



بهینه سازی بازشوهای ساختمانی بر اساس عملکرد خیرگی در ساختمان‌های آموزشی اقلیم گرم و خشک ایران

(مطالعه موردی: ساختمان‌های دانشگاهی شهر یزد)

محبوبه پورا احمدی¹، محمدعلی خانمحمدی² و فرهنگ مظفر³

تاریخ دریافت: 97/08/17

تاریخ پذیرش: 98/06/24

سال، هشتم / شماره اول / بهار و تابستان 98

113

چکیده: خیرگی یک مسأله رایج در ساختمان‌های مدرن دارای نماهای وسیع شیشه‌ای است که نه تنها تأثیرات منفی بر روی آسایش ساکنان دارد، بلکه می‌تواند عملکرد افراد را نیز مختل کند. در محیط‌های آموزشی، به دلیل میزان بالای فعالیت‌های بصری که در اکثر موارد در طول روز انجام می‌شود، توجه به مسأله خیرگی اهمیت بالایی دارد. هدف این پژوهش ارائه الگوهای مناسب جهت بهینه سازی بازشوها از لحاظ خیرگی در ساختمان‌های آموزشی اقلیم گرم و خشک ایران است.

به منظور انجام پژوهش بعد از تعیین مدل، پارامترهای رادیانس، اطلاعات آب‌وهوایی و اعتبار سنجی نرم‌افزار، زمان‌های بحرانی خیرگی در یک نقطه مشخص تعیین شد. در ادامه اولویت تأثیر هر کدام از پارامترها با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها تعیین شد. سپس با استفاده از شبیه‌سازی، ترکیب پارامترهای متفاوت کالبدی پنجره در ابعاد مختلف مورد توجه قرار گرفت. شاخص‌های کالبدی مورد استفاده در این پژوهش شامل نسبت پنجره به دیوار، طول سایه‌بان، موقعیت ناظر، میزان عبور بصری پنجره و درصد شیشه‌های رنگی بود. در مجموع 4800 حالت متفاوت ترکیب پارامترها به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد تنها در حالت نسبت پنجره به دیوار 30 درصد با تغییرات سایر فاکتورها، بازه مطلوب خیرگی تأمین می‌شود. بنابراین تغییر در مؤلفه‌های کالبدی پنجره به تنهایی، عملکرد مناسبی در جلوگیری از خیرگی در فضا ندارد. یکی از راهکارهای مناسب در این زمینه، استفاده از قفسه‌های نوری است. با حذف مؤلفه شیشه‌های رنگی و افزودن دو متغیر طول قفسه و فاصله آن تا لبه بالایی پنجره، 6000 حالت متفاوت ترکیب به دست آمد. استفاده از این روش در نسبت‌های پنجره به دیوار کمتر از 60 درصد، موجب کاهش میزان خیرگی به صورت نامحسوس می‌شود.

واژگان کلیدی: خیرگی ناراحت کننده، نور روز، ساختمان-های آموزشی، پارامترهای کالبدی پنجره.

این مقاله برگرفته از رساله دکتری معماری نویسنده اول با عنوان «بهینه‌سازی بازشوها از منظر خیرگی در ساختمان‌های آموزشی اقلیم گرم- و خشک ایران؛ مطالعه موردی: ساختمان‌های دانشگاهی شهر یزد» است که با راهنمایی نویسنده دوم و سوم در دانشگاه علم و صنعت ایران در حال انجام است.

¹دانشجوی دکتری معماری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

²دانشیار، گروه معماری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. (نویسنده مسئول) Khanmohammadi@iust.ac.ir

³دانشیار، گروه معماری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

1- مقدمه

طراحی ساختمان و فضاها با کیفیت‌های نور روز بسیار مطلوب است. این کیفیت‌ها شامل ارتباط با بیرون از طریق دید و نور طبیعی، کاهش استفاده از روشنایی الکتریکی و حفظ آسایش بصری است. نور روز عموماً باعث بهبود احساس سلامتی، شادابی و هوشیاری می‌شود؛ ولی اگر ناراحتی بصری اتفاق بیفتد، این امتیازات منتفی خواهد شد. به عبارتی دیگر، همزمان در نظر گرفتن این نکته مهم است که همیشه حضور نور روز یک نکته مثبت تلقی می‌شود.

علاوه بر این، با رشد توجه به استراتژی‌های غیر فعال برای افزایش همزمان آسایش بصری و شفافیت پوسته‌های ساختمانی، طراحان نیاز بیشتری برای معیارهای قابل اعتماد در رابطه با رضایت بصری در فضایی که از نور روز استفاده می‌کنند، دارند و با توجه به این که طراحی ساختمان‌ها به سمت درصد بیشتر سطح شیشه‌خور و سطوح انعکاسی بالاتر از قبیل شیشه و مصالح جلادار متمایل است، تمایل شدیدی برای جلوگیری از ناراحتی بصری و خیرگی وجود دارد. این تمایل به موازات برخی از مشکلات گزارش شده در ساختمان‌های مدرن، شدیدتر نیز شده است و اهمیت توجه به این مسأله، روز به روز بیشتر می‌شود.

عموماً پذیرفته شده است که نور روز و دید، موجب ایجاد سلامتی، آسایش و محیطی کار سالم برای کاربران می‌شوند و بنابراین باید در فضاهای داخلی گنجانده شوند. به همان اندازه قابل درک است که نیاز به کاهش ناراحتی بصری و خیرگی برای استفاده کنندگان فضاها با نور روز لازم است (J. A. Jakubiec and Reinhart, 2013). با افزایش استفاده از شیشه در ساختمان‌های مدرن، توجه به نیاز به کمیت بخشی و جلوگیری از خیرگی، در کنار هم افزایش یافته است. از لحاظ تاریخی، تلاش‌های کمی برای رفع مشکل خیرگی به صورت کمی و برای مقاصد مختلف، توسعه پیدا کرده است.

در نتیجه، در حال حاضر برای طراح نسبتاً دشوار است که تصمیم بگیرد چگونه می‌تواند عملکرد خیرگی را تا حد ممکن کاهش دهد. معیارهای معتبر به طراحان

کمک می‌کند تا انتخاب‌های بهینه‌تری در میان راه حل‌های متفاوت طراحی داشته باشند و این امر منجر به طیفی از طراحی نما می‌شود که در آن‌ها بین نفوذ نور روز و آسایش بصری، تعادل وجود دارد (Reinhart, 2004). با توجه به موارد مطرح شده سوالات پژوهش به شرح زیر است:

«ویژگی‌های کالبدی بازشو به منظور کاهش میزان خیرگی در فضاهای آموزشی اقلیم گرم‌وخشک ایران چگونه است؟»

«تأثیر عملکرد متغیرهای کالبدی بازشو بر عملکرد خیرگی چیست؟»

پژوهش‌های قابل توجهی برای بررسی چگونگی ارزیابی کنترل خیرگی و این که چگونه طراحان می‌توانند این مشکل را برای کاربران ساختمانی و عموم مردم کاهش دهند، انجام شده است. (Suk, Schiler, and Kensek, 2013). لیم و همکاران، پژوهشی را به منظور ارزیابی نور روز در یک ساختمان اداری در مالزی انجام دادند. بر اساس پژوهش‌های شبیه‌سازی آن‌ها دریافتند که با تغییر نوع شیشه و افزودن سایه‌بان‌های داخلی بهبود قابل توجهی در کیفیت آسایش بصری و کاهش خیرگی حاصل خواهد شد (Y.W. Lim, M.Z. Kandar, M.H. Ahmad, D.R. Ossen, 2012). شن و زمپلیکو تأثیر استراتژی‌های متفاوت کنترل سایه‌بان را بر روی مصرف انرژی و آسایش بصری در یک فضای اداری بررسی کردند. سایه‌بان‌های داخلی به منظور مسدود کردن تابش خورشیدی استفاده شدند و با از بین بردن خیرگی، آسایش بصری استفاده کنندگان از ساختمان را ارتقا دادند. آن‌ها چهار مدل سایه‌بان را مدل‌سازی کردند تا بهره‌وری از نور روز را بیشتر و احتمال ناراحتی بصری را کاهش دهند (Shen and Tzempelikos, 2013). پارک و همکاران، سایه‌بان سیستم‌های نمای دوپوسته را در نظر گرفتند و زاویه بهینه سایه‌بان را برای چند معیار آسایش بصری از جمله خیرگی به دست آوردند (Park et al., 2004). تورس و ساکاماتو در پژوهشی به بهینه‌سازی نمای ساختمان‌ها پرداختند به نحوی که حداکثر ایلمیننس و حداقل خیرگی به دلیل نور روز تأمین شود (Torres and Sakamoto, 2007). آکوستا و همکاران به



آسایش بصری عموماً از طریق ارزیابی تعدادی از فاکتورهایی که رابطه بین احتیاجات انسانی و محیط نوری را مشخص می‌کنند، مطالعه شده است، از قبیل میزان نور، یکپارچگی نور، کیفیت نور در ارائه رنگ‌ها و پیش‌بینی خطر خیرگی برای ساکنین. شکل 1 نشان دهنده مجموع شاخص‌های آسایش بصری با گذشت زمان است. در دو دهه گذشته، پژوهش‌ها نشان می‌دهد که معیار قابل اعتماد برای ارزیابی آسایش بصری بیشتر خیرگی بوده است (Carlucci, Causone, De Rosa, and Pagliano, 2015).

