



بهینه سازی چند متغیره آسایش بصری و حرارتی در کلاس‌های مدارس شهر تبریز با توجه به ابعاد و تناسبات فضا (نمونه موردی: دبیرستان‌های مقطع دوم متوسطه)

الهام سلیقه¹، آیدا ملکی^{2*}، یاسر شهبازی³، عباس غفاری⁴

1- دانشجوی دکتری معماری اسلامی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

2- استادیار، معماری، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

3- دانشیار، معماری، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

4- دانشیار، معماری، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

* تبریز، صندوق پستی 5164736931، a.maleki@tabriziau.ac.ir

چکیده

روش بهینه سازی چند منظوره و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه راهکاری برای تسهیل دستیابی همزمان به متغیرهای گوناگون در ساختمان است. پرداختن به عملکردهای مختلف در ساختمان‌ها و شناسایی متغیرهای متنوع از دیگر نتایج مطالعات این حوزه هستند. پژوهش حاضر به دنبال بررسی تاثیر متغیرهای ابعادی و نسبت سطح و حجم کلاس درس بر آسایش بصری و حرارتی کاربران است. مدل مورد بررسی در این مطالعه، کلاس درس مقطع دوم متوسطه در شهر تبریز می‌باشد. به این منظور عملکرد مدل در مورد متغیرهای کفایت نور روز، احتمال خیرگی و آسایش حرارتی با توجه به داده‌های آب و هوایی شهر تبریز با استفاده از پلاگین‌های شبیه ساز در بستر نرم افزار راینو-گرس‌هپر مطالعه گردیده است. نتایج پژوهش نسبت سطح به حجم کلاس‌های درسی مطلوب را بین بازه 1.16 تا 1.69 معرفی می‌نماید. بررسی جداگانه اهداف و پاسخ‌های برتر هر هدف بیانگر این موضوع هستند که در اهداف میزان خیرگی و کفایت نور روز نسبت سطح به حجم کمتر در بازه مذکور و در هدف مربوط به آسایش حرارتی تطبیقی نسبت سطح به حجم بالاتر در این بازه مطلوبتر بوده‌اند.

کلیدواژگان: بهینه‌سازی، آسایش حرارتی، کفایت نور روز، خیرگی، کلاس درس

Multi-objective optimization of visual and thermal comfort in classrooms as a function of room dimensions and proportions (case study : secondary high schools in Tabriz city)

Elham Saligheh^{1*}, Aida Maleki^{2*}, Yaser Shahbazi³, Abbas Ghaffari⁴

1- PhD Student of Islamic Architecture, Department of Architecture and Urbanism, Islamic Art University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Assistant Professor, Department of Architecture and Urbanism, Islamic Art University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Associate Professor, Department of Architecture and Urbanism, Islamic Art University of Tabriz, Tabriz, Iran

4- Associate Professor, Department of Architecture and Urbanism, Islamic Art University of Tabriz, Tabriz, Iran

* P.O.B. 5164736931 Tabriz, Iran, a.maleki@tabriziau.ac.ir

Received: 6 Dec. 2023 Accepted: 26 Feb. 2024

Abstract

This study addresses the intricate design considerations that affect visual and thermal comfort in classrooms. By examining dimensional variables and the ratio of surface area to volume, the research aims to optimize these spaces for the well-being of users. Using simulation tools such as Honeybee, Ladybug and Octopus, as well as an evolutionary algorithm, the study analyzes weather data from the city of Tabriz. The results show that the ideal ratio of surface area to volume in classrooms is between 1.16 and 1.69. Optimal solutions for glare probability and daylight autonomy favor lower ratios, while improved thermal comfort is associated with higher ratios. These results highlight the nuanced relationship between design variables and comfort metrics and underscore the need for comprehensive optimization

strategies in classroom design. Ultimately, the study underscores the importance of balancing these factors to create environments that prioritize both visual quality and thermal satisfaction for users.

Keywords: Optimization, Thermal comfort, Daylight Autonomy, Glare, Classroom

1- مقدمه

طراحی پایدار یک ساختمان، فرآیندی پیچیده است که در آن می‌بایست نیازهای ساکنین، محیط اطراف بنا، مفاهیم زیبایی شناسی و عناصر عملکردی توأم مورد توجه قرار گیرد [1،2]. در طراحی کلاس درس رعایت کلیه معیارهای عملکردی، به منظور اطمینان از یادگیری مناسب دانش آموزان ضروری می‌نماید [3،4]. برای دستیابی به این هدف، در طول فرآیند طراحی، معیار عملکرد کلاس درس می‌بایست مد نظر قرار گیرد. آسایش حرارتی، میزان انرژی مصرفی بنا و دسترسی به نور طبیعی از مهمترین معیارهای عملکردی در بنا می‌باشند که می‌بایست در کلاس درس نیز مد نظر قرار گیرند [5]. سطوح روشنایی بر جسم و روان استفاده‌کننده از فضا تاثیر می‌گذارد، عدم قرارگیری منظم در معرض نور مناسب می‌تواند مسبب خستگی، استرس، اختلالات عاطفی و افسردگی فصلی گردد. استفاده از نور طبیعی نسبت به نور مصنوعی دارای مزایایی از قبیل بهبود کارایی روانی و فیزیکی افراد و صرفه-جویی در انرژی می‌باشد [6،7]. باید در نظر داشت که نور روز در حالی که با تاثیر بر پاسخ‌های فیزیولوژیک افراد موجب ارتقای سلامتی می‌گردد؛ می‌تواند در صورت درخشندگی بیش از حد موجبات خیرگی و عدم آسایش بصری را فراهم آورد [8،9]. از سوی دیگر با توجه به اینکه حرارت محیط بر سلامتی و داشتن احساس خوب در دانش‌آموزان تاثیر چشمگیری دارد؛ تامین آسایش حرارتی در کلاس درس در راستای افزایش کارایی ضروری می‌باشد [10]. افزایش یا کاهش روشنایی مناسب و عدم آسایش حرارتی موجب کاهش رضایت و موفقیت دانش‌آموزان و معلمان در انجام فعالیت‌های آموزشی می‌گردد [11]. برقراری توازن بین روشنایی مناسب و آسایش حرارتی یکی از اهداف برجسته طراحی ساختمان‌های آموزشی است. نتایج مطالعات متعدد نشان داده‌اند که توازن عوامل آسایش محیطی می‌تواند بر فرآیند یادگیری دانش‌آموزان تاثیر بسیاری داشته باشد [12]. در حقیقت مدیریت میزان نور ورودی به فضا و تامین روشنایی لازم، حداکثر نور ورودی که موجب آزار چشم و خیرگی می‌گردد و آسایش حرارتی محیط چالشی است که طراحان با آن مواجهند [13]. ابعاد فضا و بازشوها تاثیر بسیار زیادی بر احساس آسایش بصری و حرارتی استفاده‌کنندگان دارند [14،15]. باید توجه داشت رفع نقص بنا پس از پایان ساخت ساختمان فرآیندی دشوار و پیچیده است بنابراین حل مشکلات در مرحله طراحی بسیار مناسب‌تر می‌باشد [16-18]. علاوه ثابت شده است که استفاده از راه‌حل‌های بهینه سازی مبتنی بر الگوریتم برای رسیدن به حالت ایده‌آل طراحی، از نظر اقتصادی و اثربخش بودن موثرتر است [19،20]. با توجه به پژوهش‌های انجام یافته مطالعه در خصوص ابعاد فضا و تناسب فضایی به منظور دستیابی همزمان به آسایش بصری و حرارتی به ویژه در خصوص کلاس درس مغفول مانده است؛ به همین منظور پژوهش حاضر درصدد آن است تا با استفاده از بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم، به تبیین نسبت مناسب سطح به حجم کلاس در راستای تامین همزمان نور طبیعی مناسب، عدم خیرگی افراد و فراهم نمودن آسایش حرارتی دانش‌آموزان بپردازد. زمینه مورد

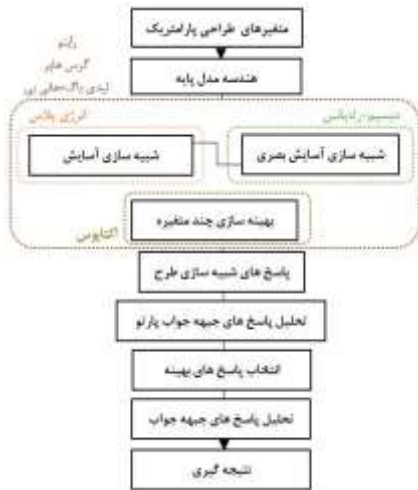
مطالعه، کلاس‌های درس مقطع دوم متوسطه شهر تبریز می‌باشند. نظر به اینکه در استانداردهای بین‌المللی پیش فرض محاسبات در مورد عوامل آسایش حرارتی اغلب منتج از تحقیقات بر روی بزرگسالان بوده است؛ در این پژوهش مقطع دوم متوسطه به دلیل رشد فیزیکی دانش‌آموزان و نزدیکی به شرایط بدنی فرد بزرگسال انتخاب شده است.

