE	LSPV3
% ۱/۳۴	% ۹۰/۹۸	% ۲/۰۹	% ۵/۵۹	% ۹۰/۹۸	SW	
% ۰/۲۴	% ۹۱/۳۸	% ۲/۷۶	% ۵/۶۱	% ۹۱/۳۸	SE	LSPV4
% ۰/۲۹	% ۹۱/۹۳	% ۲/۱۹	% ۵/۵۹	% ۹۱/۹۳	SW	
% ۱/۶۷	% ۹۰/۷۵	% ۲/۰۶	% ۵/۵۱	% ۹۰/۷۵	SE	LSPV5
% ۱/۵	% ۹۱	% ۱/۹۳	% ۵/۵۷	% ۹۱	SW	
% ۰/۲۸	% ۹۱/۶۲	% ۲/۵۲	% ۵/۵۷	% ۹۱/۶۲	SE	LSPV6
% ۰/۵۷	% ۹۱/۸۶	% ۱/۹۹	% ۵/۵۷	% ۹۱/۸۶	SW	
% ۱/۱۸	% ۹۰/۹۱	% ۲/۶۳	% ۵/۵۴	% ۹۰/۹۱	SE	LSPV7
% ۱/۵۰	% ۹۱/۰۵	% ۱/۹۱	% ۵/۵۴	% ۹۱/۰۵	SW	
% ۱/۰۹	% ۹۱/۵۸	% ۱/۸۲	% ۵/۵۱	% ۹۱/۵۸	SE	LSPV8
% ۱/۳۸	% ۹۱/۴۵	% ۱/۷۱	% ۵/۴۶	% ۹۱/۴۵	SW	
LS1H1						سناریوی مرجع



۱-۱-۲- تحلیل معیار خیرگی نور روز

- خیرگی مغل آسایش فضایی (sDG^۱)

sDG بیانگر درصد سطح فضای اشغال شده ایست که حداقل در ۵ درصد ساعات اشغال فضا در طول سال، دارای خیرگی مغل آسایش و یا غیرقابل تحمل باشد. این محاسبه براساس مقادیر DGP در هر ساعت، در هشت جهت مختلف و برای تمام نقاط در نظر گرفته شده در ساختمان اندازه‌گیری می‌شود. براساس محاسبات انجام شده (جدول ۱۴)، درصد ساعات دارای خیرگی مغل آسایش در مجموع دو کلاس جنوبی سناریوی مرجع و مدل پایه به ترتیب برابر ۱۰/۳۷ و ۹/۸۲ درصد است که نشان دهنده بالا بودن میزان خیرگی است. در مدل‌های بهینه شده کاهش چشم‌گیری در مقادیر خیرگی مغل آسایش قابل مشاهده است. با این وجود مدل‌های LSPV1، LSPV5، LSPV7، LSPV8 و LSPV2 هم‌چنان در محدوده بیش از ۵ درصد قرار دارند. LSPV3، LSPV4 و LSPV6 در محدوده مناسب قرار دارند و کمترین مقدار مربوط به LSPV4 با ۳/۸۸ درصد است.

جدول (۱۴): مقایسه مقادیر خیرگی مغل آسایش فضایی (sDG) در مدل‌های دارای پنل خورشیدی، سناریوی مرجع و مدل پایه LSIH1

سناریوی مرجع		LSIH1	LSPV1	LSPV2	LSPV3	LSPV4	LSPV5	LSPV6	LSPV7	LSPV8
جهت گیری	SE	۹/۵۸	۵/۵۸	۳/۸۵	۴/۲۴	۳/۸۵	۹/۲۵	۳/۹۶	۷/۸۱	۵/۸۰
	SW	۱۱/۱۴	۵/۳۱	۴/۲۴	۴/۶۹	۴/۰۲	۷/۱۴	۳/۹۶	۷/۸۱	۵/۳۱
	SE	۹/۳۸	۵/۳۱	۳/۸۵	۴/۲۴	۳/۸۵	۹/۲۵	۳/۹۶	۷/۸۱	۵/۳۱
	SW	۱۱/۱۴	۵/۳۱	۳/۸۵	۴/۲۴	۳/۸۵	۹/۲۵	۳/۹۶	۷/۸۱	۵/۳۱

مجموع دو کلاس	۱۰/۳۸	۹/۱۲	۵/۳۹	۳/۹۹	۴/۳۴	۳/۷۸	۶/۶۹	۴/۱۱	۷/۴۴	۵/۵۰
---------------	-------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

۴-۴- تحلیل و بررسی

شبیه‌سازی نور روز براساس تغییر در شاکله رف نوری به منظور بهینه‌سازی مشخصات آن در جهت دستیابی به آسایش بصری و بهره‌وری انرژی به صورت گام به گام و در چهار مرحله انجام گرفت. متغیرهای مستقل و وابسته مناسب جهت ارزیابی در کلاس‌ها انتخاب شدند. متغیرهای وابسته، شاخص‌های ارزیابی نور روز شامل میانگین نور روز دریافتی (Avg. Lux)، یکنواختی نور روز (Uo)، اتونومی نور روز (DA)، اتونومی نور روز در حالت فضایی (sDA)، روشنایی مفید نور روز (UDI) و همچنین شاخص‌های ارزیابی خیرگی نور روز شامل احتمال خیرگی نور روز (DGP) و شاخص تابش سالانه (ASE) بودند. متغیرهای مستقل مربوط به شاکله رف نوری انتخاب شدند و در چهار مرحله به صورت گام به گام، شاخص‌ها در هر مدل ارزیابی شدند (جدول ۴). نتایج نشان داد تغییر زاویه بخش خارجی رف نوری و اضافه شدن پنل خورشیدی به آن، مهم‌ترین متغیر طراحی به منظور تامین میانگین روشنایی روز مناسب و یکنواختی نور روز قابل قبول و کاهش خیرگی است.