1-2-2- خیرگی¹

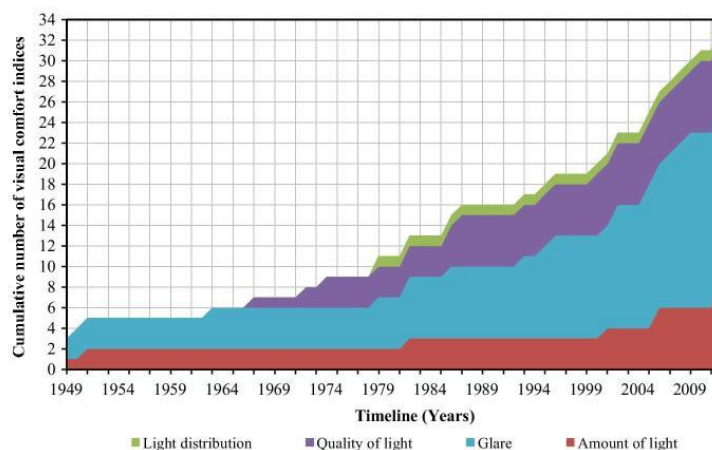
خیرگی به عنوان شرایط خاصی که می‌تواند سبب ناراحتی شود و یا عملکرد بصری، دید و قابلیت شناسایی جزئیات و اشیا را کاهش دهد تعریف می‌شود و ناشی از توزیع نامناسب روشنایی و یا تقابل بالای روشنایی در میدان بینایی است. این یک پدیده نوری است که سبب مشکل دیدن استفاده‌کنندگان از یک محیط نوری به دلیل نور طبیعی یا مصنوعی خیلی روشن می‌شود. در کتاب راهنمای نورپردازی انجمن مهندسی روشنایی شمال آمریکا IESNA خیرگی به این صورت تعریف شده است:

بررسی آسایش بصری و خیرگی در فضاهای مسکونی پرداختند و نسبت بازشو به دیوار، شکل، اندازه و موقعیت بازشو و میزان انعکاس دیوار انتهایی آن را در ارزیابی در نظر گرفتند و به این نتیجه رسیدند بازشوهایی که در موقعیت بالاتر قرار گرفته بودند نسبت به بازشوهایی مرکز، آسایش بصری بیشتری در انتهای اتاق داشتند (Acosta, Campano, and Molina, 2016). چه از نتایج پژوهش‌ها به دست می‌آید این است که معماران و طراحان روشنایی، اغلب در کنترل خیرگی در پروژه‌های معماری هم در داخل و خارج و هم منابع نور طبیعی و مصنوعی، دچار چالش هستند و ارائه یک معیار ثابت در ساختمان‌هایی با کاربری متفاوت و در اقلیم‌های متفاوت امکان‌پذیر است.

1-2-1- مبانی نظری پژوهش

1-2-1-1- آسایش بصری

آسایش بصری در استاندارد اروپا EN 12665 به این صورت تعریف می‌شود: «شرایط ذهنی بصری لذت بخش ناشی از محیط بصری» (EN 12665, 2011) این امر در مرحله اول به شرایط فیزیولوژی چشم انسان بستگی دارد. در مرحله دوم به کمیت‌های فیزیکی که میزان نور و توزیع آن را در فضا مشخص می‌کنند و در مرحله سوم به انتشار طیفی از منبع نور وابسته است.



شکل 1- شاخص‌های بصری پیشنهاد شده در طول زمان

Fig.1- Suggested visual indices over time

احساس تولید شده به وسیله روشنایی در میدان بصری که بیشتر از روشنایی است که چشم‌ها با آن سازگار شده‌اند و موجب آزار، ناراحتی و یا از دست دادن عملکرد بصری و دید می‌شود (IESNA, 2000).

گاهی خیرگی زمانی اتفاق می‌افتد که میزان نوری که به چشمان مشاهده کننده می‌رسد خیلی زیاد است یا زمانی که یک مشاهده کننده محدوده و رنج وسیعی از روشنایی را در یک میدان بصری معین تجربه می‌کند. در این حالت به آن خیرگی ناتوان کننده² یا خیرگی فیزیولوژیکی³ گفته می‌شود که شامل کاهش فوری عملکرد بصری و ناتوانی برای دیدن اشیاء مشخص است. میزان بیش از حد نور موجب واکنش‌های نورگریزی در افراد شده که موجب دوبینی و چشمک زدن در افراد می‌شود. در واقع این نوع خیرگی می‌تواند با کاهش روشنایی شبکه به وسیله تاریک کردن بخش‌های خیلی روشن میدان بصری یا کاهش روشنایی تمام میدان بصری، حل شود. نوع دیگر خیرگی، خیرگی ناراحت کننده⁴ یا خیرگی سایکولوژیکی⁵ است. تقابل شدید بین بخش‌های روشن و تاریک میدان بصری موجب تنزل تدریجی عملکرد بصری شده و منجر به خستگی زودرس چشم و متعاقباً احساس ناراحتی و یا علائمی نظیر سردرد می‌شود (Werner K E Osterhaus, 2005). اصطلاح «خیرگی ناراحت کننده» به حالتی اطلاق می‌شود که احساس ناراحتی درک می‌شود و لزوماً به معنای کاهش عملکرد بصری نیست. نتایج پژوهش‌های مربوط به خیرگی ناراحت کننده، شامل تعداد زیادی روابط تحلیلی است که معمولاً درجه خیرگی را با یک شاخص بیان می‌کند (Bellia, Cesarano, Iuliano, and Spada, 2008).

1-2-3- شاخص‌هایی برای ارزیابی خیرگی

خیرگی پدیده‌ای پیچیده است و رویکردهای متفاوتی در ارزیابی آن برای محاسبه قابلیت‌های ایجاد ناراحتی به کار گرفته شده‌اند. روش مستقیم شامل اندازه‌گیری و محاسبه روشنایی یک منبع نوری مشخص است که توسط یک نقطه مشاهده معین دیده می‌شود.

دقیق‌ترین رویکرد، نسبت خطر خیرگی به تقابل روشنایی یک شیء در میدان بصری یک مشاهده کننده است. سایر شاخص‌های خیرگی بر اساس معادلاتی است که تعدادی از فاکتورهای کلیدی را به قضاوت‌های ذهنی درجه ناراحتی تجربه شده در محیط‌های داخلی مربوط می‌کند (Osterhaus, 2005). در اصل، این شاخص‌ها به تقابل بین روشنایی منبع خیرگی، منبع اندازه زاویه دیده شده از دیدگاه مشاهده کننده و روشنایی پس زمینه، همان گونه که از موقعیت مشاهده کننده دیده می‌شود، توجه دارد. این فاکتورها، به صورت کلی به شیوه زیر ترکیب شده‌اند (Linney, 2008).

$$G = \left(\frac{L_s^e \cdot \omega_s^f}{L_b^g \cdot f(P)} \right),$$

L_b روشنایی پس زمینه است (متوسط روشنایی در میدان دید با منبع خیرگی حذف شده) L_s روشنایی منبع خیرگی است ω_s زاویه فضایی متناظر به وسیله منبع با توجه به چشم مشاهده کننده است. P شاخص موقعیت است که با توجه به موقعیت منبع خیرگی در میدان دید محاسبه می‌شود. توان‌های e ، f و g وزن مناسبی به هر کدام از عوامل متغیر می‌دهد و بر طبق فرمول خاص خیرگی متفاوت می‌شود. چندین معیار با ساختار اساسی این معادله متناسب هستند. شاخص خیرگی بریتانیا (BGI)، شاخص خیرگی نور روز (DGI)، شاخص خیرگی CIE (CGI)، شاخص خیرگی یکپارچگی (UGR). بر طبق این مدل (1) منابع روشن تر و بزرگ تر خطر خیرگی را افزایش می‌دهند. (2) یک روشنایی پس زمینه روشنتر، خطر خیرگی را کاهش می‌دهد. (3) اگر منبع خیرگی دورتر از مرکز میدان دید باشد، احتمال ناراحتی مشاهده کننده بیشتر است (A. J. and C. F. R. Jakubiec, 2011).