2- پیشینه

مهمترین مرحله طراحی، مرحله نخست آن می‌باشد؛ چرا که تصمیمات تاثیرگذار در این مرحله گرفته می‌شوند؛ حاصل تصمیمات این مرحله در کارایی ساختمان و آسایش ساکنین نقش عمده‌ای دارد [21-23]. معماران در مرحله طراحی با متغیرهای فراوانی مواجه هستند که می‌بایست برای هر کدام پاسخی مناسب بیابند [24]. خوشبختانه امروزه نرم‌افزارهای مختلف شبیه‌سازی که ابزارهای قدرتمندی برای بررسی کارایی محیطی ساختمان‌ها در دسترس قرار گرفته‌اند. علاوه داده‌های اقلیمی برای اغلب شهرهای جهان در قالب فایل‌های آب و هوایی گردآوری شده و در دسترس همگان قرار گرفته است. در نتیجه استفاده از روش‌های شبیه‌سازی کامپیوتری برای تصمیم‌گیری در طراحی، به-ویژه برای کشورهایی نظیر ایران که با کمبود دستورالعمل‌های طراحی پایدار مواجه است، طراحان را قادر می‌سازد تا به صورت کاراتری به دنبال راه‌حل‌های مختلف طراحی بوده و به گزینه‌های بهینه طراحی در مراحل نخست آن دست یابند [25-27]. مهمترین ویژگی این نرم‌افزارها این است که می‌تواند متغیرها و اهداف متعدد و حتی متضادی که در امر طراحی یکی از دغدغه‌های اصلی معماران هستند را به صورت همزمان بهینه نمایند و پاسخ مناسب بینابینی به دست دهد. ضیایی و وکیل‌نژاد در مقاله‌ای به بهینه‌سازی چند متغیره مشخصات قفسه‌های نوری در کلاس‌های درسی شهرهای تهران و ساری پرداخته‌اند. اهداف این تحقیق مناسب‌سازی میزان نور ورودی به فضا و آسایش حرارتی کاربران در هریک از این دو شهر و مقایسه شرایط بهینه قفسه‌های نوری با توجه به تفاوت میزان ابرناکی آسمان آنها بوده است. در این مطالعه به منظور بهینه‌سازی ترکیبی اهداف روشنایی از افزونه اکتاپوس¹ و گرس‌هاپر² در زمینه نرم‌افزار رایونو³ استفاده شده و برای تحلیل‌های آسایش حرارتی در پاسخ‌های بهینه، نرم‌افزار اوپن استودیو⁴ به کار رفته است. نتایج حاکی از آن است که ویژگی‌های قفسه نور بهینه از نظر ارتفاع، طول داخلی و خارجی برای کلاس‌های درسی تهران و ساری با زوایای چرخش متفاوت (به دلیل تفاوت میزان ابرناکی آسمان) یکسان است. علاوه بین نسبت پنجره به دیوار⁵ و زاویه چرخش قفسه‌ها و میزان نور روز دریافتی رابطه‌ای وجود دارد [28]. در مطالعه‌ای که توسط ژو⁶ و همکارانش انجام گرفته یک روش بهینه‌سازی چند متغیره بر اساس مدل شبکه هوش مصنوعی برای طراحی کلاس‌های درسی ابتدایی و راهنمایی در جنوب چین به کار گرفته شده است. در این تحقیق میزان انرژی مصرفی و آسایش فضای داخلی به طور همزمان بهینه‌سازی شده‌اند. نرم‌افزارهای بکاررفته در این مطالعه شامل انرژی پلاس⁷ برای ساخت مدل و سپس متلب⁸ و الگوریتم

5. WWR
6. Xu
7. Energyplus
8. Matlab

1. Octopus
2. Grasshopper
3. Rhino
4. Openstudio



شکل 1 دیاگرام روند پژوهش

3-1- تحلیل شرایط اقلیمی نمونه مورد مطالعه

شهر تبریز در ناحیه شمال غربی کشور ایران واقع شده است (شکل 2). از منظر مختصات جغرافیایی این شهر در 38 درجه و 5 دقیقه شمال خط استوا و 46 درجه و 16 دقیقه شرق گرینویچ قرار دارد. در طبقه بندی کوپن⁵ و گایگر⁶ به عنوان اقلیم نیمه خشک در عرض های میانی جغرافیایی طبقه بندی شده است که زمستان هایی سخت و تابستان هایی گرم و خشک دارد [32]. ارتفاع این شهر از سطح دریا 1361 متر بوده و رطوبت هوا هم در فصل تابستان و هم در فصل زمستان کم است. اطلاعات مربوط به موقعیت جغرافیایی شهر تبریز در جدول (1) آمده است. میانگین بارندگی در این شهر 323 میلی متر بوده و متوسط دمای آن 11.6 درجه سانتیگراد است [33].



شکل 2 موقعیت شهر تبریز در کشور ایران [33].

جدول 1 مشخصات اقلیمی شهر تبریز

عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا	روز درجه گرمایی	روز درجه سرمایی
38 5 شمال	46 16	1361 متر	2773.2	392.9

هر چه میزان ساعات آفتابی بیشتر باشد امکان بهره مندی کلاس های درس از نور طبیعی و به شرط عدم خیرگی آسایش بصری دانش آموزان بیشتر خواهد بود. شهر تبریز بطور کلی 4369 ساعت در سال ساعات آفتابی دارد که 30 درصد از این میزان در روزهای مه آلود و ابری به هدر می رود و فقط 3047 ساعت (35٪ کل ساعات سال) دسترسی به نور خورشید امکان پذیر است [33].

ان اس جی ای 2¹ و جبهه جواب پارتو به منظور بهینه سازی و اولویت بندی پاسخ ها می باشند. در مقایسه با طرح معیار، روش بهینه سازی پیشنهادی این مقاله منجر به کاهش حداکثر 810.8 کیلووات ساعت در مصرف کل انرژی، حداکثر افزایش 47.8٪ در درصد زمان اشغال شده در منطقه آسایش و حداکثر افزایش 4.2٪ در میزان ساعات عدم آسایش در محیط شده است [29]. در مطالعه های دیگر پیله چی ها و همکارانش روشی را برای بهینه سازی باز شوهای ساختمان های اداری با در نظر گرفتن اهداف مصرف انرژی، نور روز و کیفیت دید ارائه می دهند. در این روش کیفیت دید به یک پارامتر کمی تبدیل شده و با مصرف انرژی و دریافت نور روز به تعادل می رسد. برای شبیه سازی و بهینه سازی از نرم افزار راینو و پلاگین های گرس هاپر، لیدی باگ² و هانی بی³ و الگوریتم هایپ¹ در افزونه اکتاپوس استفاده شده است. نتایج حاصل از بررسی جبهه جواب پارتو حداکثر میزان مناسب برای نسبت پنجره به دیوار را تبیین می کند بعلاوه نشان می دهد که روش مورد استفاده در این تحقیق می تواند میزان روشنایی روز و کیفیت دید را بیش از مقادیر بدست آمده در پژوهش های قبلی بهبود بخشد [30].

اگرچه برخی مطالعات و دستورالعمل های طراحی برای نحوه ساخت مدارس در ایران ارائه شده است، اما همچنان فقر منابع کاربردی برای طراحی ساختمان های مناسب مدارس ایرانی از منظر آسایش حرارتی مشاهده می شود. اغلب مطالعات انجام گرفته در سایر نقاط جهان به دلیل محدودیت های تحقیقاتی قادر به پاسخگویی به مسئله طراحی مدارس در ایران نیستند [31]. بعلاوه تحقیقات انجام شده برای بهینه سازی آسایش حرارتی و بصری به ویژه در کلاس های درسی کمتر به تاثیر ابعاد پرداخته و تقریباً هیچ مطالعه ای در خصوص تاثیر سطح به حجم فضا در این مورد انجام نشده است. در تحقیق پیش رو عامل سطح و حجم (ابعاد) کلاس درسی به عنوان متغیرهای مستقل و شاخص های مربوط به آسایش بصری و حرارتی متغیرهای وابسته می باشند.