به منظور ارزیابی تغییرات در هر مرحله و بهینه‌سازی مشخصات رف نوری در ابتدا میانگین نور روز دریافتی و یکنواختی نور روز در ۴ مدل اولیه براساس تغییر در ارتفاع و عمق رف نوری انجام گرفت. براساس نتایج به دست آمده در جدول ۷ و شکل ۴ میانگین نور روز دریافتی و یکنواختی در مدل LS4H4 از همه بیشتر بوده و در تمام زمان‌های بحرانی، یکنواختی قابل قبولی از نظر طبق استاندارد بولتن ساختمانی ۹۰ و استاندارد بریم دریافت می‌کند. از آنجا که در مرحله چهارم به بخش خارجی رف نوری، پنل خورشیدی اضافه خواهد شد، امنیت آن در مقابل فشار باد نگرانی‌هایی را ایجاد می‌کند. به همین دلیل رتبه دوم در شبیه‌سازی‌ها، یعنی مدل LS3H3 در این مرحله انتخاب شد. این مدل نیز یکنواختی نور روز را در تمام زمان‌ها به جز ساعت ۹ صبح انقلاب زمستانی دریافت می‌کند.

در مرحله دوم به منظور افزایش عمق نفوذ نور روز، سطح رف نوری به مصالح بازتابنده تغییر داده شد. این موضوع سبب بروز خیرگی در فضای کلاس شد (جدول ۹) که به منظور کاهش آن در مرحله سوم بخش داخلی رف نوری در شش زاویه مختلف مدل‌سازی و بررسی شد. جدول ۱۰ و شکل ۸ نشان دهنده مقادیر حاصل از شبیه‌سازی نور روز در این مدل‌ها است. بررسی نتایج حاصل نشان دهنده بهبود نور روز دریافتی و همچنین افزایش یکنواختی در مدل LSC6 است که در این مرحله انتخاب و وارد گام چهارم شد. در نهایت در گام نهایی به منظور دریافت نور روز مطلوب، کاهش خیرگی و همچنین کاهش مصرف انرژی از پنل خورشیدی بر روی سطح خارجی رف نوری با درصد اشغال‌های متفاوت و به صورت مسطح و ۳۵/۷ درجه قرار گرفت. نتایج جدول ۱۱ و شکل ۹ نشان دهنده افزایش نور روز دریافتی و یکنواختی است، اما به منظور ارزیابی دقیق‌تر مدل‌ها، توسط سایر معیارهای ارزیابی نور روز و خیرگی بررسی شدند. نتایج در جداول ۱۲ الی ۱۴ و شکل ۱۰ ارائه شده است. LSPV4 در نهایت به عنوان مدل بهینه به منظور دستیابی به آسایش بصری و همچنین کاهش مصرف انرژی انتخاب شد.

مقایسه سناریوی مرجع، مدل پایه و مدل بهینه نشان دهنده تغییرات نتایج خواهد بود. جدول ۱۵ مقادیر مرتبط با شاکله رف نوری در هریک از این سه مدل را ارائه می‌دهد. سناریوی مرجع مشخصات اصلی رف‌های نوری در کلاس‌های جنوبی بنای پیش‌دبستانی شهید مهدوی، در مدل پایه رف نوری به صورت کامل حذف و در مدل بهینه مشخصات شاکله آن براساس روند شبیه‌سازی و نتایج حاصل در راستای اهداف پژوهش حاضر بهینه شده است.

جدول (۱۵): مقایسه شاکله رف نوری در سناریوی مرجع، مدل پایه و مدل بهینه

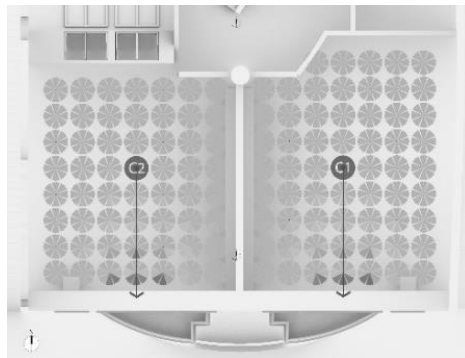
سناریوی مرجع	مدل پایه (LS1H1)	مدل بهینه (LSPV4)
ارتفاع رف نوری	۰/۳۷ متر	فاقد رف نوری
فاصله رف نوری از زمین	۲/۵۰ متر	فاقد رف نوری
عمق بخش داخلی رف نوری	۰	فاقد رف نوری
عمق بخش خارجی رف نوری	۰/۳۱ متر	فاقد رف نوری
زاویه بخش داخلی رف نوری	مسطح	فاقد رف نوری
		۱۰ درجه

زاویه بخش خارجی رف نوری	مسطح	فاقد رف نوری	۳۵/۷ درجه
استفاده از پنل خورشیدی روی سطح بیرونی	خیر	خیر	بله

کلاس‌های جنوبی مورد بررسی به لحاظ نورگیری از سمت شمال شرایط متفاوتی دارند که در محاسبات بخش ۴-۲ از آن صرف نظر شد. در بررسی نهایی ۳-۴، به منظور قیاس دقیق سناریوی مرجع، مدل پایه و مدل بهینه، نتایج حاصل از شبیه سازی برای دو کلاس جنوبی به صورت مجزا در جداول و نمودارها ارائه شده است. کلاس جنوب شرقی فاقد نورگیری از شمال و کلاس جنوب غربی دارای نورگیری از شمال از آتریوم مورب مرکزی است. در ادامه به بررسی شاخص‌های ارزیابی نور روز و خیرگی در دو کلاس جنوبی سناریوی مرجع، مدل پایه و مدل بهینه پرداخته شده است.

نتایج حاصل از تحلیل خیرگی سالانه (sDG) نشان دهنده کاهش ۶۲/۵۸ - درصدی در سناریوی مرجع و ۶۰/۴۹ - درصدی در مدل پایه نسبت به مدل بهینه است. حداکثر مقدار قابل قبول برای این معیار ۵ درصد است که در سناریوی مرجع و مدل پایه براساس جدول ۱۴ مقادیر آن بیش از ۵ است، اما در مدل بهینه مقادیر خیرگی سالانه برای کلاس جنوب شرقی و غربی به ترتیب به ۳/۷۵ و ۴/۰۲ درصد محاسبه شد که نشان دهنده کاهش تعداد ساعات دارای خیرگی محل آسایش است که در حال حاضر در وضعیت مطلوب قرار دارد. شاخص ASE برای کلاس جنوب شرقی سناریوی مرجع ۸/۲ و مدل پایه، ۱۰ درصد و مطلوب و برای کلاس جنوب غربی سناریوی مرجع ۱۰/۷۱ و مدل پایه ۱۲/۵۰ درصد و دارای خیرگی محدودی است. مقدار شاخص تابش سالانه برای مدل بهینه صفر است که به معنای عدم وجود خیرگی در فضا است.

