



Original Paper

Open Access

Optimizing the Ratio of Window to Floor Area in Classrooms to Achieve Thermal and Visual Comfort for Students

Elham Saligheh¹, , Aida Maleki^{2,*}, , Yaser Shahbazi³, , Abbas Ghaffari⁴,

1. PhD Student of Islamic Architecture, Department of Architecture, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran
2. Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran
3. Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran
3. Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran

Received: 2024/01/31

Accepted: 2024/09/27

Abstract

Architectural design is a complex process in which multiple issues must be addressed simultaneously. The ratio of window area to floor area in classrooms, especially in cold regions, plays a significant role in enhancing both visual and thermal comfort, as it directly influences the amount of natural light and radiant heat entering the space. This reduces the need for artificial lighting and dependency on heating systems. However, an excessively high ratio can lead to heat loss, energy wastage, and discomfort due to glare. Therefore, determining an optimal window-to-floor area ratio is crucial for ensuring both visual and thermal comfort. This study focuses on a secondary school classroom in Tabriz, a city with a cold climate. The research objectives were optimized using simulation tools such as Honey Bee, Ladybug, and the Octopus optimization plugin. The study concludes that the optimal classroom window-to-floor area ratio ranges between 0.125 and 0.2. Specifically, the best results for glare and adaptive thermal comfort are achieved with a lower ratio within this range. In contrast, the best results for daylight sufficiency occur at the higher end.

Keywords:

Optimization, Thermal comfort, Daylight Autonomy, Glare, Classroom

* Corresponding Author: a.maleki@tabriziau.ac.ir



©2025 by the Authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Introduction

Sustainable architecture is a comprehensive approach that addresses user needs, contextual factors, functionality, and aesthetics in an integrated manner. In educational buildings, functionality plays a critical role as it directly affects the cognitive performance, comfort, and health of students. Among the most important factors are thermal comfort, energy efficiency, and adequate natural lighting, all of which contribute to creating a conducive learning environment. Natural daylight has been widely acknowledged for its positive physical and psychological effects. It enhances alertness, reduces eye strain, and supports circadian rhythm regulation, contributing to better concentration and reduced fatigue. However, without proper design, excessive brightness can cause glare and discomfort, undermining these benefits. Achieving a balance between sufficient daylight and visual comfort requires careful consideration during the design phase. Thermal comfort is equally essential, as inappropriate indoor temperatures can impair students' health and focus. Given the challenges and costs associated with post-construction modifications, using simulation tools during the early design stage is highly advantageous. In regions like Iran, where localized sustainable building guidelines are lacking, such tools are crucial for climate-responsive architectural solutions. Numerous studies have examined environmental comfort in educational buildings across diverse climates. For example, research in subtropical and tropical regions has emphasized the need for cooler indoor environments and has highlighted gender-based variations in thermal comfort perception. Other studies have focused on optimizing design elements such as light shelves and window placement to improve performance. The use of multi-objective optimization tools based on artificial intelligence has enabled architects to address multiple goals simultaneously. Despite these advancements, practical design recommendations tailored to specific Iranian climates remain limited. This study addresses that gap by focusing on the window-to-floor area ratio in high school classrooms in Tabriz. The goal is to identify an optimal range that ensures thermal and visual comfort based on climatic conditions, using simulation and optimization tools to inform design decisions.

Materials and Methods

Tabriz is situated in northwestern Iran and features a semi-arid climate characterized by cold winters and hot, dry summers. Positioned at an altitude of 1361 meters, the city receives about 4,369 hours of sunshine annually, of which approximately 3,047 hours are usable due to weather conditions (Ouria, 2019). According to ASHRAE Standard 55, the psychrometric chart indicates that, without climate-adaptive measures, only 19% of the year offers natural thermal comfort. To evaluate the classroom environment, the study used three key performance indicators:

Daylight Autonomy (DA) — the percentage of time during which natural light meets or exceeds minimum illumination levels, as defined by Reinhart & Walkenhorst (2001).

Daylight Glare Probability (DGP) — a measure of potential visual discomfort due to bright light sources within a space (Van Den Wymelenberg, 2014).

Adaptive Thermal Comfort — determined using updated ASHRAE and EN standards that incorporate outdoor conditions in naturally ventilated buildings (Sergides et al., 2017; Wang et al., 2019).

The research employed Rhino software with the Grasshopper plugin for parametric modeling. This allowed for flexible adjustments of classroom geometry, including width, length, and window size. Ladybug and Honeybee plugins simulated daylight and thermal behavior using actual climate data from Tabriz Airport. Artificial lighting was excluded to isolate the impact of natural light. For optimization, the Octopus plugin within Grasshopper applied the SPEA2 evolutionary algorithm. The three objectives—maximizing daylight autonomy, minimizing glare, and increasing thermal comfort hours—were assigned equal weights to ensure an unbiased evaluation. The simulated classroom was a ground-floor unit with an east-west orientation, featuring one south-facing window and a fixed-size door. The window was modeled as non-operable, double-glazed, and low-emissivity. Except for the southern external wall, all other surfaces were considered adiabatic. The simulation focused on typical school days and hours, excluding holidays and vacations, and assumed adult student occupancy per ASHRAE guidelines.