3- ابزار و روش ها

روش تحقیق پژوهش حاضر از نوع توصیفی-تحلیلی است که در آن به کمک نرم افزارهای شبیه ساز و بهینه ساز بررسی تاثیر تغییر تناسبات فضا بر آسایش حرارتی و بصری انجام گرفته است. مدل تحقیق در دیاگرام شکل (1) آمده است.

4. HypE
5. Köppen
6. Geiger

1. NSGAII
2. Ladybug
3. Honeybee

موقعیت است که بیانگر تغییر در میزان خیرگی آزاردهنده با تغییر در زاویه قرارگیری منبع نسبت خط دید ناظر است. بر اساس این رابطه میزان آزاردهندگی خیرگی حاصل از نور روز بر اساس جدول (2) در چهار طبقه دسته‌بندی می‌شود [36-38].

جدول 2 معیار آزاردهندگی خیرگی [36]

میزان آزاردهندگی خیرگی	احتمال خیرگی نور روز
تابش خیره کننده نامحسوس	$DGP < 0.35$
تابش خیره کننده محسوس	$0.35 < DGP < 0.4$
تابش خیره کننده آزاردهنده	$0.4 < DGP < 0.45$
تابش خیره کننده غیرقابل تحمل	$0.45 < DGP$

3-3- شاخص آسایش حرارتی

آسایش حرارتی اصطلاحی برای توصیف یک محیط حرارتی رضایت‌بخش و بدون استرس در ساختمان‌هاست که به صورت یک مفهوم جمعی و به واسطه هنجارها و انتظارات تعریف شده است [39]. در شکل اولیه استاندارد اشری 55 استانداردهای اولیه آسایش حرارتی با تمرکز بر مدل‌های تعادل حرارتی چنین فرض می‌کردند که آسایش حرارتی زمانی به دست می‌آید که دمای بدن در یک بازه باریک حرارتی قرار گیرد. در این مورد تلاش فیزیولوژیکی افراد برای انطباق با محیط و احساس آسایش نادیده گرفته می‌شده است و صرفاً عوامل محیطی (دما، تابش حرارتی، رطوبت و سرعت هوا) علاوه عوامل شخصی (فعالیت و لباس) به عنوان عوامل تاثیرگذار بر آسایش حرارتی افراد مطرح می‌شده‌اند [40]. استاندارد اشری 55 در سال 2010 از رابطه بین دمای آسایش داخلی و دمای بیرون برای تعریف مناطق قابل قبول برای دمای داخلی در ساختمان‌هایی با تهویه طبیعی استفاده می‌کند. بنابراین باید اصلاحاتی انجام می‌شد تا تفاوت بین رفتار ساکنین و آنچه استانداردها پیش بینی می‌کردند به حداقل برسد؛ پس از مطالعات میدانی و پرسش از میزان آسایش ساختمان‌های دارای تهویه طبیعی استانداردهای آسایش حرارتی تطبیقی⁶ به وجود آمد. این مدل در حال حاضر توسط استانداردهای بین‌المللی مانند اشری آرپی 884⁹ و استاندارد اروپایی ای ان 15251¹⁰ پشتیبانی می‌شود [41، 42]. تحقیق حاضر نیز از این مدل برای تحلیل آسایش حرارتی کاربران استفاده نموده است. نحوه محاسبه دمای آسایش داخلی را می‌توان بصورت معادله (3) نوشت:

$$T_c = 0.31 \times T_r + 17.8^\circ\text{C} \quad (3)$$

که T_c عبارت از دمای آسایش داخلی بر حسب درجه سانتیگراد و T_r میانگین دمای هوای خارج برای دوره زمانی بین 7 تا 30 روز قبل از روز مورد سنجش است [43، 44].

شکل (3) با توجه به فرمول بالا محدوده آسایش را بر پایه احساس 80 تا 90 درصد ساکنین ارائه می‌دهد. حد بالا و پایین دمای آسایش نیز بر اساس فرمول‌های (4 و 5) به دست می‌آید:

$$T_{upper} = 0.31 \times T_r + 20.3^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$T_{lower} = 0.31 \times T_r + 15.3^\circ\text{C} \quad (5)$$

آسایش حرارتی فاکتور مهم دیگری در راستای فراهم نمودن شرایط مناسب جهت یادگیری دانش‌آموزان در کلاس درس است. محدوده آسایش حرارتی برای شهر تبریز در نمودار سایکرومتریک این شهر و با توجه به توسط استاندارد اشری 55¹ و فاکتورهای مختلف تاثیرگذار مشخص شده است. بر این اساس و بدون در نظر گرفتن تمهیدات طراحی اقلیمی ساختمان، تنها 1708 ساعت (19٪ کل ساعات سال) در شهر تبریز آسایش حرارتی ساکنین فراهم می‌باشد.

3-2- شاخص آسایش بصری

بسیاری از تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از نور طبیعی روز موجب کاهش استفاده از روشنایی الکتریکی و مهمتر از آن افزایش سلامتی و بهره‌وری کاربران می‌شود. مقدار نور ورودی به اتاق‌ها نباید در حدی باشد که موجب ناراحتی ساکنین شود؛ با در نظر داشتن این موضوع در این تحقیق برای بررسی نور مورد نیاز دو عامل کفایت نور روز² و احتمال خیرگی نور³ مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند:

3-2-1- کفایت نور روز

کفایت نور روز نسبت تعداد ساعاتی از سال است که روشنایی حاصل از نور روز بیش از حداقل روشنایی مورد نیاز در فضا است بر کل تعداد ساعات سال که فضا مورد استفاده قرار می‌گیرد [34]. کفایت نور روز از معیارهای پویای اندازه گیری نور روز به شمار می‌رود. معیارهای پویای اندازه گیری نور روز بر مبنای سری‌های زمانی روشنایی می‌باشند که آن هم بر اساس داده‌های تابش خورشیدی سالانه در منطقه مورد نظر به دست می‌آید و کمیت نور را در کنار تغییرات روزانه نور و نیز شرایط آب و هوایی در نظر می‌گیرد [35]. میزان کفایت روشنایی، توسط استانداردهایی مانند استاندارد انجمن مهندسی روشنایی آمریکای شمالی⁴ برای کار خاصی در زمان مشخصی از سال تعیین می‌شود [35-37]. نحوه محاسبه کفایت نور روز به صورت فرمول (1) محاسبه می‌گردد:

$$DA = \frac{\sum_i (\omega f_i \times t_i)}{\sum_i t_i} \in [0, 1] \quad (1)$$

$$\text{With } \omega f_i = \begin{cases} 1 & \text{if } E_{\text{Daylight}} \geq E_{\text{limit}} \\ 0 & \text{if } E_{\text{Daylight}} < E_{\text{limit}} \end{cases}$$

که در اینجا E_{limit} به معنی حداقل روشنایی موردنیاز بر حسب لوکس⁵ است که این میزان در کلاس درس 300 لوکس می‌باشد.

3-2-2- احتمال خیرگی نور روز

این شاخص توسط وینولد و کریستوفرسون در سال 2006 پیشنهاد شده و به درصد افرادی اشاره دارد که از میزان تابش خیره کننده و آزاردهنده تحریک می‌شوند [38]. فاکتور احتمال خیرگی به صورت فرمول (2) محاسبه می‌گردد:

$$DGP = 5.87 \times 10^{-5} E_v + 0.098 \times \log_{10} \left[1 + \sum_{i=0}^n \frac{l_{s,i}^2 \times \omega_{s,i}}{E_v^{1.87} \times P_i^2} \right] + 0.16 \quad (2)$$

که در آن E_v روشنایی عمودی بر حسب لوکس است که به چشم می‌رسد و به واسطه منبع نور تولید می‌شود، $l_{s,i}$ روشنایی منبع نور بر حسب کندلا بر مترمربع⁶، $\omega_{s,i}$ زاویه بین منبع نوری و بیننده بر حسب رادیان⁷ و P شاخص