ارزیابی خیرگی در فاصله ۴ متری از پنجره و در میانه کلاس، در سه زمان ۲۱ دسامبر، ۲۱ مارس و ۲۱ ژوئن از سال، و در ساعت ۰۸:۳۰ صبح، ۱۱:۳۰ صبح و ۱۴:۳۰ ظهر انجام و شرایط آسمان برای هر سه زمان انقلاب زمستانی، اعتدالین و انقلاب تابستانی به صورت صاف در نظر گرفته شد. موقعیت نقاط ارزیابی C1 و C2 در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل (۱۱): موقعیت نقاط C1 و C2 به منظور بررسی مقادیر DGP و Ev

در جدول ۱۶، مقایسه نتایج مقادیر DGP و Ev حاصل از مدل‌سازی و تحلیل خیرگی در دو نقطه C1 و C2 در سه ماه و سه زمان از روز و در دو کلاس جنوبی سناریوی مرجع، مدل پایه و مدل بهینه ارائه شده است. در هر سه مدل، تمام ساعات انقلاب تابستانی (۲۱ ژوئن) و اعتدال بهاری (۲۱ مارس) و همچنین ساعت ۸:۳۰ صبح و ۱۴:۳۰ ظهر انقلاب زمستانی (۲۱ دسامبر)، خیرگی نامحسوس است. در انقلاب زمستانی (۲۱ دسامبر) به دلیل ارتفاع کم خورشید، شاخص خیرگی در ساعات ۱۱:۳۰ و در سطح میز دانش‌آموزان (۵۶ سانتی‌متر از کف) افزایش می‌یابد. مقدار احتمال خیرگی نور روز برای سناریوی مرجع در کلاس SE و SW به ترتیب ۰/۴۸ و ۰/۳۸ است که به ترتیب غیرقابل تحمل و قابل درک ارزیابی می‌شود. این مقدار در مدل پایه با توجه به حذف رف نوری افزایش یافته و مقادیر آن ۰/۵۴ و ۰/۵۸ و غیرقابل تحمل محاسبه شده است. در مدل بهینه کلاس SE در محدوده قابل درک و کلاس SW در محدوده مزاحم ارزیابی شد که به این ترتیب در ساعات مذکور باید تمهیداتی جهت جلوگیری از بروز خیرگی اندیشیده شود.

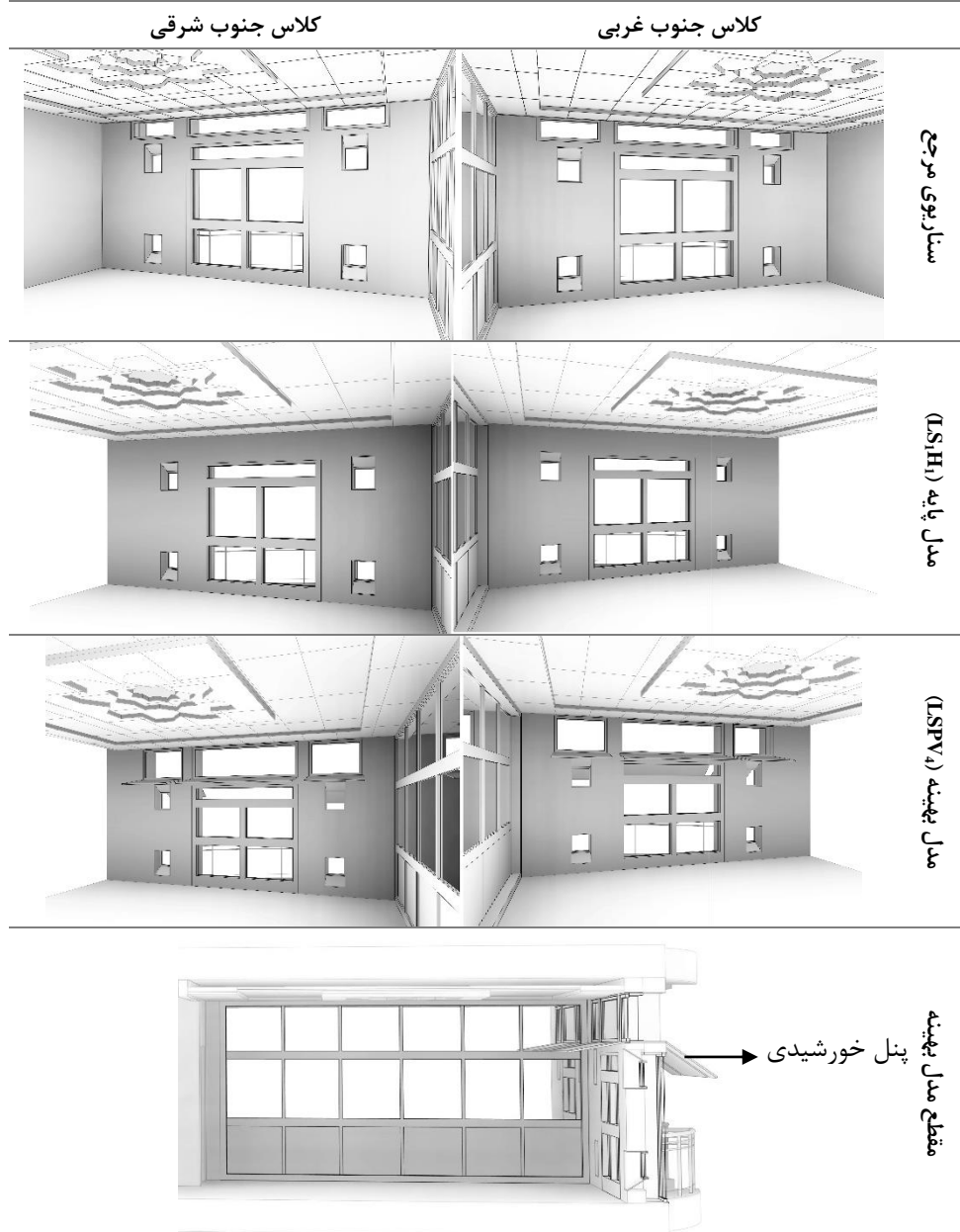
جدول (۱۶): مقادیر DGP و Ev در دو نقطه C1 و C2 سه زمان ۲۱ دسامبر، ۲۱ مارس و ۲۱ ژوئن از سال، و در ساعت ۰۸:۳۰ و ۱۰:۴۰ صبح و