برای ارزیابی خیرگی، عموماً از پنج شاخص زیر استفاده می‌شود:

احتمال آسایش بصری⁶ (VCP)، شاخص خیرگی CIE⁷ (CGI)، شاخص خیرگی ناراحت کننده⁸ (DGI)، نسبت خیرگی یک‌نواخت⁹ (UGR)، احتمال خیرگی ناراحت کننده¹⁰ (DGP). عموماً برای ارزیابی خیرگی ناشی از نور روز از شاخص DGP استفاده می‌شود که در این پژوهش



در جبهه جنوبی قرار گرفته است و هیچ مانع بصری در مجاورت آن وجود ندارد. پنجره کلاس در جبهه جنوبی واقع و جهت صندلی‌ها به سمت غرب است. ویژگی‌های نوری سطوح استفاده شده، در جدول شماره 2 بیان شده است.

جدول 2- میزان انعکاس سطوح مختلف

Tab.2- The reflection of different surfaces

درصد انعکاس	نوع مصالح
70 درصد	میزان انعکاس دیوار
70 درصد	میزان انعکاس سقف
40 درصد	میزان انعکاس کف
50 درصد	میزان انعکاس مبلمان
80 درصد	میزان عبور بصری پنجره‌ها
40 درصد	میزان عبور بصری پنجره‌های رنگی
50 درصد	میزان انعکاس سایه بان
20 درصد	میزان انعکاس زمین

3-2- تنظیم اطلاعات آب‌وهوایی و مدل آسمان

اطلاعات آب‌وهوایی بر اساس فایل اقلیمی ایستگاه هواشناسی یزد در نظر گرفته شد و با توجه به معیارهای انتخاب شده، نتایج به صورت لحظه‌ای است.

4-2- تنظیمات رادیانس

در طول پژوهش از اطلاعات جدول 3 در پارامترهای رادیانس استفاده شد. این پارامترها شامل بازتاب محیط (ab)، تقسیم محیطی (ad)، نمونه محیطی (as)، دقت محیط (aa) و رزولوشن محیط (ar) است.

جدول 3- پارامترهای استفاده شده در رادیانس

Tab.3- Radiance parameters

Ambient bounces (-ab)	2
Ambient divisions (-ad)	1024
Ambient supersamples (-as)	1024
Ambient resolution (-ar)	128
Ambient accuracy (-aa)	0.25

5-2- اعتبارسنجی نرم‌افزار

برای بهره‌گیری صحیح از ابزارهای شبیه‌سازی در فرایند طراحی و ارزیابی، لازم است اعتبار آنها از طریق روش‌های علمی بررسی شود، چرا که اعتبار و دقت چنین ابزارهایی تحت تأثیر عوامل مختلف است و متناسب

نیز از همین شاخص استفاده شده است. مقادیر این شاخص در چهار مقیاس خیرگی به شرح جدول 1 است.

جدول 1- مقادیر DGP در مقیاس‌های متفاوت خیرگی

Tab.1- DGP values on different glare levels

DGP	درجه احساس خیرگی
>0.45	غیر قابل تحمل
0.40-0.45	آزار دهنده
0.35-0.4	قابل درک
0.35<	غیر قابل درک

2- روش تحقیق

1-2- شبیه‌سازی

از آنجایی که اندازه‌گیری میدانی سطوح نور روز در تمام طول سال هزینه‌بر و وقت‌گیر است، در این پژوهش از نتایج شبیه‌سازی به منظور تحلیل خیرگی استفاده شد. مدل‌های سه بعدی در محیط Grasshopper که پلاگینی برای Rhinoceros 3D است، با اندازه تقریبی مشابه با شرایط واقعی ایجاد شده و شبیه‌سازی با استفاده از ابزار HoneyBee Plus در محیط Grasshopper اجرا شد. محیط HoneyBee Plus از مجموعه‌ای از ارزیابی‌های عملکردی با استفاده از ابزارهای اعتبارسنجی شده مانند Radiance پشتیبانی می‌کند. این نرم‌افزار از موتور Radiance برای تجسم شرایط نوری، از موتور Daysim برای بررسی معیارهای مبتنی بر اقلیم و نقشه خیرگی سالانه و از موتور Evalglare برای آنالیز خیرگی استفاده می‌کند و قابلیت ارزیابی همزمان معیارهای دینامیک و پویا را داراست. پشتیبانی موتورهای مختلف معتبر ارزیابی نور روز از HoneyBee Plus اعتبار این نرم‌افزار را در شبیه‌سازی تأیید می‌نماید. ساعات بحرانی خیرگی نیز از طریق پلاگین Ladybug در محیط Grasshopper به دست آمد. به منظور بهینه‌سازی بازوها از ابزار Colibri استفاده شد که بخشی از ابزار TToolbox در محیط Grasshopper است.

2-2- تنظیمات مدل

ابعاد مدل مورد مطالعه بر اساس متوسط ابعاد یک کلاس درس دانشگاهی 5×7 متر مربع در نظر گرفته شد. کلاس

مدل مورد بررسی کلاسی در جبهه جنوب شرقی ساختمان دانشگاه پیام نور مهریز به ابعاد 5×7 متر مربع و در طبقه اول و شامل 4 پنجره به ابعاد 1×2 متر مربع است. یک میز به ابعاد 0.6×1.2 متر مربع با ارتفاع 0.8 متر در فاصله تقریبی 0.3 متر از پنجره جای گذاری و به صورت عمود بر دومین پنجره در نظر گرفته شد. (تصویر 5).

در ابتدا جدولی مطابق زیر تنظیم که در آن مقادیر ایلومینانس افقی اندازه گیری شد. سپس با لوکس متر HS-1010 و سنجیده شده توسط HoneyBee Plus بعد از شبیه سازی و مقادیر اختلاف آن‌ها از ساعت 8:00 تا 16:00 وارد شد. جدول 5 مقادیر ایلومینانس و درصد مقادیر اختلاف را در روز 6 دی ماه نشان می‌دهد. در شکل 3 نیز میزان ایلومینانس اندازه گیری شده توسط لوکس متر HS-1010 و میزان ایلومینانس سنجیده شده توسط HoneyBee Plus برای درک بهتر، نمایش داده شده است.

آن چه از جدول و نمودار برمی‌آید، نشان می‌دهد که به طور متوسط، مقادیر ایلومینانس سنجیده شده در شبیه سازی حدود 5.9 درصد بالاتر از مقادیر اندازه گیری شده بود. این خطا عمدتاً به دلیل عدم تطابق وضعیت آسمان در شبیه سازی با آسمان واقعی، همچنین دقیق نبودن میزان انعکاس سطوح مختلف، وجود مبلمان در کلاس و مجاورت های اطراف آن است که خطای منطقی به نظر می‌رسد و قابل چشم پوشی است. بنابراین با توجه به نتایج می‌توان صحت نرم افزار HoneyBee Plus را در شبیه سازی تأیید نمود.