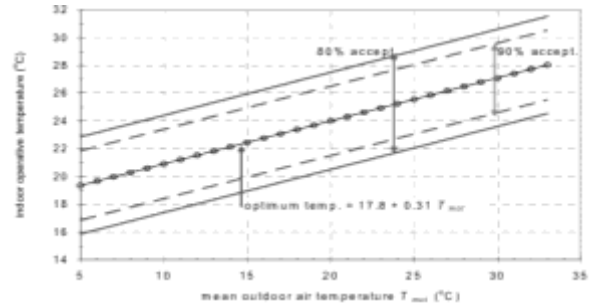
6. cd/m2
7. rad
8. Adaptive
9. ASHRAE RP884
10. EN 15251

1. ASHRAE 55
2. Daylight Autonomy
3. DGP
4. IESNA
5. lux

گروه بزرگسالان استانداردهای مربوط به احساس آسایش فیزیکی فرد در محیط، به ویژه پیش‌فرض‌های موجود در استاندارد آسایش می‌باشد. به منظور شناخت نمونه‌های موجود، در گام نخست با مطالعه میدانی مدارس این مقطع در شهر تبریز و جمع‌آوری مدارک و نقشه‌ها از سازمان‌های مربوطه، ابعاد، تناسبات و شرایط فیزیکی کلاس‌ها استخراج شده است. با توجه به این مهم که اغلب مدارس غیرانتفاعی از تغییر کاربری مسکونی به وجود آمده‌اند؛ به منظور افزایش دقت پژوهش، جامعه آماری محدود به مدارس دولتی این مقطع در نواحی پنجگانه شهر گردیده است. از 173 مدرسه با شرایط مذکور، برخی به دلیل تپ بودن و تطابق پلانی با سایر اعضا، از دایره بررسی حذف گردیده و در نهایت جامعه آماری به 103 مدرسه با مجموع 338 کلاس درسی محدود شده است. بررسی ابعادی و تناسباتی جامعه آماری نشان می‌دهد که در این مدارس حداقل عرض کلاس‌ها 3.1 متر و حداکثر آن 7.4 متر و میانگین عرض 5.5 متر بوده و حداقل طول کلاس‌ها 4.8 متر و حداکثر طول 11.2 متر و میانگین طول 7 متر می‌باشد. ارتفاع کلاس‌ها نیز از 2.9 تا 3.2 متر متغیر بوده است. ابعاد و مساحت بازشوها نورگیر به شدت متغیر بوده و بررسی جهت قرارگیری آنها نشان می‌دهد که 4.49٪ از مجموع پنجره‌های کل کلاس‌های مورد مطالعه جهت‌گیری غربی، 3.59٪ شرقی، 8.08٪ جنوب غربی، 2.69٪ جنوب‌شرقی، 40.12٪ جنوبی، 2.09٪ شمال غربی، 7.48٪ شمال شرقی و 31.44٪ جهت‌گیری شمالی دارند. به این ترتیب بیشترین فراوانی مربوط به بازشوها با جهت‌گیری جنوبی است که مویده تمهیدات اقلیمی در این منطقه جهت دریافت بیشترین نور روز و استفاده از گرمایش تابشی خورشید می‌باشد. در گام بعدی ضوابط سازمان نوسازی و تجهیز مدارس کشور (مرجع ضوابط مربوط به احداث مدارس و کلاس‌های درسی) مورد بررسی قرار گرفته است. آنچه از مطالعه ضوابط مذکور در خصوص ابعاد، تناسبات و ویژگی‌های کلاس‌های این مقطع بدست آمده نشان می‌دهد که این دستورات عملی‌ها حداکثر طول کلاس درسی را 8 متر و حداکثر عرض آن را 7 متر تعیین نموده و در مورد حداقل‌ها سخنی به میان نیاورده‌اند. در خصوص ارتفاع کلاس‌های مناطق سردسیر نیز ارتفاع 3 متری پیشنهاد گردیده است [48، 49].

در ادامه برای جمع‌بندی اطلاعات بدست آمده از گام‌های اول و دوم، حداقل طول و عرض کلاس‌ها با توجه به داده‌های مطالعه میدانی و حداکثر آنها با در نظر گرفتن مقادیر ذکر شده در ضوابط تعیین شده است. بنابراین بازه تغییر طول کلاس‌ها بین 4.8 تا 8 متر و بازه تغییر عرض کلاس‌ها بین 3.1 متر تا 7 متر می‌باشد. برای ارتفاع کلاس نیز با توجه به مطالعات میدانی بازه 2.9 تا 3.2 متر در نظر گرفته شده است (شکل 4).

بر این اساس، مدل پایه شبیه‌سازی، کلاسی است با جهت‌گیری شرقی-غربی با طولی متغیر در بازه 8-4.8 متر و عرضی متغیر در بازه 7-3.1 متر و ارتفاع متغیر در بازه 3.2-2.9 متر با یک پنجره جنوبی که ابعاد آن متغیر و وابسته به تغییر ابعاد کلاس می‌باشد. لازم به ذکر است مساحت پنجره متغیر و 0.2 برابر مساحت کلاس بوده و ارتفاع کف پنجره از کف کلاس بصورت ثابت 1.2 متر و ارتفاع پنجره بطور ثابت 1.5 متر در نظر گرفته شده که در این خصوص ضوابط سازمان نوسازی مدارس ملاک عمل قرار گرفته است. برای ورودی کلاس مورد مطالعه، یک در با ابعاد ثابت 2x1 متر در نظر گرفته شده است (جدول 3).



شکل 3 محدوده دمایی قابل قبول برای آسایش 80 تا 90 درصد ساکنین و حد بالا و پایین قابل قبول دمایی [40]

بر اساس مدل آسایش حرارتی تطبیقی درصد آسایش حرارتی سالانه¹ به عنوان معیار سنجش آسایش حرارتی در نظر گرفته می‌شود و به صورت فرمول (6) محاسبه می‌گردد:

$$CTR = \sum_{i=1}^q \frac{\omega f_i}{q} \times 100$$

$$\text{With } \omega f_i = \begin{cases} 1 & \text{if } T_{lower} \geq T_{Upper} \\ 0 & \text{if } T < T_{lower} \text{ or } > T_{Upper} \end{cases} \quad (6)$$

در این معادله T دمای داخل ساختمان بر حسب سانتیگراد و q نماینده کل ساعات است [45، 46]. با توجه به اینکه مدل آسایش حرارتی توسط استانداردهای معتبر جهانی تایید می‌گردد در پژوهش حاضر از این مدل استفاده شده است.

3-4- ابزار پژوهش

در مقاله پیش‌رو برای شبیه‌سازی فضای کلاس درسی از نرم افزار گرافیکی راینو و افزونه گرس‌هاپر جهت تغییر پارامتریک حجم و سطح کلاس درسی و نورگیر دیوار جنوبی استفاده شده است. مدل‌سازی پارامتریک به محقق این امکان را می‌دهد تا تمام امکان‌های موجود در یک بازه تغییر معین را بررسی نماید [47]. برای اندازه‌گیری عوامل مرتبط با آسایش بصری و حرارتی از افزونه‌های لیدی‌باگ و هانی‌پی استفاده شده است. برای ارزیابی دقیق‌تر میزان دریافت نور طبیعی و حد آسایش بصری از نور مصنوعی در فضا صرف‌نظر شده و شرایط آب و هوایی و شرایط آسمان از طریق وارد نمودن فایل آب و هوایی ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهر تبریز برگرفته از تارنمای لیدی‌باگ تامین شده است. حداقل نور موردنیاز در فضای کلاس درسی 300 لوکس و آستانه نهایی اجتناب از خیرگی ناراحت کننده 0.4 در نظر گرفته شده است.

در این مقاله به منظور بهینه‌سازی از افزونه اکتاپوس² به روی گرس‌هاپر استفاده شده است. در این راستا برای انتخاب مجموعه جواب بهینه از الگوریتم اس پی ای 2 در افزونه اکتاپوس استفاده شده است. لازم به ذکر است که وزن اهداف در این پژوهش یکسان در نظر گرفته شده است تا پاسخ‌های کارایی به دست آمده دارای شرایط مطلوب در تمام توابع باشند.