Results

The primary objective of this study was to determine an optimal ratio between window area and classroom floor area to create a comfortable indoor environment that supports educational activities. Using parametric simulation and multi-objective optimization, the study explored how variations in classroom dimensions and window sizes affected thermal comfort, daylight adequacy, and glare probability. Out of the various configurations tested, 70 optimal solutions were identified using the SPEA2 algorithm. These solutions formed a Pareto front where none dominated the others, meaning each provided a balanced trade-off among the three objectives. The optimal range of window-to-floor ratios was found to be between 0.125 and 0.2. Within this range, several configurations demonstrated particularly high performance in specific areas. For instance, some configurations achieved daylight adequacy levels exceeding 86%, making them suitable for reducing the need for artificial lighting during school hours. Others achieved over 1830 annual hours of

thermal comfort, which would reduce reliance on mechanical heating or cooling systems. In contrast, the best glare performance, with values as low as 0.73, indicating minimal visual discomfort. These results underscore the importance of considering all comfort factors in tandem. Enhancing one objective often impacts another—for example, increasing window size can improve daylight but may also raise glare and thermal instability. The study demonstrates that there is no one-size-fits-all solution; rather, the optimal design based on contextual needs and priorities. Designers may select specific solutions from the Pareto set depending on site conditions, user preferences, or institutional policies on artificial lighting and HVAC usage. Ultimately, the study's findings provide a valuable framework for evidence-based design in educational architecture, especially in cold-climate regions like Tabriz.

Discussion

Ensuring thermal and visual comfort in classrooms is essential for supporting learning and well-being. This study employed multi-objective optimization to explore how window-to-floor ratios affect daylight, glare, and thermal comfort. A ratio between 0.125 and 0.2 was found to be the most effective. Lower ratios reduce glare and maintain daylight levels, whereas higher ratios improve thermal comfort. The results provide practical guidance for cold-climate classroom design in Tabriz. Future research can examine these proportions in other climates and consider additional factors such as acoustic comfort or surface-to-floor ratio as further design parameters.



بهینه‌یابی نسبت سطح بازشو به کف در کلاس‌های درسی به منظور دستیابی توانمند به آسایش حرارتی و بصری دانش‌آموزان

الهام سلیقه^۱، آیدا ملکی^{۲*}، یاسر شهبازی^۲، عباس غفاری^۴

۱. دانشجوی دکترای معماری اسلامی، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

۲. دانشیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

۳. دانشیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

۴. دانشیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱

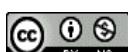
چکیده

طرحی معماری امری پیجیده است که در آن باید به صورت همزمان برای موضوعات و مسائل متعدد پاسخی قانع‌کننده و در خور یافت شود. نسبت مساحت پنجره به کف در کلاس‌های درس مناطق سردسیر، نقش مهمی در افزایش آسایش بصری و حرارتی کاربران دارد. چراکه به طور مستقیم، بر میزان نفوذ نور طبیعی و گرمای تابشی آن تأثیر می‌گذارد. به این ترتیب، نیاز به نور مصنوعی و واستگی به سیستم‌های گرمایشی کاهش می‌یابد. با این حال، نسبت بیش از حد نیز می‌تواند منجر به از دست دادن گرما و انرژی و همچنین خیرگی آزاردهنده شود؛ بنابراین دستیابی به یک نسبت بهینه از مساحت پنجره به کف در کلاس در تأمین آسایش بصری و حرارتی کاربران اهمیت فراوانی دارد و این پژوهش بر این مهم اختصاص یافته است. مدل موردبررسی در این مطالعه، یک کلاس درس در مقطع متوسطه در شهر تبریز است. بهینه‌یابی اهداف تحقیق با استفاده از پلاگین‌های شبیه‌سازی و لیدی و پلاگین بهینه‌ساز اکتاپوس انجام شده است. دستاورد این تحقیق نسبت مساحت پنجره به کف کلاس‌های درسی مطلوب را در بازه ۰/۰ تا ۰/۲۵ معرفی می‌کند. بررسی جدایانه اهداف و پاسخ‌هایی که به عنوان برترین‌های هر هدف معرفی شدند، بیانگر این موضوع است که در اهداف مربوط به میزان خیرگی و آسایش حرارتی تطبیقی، نسبت بهینه سطح بازشو به کف، در حد پایین بازه مذکور و در هدف مربوط به کفایت نور روز، این نسبت در حد بالای بازه مذکور قرار دارد.