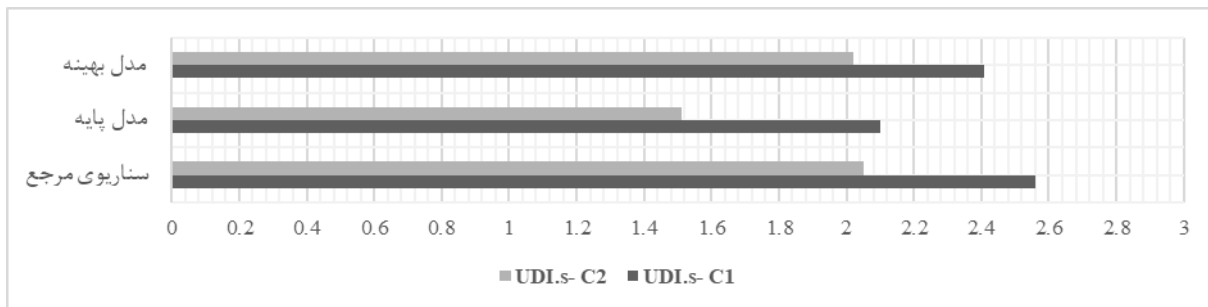
۱۲:۰۰ ظهر

سناریوی مرجع			مدل پایه (LS1H1)			مدل بهینه (LSPV4)		
C2 (SW)		C1 (SE)	C2 (SW)		C1 (SE)	C2 (SW)		C1 (SE)
14.30	11.30	8.30	14.30	11.30	8.30	14.30	11.30	8.30