3-5- مدل و شرایط شبیه‌سازی

مدل مورد مطالعه در این پژوهش کلاس درسی مقطع دوم دوره متوسطه در شهر تبریز می‌باشد. علت این انتخاب دسته‌بندی دانش‌آموزان این مقطع در

2. Octopus

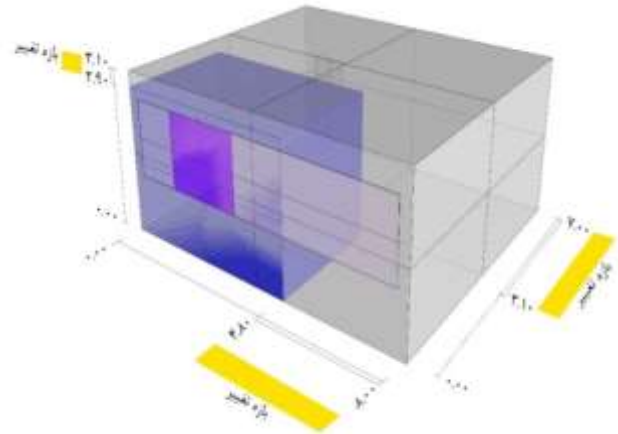
1. CTR%

4- یافته ها

پژوهش حاضر با هدف دستیابی به نسبت بهینه سطح به حجم کلاس درسی به منظور تامین همزمان آسایش حرارتی و آسایش بصری دانش‌آموزان صورت گرفته است. در این بستر تحقیقاتی ابعاد طولی، عرضی و ارتفاع کلاس به عنوان متغیر مستقل و میزان آسایش حرارتی تطبیقی ساکنین و میزان کفایت نور روز برای فعالیت آموزشی در طول سال و میزان خیرگی ایجاد شده به واسطه نور روز به عنوان متغیر وابسته تعریف شده‌اند. در تنظیمات مربوط به بهینه‌سازی، نرخ نخبگی بر عدد 0.5، احتمال جهش 0.2، نرخ جهش 0.9، نرخ التقاط متقاطع 0.8 و تعداد اعضای جامعه بر عدد 100 تنظیم شد. با توجه به همگرایی نتایج، بهینه‌سازی در نسل 200 متوقف گردید. برای انتخاب مجموعه راه‌حل‌های بهینه، از الگوریتم اس پی ای ای 2 در بستر افزونه اکتاپوس استفاده شد و مجموعه جواب به دست آمده در مرز جبهه جواب نهایی شامل 59 راه حل است. پاسخ‌های به دست آمده در مرز جبهه جواب نهایی در جدول (4) ارائه شده است.

از میان پاسخ‌های جبهه نهایی بیشترین میزان کفایت نور روز مربوط به جواب شماره 6 با مقدار 86.85٪، بیشترین میزان آسایش حرارتی تطبیقی مربوط به پاسخ شماره 19 با مقدار 1708 و کمترین میزان خیرگی آزاردهنده مربوط به پاسخ شماره 18 با مقدار 0.73 می‌باشد که به صورت سطور رنگی در جدول (4) نشان داده شده‌اند. باید توجه داشت که تمام پاسخ‌های موجود در جبهه جواب از لحاظ مطلوبیت توأمان دستیابی به اهداف بر هم برتری ندارند اما بر اساس نیاز طراح می‌توان گزینه مورد نظر را طبق ترجیحات مربوط به هر هدف انتخاب نمود؛ به همین منظور در ادامه پاسخ‌های بهینه‌ای که در جبهه جواب نهایی بیشترین میزان هر هدف را به خود اختصاص داده‌اند بررسی می‌گردد.

4-1- پاسخ‌های بهینه با بیشترین میزان کفایت نور روز



شکل 4 مدل شبیه‌سازی شده کلاس درسی

جدول 3 ویژگی‌های ابعادی مدل مورد مطالعه

ارتفاع	کف	ارتفاع	ارتفاع	عرض	عرض	عرض	عرض
ارتفاع	کلاس	ارتفاع	ارتفاع	عرض	عرض	عرض	عرض
پنجره	تا کف	پنجره	پنجره	پنجره	پنجره	پنجره	پنجره
(متر)	(متر)	(متر)	(متر)	(متر)	(متر)	(متر)	(متر)
1.5	1.2	3.2	2.9	7	3.1	8	4.8

مدل فوق به صورت کلاسی در طبقه همکف یک مدرسه دو طبقه تعریف شده است. کف این کلاس مجاور با زمین، دو جبهه شرقی و غربی مجاور با کلاس‌ها و سقف آن مجاور با طبقه فوقانی بوده و اتلاف حرارت از این جوانب صورت نمی‌گیرد و به اصطلاح دیوارها و سقف آدیاباتیک¹ تعریف شده است. تنها دیوار جبهه جنوبی دیوار خارجی محسوب شده و مجاور فضای کنترل نشده می‌باشد. لازم به ذکر است جزئیات دیوار خارجی از مجموعه مصالح پیشنهادی توسط سازمان نوسازی و تجهیز مدارس انتخاب شده و پنجره بکار رفته در دیوار نیز از نوع شیشه دوجداره کم گسیل غیرفعال همراه با قاب پی وی سی² می‌باشد. با توجه به اینکه روش تحقیق بر مبنای مقایسه ابعادی فضا در مدل‌های شبیه سازی شده است؛ در این تحقیق از وجود عوامل مداخله‌گری همچون وجود پرده‌ها و مبلمان صرف نظر گردیده تا صرفاً تأثیر ابعاد و تناسب کالبد فضا مورد بررسی قرار گیرد.

در خصوص زمان‌های مورد نظر برای تحلیل آسایش حرارتی و بصری، زمان‌های آموزشی به صورت روزانه از ساعت 7 صبح تا 6 بعد از ظهر مورد تحلیل قرار گرفته است. لازم به ذکر است روزهای تعطیل از جمله روزهای جمعه، تعطیلات تابستانی (اول تیر تا اول مهرماه) و همچنین تعطیلات رسمی از جدول زمانی مربوط حذف شده‌اند.

در روند این تحقیق با تغییر متغیرهای مستقل شامل ابعاد طولی، عرضی و ارتفاعی کلاس و مساحت بازشو که به صورت پارامتریک وابسته به این ابعاد بوده است، اهداف یا متغیرهای وابسته شامل عوامل آسایش بصری و حرارتی مورد بررسی قرار گرفته و جواب‌های بهینه استخراج شده است.

2. PVC

1. Adiabatic

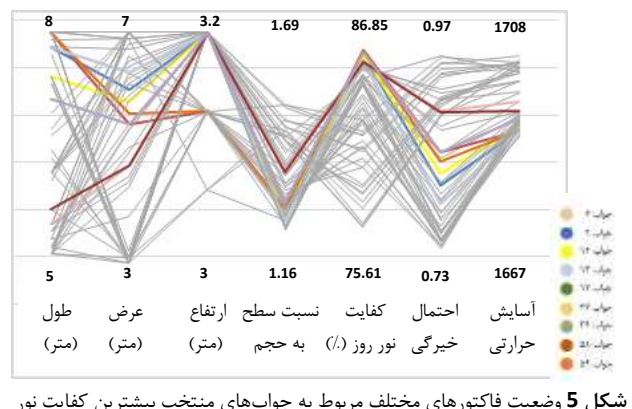
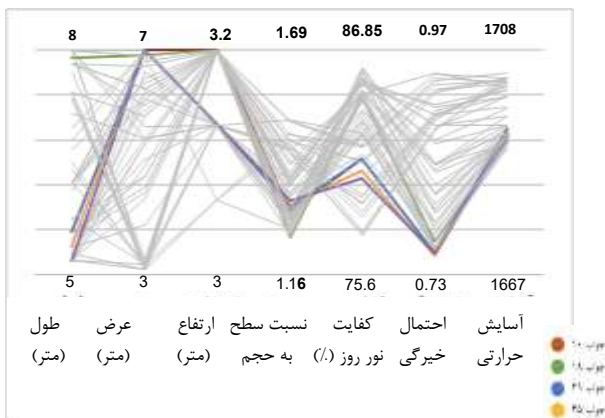
جدول 4 مقادیر مربوط به متغیرهای مستقل و وابسته در پاسخ های جبهه جواب نهایی پارتو