واژگان کلیدی

بهینه‌یابی، آسایش حرارتی، کفایت نور روز، خیرگی، کلاس درس

*مسئول مکاتباته: a.maleki@tabriziau.ac.ir



©2025 by the Authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

نور ورودی افزایش و درنتیجه، کفایت نور روز و میزان احتمال خیرگی بیشتر و تعداد ساعت احسان آسایش حرارتی افزایش می‌باید. فرض بر آن است که نسبت یا نسبت‌هایی بین مساحت سطح نورگیر و مساحت کف کلاس درسی وجود دارد که اهداف تحقیق را به صورت توأم‌ان و به میزان مناسب تأمین مدنظر اهداف اصلی این پژوهش، افزایش دریافت نور طبیعی همزمان با افزایش آسایش حرارتی و کاهش خیرگی است. زمینهٔ مورد مطالعهٔ پژوهش حاضر، کلاس‌های درس مقطع دوم متوسطه در شهر تبریز هستند.

۲. پیشینهٔ پژوهش

مرحلهٔ نخست برنامه‌دهی پیش از طراحی بسیار حائز اهمیت است. چراکه تصمیمات اساسی در این مرحله اتخاذ می‌شوند. تصمیم‌گیری‌های این مرحله بر کارایی ساختمان و آسایش ساکنان تأثیر بسیاری دارد (سعادت جو و سلیقه، ۱۴۰۰؛ Taghizade et al., 2019) در امر طراحی، معماران و طراحان با متغیرهای بسیاری سروکار دارند که باید پاسخ مناسبی برای آن‌ها بیابند (Moghtadinejad & Pashaei, 2016). در حال حاضر داده‌های آب‌وهایی اغلب شهرهای جهان، در اختیار طراحان و برنامه‌ریزان قرار دارند که آن‌ها می‌توانند در نرم-افزارهای شبیه‌ساز کارایی ساختمان وارد شوند و عملکرد مشابه محیط واقعی ساختمان را نشان دهند. در کشور ایران نیز به دلیل فقدان دستورالعمل‌های مربوط به طراحی پایدار، استفاده از نرم-افزارهای شبیه‌ساز امکان دستیابی به طرح‌های مؤثر و کارا را برای طراحان فراهم می‌کند & (Bakmohammadi Noorzai, 2020). در طی سالیان اخیر مطالعات گوناگونی در خصوص بررسی و بهبود آسایش بصری و حرارتی در فضاهای انجام گرفته است. کاستودیو و همکارانش، در مطالعه‌ای به بررسی آسایش حرارتی در کلاس‌های دانشگاهی اقلیم مرتبط نیمه استوایی پرداخته‌اند. در این مطالعه با استفاده از مدل‌های تحلیلی و تطبیقی، آسایش حرارتی دانشجویان، در کلاس‌های دلایی تهווیه مطبوع و تهווیه طبیعی مقایسه شده است. پژوهشگران در این پژوهش، متغیرهای محیطی را توسط یک ایستگاه میکرواقلیمی اندازه‌گیری نموده و داده‌های شخصی را از طریق پرسشنامه‌های الکترونیکی در بازهٔ زمانی سپتامبر ۲۰۲۲ تا جولای ۲۰۲۳ جمع‌آوری کرده‌اند. میانگین دمای خنثی حرارتی ۱۹/۸ درجه سانتی‌گراد و ۲۱/۴ درجه سانتی‌گراد در کلاس‌های با تهווیه طبیعی و ۲۱/۸ درجه سانتی‌گراد و ۲۲/۱ درجه سانتی‌گراد در کلاس‌های دلایی تهווیه مطبوع گزارش شده است. علی‌رغم گزارش احساسات گرمایی خنثی توسط دانشجویان، آن‌ها محیط‌های خنکتر را ترجیح می‌دانند. از طرفی میزان تراکم زیر