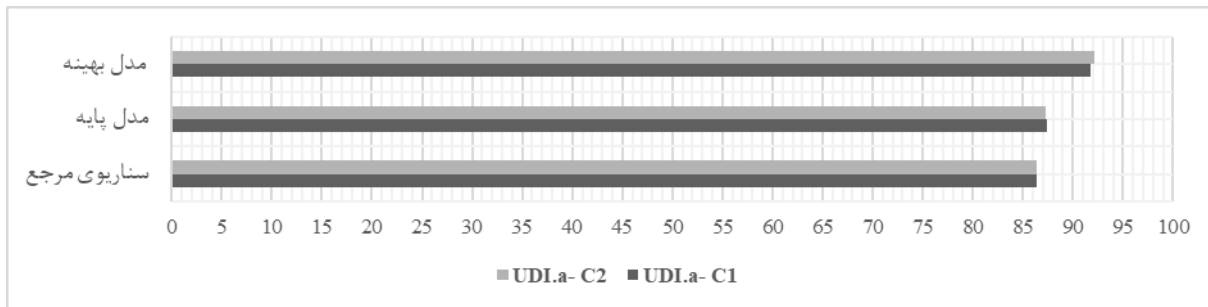
انقلاب تابستانی	DGP		انقلاب زمستانی	DGP		اعتدال بهاری	DGP	
	Ev (Lux)	0.36		Ev (Lux)	0.37		Ev (Lux)	0.38
15817	0.35	1448	15993	0.36	1451	16217	0.37	1451
18566	0.37	1452	19277	0.38	1453	19700	0.38	1454
15113	0.35	1455	16111	0.36	1456	18556	0.37	1457
14277	0.34	1456	19277	0.38	1457	2106	0.38	1458
14566	0.36	1457	16111	0.36	1458	18556	0.37	1459
14566	0.36	1458	19277	0.37	1459	2106	0.38	1460
14566	0.36	1459	16111	0.37	1460	18556	0.38	1461
14566	0.36	1460	19277	0.38	1461	2106	0.38	1462
14566	0.36	1461	16111	0.38	1462	18556	0.38	1463
14566	0.36	1462	19277	0.38	1463	2106	0.38	1464
14566	0.36	1463	16111	0.38	1464	18556	0.38	1465
14566	0.36	1464	19277	0.38	1465	2106	0.38	1466
14566	0.36	1465	16111	0.38	1466	18556	0.38	1467
14566	0.36	1466	19277	0.38	1467	2106	0.38	1468
14566	0.36	1467	16111	0.38	1468	18556	0.38	1469
14566	0.36	1468	19277	0.38	1469	2106	0.38	1470
14566	0.36	1469	16111	0.38	1470	18556	0.38	1471
14566	0.36	1470	19277	0.38	1471	2106	0.38	1472
14566	0.36	1471	16111	0.38	1472	18556	0.38	1473
14566	0.36	1472	19277	0.38	1473	2106	0.38	1474
14566	0.36	1473	16111	0.38	1474	18556	0.38	1475
14566	0.36	1474	19277	0.38	1475	2106	0.38	1476
14566	0.36	1475	16111	0.38	1476	18556	0.38	1477
14566	0.36	1476	19277	0.38	1477	2106	0.38	1478
14566	0.36	1477	16111	0.38	1478	18556	0.38	1479
14566	0.36	1478	19277	0.38	1479	2106	0.38	1480
14566	0.36	1479	16111	0.38	1480	18556	0.38	1481
14566	0.36	1480	19277	0.38	1481	2106	0.38	1482
14566	0.36	1481	16111	0.38	1482	18556	0.38	1483
14566	0.36	1482	19277	0.38	1483	2106	0.38	1484
14566	0.36	1483	16111	0.38	1484	18556	0.38	1485
14566	0.36	1484	19277	0.38	1485	2106	0.38	1486
14566	0.36	1485	16111	0.38	1486	18556	0.38	1487
14566	0.36	1486	19277	0.38	1487	2106	0.38	1488
14566	0.36	1487	16111	0.38	1488	18556	0.38	1489
14566	0.36	1488	19277	0.38	1489	2106	0.38	1490
14566	0.36	1489	16111	0.38	1490	18556	0.38	1491
14566	0.36	1490	19277	0.38	1491	2106	0.38	1492
14566	0.36	1491	16111	0.38	1492	18556	0.38	1493
14566	0.36	1492	19277	0.38	1493	2106	0.38	1494
14566	0.36	1493	16111	0.38	1494	18556	0.38	1495
14566	0.36	1494	19277	0.38	1495	2106	0.38	1496
14566	0.36	1495	16111	0.38	1496	18556	0.38	1497
14566	0.36	1496	19277	0.38	1497	2106	0.38	1498
14566	0.36	1497	16111	0.38	1498	18556	0.38	1499
14566	0.36	1498	19277	0.38	1499	2106	0.38	1500
14566	0.36	1499	16111	0.38	1500	18556	0.38	1501
14566	0.36	1500	19277	0.38	1501	2106	0.38	1502
14566	0.36	1501	16111	0.38	1502	18556	0.38	1503
14566	0.36	1502	19277	0.38	1503	2106	0.38	1504
14566	0.36	1503	16111	0.38	1504	18556	0.38	1505
14566	0.36	1504	19277	0.38	1505	2106	0.38	1506
14566	0.36	1505	16111	0.38	1506	18556	0.38	1507
14566	0.36	1506	19277	0.38	1507	2106	0.38	1508
14566	0.36	1507	16111	0.38	1508	18556	0.38	1509
14566	0.36	1508	19277	0.38	1509	2106	0.38	1510
14566	0.36	1509	16111	0.38	1510	18556	0.38	1511
14566	0.36	1510	19277	0.38	1511	2106	0.38	1512
14566	0.36	1511	16111	0.38	1512	18556	0.38	1513
14566	0.36	1512	19277	0.38	1513	2106	0.38	1514
14566	0.36	1513	16111	0.38	1514	18556	0.38	1515
14566	0.36	1514	19277	0.38	1515	2106	0.38	1516
14566	0.36	1515	16111	0.38	1516	18556	0.38	1517
14566	0.36	1516	19277	0.38	1517	2106	0.38	1518
14566	0.36	1517	16111	0.38	1518	18556	0.38	1519
14566	0.36	1518	19277	0.38	1519	2106	0.38	1520
14566	0.36	1519	16111	0.38	1520	18556	0.38	1521
14566	0.36	1520	19277	0.38	1521	2106	0.38	1522
14566	0.36	1521	16111	0.38	1522	18556	0.38	1523
14566	0.36	1522	19277	0.38	1523	2106	0.38	1524
14566	0.36	1523	16111	0.38	1524	18556	0.38	1525
14566	0.36	1524	19277	0.38	1525	2106	0.38	1526
14566	0.36	1525	16111	0.38	1526	18556	0.38	1527
14566	0.36	1526	19277	0.38	1527	2106	0.38	1528
14566	0.36	1527	16111	0.38	1528	18556	0.38	1529
14566	0.36	1528	19277	0.38	1529	2106	0.38	1530
14566	0.36	1529	16111	0.38	1530	18556	0.38	1531
14566	0.36	1530	19277	0.38	1531	2106	0.38	1532
14566	0.36	1531	16111	0.38	1532	18556	0.38	1533
14566	0.36	1532	19277	0.38	1533	2106	0.38	1534
14566	0.36	1533	16111	0.38	1534	18556	0.38	1535
14566	0.36	1534	19277	0.38	1535	2106	0.38	1536
14566	0.36	1535	16111	0.38	1536	18556	0.38	1537
14566	0.36	1536	19277	0.38	1537	2106	0.38	1538
14566	0.36	1537	16111	0.38	1538	18556	0.38	1539
14566	0.36	1538	19277	0.38	1539	2106	0.38	1540
14566	0.36	1539	16111	0.38	1540	18556	0.38	1541
14566	0.36	1540	19277	0.38	1541	2106	0.38	1542
14566	0.36	1541	16111	0.38	1542	18556	0.38	1543
14566	0.36	1542	19277	0.38	1543	2106	0.38	1544
14566	0.36	1543	16111	0.38	1544	18556	0.38	1545
14566	0.36	1544	19277	0.38	1545	2106	0.38	1546
14566	0.36	1545	16111	0.38	1546	18556	0.38	1547
14566	0.36	1546	19277	0.38	1547	2106	0.38	1548
14566	0.36	1547	16111	0.38	1548	18556	0.38	1549
14566	0.36	1548	19277	0.38	1549	2106	0.38	1550
14566	0.36	1549	16111	0.38	1550	18556	0.38	1551
14566	0.36	1550	19277	0.38	1551	2106	0.38	1552
14566	0.36	1551	16111	0.38	1552	18556	0.38	1553
14566	0.36	1552	19277	0.38	1553	2106	0.38	1554
14566	0.36	1553	16111	0.38	1554	18556	0.38	1555
14566	0.36	1554	19277	0.38	1555	2106	0.38	1556
14566	0.36	1555	16111	0.38	1556	18556	0.38	1557
14566	0.36	1556	19277	0.38	1557	2106	0.38	1558
14566	0.36	1557	16111	0.38	1558	18556	0.38	1559
14566	0.36	1558	19277	0.38	1559	2106	0.38	1560
14566	0.36	1559	16111	0.38	1560	18556	0.38	1561
14566	0.36	1560	19277	0.38	1561	2106	0.38	1562
14566	0.36	1561	16111	0.38	1562	18556	0.38	1563
14566	0.36	1562	19277	0.38	1563	2106	0.38	1564
14566	0.36	1563	16111	0.38	1564	18556	0.38	1565
14566	0.36	1564	19277	0.38	1565	2106	0.38	1566
14566	0.36	1565	16111	0.38	1566	18556	0.38	1567
14566	0.36	1566	19277	0.38	1567	2106	0.38	1568
14566	0.36	1567	16111	0.38	1568	18556	0.38	1569
14566	0.36	1568	19277	0.38	1569	2106	0.38	1570
14566	0.36	1569	16111	0.38	1570	18556	0.38	1571
14566	0.36	1570	19277	0.38	1571	2106	0.38	1572
14566	0.36	1571	16111	0.38	1572	18556	0.38	1573
14566	0.36	1572	19277	0.38	1573	2106	0.38	1574
14566	0.36	1573	16111	0.38	1574	18556	0.38	1575
14566	0.36	1574	19277	0.38	1575	2106	0.38	1576

جدول (۱۸): مدلسازی سناریوی مرجع، مدل پایه و مدل بهینه در دو کلاس جنوب غربی و جنوب شرقی