3- نتایج و بحث

همان گونه که قبلاً مطرح شد، از شبیه سازی به منظور انجام نتایج قابل تعمیم استفاده شد. در ابتدا به منظور تعیین زمان های بحرانی که در آن‌ها احتمال خیرگی به حداکثر می‌رسد، با استفاده از پلاگین Ladybug در محیط Grasshopper مدل مورد بررسی شبیه سازی شد. با توجه به این که خیرگی تا حد زیادی به موقعیت ناظر و زاویه دید او وابسته است، تحلیل‌ها در چهار نقطه صورت گرفت.

کاربری، نوع بنا، اقلیم و داده‌ها، نرم افزار مناسب طلب می‌کند. در این پژوهش به منظور اعتبار سنجی نرم افزار HoneyBee Plus از پژوهش میدانی بهره گیری شد. به این منظور، میزان ایلومینانس صفحه کار در مدل مورد بررسی در واقعیت اندازه گیری شد و نتایج میدانی با نتایج شبیه سازی مقایسه شد تا درصد مقادیر اختلاف به دست آید. اندازه گیری در روز 6 دی طی ساعات 8:00 تا 16:00 با گام‌های زمانی نیم ساعت انجام شد. میزان انعکاس تمامی سطوح به شرح جدول 4 است.

جدول 4- میزان انعکاس سطوح متفاوت

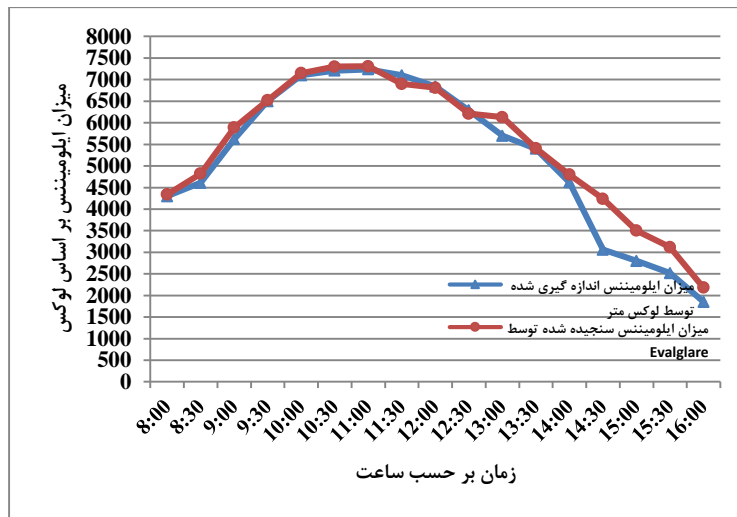
Tab.4- The reflection of different surfaces

سطح مورد نظر	میزان انعکاس سطوح
دیوار	70%
سقف	70%
کف	40%
میز	50%
سطح مورد نظر	میزان انعکاس سطوح
دیوار	70%
سقف	70%
کف	40%
میز	50%

همچنین از یک لوکس متر HS-1010 به منظور ارزیابی شرایط نوری استفاده شد (شکل 2). لوکس متر در فاصله 1 متری از محور دومین پنجره قرار داده شد تا در شبیه سازی نیز میزان ایلومینانس در این نقطه مشخص بر همین اساس به دست بیاید.



شکل 2- موقعیت لوکس متر
Fig.2- The luxmeter position



شکل 3- مقایسه میزان ایلمینانس افقی اندازه گیری شده توسط لوکس متر HS-1010 و سنجیده شده توسط HoneyBee Plus
 Fig.3- Comparison of the horizontal Illuminance measured by the HS-1010 lux meter and measured by HoneyBee Plus

جدول 5- مقایسه میزان ایلمینانس افقی اندازه گیری شده توسط لوکس متر HS-1010 و سنجیده شده توسط HoneyBee Plus
 Tab.5- Comparison of the horizontal Illuminance measured by the HS-1010 lux meter and measured by HoneyBee Plus

ساعت	میزان ایلمینانس اندازه گیری شده توسط لوکس متر HS-1010	میزان ایلمینانس سنجیده شده توسط HoneyBee Plus	درصد مقادیر اختلاف
8:00	4300	4340	0.9
8:30	4610	4820	4.3
9:00	5623	5890	4.5
9:30	6500	6520	0.3
10:00	7100	7150	0.6
10:30	7210	7300	1.2
11:00	7240	7310	0.9
11:30	7100	6900	-2.8
12:00	6840	6810	-0.4
12:30	6290	6210	-1.2
13:00	5700	6130	7
13:30	5400	5410	0.1
14:00	4620	4800	3.7
14:30	3060	4240	27.8
15:00	2800	3500	20
15:30	2520	3120	19.2
16:00	1850	2180	15.1
متوسط درصد مقادیر اختلاف: 5.9 درصد			

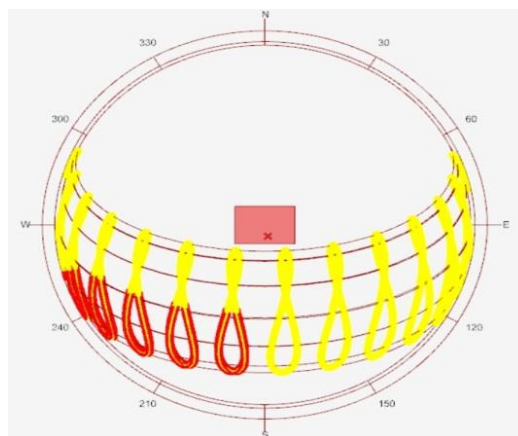
3-1- ارزیابی شاخصه‌های کالبدی

شاخصه‌های کالبدی مورد استفاده در این پژوهش شامل نسبت پنجره به دیوار (WWR)، طول سایه‌بان (Shading Length)، موقعیت ناظر (View Point)، میزان عبور بصری پنجره (Glass Transmission) و درصد شیشه‌های رنگی (Colorful Glass) است. مدل مورد نظر یک کلاس درس دانشگاهی به ابعاد 5×7 متر مربع است. مشخصات مدل اولیه در جدول شماره 6 مشخص شده است. لازم به ذکر است، WWR نسبت پنجره به دیوار، LShading طول سایه بان، VP موقعیت ناظر، Tglass ضریب عبور بصری پنجره و Cglass درصد شیشه‌های رنگی است.

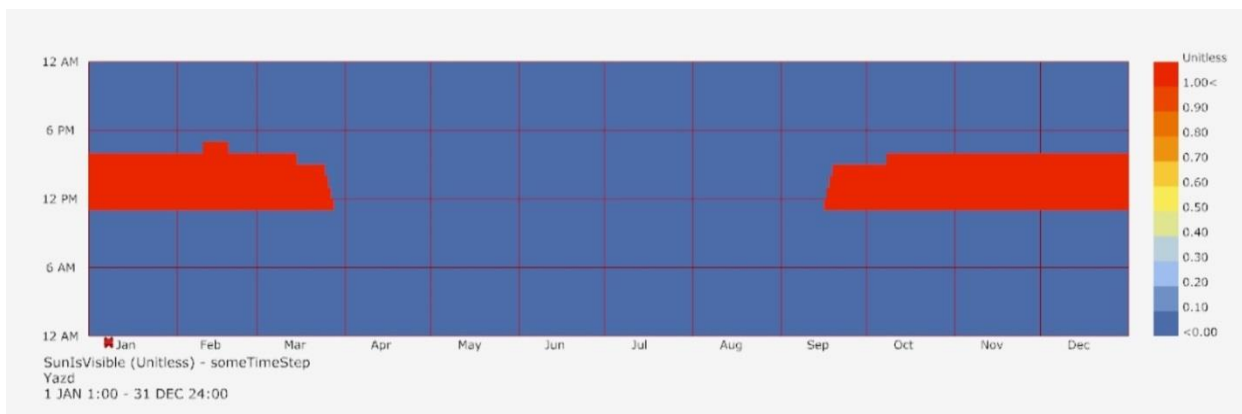
در ابتدا به منظور تعیین اولویت تأثیر هر کدام از پارامترها، میزان هر کدام در حالی که بقیه پارامترها ثابت نگه داشته شده بودند، در گام‌های متفاوت، تغییر پیدا کرد. در جدول 7 میزان تغییرات هر کدام از پارامترها ارائه شده است.