۱. مقدمه

معماری پایدار ساختمان‌ها موضوعی چندوجهی است، به‌گونه‌ای که باید در آن تمام شرایط و نیازهای افراد و بستر طرح در کنار مفاهیم عملکردی و زیبایی‌شناسی به‌طور همزمان مدنظر قرار گیرد (Fallahatfi & Mahdavinejad, 2015). در فضای آموزشی اطمینان از فراهم شدن شرایط عملکردی به‌منظور فرآگیری مناسب دانش‌آموزان از ضروریات طراحی است (Boubekri et al., 2020). تأمین آسایش حرارتی، توجه به کارایی بنا از منظر انرژی مصرفی و تأمین نور طبیعی در کلاس-های درس مهم‌ترین معیارهای عملکردی در فضای آموزشی هستند (Konis et al., 2016). میزان نور و روشنایی فضای تأثیرات جسمانی و روانی متعددی بر مخاطب دارد و عدم بهره‌مندی از نور مناسب می‌تواند منجر به اختلالات عاطفی و روانی، افسردگی، خستگی و استرس در افراد شود. نور طبیعی از بسیاری جهات، مقدم بر نور مصنوعی است و می‌تواند سبب بهبود کارایی روانی و فیزیکی افراد گردد، به علاوه منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی نیز می‌شود (سلیقه و سعادت جو، ۱۳۹۹). اگرچه بهره‌مندی از نور روز بر سلامتی استفاده‌کنندگان از فضای مؤثر است اما باید توجه داشت که در خشنده‌گی بیش از حد نیز می‌تواند سبب ایجاد خیرگی و عدم آسایش بصری گردد (Kent et al., 2017). کنترل روشنایی فضای به‌گونه‌ای که هم نور کافی تأمین شود و هم موجب خیرگی نشود، چالشی است که طراحان در گیر آن هستند (سلیقه، ۱۴۰۱؛ Veillette et al., 2021). از طرفی، تأمین آسایش حرارتی یکی از ضروریات دیگر عملکردی فضای آموزشی است. چراکه دمای فضای برای ایجاد حس خوب و سلامتی افراد تأثیر بسیاری دارد (Lamberti et al., 2021). توجه به این مسئله که رفع اشکالات بنا بعد از اتمام کار ساختمان بسیار پیچیده و دشوار است، اهمیت مطالعات و شبیه‌سازی‌های پیش از طراحی را آشکارتر می‌سازد (Javanroodi et al., 2019؛ Xu et al., 2021). بهره‌مندی از راه حل‌های بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم در راستای دستیابی به بهترین حالت‌های طراحی، بسیار مؤثر و مقول به صرفه است (Talaei et al., 2021). روش بهینه‌سازی چنددهده در مسائل مختلف به‌منظور تأمین بینایی و تأمین اهداف متناقض یا غیرهمسو به کار می‌رود. در مقالهٔ پیشرو با بهره‌گیری از شیوهٔ بهینه‌سازی چنددهده مبتنی بر الگوریتم، به دنبال تبیین نسبت بهینهٔ مساحت پنجره به مساحت کلاس در راستای تأمین همزمان نور طبیعی مناسب، عدم خیرگی افراد و فرآهم نمودن آسایش حرارتی دانش‌آموزان است. فرضیه تحقیق، آن است که با افزایش نسبت سطح بازشو به کف کلاس، میزان

وروودی مورد شناسایی قرار گرفته‌اند (Ziae & Vakilnezhad, 2022) در پژوهشی که ژو (Xu) و همکاران، در خصوص طراحی کلاس‌های درسی ابتدایی در چین انجام داده‌اند، یک روش بهینه‌سازی چنددهدفه بر مبنای شبکه هوش مصنوعی مورداستفاده قرار گرفته است. در این پژوهش، از نرم‌افزارهای انرژی پلاس (Energyplus)، متلب (Matlab) و الگوریتم ان-اس جی ای ۲ (NSGAII) استفاده شده و جبهه جواب پارت‌تو بهمنظور بهینه‌سازی و اولویت‌بندی جواب‌ها به کاررفته است. اهداف بهینه‌سازی شده شامل شاخص‌های کلیدی مانند میزان انرژی مصرفی و آسایش فضای داخلی می‌شوند. در بررسی و مقایسه نتایج نسبت به طرح معیار، روش به کاررفته گرفته شده منجر به افزایش ۴۷/۸٪ درصد مدت‌زمان قرارگیری در محدوده آسایش، کاهش ۸۱۰/۸ کیلووات ساعت مصرف انرژی سالانه و افزایش ۴/۲٪ در میزان ساعت خارج از محدوده آسایش شده است (Xu et al., 2021). در تحقیقی دیگر به بهینه‌سازی چند متغیره کلاس مدارس متوسطه از منظر بهبود نور طبیعی، آسایش حرارتی و بهره‌وری انرژی در اقلیم گرم و خشک و با استفاده از روش پارامتریک پرداخته شده است. متغیرهای این پژوهش، مصالح به کاررفته در دیوار، نسبت سطح بازشو به دیوار، انواع شیشه‌ها و ابزار سایه‌اندازی بوده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با تعییر و تنظیم متغیرهای مربوط به پوسته ساختمان می‌توان بهره‌مندی از نور طبیعی، آسایش حرارتی و نیز بهره‌وری انرژی را در ساختمان‌های آموزشی این اقلیم بهبود بخشید (Lakhdari et al., 2021; Bakmohammadi & Noorzai, 2020). این مقاله در پی بهبود بخشیدن عناصر معماری از جمله هندسه فضای با ایجاد حوزه‌های نوری مستقل و قابل کنترل بوده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهند که با این روش، میزان مصرف انرژی تا ۴۲/۹۲ کیلووات ساعت بر مترمربع، کاهش و میزان احساس آسایش حرارتی افراد بهبودیافته است. در یک پژوهش دیگر، رویکرد نوآورانه‌ای برای بهینه‌سازی بازشوهای ساختمان‌های اداری از منظر کارایی انرژی و عملکرد بصری به کاررفته است. در این روش از نرم‌افزارهای راینو و افزونه‌های گرس‌هایپ (Honeybee) و لیدی‌بگ (Ladybug) به همراه الگوریتم هایپ (HypE) در اکتاپوس (Octopus) در راینو (Rhino) برای بهینه‌سازی و از نرم‌افزار اوین استودیو برای تحلیل آسایش حرارتی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که ویژگی‌های قفسه‌های نوری در کلاس‌های شهر ساری و تهران مشابه است و برخی روابط بین زوایای قفسه‌ها و نور