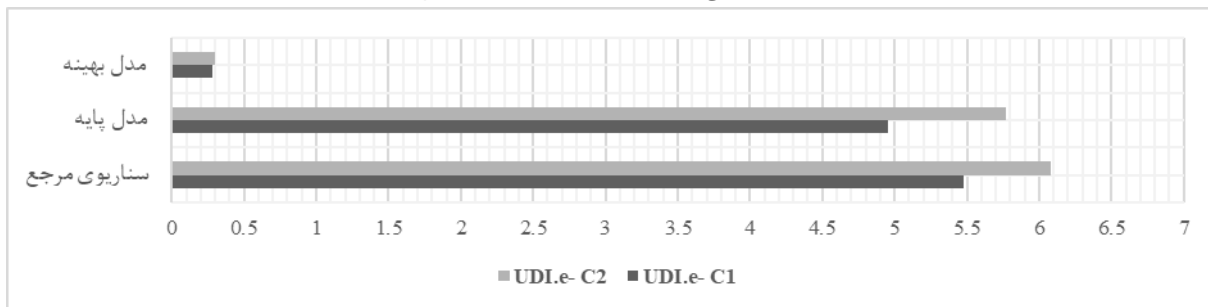




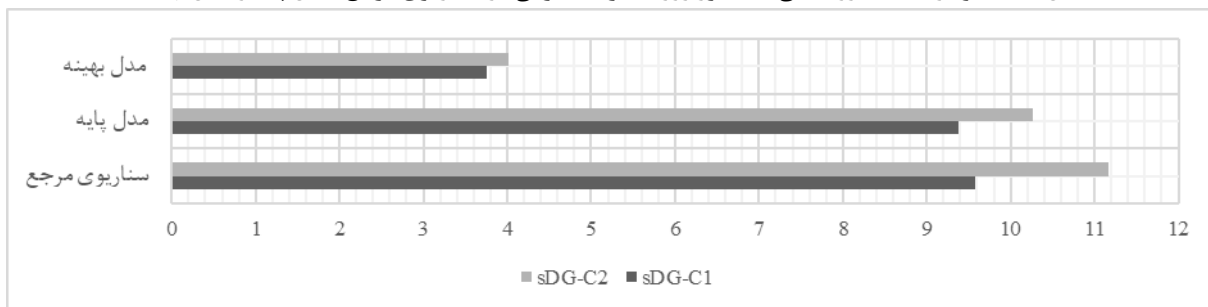
شکل (۱۲): نمودار مقایسه روشنایی مفید نور روز ناکافی در سناریوی مرجع، مدل پایه و مدل بهینه



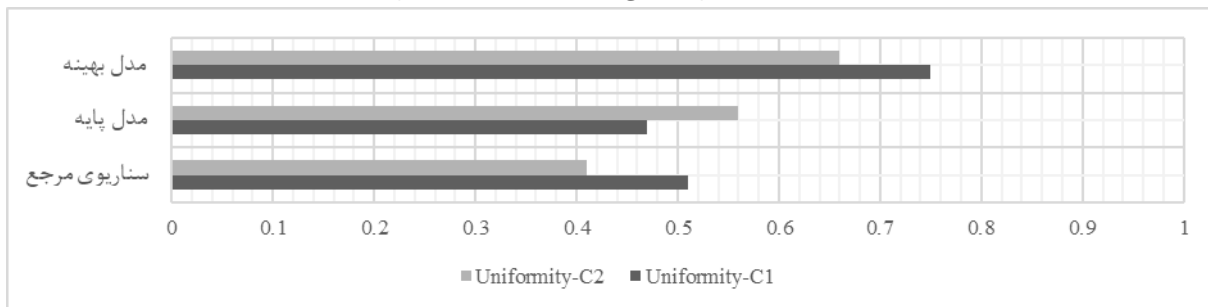
شکل (۱۳): نمودار مقایسه روشنایی مفید نور روز در سناریوی مرجع، مدل پایه و مدل بهینه



شکل (۱۴): نمودار مقایسه روشنایی مفید نور روز منجر به خیرگی در سناریوی مرجع، مدل پایه و مدل بهینه



شکل (۱۵): نمودار مقایسه احتمال وقوع خیرگی سالانه در سناریوی مرجع، مدل پایه و مدل بهینه



شکل (۱۶): نمودار مقایسه یکنواختی نور روز در سناریوی مرجع، مدل پایه و مدل بهینه

۵- نتیجه گیری

پژوهش حاضر به منظور دستیابی به شاکله بهینه رف‌های نوری در کلاس درس اقلیم نیمه گرم و خشک انجام گرفت. برای این منظور مدل پایه بر مبنای کلاس‌های درس جنوبی نمونه مورد پژوهی، اما بدون رف نوری، به عنوان مدل پایه در نظر گرفته شد. به منظور کاهش انرژی مورد نیاز برای روشنایی کلاس درس در مواقع لزوم از پنل خورشیدی بر روی سطح بخش خارجی رف نوری بهره‌گیری شد. در راستای بهینه‌سازی عملکرد نور روز، سه مرحله قبل از اتصال پنل‌های خورشیدی به رف‌های نوری در نظر گرفته شد تا ابعاد و اندازه مناسب رف نوری متناسب با شرایط اقلیمی نیمه گرم و خشک شهر تهران و زاویه تابش آن در نظر گرفته شود و پس از آن در مرحله دوم سطح رف نوری به مصالح بازتابنده تغییر یافت و در مرحله سوم به بخش داخلی رف نوری زاویه داده شد تا علاوه بر افزایش عمق نفوذ نور روز، از میزان خیرگی محل آسایش ناشی از تابش مستقیم خورشید جلوگیری شود. در مرحله چهارم نیز با نصب پنل خورشیدی به بخش خارجی رف نوری و تغییر زاویه آن متناسب با عرض جغرافیایی شهر تهران، علاوه بر تامین نور روز یکنواخت و کاهش خیرگی در کلاس، انرژی مورد نیاز برای روشنایی نیز تامین می‌شود.

یافته‌های کلیدی پژوهش حاضر برای مدل پایه‌ی بررسی شده به شرح زیر است:

- ارتفاع بهینه برای رف نوری مسطح به منظور افزایش یکنواختی نور روز و همچنین میانگین نور روز دریافتی در این مطالعه ۲/۱۰ بالاتر از کف در نظر گرفته شد. عرض بخش خارجی و داخلی آن به ترتیب ۱/۰۵ و ۰/۷۰ متر است. در مرحله اول شاکله LS3H3، مورد ارزیابی و تایید قرار گرفت.
 - استفاده از یک مصالح بازتابنده بر روی سطح رف نوری به عمق ۷۴ سانتی متر (۵۶ سانتی متر ضخامت دیوار ترومب و ۱۸ سانتی متر خارج از دیوار) راه حل مناسبی جهت افزایش عمق نفوذ نور و یکنواختی است.
 - مشخصات بهینه برای رف نوری به منظور بهبود توزیع نور روز در فضای کلاس، بخش داخلی با زاویه ۱۰+ درجه و بخش خارجی به صورت مسطح در نظر گرفته شد به این ترتیب میانگین نور روز دریافتی در انقلاب تابستانی و اعتدالین به ترتیب ۴۰/۶۹-، ۲۵/۳۷- درصد کاهش و در انقلاب زمستانی ۲۰/۵۶ درصد افزایش یافت. با وجود این کاهش، میانگین نور روز دریافتی همچنان در محدوده قابل قبول بوده و سبب کاهش خیرگی محل آسایش شده است.
 - ترکیب رف نوری در بخش خارجی و پنل خورشیدی با ضریب بهره‌وری ۱۰ درصد، میزان انرژی مصرفی برای روشنایی در تمام شاکله‌ها را تامین کند، بعلاوه سبب کاهش خیرگی محل آسایش می‌شود. براساس نتایج حاصل از جدول ۱۱، همچنین LSPV1 با بخش خارجی مسطح و پوشش ۱۰۰ درصد پنل خورشیدی یکنواختی بالاتری را در مقایسه با LSC6 با شرایط مشابه و بدون پنل خورشیدی نشان می‌دهد.
 - همانطور که در جداول ۱۲ الی ۱۴ و تصاویر ۹ و ۱۰ مشخص شده مدلهایی که توزیع یکنواختی نور روز و میانگین نور روز دریافتی بیشتری را به دست می‌آورند LSPV4 و LSPV6 هستند.
- پژوهش حاضر بر بهینه‌سازی مشخصات رف نوری به منظور دستیابی به آسایش بصری و بهره‌وری انرژی متمرکز شده، به همین سبب مطالعات محدود به انرژی مورد نیاز برای روشنایی و توزیع نور روز به منظور دستیابی به آسایش بصری در فضای کلاس درس است. با این وجود، باید مطالعات بیشتری به منظور ارزیابی نسبت پنجره به دیوار، تاثیر حذف شیشه از سقف کلاس‌های مدل پایه، انواع پنل‌های خورشیدی قابل استفاده، تغییر میزان عبور نور روز از شیشه و بررسی تاثیر آن بر توزیع نور و جلوگیری از خیرگی محل آسایش در آینده انجام گیرد. پیشنهاد می‌شود به منظور دستیابی به الگوهای بهینه، در پژوهش‌های آتی، سایر اقلیم‌های ایران مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. بعلاوه می‌توان علاوه بر آسایش بصری، به آسایش حرارتی و دمایی فضا در فصول سرد و گرم و تاثیر شاکله رف نوری بر دستیابی به این آسایش محیطی پرداخت.

سیاسگزاری

نویسندگان این مقاله از مدیریت موسسه آموزشی شهید مهدوی کمال سیاسگزاری و قدردانی را دارند.

مراجع

- [۱] British Standard BS 8206-2, Lighting for Buildings- Part 2: Code of Practice for Daylighting, British Standards Institution: London, 2008.
- [۲] European Union 2020, "International Energy Agency," [iea.org](https://www.iea.org/reports/european-union-2020), June, 2020. [Online]. Available: Paris <https://www.iea.org/reports/european-union-2020>, Licence: CC BY 4.0, [Accessed: June. 28, 2024].
- [۳] "IRAN Power Generation Transmission & Distribution Company," [Tavanir.org.ir](https://amar.tavanir.org.ir/pages/general.php), Jan, 2021. [Online]. Available: <https://amar.tavanir.org.ir/pages/general.php>. [Accessed: June. 28, 2024].
- [۴] H. Lee, S. Gim, J. Seo, Y. Kim, "Study on movable light-shelf system with location-awareness technology for lighting energy saving", *Indoor Built Environ*, vol. 26, no. 6, pp. 796-812, July. 2017 (doi:10.1177/1420326X16659691).
- [۵] K. Kim, H. Lee, H. Jang, C. Park, C. Choi, "Energy-saving performance of light shelves under the application of user-awareness technology and light-dimming control", *Sustainable Cities and Society*, vol. 44, pp. 582-596, Jan. 2019 (<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.005>).
- [۶] P. Zazzini, A. Romano, A. di Lorenzo, V. Portaluri, A. di Crescenzo, "Experimental analysis of the performance of light shelves in different geometrical configurations through the scale model approach", *Journal of Daylighting*, vol. 7, no. 1, pp. 37-56, March. 2020 (doi: 10.15627/jd.2020.4).
- [۷] A.A. Freewan, "Maximizing the lightshelf performance by interaction between lightshelf geometries and a curved ceiling", *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 8, pp. 1600-1604, Aug. 2010 (<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.09.037>).
- [۸] G. Chieli, L.C. Nelli, "Photovoltaic and thermal solar concentrator integrated into a dynamic shading device", In: A. Sayigh, (eds) *Sustainable Building for a Cleaner Environment. Innovative Renewable Energy*. Springer: Cham. pp. 335-345, 2019(doi:10.1007/978-3-319-94595-8_28).
- [۹] Y.W. Lim, C.Y.S. Heng, "Dynamic internal light shelf for tropical daylighting in high-rise office buildings", *Building and Environment*, vol. 106, pp. 155-166, Sep. 2016 (<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.030>).
- [۱۰] H. Lee, "Performance evaluation of a light shelf with a solar module based on the solar module attachment area", *Building and Environment*, vol. 159, July. 15, 2019 (<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106161>).
- [۱۱] W. Wu, E. Ng, "A review of the development of daylighting in schools", *Lighting Research & Technology*, vol. 35, no. 2, pp. 111-124, June. 2003 (doi:10.1191/1477153503li072oa)
- [۱۲] R. Küller, C. Lindsten, "Health and behavior of children in classrooms with and without windows", *Journal of Environmental Psychology*, vol. 12, no. 4, pp. 305-317, Dec. 1992 ([https://doi.org/10.1016/S0272-4944\(05\)80079-9](https://doi.org/10.1016/S0272-4944(05)80079-9)).
- [۱۳] SATBA, "Renewable Energy and Energy Efficiency Organization," [Statistical information/satba.gov.ir](https://www.satba.gov.ir), [Online]. Available: <https://www.satba.gov.ir/fa/satba/information-%d8%a7%d8%b7%d9%84%d8%a7%d8%b9% d8%a7%d8%aa- %d8%a2%d9%85%d8%a7%d8%b1%db%8c>, [Accessed: June. 28, 2024].
- [۱۴] M. Economidou, B. Atanasiu, D. Staniaszek, J. Maio, I. Nolte, O. Rapf, J. Laustsen, P. Ruyssvelt, D. Strong, S. Zinetti, "Europe's buildings under the microscope. A country-by-country review of the energy performance of buildings", *Buildings Performance Institute Europe*, October. 2011[E-Book] Available: <https://www.researchgate.net/publication/271200847>
- [۱۵] ISNA, "Iraninan Students' News Agency," [Knowledge base/ Isna.ir](https://www.isna.ir/news/1403031610296/%D8%B1%D9%88%D8%B4-%D9%87%D8%A7%DB%8C-%D9%81%D9%86%D8%A7%D9%88%D8%B1%D8%A7%D9%86%D9%87-%D8%A8%D8%B1%D8%A7%DB%8C-%D9%85%D8%B5%D8%B1%D9%81-%D8%A8%D9%87%DB%8C%D9%86%D9%87-%D8%A7%D9%86%D8%B1%DA%98%DB%8C-%D8%AF%D8%B1-%D8%A7%D9%88%D9%82%D8%A7%D8%AA-%D9%BE%DB%8C%DA%A9), June.5, 2024. [Online]. Available: <https://www.isna.ir/news/1403031610296/%D8%B1%D9%88%D8%B4-%D9%87%D8%A7%DB%8C-%D9%81%D9%86%D8%A7%D9%88%D8%B1%D8%A7%D9%86%D9%87-%D8%A8%D8%B1%D8%A7%DB%8C-%D9%85%D8%B5%D8%B1%D9%81-%D8%A8%D9%87%DB%8C%D9%86%D9%87-%D8%A7%D9%86%D8%B1%DA%98%DB%8C-%D8%AF%D8%B1-%D8%A7%D9%88%D9%82%D8%A7%D8%AA-%D9%BE%DB%8C%DA%A9>, [Accessed: June. 28, 2024].
- [۱۶] A. Aghahosseini, D. Bogdanov, N. Ghorbani, C. Breyer, "Analysis of 100% renewable energy for Iran in 2030: integrating solar PV, wind energy and storage", *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 15, pp. 17-36, Jan. 2018 (doi: 10.1007/s13762-017-1373-4).
- [۱۷] S. Saadatian, N. Simões, F. Freire, "Integrated environmental, energy and cost life-cycle analysis of windows: Optimal selection of components", *Building and Environment*, vol. 188, 107516, Jan. 2021 (<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107516>).