نسبت پنجره به دیوار از 10 درصد تا 90 درصد، طول سایه‌بان از 10 سانتیمتر تا 80 سانتیمتر، موقعیت ناظر در سه نقطه 1 و 2 و 3 (در فاصله 80 سانتیمتری دیوار جنوبی و در فواصل 1.5 و 3 و 4.5 متری دیوار شرقی)، میزان عبور بصری پنجره‌ها از 40 تا 80 درصد و درصد شیشه‌های رنگی از 10 تا 50 درصد در نظر گرفته شد.

این نقاط به فاصله 0.8 متر از دیوار جنوبی بودند و به ترتیب با گام‌های 1 متری از دیوار شرقی فاصله می‌گرفتند (بر اساس چیدمان صندلی در کلاس). جهت دید نیز رو به دیوار غربی (موقعیت وایت برد) در نظر گرفته شد. آن چه از نتایج به دست می‌آید این است که در هر چهار نقطه مورد بررسی، از اواسط سپتامبر تا اواخر مارچ حضور نور مستقیم خورشید در فضا و به تبع آن خیرگی به چشم می‌خورد که عمدتاً بین ساعت 12 تا 16 اتفاق می‌افتد. در اشکال 4 و 5 زمان‌های بحرانی خیرگی در نقطه 2 نشان داده شده است. در این مقاله ساعت 14:00 روز انقلاب زمستانی (21 سپتامبر) به عنوان زمان مورد استفاده در پژوهش در نظر گرفته شد.



شکل 4- تعیین زمان‌های بحرانی برای خیرگی
Fig.4- Determine critical times for glare



شکل 5- تعیین زمان‌های بحرانی برای خیرگی
Fig.5- Determine critical times for glare



زیرا خیرگی بسته به موقعیت ناظر و جهت دید او تغییر می‌کند. با توجه به موقعیت ناظر که در حالت نشسته است و ارتفاع پایینی دارد، تغییر طول سایه‌بان تأثیر چندانی در درک خیرگی نخواهد داشت. افزایش درصد شیشه‌های رنگی کمترین تأثیر را در تغییرات میزان خیرگی داراست (شکل 6).

در ادامه به منظور بهینه سازی بازشوها از منظر خیرگی، از ابزار Colibri در محیط Grasshopper بهره گرفته شد. با توجه به توضیحات بالا، 4800 حالت به صورت زیر، توسط این ابزار به دست آمد (جدول 9).

طبق جدول 8 بررسی اولیه نشان می‌دهد، تغییر در میزان نسبت پنجره به دیوار (WWR) بیشترین تأثیر را در تغییرات DGP داراست (98 درصد)، زیرا تغییرات ابعاد پنجره ایلومینانس ورودی نور روز را تا حد زیادی تغییر می‌دهد و افزایش آن موجب افزایش میزان خیرگی می‌شود. تغییر در میزان عبور بصری پنجره نیز بعد از نسبت پنجره به دیوار، موجب تغییر قابل توجهی در میزان DGP می‌شود (27 درصد). همان گونه که مشخص است، تغییر نقطه دید نیز در تغییرات DGP مؤثر است (16 درصد).

جدول 6- مشخصات کالبدی مدل اولیه

Tab.6- Basic Model Physical Specifications

WWR	LShading	VP	Tglass	Cglass	DGP
0.4	0.5	1	0.8	0.25	0.760017

جدول 7- میزان تغییرات هر کدام از پارامترها

Tab.7- The rate of variation of each parameters

میزان تغییر									پارامتر مورد بررسی
90	80	70	60	50	40	30	20	10	WWR (درصد)
	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	LShading (متر)
						3	2	1	VP (-)
				80	70	60	50	40	Tglass (درصد)
				50	40	30	20	10	Cglass (درصد)

جدول 8- درصد تغییرات پارامترهای متفاوت

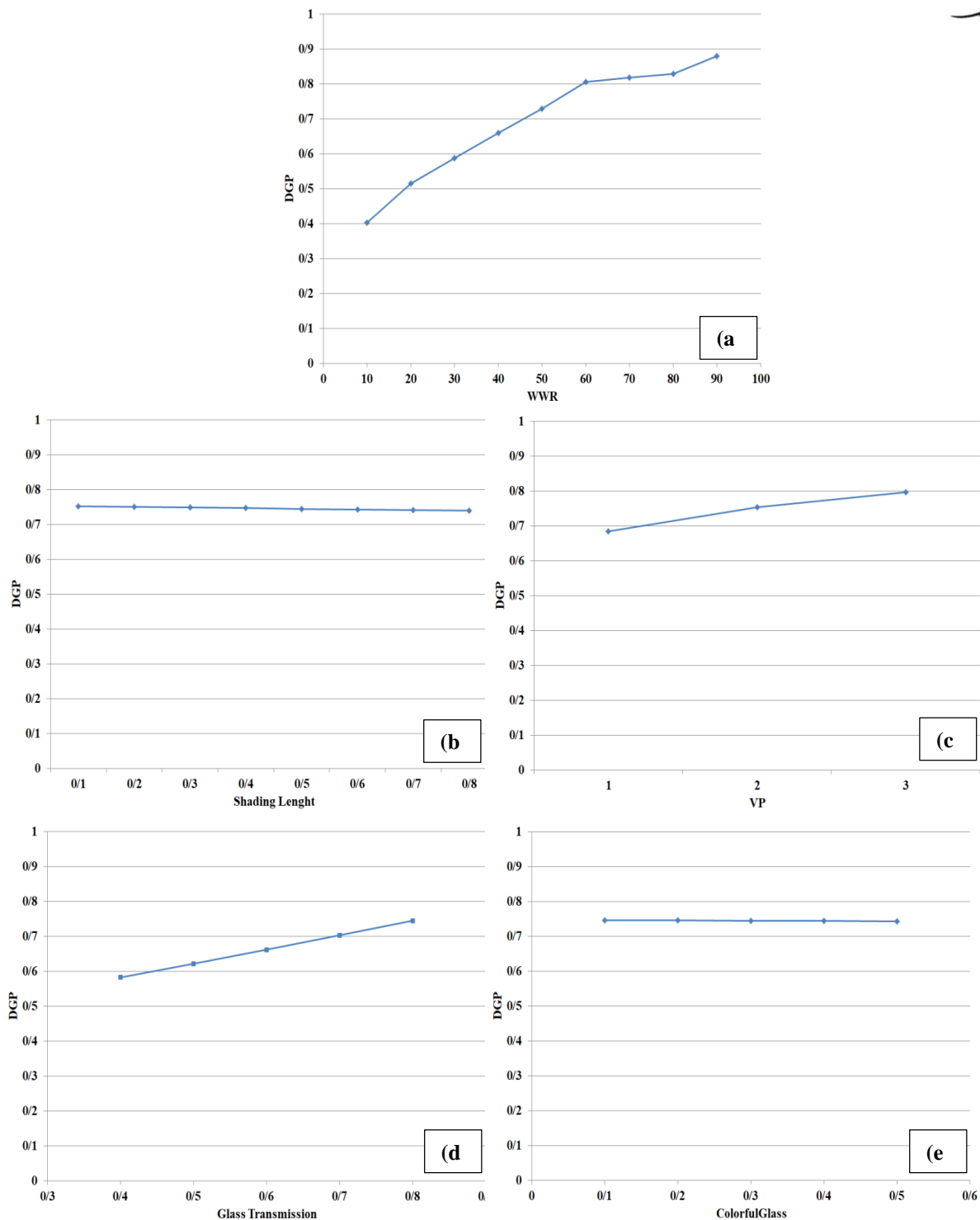
Tab.8 - The percentage of changes in different parameters

درصد تغییرات	پارامتر مورد بررسی
98	WWR (درصد)
-1	LShading (متر)
16	VP (-)
27	Tglass (درصد)
0.3	Cglass (درصد)