۱۰۰ افراد بر احساسات حرارتی آن‌ها تأثیری نداشته است. نتیجه این پژوهش، نشان می‌دهد مدل PMV/PPD قادر نبوده است که آسایش حرارتی کاربران را بدروستی پیش‌بینی کند. در حالی که مدل آسایش تطبیقی برای این موضوع مؤثرتر بوده است (Custodio et al., 2024). در مطالعه دیگری، نیزا و همکارانش، به ارزیابی آسایش حرارتی در کلاس‌های درسی دانشگاهی بزریل با در نظر گرفتن دست‌بندی جنسیتی و ترجیحات حرارتی افراد پرداخته‌اند. بر اساس نتایج این پژوهش، محدوده آسایش حرارتی برای زنان بین ۲۰/۳۹ و ۲۲/۱۹ درجه سانتی‌گراد تعیین شده است. مردان ۱۹/۴۷ تا ۵۶/۲۲ درجه سانتی‌گراد تعیین شده است. پژوهشگران این مطالعه معتقد هستند که در نظر گرفتن تقاضات‌های جنسیتی در دستیابی به آسایش حرارتی و ارائه دستورالعمل‌های رفاهی کاربران اهمیت بالایی دارد (Niza et al., 2023). نسما و سایر همکارانش، در پژوهشی تحلیلی به بررسی قفسه‌های نوری و تخمين روشنایی مناسب در روز و آسایش بصری با روش طراحی پارامتریک پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش، پارامترهای بهینه طراحی برای قفسه‌های نوری و آفتتاب‌گیرهای پنجره‌ها را زاویه نصب مناسب با جهت‌گیری ساختمان و درصد شفافیت مناسب می‌داند (Nesma et al., 2023). علاوه بر بررسی هر یک از اهداف ذکر شده به صورت جداگانه، نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهند که استفاده از روش بهینه‌سازی چنددهدفه بر مبنای شبکه هوش مصنوعی می‌تواند اهداف چندگانه را همزمان بررسی و بهینه‌سازی کند. بهیان دیگر، متغیرها و اهداف متضاد موجود در امر طراحی توسط نرم‌افزارهای بهینه‌ساز به طور همزمان می‌تواند بهینه‌سازی شوند Ziae & Vakilnezhad, 2022; Xu et al., 2021; Lakhdari et al., 2021; Bakmohammadi & Noorzai, 2020; Zhang et al., 2017; Mahdavinejad et al., 2016.

در تحقیق ضیایی و وکیل نژاد، به بهینه‌سازی ویژگی‌های قفسه‌های نوری در کلاس‌های مدارس تهران و ساری پرداخته شده است. هدف اصلی این تحقیق، بهبود آسایش حرارتی کاربران و بهره‌وری از نور طبیعی بوده است. از افزونه‌های اکتاپوس (Octopus) و گرس‌هایپ (Grasshopper) در راینو (Rhino) برای بهینه‌سازی و از نرم‌افزار اوین استودیو برای تحلیل آسایش حرارتی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که ویژگی‌های قفسه‌های نوری در کلاس‌های شهر ساری و تهران مشابه است و برخی روابط بین زوایای قفسه‌ها و نور

که استفاده از سامانه‌های ترکیبی، از طریق تلفیق رف نوری به همراه سایبان، می‌تواند نوری پکنواخت با میانگین شدت روشنایی ۳۰۰ لوکس در سطح میز دانش‌آموzan در کلاس درس مورد آزمایش ایجاد کند (مهدوی نژاد و همکاران، ۱۳۹۵). تحقیقات مورداشاره در این بخش به اختصار در جدول (۱) آمده است. علی‌رغم وجود برخی مطالعات و دستورالعمل‌های طراحی در خصوص نحوه ساخت مدارس در کشور ایران، همچنان کمبود منابع کاربردی در امر طراحی ساختمان‌های مناسب مدارس ایرانی از منظر آسایش حرارتی مشاهده می‌شود. مطالعات انجام‌گرفته در سایر نقاط جهان، به دلیل محدودیت‌های تحقیقاتی، قادر به پاسخ‌گویی به مسئله طراحی مدارس در ایران نیستند (Zahiri & Altan, 2016). علاوه بر این، مطالعات صورت گرفته در راستای پهینه‌سازی آسایش حرارتی و بصری در کلاس‌های درسی، کمتر به تأثیر ابعاد پرداخته‌اند و تقریباً هیچ مطالعه‌ای در خصوص تأثیر نسبت سطح بازشو به مساحت کف در این خصوص انجام نگرفته است. در پژوهش حاضر، عامل نسبت مساحت بازشو به مساحت کف کلاس درسی به عنوان متغیرهای مستقل و شاخص‌های مربوط به آسایش بصری و حرارتی متغیرهای وابسته محسوب می‌شوند.