جواب ها	طول کلاس (متر)	عرض کلاس (متر)	ارتفاع کلاس (متر)	نسبت سطح به حجم	جواب ها	طول کلاس (متر)	عرض کلاس (متر)	ارتفاع کلاس (متر)	نسبت سطح به حجم	جواب ها	طول کلاس (متر)	عرض کلاس (متر)	ارتفاع کلاس (متر)	نسبت سطح به حجم
جواب 1	6.1	7	3.1	1.26	جواب 21	7.9	6.9	3.2	1.17	جواب 41	8	7	3.1	1.18
جواب 2	6.1	7	3.2	1.24	جواب 22	8	3	3.2	1.54	جواب 42	5.3	4.4	3.2	1.46
جواب 3	5.3	5	3.1	1.42	جواب 23	8	6.9	3	1.21	جواب 43	5	4.3	3.2	1.49
جواب 4	5.3	5.4	3.1	1.39	جواب 24	5	6.6	3.1	1.35	جواب 44	5.1	5.8	3.2	1.36
جواب 5	5.2	3.8	3.1	1.56	جواب 25	6.9	7	3.1	1.22	جواب 45	5	7	3.1	1.33
جواب 6	8	5.4	3.1	1.27	جواب 26	8	3	3	1.58	جواب 46	6.1	6.5	3.2	1.26
جواب 7	5.1	6.1	3.2	1.35	جواب 27	5.6	3.1	3.2	1.63	جواب 47	6.1	7	3.1	1.26
جواب 8	6.1	7	3.2	1.29	جواب 28	7.3	3	3.1	1.59	جواب 48	6.3	3.1	3	1.63
جواب 9	7.8	6	3.2	1.21	جواب 29	5.4	7	3.1	1.30	جواب 49	8	3	3.2	1.54
جواب 10	5.4	7	3.2	1.28	جواب 30	6.6	6.4	3.2	1.24	جواب 50	7.7	3.2	3.2	1.51
جواب 11	6.1	3.1	3.2	1.60	جواب 31	5	3	3.2	1.69	جواب 51	7.4	3	3.2	1.56
جواب 12	7.4	5.8	3.2	1.24	جواب 32	7.4	3.1	3.2	1.54	جواب 52	5	3.1	3.1	1.69
جواب 13	7.8	6.3	3.2	1.20	جواب 33	5	4.9	3.2	1.43	جواب 53	7.4	3.1	3.2	1.54
جواب 14	6.1	5.9	3.2	1.29	جواب 34	5.1	5.3	3.2	1.39	جواب 54	7.8	6.7	3.2	1.18
جواب 15	6.1	6.2	3.2	1.28	جواب 35	5	5.3	3.2	1.40	جواب 55	6	6.8	3.2	1.25
جواب 16	7.3	3.1	3.1	1.56	جواب 36	5.4	4.7	3.2	1.42	جواب 56	6.1	6.1	3.1	1.30
جواب 17	8	5.6	3.1	1.25	جواب 37	6.4	3	3.2	1.60	جواب 57	8	6.9	3.2	1.16
جواب 18	5.2	7	3.1	1.31	جواب 38	6.7	7	3.1	1.23	جواب 58	5.6	4.7	3.2	1.41
جواب 19	5.1	3	3.2	1.68	جواب 39	7.8	6.3	3.2	1.20	جواب 59	7.1	5.4	3.2	1.28
جواب 20	5	6.3	3.1	1.36	جواب 40	5.4	4.5	3.2	1.44					

4-2- پاسخ های بهینه با کمترین احتمال خیرگی

مطالعه میزان احتمال خیرگی در پاسخ های جبهه جواب نهایی بیانگر آن است که پاسخ های شماره 10، 18، 29 و 45 به ترتیب با مقادیر دقیق 0.728، 0.725، 0.729 و 0.728 دارای کمترین میزان احتمال خیرگی نسبت به سایر پاسخ ها می باشند. چنانچه ذکر شد هدف کاهش خیرگی و افزایش میزان کفایت نور روز دو هدف متقابل می باشند که بر اهمیت بهینه سازی چندهدفه تاکید می نمایند؛ بنابراین بهترین پاسخ های مربوط به خیرگی را نمی توان به عنوان برترین گزینه ها از منظر آسایش بصری انتخاب نمود. شکل (6) وضعیت فاکتورهای مختلف مربوط به جواب های منتخب احتمال خیرگی را نشان می دهد.

بررسی نتایج حاصل از جبهه جواب نهایی نشان می دهد جواب های شماره 6، 9، 12، 13، 17، 36، 39، 58 و 59 به ترتیب با مقادیر 86.56٪، 86.53٪، 86.13٪، 86.82٪، 86.15٪، 86.19٪، 86.09٪ و 86.71٪ بیشترین میزان کفایت نور روز را نسبت به سایر پاسخ ها دارند. باید در نظر گرفت که در برخی از این گزینه ها افزایش مساحت باز شو در نتیجه افزایش مساحت کلاس میتواند منجر به افزایش میزان خیرگی آزاردهنده گردد. بنابراین لزوماً نمی توان گزینه های فوق را به عنوان برترین گزینه ها از منظر آسایش بصری انتخاب نمود؛ چرا که عوامل کفایت نور روز و خیرگی هر دو در مقدار آسایش بصری دخیل می باشند. شکل (5) وضعیت فاکتورهای مختلف مربوط به جواب های منتخب کفایت نور روز را نشان می دهد.



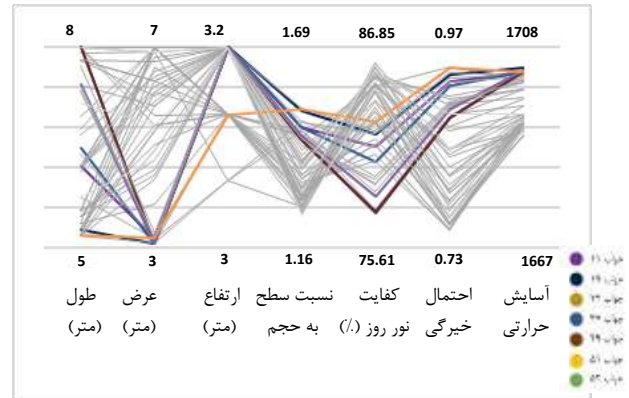
شکل 5 وضعیت فاکتورهای مختلف مربوط به جواب های منتخب بیشترین کفایت نور

روز

شکل 6 وضعیت فاکتورهای مختلف مربوط به جواب‌های منتخب کمترین احتمال خیرگی

4-3- پاسخ‌های بهینه با بیشترین میزان آسایش حرارتی

بررسی آسایش حرارتی پاسخ‌های ارائه شده در جبهه جواب نهایی نشان می‌دهد جواب‌های شماره 19، 51، 52، 49، 37، 22، 11 به ترتیب مقادیر 1708، 1706، 1705، 1705، 1705، 1705، 1705 دارای بیشترین میزان آسایش حرارتی در مقایسه با سایر پاسخ‌ها می‌باشند. نمودار موجود در شکل (7) وضعیت فاکتورهای مختلف مربوط به جواب‌های منتخب آسایش حرارتی تطبیقی را نشان می‌دهد.



شکل 7 وضعیت فاکتورهای مختلف مربوط به جواب‌های منتخب بیشترین آسایش حرارتی تطبیقی

5- بحث

در پژوهش حاضر در گام نخست و پس از همگرایی پاسخ‌های بهینه‌سازی چندهدفه، جواب‌های حاصل از جبهه جواب نهایی پارتو بررسی شدند تا مدل‌های ابعادی با نتایج بهینه توامان در خصوص اهداف آسایش حرارتی و بصری مشخص گردند. با توجه به نتایج این بخش 59 جواب با مشخصات ارائه شده در جدول (4) بصورت غیرغالب در هر یک از اهداف حالت بهینه را ارائه می‌نمایند. این مهم بدان معنی است که تمام پاسخ‌های موجود در جبهه جواب نهایی از لحاظ مطلوبیت دستیابی همزمان به اهداف بر هم برتری ندارند. با توجه به اینکه بر اساس شرایط مختلف سایت و ابنیه، از نقطه نظر طراح یکی از اهداف می‌تواند نسبت به دیگری دارای اهمیت نسبی باشد. در گام‌های بعد جواب‌های بهینه موجود در جبهه جواب نهایی که بیشترین میزان هر یک از اهداف را به خود اختصاص داده‌اند معرفی می‌گردند. به اختصار می‌توان گفت از میان پاسخ‌های جبهه نهایی، بیشترین میزان کفایت نور روز مربوط به جواب شماره 6 با مقدار 86.85٪، بیشترین میزان آسایش حرارتی تطبیقی مربوط به پاسخ شماره 19 با مقدار 1708 و کمترین میزان خیرگی آزاردهنده مربوط به پاسخ شماره 18 با مقدار 0.73 می‌باشد.