جدول 9- تعداد حالات ترکیب پارامترهای کالبدی پنجره

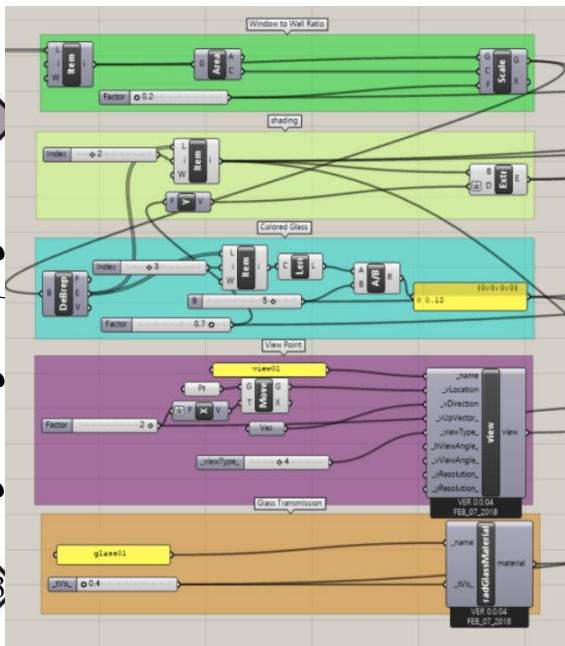
Tab.9 - The number of combinations of physical parameters of the window

WWR	LShading	VP	Tglass	Cglass
20-90	0.1-0.8	0-2	40-80	10-50
8 حالت	8 حالت	3 حالت	5 حالت	5 حالت
$8 \times 8 \times 3 \times 5 \times 5 = 4800$				



شکل 6- تاثیر پارامترهای متفاوت بر میزان خیرگی؛ (a): نسبت پنجره به دیوار، (b): طول سایه بان، (c): نقطه دید، (d): عبور بصری شیشه و (e): درصد شیشه های رنگی

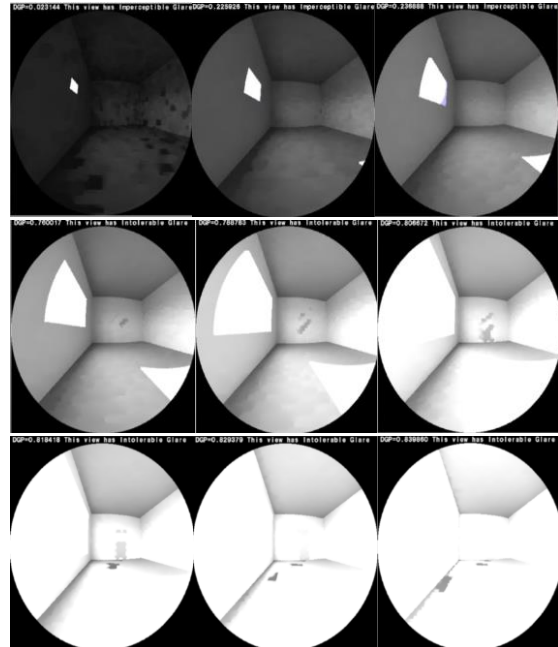
Fig.6- Effect of different parameters on the glare; (a): the window to the wall ratio, (b): the length of the shading, (c): the view point, (d): the glass transmission and (e): the percentage of colorful glasses



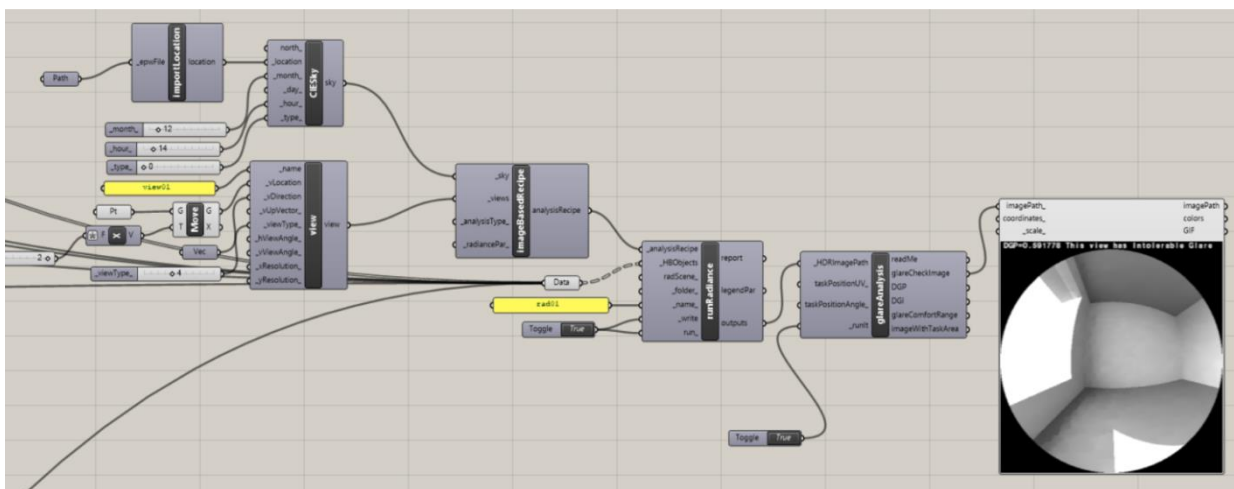
شکل 8- بخشی از الگوریتم استفاده شده
Fig.8- Part of the used algorithm

نتایج سپس برای اعمال گرافیک در سایت Design Explorer به آدرس <https://tt-acm.github.io/DesignExplorer> بارگذاری شدند و شکل شماره 10 حاصل شد. جدول 10 تعدادی از حالات ترکیب پارامترهای کالبدی پنجره را نشان می‌دهد.

شکل 7 تغییرات نسبت پنجره به دیوار در درک خیرگی و اشکال 8 و 9 بخشی از الگوریتم استفاده شده بر اساس پارامترهای مطرح شده برای ارزیابی DGP را نشان می‌دهد.



شکل 7- تغییرات نسبت پنجره به دیوار در درک خیرگی
Fig.7- Window to wall ratio changes in perceived glare



شکل 9- بخشی از الگوریتم استفاده شده
Fig.9- Part of the used algorithm

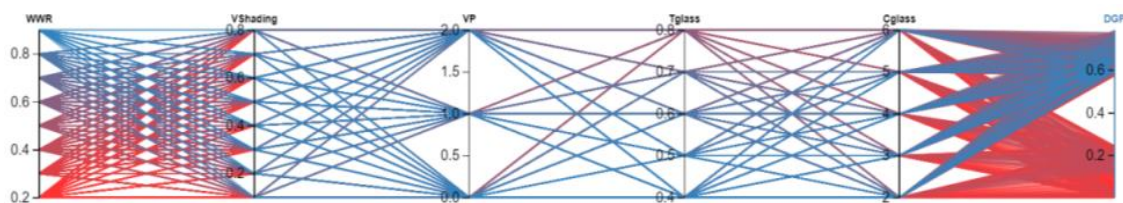
در مجموع 200 حالت ترکیب، ارائه دهنده DGP بین 0.2 تا 0.35 بود. ولی تنها در حالتی که نسبت پنجره به دیوار 30 درصد است و فقط در نقطه 1 این امکان وجود دارد. به عبارتی در سایر نقاط امکان جلوگیری از خیرگی با پارامترهای مطرح شده وجود ندارد. در حالت نسبت پنجره به دیوار 20 درصد، نتایج DGP زیر 0.2 می شود که قابل قبول نیست.

همان گونه که از نمودار مشخص است، نتایج عمدتاً در محدوده زیر 0.28 و بالای 0.55 قرار گرفته اند. با توجه به این که در مورد خیرگی، میزان DGP بین 0.2 تا 0.35 به صورت خیرگی نامحسوس در نظر گرفته شده و مطلوب است، نتایج DGP با توجه به شکل 11 در این محدوده بزرگنمایی شد تا مشخص شود کدام شاخصه های کالبدی ارائه کننده این میزان است.