نتایج پژوهش حاکی از آن هستند که با کاهش ۱۲ درصدی مصرف انرژی و بهبود کیفیت دید در بیش از ۸۰٪ از نقاط شبیه‌سازی شده، روش حاضر توانسته بهبود قابل توجهی در دریافت روشنایی روز و کیفیت دید رضایت‌بخش ایجاد کند (Pilechiha et al., 2020). در تحقیقی دیگر، بهینه‌سازی توأمان نور روز دریافتی و آسایش حرارتی در مدارس چنین مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه، موقعیت قرارگیری کلاس درس، ویژگی‌های مختلف سطوح بازتابنده، نوع اینزار سایه‌انداز و ویژگی‌های آن، به عنوان متغیر موردنرسی قرار گرفته‌اند. محققان اشاره کرده‌اند که بر مبنای نتایج حاصل از مدل بهینه می‌توان میزان استفاده از نور روز را بهبود بخشید و تعداد ساعات عدم آسایش حرارتی را کاهش داد (Zhang et al., 2017). مهدوی نژاد و همکارانش در مقاله‌ای به بهینه‌سازی چنددهدۀ تنشیات و موقعیت رفهای نوری به منظور استفاده بیشینه مطلوب از نور طبیعی و جلوگیری از خیرگی در کلاس درسی در شهر تهران پرداخته‌اند. در این مطالعه، با تأکید بر تنشیات بهینه برای بهره‌گیری حداکثری از نور طبیعی در روز در فضای داخلی، از یک سطح بازتابنده و انتقال دهنده نور جهت نفوذ دهی عمیق تر نور به فضا استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهند

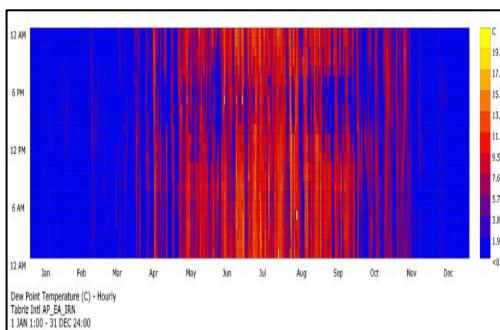
جدول ۱. بررسی اختصاری پیشینه تحقیق

Table 1. A Brief Review of Research Background

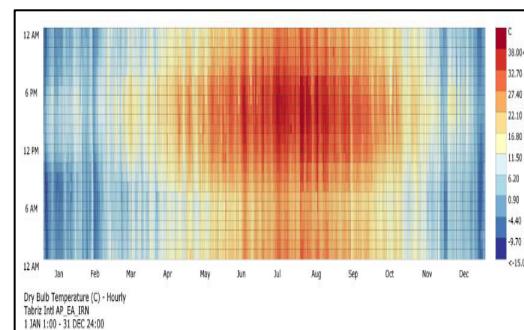
نام پژوهش	نویسنده‌گان	اهداف	متغیرها	ابزار مورد استفاده
Thermal comfort in university classrooms in humid subtropical climate: Field study during all seasons Thermal Comfort Assessment in University Classrooms: A Discriminant Analysis for Categorizing Individuals According to Gender and Thermal Preferences Optimizing Visual Comfort in School Buildings Through Parametric Design Multi-objective optimization of daylight performance and thermal comfort in classrooms with light-shelves: Case studies in Tehran and Sari, Iran A Novel Optimization Method for Conventional Primary and Secondary School Classrooms in Southern China Considering Energy Demand, Thermal Comfort and Daylighting Parametric optimization of daylight, thermal and energy	Custodio et al., 2024 Niza et al., 2023 Nesma et al., 2023 Ziae & Vakilnezhad, 2022 Xu et al., 2021 Lakhdari et al., 2021	آسایش حرارتی آسایش حرارتی آسایش بصری آسایش حرارتی آسایش حرارتی آسایش حرارتی	آسایش حرارتی آسایش حرارتی زاویه و شفافیت قفسه‌های نوری و آفتاب‌گیرهای بیرونی بهره‌مندی از نور طبیعی بهره‌مندی از نور طبیعی بهره‌مندی از نور طبیعی نسبت سطح بازشو به دیوار ویژگی‌های مخالف قفسه‌های بازشو ویژگی‌های مخالف قفسه‌های بازشو نسبت سطح بازشو به دیوار ویژگی‌های مصالح به کاررفته در بازشو ویژگی‌های مختلف مصالح دیوار	دیتالاگر و برداشت میدانی پرسشنامه دیتالاگر و برداشت میدانی پرسشنامه Rhino-Grasshopper Ladybug-Honeybee Rhino-Grasshopper Ladybug-Honeybee Openstudio Octopus Matlab Energyplus Rhino-Grasshopper Ladybug-Honeybee