در گام بعد جواب‌های شماره 6، 9، 12، 13، 17، 36، 39، 58 و 59 به ترتیب با مقادیر کفایت نور روز 86.56٪، 86.53٪، 86.13٪، 86.82٪، 86.15٪، 86.19٪، 86.09٪ و 86.71٪ و نسبت سطح به حجم 1.27، 1.21، 1.24، 1.20، 1.25، 1.40، 1.20، 1.41 و 1.28 بیشترین میزان کفایت نور روز را نسبت به سایر پاسخ‌ها دارند. باید در نظر گرفت که در برخی از این گزینه‌ها افزایش مساحت بازشو در نتیجه افزایش مساحت کلاس می‌تواند

منجر به افزایش میزان خیرگی آزاردهنده گردد. بنابراین لزوماً نمی‌توان گزینه‌های فوق را به عنوان برترین گزینه‌ها از منظر آسایش بصری انتخاب نمود؛ چرا که عوامل کفایت نور روز و خیرگی هر دو در مقدار آسایش بصری دخیل می‌باشند. به همین ترتیب جواب‌های شماره 10، 18، 29 و 45 به ترتیب با مقادیر دقیق احتمال خیرگی 0.728، 0.725، 0.729 و 0.728 و نسبت سطح به حجم 1.28، 1.31، 1.30 و 1.33 دارای کمترین میزان احتمال خیرگی نسبت به سایر پاسخ‌ها می‌باشند. چنانچه ذکر شد هدف کاهش خیرگی و افزایش میزان کفایت نور روز دو هدف متقابل می‌باشند که بر اهمیت بهینه‌سازی چندهدفه تاکید می‌نمایند. در ادامه جواب‌های شماره 19، 51، 52، 49، 37، 22، 11 به ترتیب با مقادیر شاخص آسایش حرارتی تطبیقی 1708، 1706، 1705، 1705، 1705، 1705، 1705 و نسبت سطح به حجم 1.68، 1.56، 1.69، 1.54، 1.60، 1.54 و 1.60 به عنوان گزینه‌هایی با بیشترین میزان آسایش حرارتی در مقایسه با سایر پاسخ‌ها معرفی شدند. باید توجه داشت که تمام جواب‌های فوق از منظر بهینه‌سازی چندهدفه دارای شرایط مطلوب توامان در خصوص اهداف تحقیق می‌باشند.

6- تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از رساله دکتری با عنوان "بهینه‌یابی چندهدفه آسایش بصری، حرارتی و صوتی دانش‌آموزان در کلاس‌های درسی" می‌باشد که با راهنمایی اساتید بزرگوار خانم دکتر آیدا ملکی و آقای دکتر یاسر شهبازی و مشاوره آقای دکتر عباس غفاری در دانشگاه هنر اسلامی تبریز انجام گرفته است.

7- نتیجه گیری

تأمین آسایش بصری و حرارتی دانش‌آموزان از جمله موضوعات پر اهمیت در طراحی کلاس‌های درسی است. با توجه به اینکه ابعاد و تناسبات فضا در تحقق اهداف فوق تاثیر چشمگیری دارند، پژوهش حاضر به دنبال دستیابی به تناسبات بهینه فضای کلاس درس در قدم اول پیشینه تحقیقاتی موجود را مورد بررسی قرار داده است. تدقیق در این مطالعات نشان می‌دهد؛ اگرچه همگی بر اهمیت تأمین توامان آسایش بصری و حرارتی توجه داشته‌اند اما اغلب جزئیات فضا از جمله سطوح بازشو و نورگیر و یا سایر اجزای پیوستی فضا که میزان نور ورودی را کنترل می‌کنند مورد مطالعه بوده است و به ابعاد خود فضا و به طور دقیق تر نسبت بین این ابعاد نپرداخته‌اند. پژوهش حاضر درصدد رفع خلاء تحقیقاتی مذکور برآمده و با استفاده از روش‌هایی که دستیابی همزمان به اهداف متعدد و غیر همسو (همچون میزان خیرگی و عوامل آسایش حرارتی و میزان نور ورودی جهت تأمین روشنایی کافی) را ممکن می‌سازند، به دنبال تناسبات بهینه فضا بوده است. در نهایت و با استفاده از روش فوق پس از همگرایی نتایج حاصل از بهینه سازی در نسل 200، جواب‌های غیرغالب معرفی گردیدند. در هر یک از این جواب‌ها علاوه بر معرفی ابعاد سه‌گانه فضا، به تناسبات و میزان نور دریافتی و خیرگی ممکن و آسایش حرارتی اشاره گردیده است. بررسی نتایج 59گانه جبهه جواب نهایی نشان می‌دهد نسبت سطح به حجم کلاس‌های درسی بین بازه 1.16 تا 1.69 متغیر بوده است. مطالعه جداگانه هر یک از اهداف و پاسخ‌هایی که به عنوان برترین‌های هر هدف معرفی شدند حاکی از آن است که در اهداف مربوط به میزان خیرگی و کفایت نور روز، نسبت سطح به حجم کمتر از بازه مذکور و در هدف مربوط به آسایش حرارتی تطبیقی نسبت سطح به حجم بالاتر در این بازه مطلوبتر بوده‌اند. شایان ذکر است که

- consumption, thermal environment, visual performance and sound insulation effect, No. 3789. *Springer Berlin Heidelberg*, 2021.
- [17] K. Javanroodi, V. M. Nik, and M. Mahdavejad, A novel design-based optimization framework for enhancing the energy efficiency of high-rise office buildings in urban areas, *Sustain. Cities Soc.*, Vol. 49, No. May, 2019.
- [18] N. -H. Ham, K. -M. Min, J. -H. Kim, Y. -S. Lee and J. -J. Kim, A Study on Application of BIM (Building Information Modeling) to Pre-design in Construction Project, 2008 *Third International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology*, Busan, Korea (South), 2008, pp. 42-49.
- [19] E. Engy Moustafa, *Optimizing Classroom Acoustic Performance to Promote Children's Education and Wellbeing*, THE UNIVERSITY OF ARIZONA, 2015.
- [20] B. Arandian, M. Eslami, A. Khalid, B. Khan, U. Sheikh, E. Akbari, A.H. Mohammed, An Effective Optimization Algorithm for Parameters Identification of Photovoltaic Models, *IEEE Access*, Vol.10, pp.34069-34084, 2022.
- [21] M. Ferial, M. Amado, Architectural Design: Sustainability in the Decision-Making Process, *Buildings*, Vol.9, No.2, 2019.
- [22] Ö. Çavuşoğlu, C. Gulen. Enhancing decision making processes in early design stages: Opportunities of BIM to achieve energy efficient design solutions. *ITU Journal of Faculty of Architecture*, Vol 15, pp. 53-64, 2018.
- [23] M. Valitabar, M. Moghimi, M. Mahdavejad, and P. Pilechiha, Design optimum responsive façade based on visual comfort and energy performance, *CAADRIA 2018 - 23rd Int. Conf. Comput. Archit. Des. Res. Asia Learn. Prototyp. Adapt.*, Vol. 2, pp. 93-102, 2018.
- [24] O. Iseri, O. Dursun, The Impacts of Early Architectural Design Decisions on Building Performance. *International Journal of Digital Innovation in the Built Environment*, Vol 11 ,No.2. pp. 1-21, 2022.
- [25] E. Elbeltagi, H. Wefki, R. Khallaf, Sustainable Building Optimization Model for Early-Stage Design, *Buildings*. 2023; 13(1):74.
- [26] T. Han, Q. Huang, A. Zhang, Q. Zhang. Simulation-Based Decision Support Tools in the Early Design Stages of a Green Building—A Review, *Sustainability*, Vol 10, No.10, 2018.
- [27] S. Samadi, E. Noorzai, L. O. Beltrán, and S. Abbasi, A computational approach for achieving optimum daylight inside buildings through automated kinetic shading systems, *Front. Archit. Res.*, Vol. 9, No. 2, pp. 335-349, 2020.
- [28] N. Ziaee and R. Vakilinezhad, Multi-objective optimization of daylight performance and thermal comfort in classrooms with light-shelves: Case studies in Tehran and Sari, Iran, *Energy Build.*, Vol. 254, p. 111590, 2022.
- [29] Y. Xu, C. Yan, H. Qian, L. Sun, G. Wang, and Y. Jiang, A Novel Optimization Method for Conventional Primary and Secondary School Classrooms in Southern China Considering Energy Demand, Thermal Comfort and Daylighting, *Sustainability*, Vol. 13, No. 23, 2021.
- [30] P. Pilechiha, M. Mahdavejad, F. Pour Rahimian, P. Carnemolla, and S. Seyedzadeh, Multi-objective optimisation framework for designing office windows: quality of view, daylight and energy efficiency, *Appl. Energy*, Vol. 261, Mar. 2020.
- [31] S. Zahiri, The effect of Passive Design strategies on Thermal Performance of Female secondary school Buildings during Warm season in a hot and Dry climate, *Front. Built Environment*, Vol. 2, No. March, pp. 1-15, 2016.
- [32] M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel, *World map of the Köppen-Geiger climate classification updated*, Meteorol. Zeitschrift, Vol. 15, No. 3, pp. 259-263, 2006.
- [33] M. Ouria, Solar energy potential according to climatic and geometrical parameters of cities and buildings: A case-study from Tabriz City- Iran, *Urban Clim.*, Vol. 28, p. 100469, 2019.
- [34] M. Ouria and A. T. de Almeida, How to decarbonize developing cities by 2050: A case from Tabriz-Iran, *Renew. Energy*, Vol. 178, pp. 620-638, 2021.
- [35] M. Schweiker et al., Review of multi-domain approaches to indoor environmental perception and behaviour, *Build. Environ.*, Vol. 176, p. 106804, 2020.
- تمام پاسخ‌های 59 گانه حد متعادلی را بین اهداف به دست آورده‌اند و همزمان اهداف مطالعه را تامین می‌نمایند. نتایج مطالعه حاضر می‌تواند راهنمایی در جهت طراحی مناسب کلاس‌های درسی در مقطع متوسطه شهر تبریز و اقلیم سرد باشد. در پژوهش‌های آتی محققان می‌توانند علاوه بر بررسی تناسبات فوق در سایر شرایط اقلیمی، برخی اهداف مهم دیگر از جمله آسایش صوتی را نیز بصورت توأمان مورد تحقیق قرار دهند؛ همچنین نقش نسبت سطح پنجره به سطح کف کلاس درسی و بهینه‌یابی ابعاد آن برای تامین اهداف آسایشی کلاس درسی می‌تواند موضوع مناسب و تکمیل کننده پژوهش حاضر باشد.