جدول 10- تعدادی از حالات ترکیب پارامترهای کالبدی پنجره

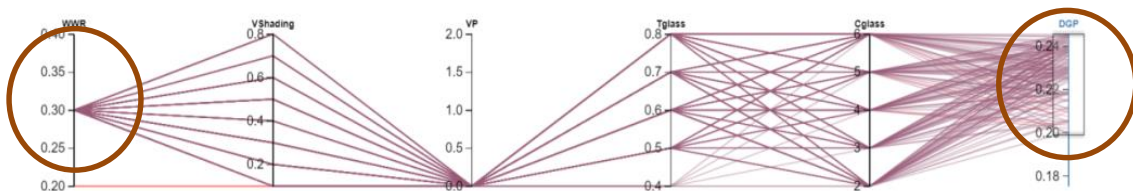
Tab.10- Some of Combination of the physical parameters of the window

WWR	Sahading	Cglass	Tglass	VP	DGP
0.2	0.1	2	0.4	0	0.055889
0.3	0.1	2	0.4	0	0.209969
0.4	0.1	2	0.4	0	0.586305
0.5	0.1	2	0.4	0	0.595223
0.6	0.1	2	0.4	0	0.600992
0.7	0.1	2	0.4	0	0.604736
0.8	0.1	2	0.4	0	0.608346
0.9	0.1	2	0.4	0	0.61192
0.2	0.2	2	0.4	0	0.04133
0.3	0.2	2	0.4	0	0.205489
0.3	0.3	2	0.4	0	0.197876



شکل 10- ترکیب پارامترهای کالبدی پنجره

Fig.10- Combination of the physical parameters of the window



شکل 11- بزرگنمایی نتایج DGP بین 0.2 تا 0.35

Fig.11- Magnification of DGP results between 0.2 to 0.35



در این شبیه سازی با توجه به این که نسبت پنجره به دیوار 30 درصد تأمین کننده خیرگی غیر قابل درک است و در نسبت پنجره به دیوار 20 درصد نیز میزان DGP کمتر از 0.2 می شود، این دو نسبت حذف شده و نسبت پنجره به دیوار 40 تا 80 درصد مد نظر قرار گرفت. طول سایه بان از 0.5 تا 0.8 متر در نظر گرفته شده و به دلیل اهمیت نقطه دید، تعداد آن افزایش پیدا کرد. دو پارامتر طول قفسه از 0.3 تا 0.5 متر و ارتفاع قفسه از 0.5 تا 0.8 متر به پارامترها اضافه شد.

شکل 12 حالات مختلف موجود را نشان می دهد. در ادامه با محدود کردن نتایج، مشخص شد که قفسه های نوری در کاهش میزان خیرگی در نسبت های پنجره به دیوار 70 و 80 درصد، تأثیری ندارند، ولی در نسبت های پنجره به دیوار 40، 50 و 60 درصد استفاده از این تکنیک، موجب کاهش میزان خیرگی به صورت نامحسوس بین 0.2 تا 0.35 می شود (شکل 13).

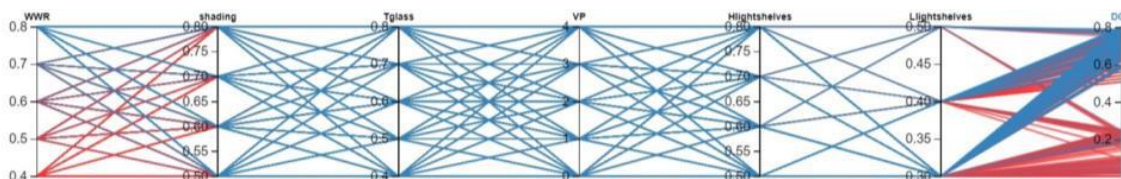
در نسبت های بالاتر نیز DGP بیشتر از 0.35 می شود. ولی طول سایه بان، میزان عبور بصری شیشه و درصد شیشه های رنگی در تمامی ابعاد و درصدهای داده شده، خیرگی غیر قابل درک را تأمین می کنند. این امر نشان دهنده اهمیت نسبت پنجره به دیوار و نقطه دید ناظر در ارزیابی خیرگی است.

همان گونه که از نتایج مشخص است، ترکیب حالات بهینه بسیار محدود است و تغییر در مؤلفه های کالبدی پنجره به تنهایی، عملکرد مناسبی در ممانعت از خیرگی در فضا ندارد. یکی از راهکارهای مناسب در این زمینه که در مقالات متعددی به آن اشاره شده است، استفاده از قفسه های نوری است. بنابراین شبیه سازی دیگری با استفاده از قفسه های نوری تنظیم شد و مؤلفه شیشه های رنگی به دلیل تأثیر اندک حذف و دو مؤلفه طول قفسه (Length lightshelves) و فاصله آن تا لبه بالایی پنجره (Height lightshelves) به مؤلفه های مورد بررسی اضافه شد. شبیه سازی بر اساس حالت های جدول 11 و در مجموع 6000 حالت انجام شد.

جدول 11- تعداد حالات ترکیب پارامترهای کالبدی پنجره و قفسه های نوری

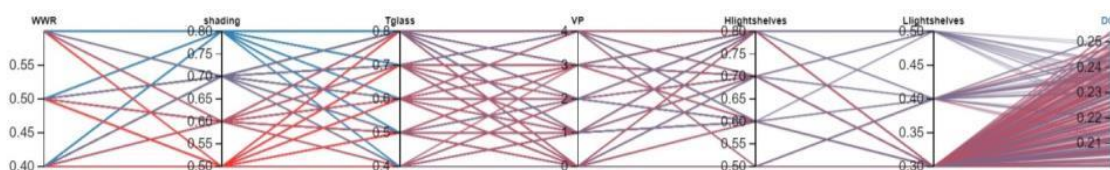
Tab.11- Number of scenarios of combination the physical parameters of the window and light shelves

WWR	LShading	VP	Tglass	lightshelves-L	lightshelves-H
0.4-0.8	0.5-0.8	0-4	0.4-0.8	0.3-0.5	0.5-0.8
حالت 5	حالت 4	حالت 5	حالت 5	حالت 3	حالت 4
$5 \times 4 \times 5 \times 5 \times 3 \times 4 = 6000$					



شکل 12- ترکیب پارامترهای کالبدی پنجره و قفسه های نوری

Fig.12- Combination of the physical parameters of the window and light shelves



شکل 13- بزرگ نمایی نتایج DGP بین 0.2 تا 0.35

Fig. 13- Magnification of DGP results between 0.2 to 0.35

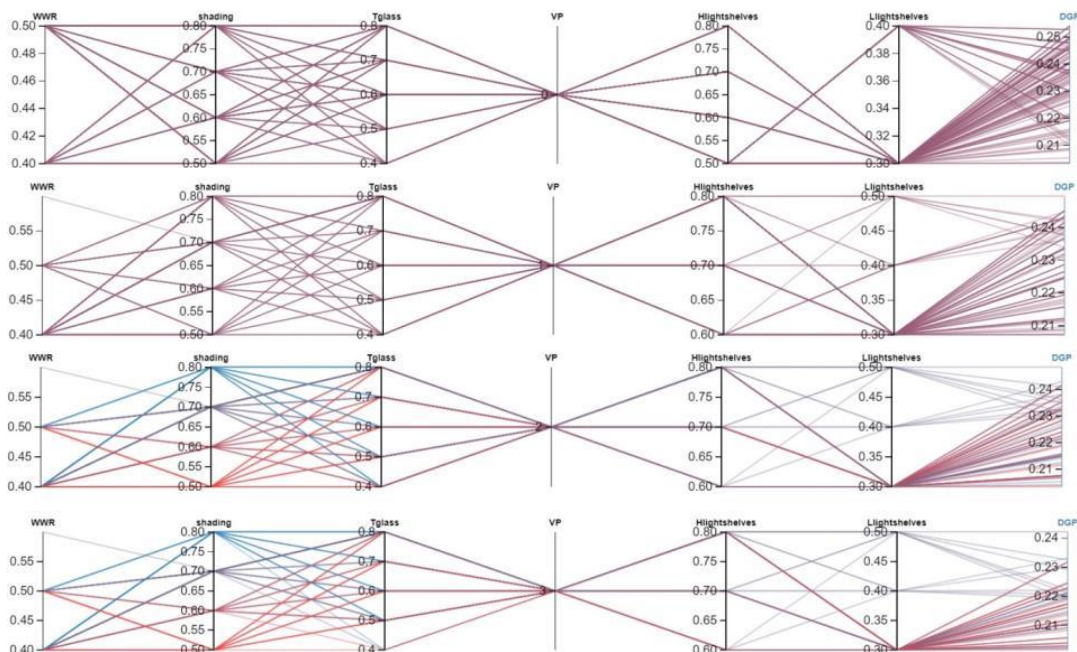
مورد بررسی قرار گرفتند تا مشخص شود که در تمامی نقاط خیرگی به صورت غیر قابل درک باشد (شکل 14). آن چه از نتایج برمی آید این است که در تمامی نقاط امکان حذف خیرگی با استفاده از قفسه‌های نوری وجود دارد. مطابق نمودار 6 تنها در موقعیت 0 و در حالت نسبت پنجره به دیوار 60 درصد، قفسه‌های نوری مناسب نبود و نتایج DGP بالای 0.35 می‌شود.