نام پژوهش	نویسنده‌گان	اهداف	متغیرها	ابزار مورد استفاده
performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions		آسایش حرارتی بهره‌مندی از نور طبیعی	نوع مصالح دیوار نوع مصالح بازشو نوع ابزار سایه‌انداز	Octopus
Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions	Bakmohammadi & Noorzai, 2020	بهره‌وری انرژی آسایش حرارتی بهره‌مندی از نور طبیعی	نوع هندسه فضا	Rhino-Grasshopper Ladybug-Honeybee Octopus
Multi-objective optimisation framework for designing office windows: quality of view, daylight and energy efficiency	Pilechiha et al., 2020	کیفیت دید ویژگی‌های ابعادی پنجره فاصله لبه‌های پنجره از دیوارها و سقف و کف بهره‌وری انرژی	ویژگی‌های مختلف سطوح بازنگشته نوع ابزار سایه‌انداز و ویژگی‌های آن	Rhino-Grasshopper Ladybug-Honeybee Energyplus Octopus
Optimization of thermal and daylight performance of school buildings based on a multi-objective genetic algorithm in the cold climate of China	Zhang et al., 2017	موقیع قرارگیری کلاس درس بهره‌مندی از نور طبیعی آسایش حرارتی	میزان و کیفیت بهره-مندی از نور طبیعی	Rhino-Grasshopper Ladybug-Honeybee Energyplus Octopus
بهینه‌سازی تنشیات و نحوه استفاده از رف نور در معماری کلاس‌های مهدوی نژاد و دیگران، ۱۳۹۵ آموزشی		میزان و کیفیت بهره-مندی از نور طبیعی	تناسبات و ابعاد رف نوری	Ecotect Radiance

2006). ارتفاع این شهر از سطح دریا ۱۳۶۱ متر و رطوبت هوا هم در فصل تابستان و هم در فصل زمستان کم است. در شکل (۱)، اطلاعات بعضی از پارامترهای مستقل اقلیمی مانند دمای خشک، دمای نقطه شنبن، میزان تابش مستقیم عمودی خورشید و رطوبت نسبی تبریز در ساعت‌های مختلف سال بر اساس فایل آب و هوایی (epw) با استفاده از افزونه لیدی‌بگ مورد تحلیل قرار گرفته است. میانگین بارندگی در این شهر ۳۲۳ میلی-متر و متوسط دمایی آن ۱۱/۶ درجه سانتی‌گراد است (Ouria, 2019).



B-

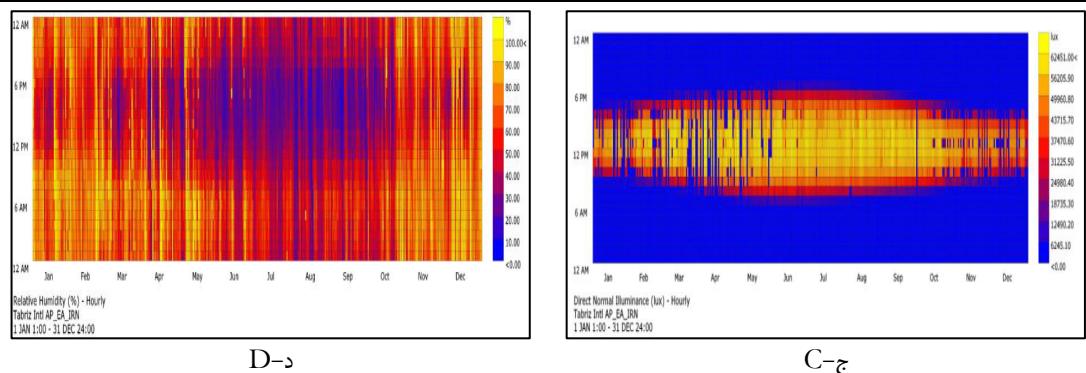


A-

۳. روش و ابزارهای پژوهش

۳-۱. بررسی بستر موردمطالعه

تبریز شهری در شمال غربی ایران است که از لحاظ جغرافیایی در ۳۸ درجه و ۵ دقیقه شمال خط استوا و ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه شرق گرینویچ قرار دارد. طبق طبقه‌بندی کوپن (Köppen) و گایگر (Geiger)، تبریز در حوزه اقلیم نیمه‌خشک و در عرض‌های میانی جغرافیایی با زمستان‌هایی سخت و تابستان‌هایی گرم و خشک قرار گرفته است (Kottek et al., 2010).