8- مراجع

- [1] R. Fallahtafti and M. Mahdavejad, Optimisation of building shape and orientation for better energy efficient architecture, *Int. J. Energy Sect. Manag.*, Vol. 9, No. 4, pp. 593-618, 2015.
- [2] K. Gharouni Jafari, N. Ghazi Sharyatpanahi, and E. Noorzai, BIM-based integrated solution for analysis and management of mismatches during construction, *J. Eng. Des. Technol.*, Vol. Jun. 2020.
- [3] L. Heschong, R. Wright, and S. Okura, Daylighting and productivity: Elementary school studies, Vol. 8, pp. 8.149-8.159, Jan. 2000.
- [4] M. Boubekri, J. Lee, K. Bub, and K. Curry, Impact of Daylight Exposure on Sleep Time and Quality of Elementary School Children, *Eur. J. Teach. Educ.*, Vol. 2, No. 2 SE-Articles, pp. 10-17, Apr. 2020.
- [5] K. Konis, A. Gamas, and K. Kensek, Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support, *Sol. Energy*, Vol. 125, pp. 161-179, 2016.
- [6] T. Hwang and J. T. Kim, Effects of Indoor Lighting on Occupants' Visual Comfort and Eye Health in a Green Building, *Indoor Built Environment.*, Vol. 20, No. 1, pp. 75-90, Dec. 2010.
- [7] K. Taniguchi, M. Takano, Y. Tobari, M. Hayano, S. Nakajima, M. Mimura, K. Tsubota, Y. Noda, Influence of External Natural Environment Including Sunshine Exposure on Public Mental Health: A Systematic Review, *Psychiatry International*, Vol.3, No.1, pp:91-113, 2022.
- [8] R. G. Rodriguez, J. A. Yamin Garretón, and A. E. Pattini, Glare and cognitive performance in screen work in the presence of sunlight, *Light. Res. Technol.*, Vol. 48, No. 2, pp. 221-238, 2016.
- [9] M. G. Kent, S. Altomonte, R. Wilson, and P. R. Tregenza, Temporal effects on glare response from daylight, *Build. Environ.*, Vol. 113, pp. 49-64, 2017.
- [10] G. Lamberti, G. Salvadori, F. Leccese, F. Fantozzi, and P. M. Bluyssen, Advancement on Thermal Comfort in Educational Buildings: Current Issues and Way Forward, *Sustainability*, Vol. 13, No. 18, 2021.
- [11] H. Al-Khatiri, M. Alwetaishi, M. B. Gadi, Exploring thermal comfort experience and adaptive opportunities of female and male high school students, *Journal of Building Engineering*, Vol. 31, 2020.
- [12] K. Lakhdari, L. Sriti, and B. Painter, Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions, *Build. Environ.*, Vol. 204, No. January, p. 108173, 2021.
- [13] AMM. Irfeey, E. Jamei, H-W. Chau, B. Ramasubramanian. Enhancing Occupants' Thermal Comfort in Buildings by Applying Solar-Powered Techniques. *Architecture*, Vol.3, No.2, pp:213-233, 2023.
- [14] D. Veillette, J. Rouleau, and L. Gosselin, Impact of Window-to-Wall Ratio on Heating Demand and Thermal Comfort When Considering a Variety of Occupant Behavior Profiles, *Front. Sustain. Cities*, Vol. 3, No. December, pp. 1-16, 2021.
- [15] Z. Barzegar, K. Sajjadi, Analogy of thermal comfort with the influence of openings by PMV method in traditional houses and apartments in Shiraz, *Journal of Iranian Architecture & Urbanism (JIAU)*, Vol.14, No.1, pp:117-131, 2023.
- [16] Z. Sun, Y. Cao, X. Wang, and J. Yu, Multi - objective optimization design for windows and shading configuration : considering energy

- [36]K. Alhagla, A. Mansour, and R. Elbassuoni, Optimizing windows for enhancing daylighting performance and energy saving, *Alexandria Eng. J.*, Vol. 58, No. 1, pp. 283–290, 2019.
- [37]A. Tabadkani, M. Valinejadshoubi, F. Soflaei, and S. Banihashemi, Integrated parametric design of adaptive facades for user's visual comfort, *Autom. Constr.*, Vol. 106, Jun. 2019.
- [38]J. Wienold and J. Christoffersen, Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras, *Energy Build.*, Vol. 38, No. 7, pp. 743–757, 2006.
- [39]J. F. Nicol, S. Roaf, and J. F. Nicol, Rethinking thermal comfort Rethinking thermal comfort, *Building research and information*, Vol. 45, No.7, pp. 711-716, 2017.
- [40]R. J. de Dear and G. Brager, Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference-Final Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, *ASHRAE Transactions*, January, 1997.
- [41]R. and American Society of Heating and I. Air-Conditioning Engineers, *ASHRAE, 2010. ANSI/ASHRAE Standard 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, Atlanta, 2010.
- [42]A. *ANSI/ASHRAE Standard 55-2013*, Thermal environmental conditions for human occupancy, 2013.
- [43]R. Wang, S. Lu, and W. Feng, Impact of adjustment strategies on building design process in different climates oriented by multiple performance, *Appl. Energy*, Vol. 266, p. 114822, 2020.
- [44]D. Serghides, S. Dimitriou, I. Kyprianou, and C. Papanicolas, The Adaptive Comfort Factor in Evaluating the Energy Performance of Office Buildings in the Mediterranean Coastal Cities, *Energy Procedia*, Vol. 134, pp. 683–691, 2017.
- [45]A. Zhang, Q. Huang, Y. Sun, and Q. Zhang, Multi-objective window optimization of school buildings for thermal and daylight performance in the cold climate of China, *Energy & Buildings*, 2017, Vol. 3, pp. 4461–4468.
- [46]B. Wang and A. Malkawi, Design-based natural ventilation evaluation in early stage for high performance buildings, *Sustain. Cities Soc.*, Vol. 45, pp. 25–37, 2019.
- [47]I. Gursel Dino and G. Üçoluk, Multiobjective Design Optimization of Building Space Layout, Energy, and Daylighting Performance, *J. Comput. Civ. Eng.*, Vol. 31, p. 4017025, Mar. 2017.
- [48]Deputy Technical and Supervision Organization of School Equipment and Renovation, *Regulations and criteria for the design of educational spaces*, Tehran, 2006. (in Persian)
- [49]Technical Deputy and Supervision of School Equipment and Renovation Organization, *Regulations for the Design of Educational Buildings (Architectural Planning for Schools)*, 2015. (in Persian)