- [۱۸] M. Knoop, O. Stefani, B. Bueno, B. Matusiak, R. Hobday, et al., "Daylight: What makes the difference?", *Lighting Research Technol*, vol. 52, no. 3, pp. 423–442, 2020 (doi: 10.1177/1477153519869758).
- [۱۹] M. Aik, "Evaluating daylight performance of light shelves combined with external blinds in south-facing classrooms in Athens, Greece", *Energy and Buildings*, vol. 116, pp. 190- 205, March.15, 2016 (<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.009>).
- [۲۰] A. Kontadakis, A. Tsangrassoulis, L. Doulos, S. Zerefos, "A review of light shelf designs for daylight environments", *Sustainability*, vol. 10, no. 1, pp. 71, 2018 (<https://doi.org/10.3390/su10010071>).
- [۲۱] C. Heng, Y.W. Lim, D.R. Ossen, "Horizontal light pipe transporter for deep plan high-rise office daylighting in tropical climate", *Building and Environment*, vol. 171, 106645, March.15 (<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106645>).
- [۲۲] M.T. Kahsay, G.T. Bitsuamlak, F. Tariku, "Thermal zoning and window optimization framework for high-rise buildings", *Applied Energy*, vol. 292, 112479, June. 15, 2021 (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116894>).
- [۲۳] T.A. Arntsen, D.H. Bozena, "Optimization of Window Design for Daylight and Thermal Comfort in Cold Climate Conditions", *Energies*, vol. 14, no. 23: 8013, Nov. 30, 2021 (<https://doi.org/10.3390/en14238013>).
- [۲۴] S.T. Claros, A. Soler, "Indoor daylight climate–influence of light shelf and model reflectance on light shelf performance in Madrid for hours with unit sunshine fraction", *Building and Environment*, vol. 37, no. 6, pp. 587-598, June. 2002 ([https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00074-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00074-9)).
- [۲۵] B. Raphael, "Active control of daylighting features in buildings", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 26, no. 5, pp. 393-405, Nov. 15, 2010 (<https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2010.00692.x>).
- [۲۶] H. Lee, J. Seo, C.H. Choi, "Preliminary Study on the Performance Evaluation of a Light Shelf Based on Reflector Curvature", *Energies*, vol. 12, no. 22: 4295, Nov. 11, 2019 (<https://doi.org/10.3390/en12224295>).
- [۲۷] R.G. Hopkinson, "Glare from daylighting in buildings", *Applied Ergonomics*, vol. 3, no. 4, pp. 206-215, Dec. 1972 ([https://doi.org/10.1016/0003-6870\(72\)90102-0](https://doi.org/10.1016/0003-6870(72)90102-0)).
- [۲۸] A. Meresi, "Evaluating daylight performance of light shelves combined with external blinds in south-facing classrooms in Athens, Greece", *Energy and Building*, vol. 116, pp. 190-205, March. 15, 2016 (<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.009>).
- [۲۹] T. Hwang, J.T. Kim, Y. Chung, "Power performance of photovoltaic-integrated lightshelf systems", *Indoor Built Environment*, vol. 23. No. 1, pp. 180-188, March. 21, 2014 (<https://doi.org/10.1177/1420326X14525062>).
- [۳۰] "I.R. of IRAN Metrological Organization," *Meteorological statistics/ tehranmet.ir*, [Online]. Available: <https://tehranmet.ir/fa/pages/16/show> [Accessed: June. 28, 2024].
- [۳۱] A. Mesloub, A. Ghosh, "Daylighting Performance of Light Shelf Photovoltaics (LSPV) for Office Buildings in Hot Desert-Like Regions", *Applied Sciences*, vol. 10, no. 22: 7959, Nov. 10, 2020 (<https://doi.org/10.3390/app10227959>).

زیر نویس‌ها

¹ International Energy Agency (IEA)

² Koppen climate classification

³ Revit Architecture

⁴ Rhino Ceros

⁵ Climate Studio

⁶ Uniformity

⁷ BREEAM

⁸ Mesloub & Ghosh

⁹ Spatial Disturbing Glare