جدول 12 تعدادی از حالات بهینه ترکیب را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است بر اساس نتایج در مجموع 144 حالت بهینه به دست آمد.

یکی از نکات مهم در تحلیل قبلی این بود که با ترکیب پارامترها، تنها در یک نقطه دید امکان حذف خیرگی وجود دارد. به منظور تحلیل دقیقتر این مسأله بعد از استفاده از قفسه‌های نوری، نقاط متفاوت دید به تفکیک

جدول 12- تعدادی از حالات بهینه ترکیب پارامترهای کالبدی پنجره
Tab.12- Some of optimized Combination of the physical parameters of the window

WWR	shading	Tglass	VP	H-lightshelves	L-lightshelves	DGP
0.4	0.7	0.5	2	0.6	0.3	0.215071
0.4	0.6	0.6	0	0.5	0.3	0.220857
0.4	0.7	0.6	2	0.6	0.3	0.222576
0.5	0.7	0.4	0	0.5	0.4	0.219744
0.5	0.8	0.4	0	0.5	0.4	0.219723
0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.4	0.230027
0.6	0.5	0.7	4	0.6	0.3	0.206617
0.6	0.6	0.7	4	0.6	0.3	0.206605
0.6	0.5	0.6	4	0.7	0.3	0.20125



شکل 14- ترکیب پارامترهای کالبدی پنجره و قفسه‌های نوری در موقعیت‌های دید متفاوت
Fig.14- Combination of the physical parameters of the window and light shelves in different view point



به تنهایی، عملکرد مناسبی در جلوگیری از خیرگی در فضا ندارد.

یکی از راهکارهای مناسب در این زمینه، استفاده از قفسه‌های نوری است. با حذف مؤلفه شیشه‌های رنگی و افزودن دو متغیر طول قفسه و فاصله آن تا لبه بالایی پنجره، 6000 حالت متفاوت ترکیب به دست آمد. استفاده از این تکنیک در کاهش میزان خیرگی در نسبت‌های پنجره به دیوار 70 و 80 درصد، تأثیری ندارد، ولی در نسبت‌های پنجره به دیوار کمتر از 60 درصد، موجب کاهش میزان خیرگی به صورت نامحسوس می‌شود.

پی‌نوشت

- ¹ Glare
- ² Disability Glare
- ³ Physiological Glare
- ⁴ Discomfort Glare
- ⁵ Psychological Glare
- ⁶ Visual Comfort Probability
- ⁷ CIE Glare Index
- ⁸ Discomfort Glare Index
- ⁹ Unified Glare Rating
- ¹⁰ Discomfort Glare Probability

منابع

- Acosta, I., Campano, M. Á., and Molina, J. F. (2016). Window design in architecture: Analysis of energy savings for lighting and visual comfort in residential spaces. *Applied Energy*, 168, 493–506. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.005>
- Bellia, L., Cesarano, A., Iuliano, G., and Spada, G. (2008). Daylight glare: a review of discomfort indexes. Detec. Retrieved from http://www.fedoa.unina.it/1312/1/Bellia_paper.pdf
- Carlucci, S., Causone, F., De Rosa, F., and Pagliano, L. (2015). A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47(7491), 1016–1033. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.062>
- EN 12665. (2011). Light and lighting – Basic terms and criteria for specifying lighting requirements. Belgium: European Committee for Standardization. <https://doi.org/2004R0726 - v.7 of 05.06.2013>

با توجه به نتایج، فارغ از نقطه دید، در مجموع 144 حالت بهینه به دست آمد که نشان دهنده میزان DGP بین 0.2 تا 0.35 است. این حالات بهینه بر اساس نسبت پنجره به دیوار 40 تا 60 درصد حاصل شده و در مورد سایر پارامترها، تمامی ابعاد و درصدها را شامل می‌شود. بنابراین قفسه‌های نوری ارتقا دهنده محدوده حالت‌های ترکیب است و طیف وسیعی از پارامترها را شامل می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور بهینه‌سازی بازشوها از لحاظ عملکرد خیرگی، یک کلاس درس دانشگاهی به ابعاد 5×7 متر مربع در نظر گرفته شد. در ابتدا ساعات بحرانی خیرگی با استفاده از نرم‌افزار تعیین شد. در ابتدا اولویت تأثیر پارامترهای مختلف تعیین شد. شاخصه‌های کالبدی مورد استفاده در این پژوهش شامل نسبت پنجره به دیوار، طول سایه‌بان، موقعیت ناظر، میزان عبور بصری پنجره و درصد شیشه‌های رنگی است. تغییر در میزان نسبت پنجره به دیوار (WWR) بیشترین تأثیر را در تغییرات DGP داراست (98 درصد). تغییر در میزان عبور بصری پنجره نیز بعد از نسبت پنجره به دیوار، موجب تغییر قابل توجهی در میزان DGP می‌شود (27 درصد). تغییر نقطه دید نیز در تغییرات DGP مؤثر است (16 درصد). علاوه بر این تغییر طول سایه‌بان تأثیر چندانی در درک خیرگی نخواهد داشت. افزایش درصد شیشه‌های رنگی کمترین تأثیر را در تغییرات میزان خیرگی داراست.

سپس با استفاده از شبیه‌سازی تأثیرات ترکیب پارامترهای کالبدی‌های متفاوت، مورد توجه قرار گرفت. در مجموع 4800 حالت متفاوت ترکیب پارامترها به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد تنها در حالت نسبت پنجره به دیوار 30 درصد با تغییرات سایر فاکتورها، بازه مطلوب خیرگی تأمین می‌شود. در حالت نسبت پنجره به دیوار 20 درصد، نتایج DGP زیر 0.2 می‌شود که قابل قبول نیست. در نسبت‌های بالاتر نیز DGP بیشتر از 0.35 می‌شود. بنابراین تغییر در مؤلفه‌های کالبدی پنجره



Park, C., et al., 2004. Real-time optimization of a double-skin facade based on lumped modelling and occupant preference. *Building and Environment*, 39 (8), 939–948.

Reinhart, C. (2004). Lights witch- 2002 :a model for manual and automated control of electric lighting and blinds. *Sol Energy*, 78, 15–28.

Shen, H., and Tzempelikos, A. (2013). Sensitivity analysis on daylighting and energy performance of perimeter offices with automated shading. *Building and Environment*, 59, 303–314. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.028>

Suk, J. Y., Schiler, M., and Kensek, K. (2013). Development of new daylight glare analysis methodology using absolute glare factor and relative glare factor. *Energy and Buildings*, 64, 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.020>

Torres, S.L., and Sakamoto, Y., 2007. Facade design optimization for daylight with a simple genetic algo- rithm. In: *Proceedings of Building Simulation 2007*, Beijing, 1162–1167.

Y.W. Lim, M.Z. Kandar, M.H. Ahmad, D.R. Ossen, M. A. A. (2012). Building facade design for daylighting quality in typical government office building, *Build. Environ*, 57, 307–316.

IESNA. (2000). *The Lighting Handbook. Illuminating Engineering Society of North America*;

Jakubiec, A. J. and C. F. R. (2011). Diva2.0: Integrating daylight and thermal simulations using rhino ceros 3d, daysim and energyplus. In the 12th Conference of BPSA, *Building Simulations* (pp. 2202–2209).

Jakubiec, J. A., and Reinhart, C. F. (2013). Predicting Visual Comfort Conditions in a Large Daylit Space Based on Long-Term Occupant Evaluations : a Field Study. 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, 3408–3415.

Linney, A. (2008). Maximum luminance and luminance ratio and their impact on users' discomfort glare perception and productivity in daylight offices. Victoria University of Wellington.

Osterhaus, W. K. E. (2005a). Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments. *Solar Energy*, 79(2), 140–158. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.11.011>

Osterhaus, W. K. E. (2005b). Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments. *Solar Energy*, 79(2), 140–158. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.11.011>