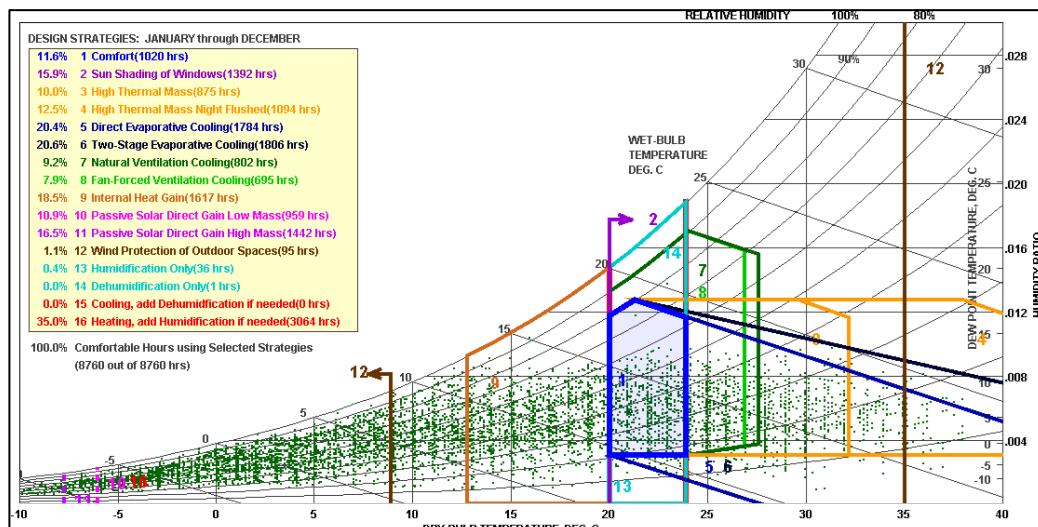
شکل ۱. کانتورهای گرافیکی مربوط به پارامترهای اقلیمی به صورت ساعتی، برگرفته از پایگاه داده‌های هواشناسی فرودگاه تبریز، از ابتدای ماه ژانویه تا پایان دسامبر- (الف) دمای جباب خشک (°C) (ب) دمای نقطه شبنم (°C) (ج) تابش مستقیم (lux) (د) رطوبت نسبی (%).

Fig 1. Graphic Contours of Climatic Parameters on an Hourly Basis, Extracted from Tabriz Airport Meteorological Database, from January to December. **A.** Dry bulb temperature (°C) **B.** Dew point temperature (°C) **C.** Direct vertical irradiance (lux) **D.** Relative humidity (%)

دسترسی به نور خورشید امکان پذیر است (Ouria, 2019). با توجه به نمودار سایکرومتریک شهر تبریز، استاندارد اشری ۵۵ (ASHRAE 55) و فاکتورهای مختلف تأثیرگذار، محدوده آسایش حرارتی برای این شهر مشخص شده است (شکل ۲). طبق این نمودار، بدون در نظر گرفتن تمیهیات طراحی اقلیمی ساختمان، تنها در ۱۷۰۸ ساعت (۱۹٪ کل ساعت سال) آسایش حرارتی برای ساکنان فراهم می‌باشد.

با افزایش میزان ساعت‌های آفتابی، امکان بهره‌برداری مؤثرتر از نور طبیعی در کلاس‌های درس فراهم می‌شود، به شرطی که از ایجاد خیرگی و اختلال در آسایش بصری دانش‌آموzan جلوگیری شود.

شهر تبریز به طور کلی ۴۳۶۹ ساعت در طول سال ساعت آفتابی دارد و ۳۰ درصد از این ساعت‌ها در روزهای مه آلود و ابری به هدر می‌رود و صرفاً در ۳۰۴۷ ساعت (۳۵٪ کل ساعت سال)



شکل ۲. نمودار سایکرومتریک شهر تبریز و حوزه آسایش حرارتی در آن (برگرفته از ورزن ۱۰ نرم‌افزار کالایمیت کانسلتنت (Climateconsultant))

Fig 2. Graphic Contours of Climatic Parameters on an Hourly Basis, Extracted from Tabriz Airport Meteorological Database, from January to December

کلیدی کفایت نور روز و احتمال خیرگی بیش از سایر موارد در ارزیابی آسایش نوری و بصری مورد توجه قرار گرفته‌اند. چنانچه از تعاریف این فاکتورها و نمونه‌های مشابه در سایر پژوهش‌ها نیز بر اساس یافته‌های این پژوهش و مطالعات مشابه، دو عامل فرهنگ معماری و شهرسازی اسلامی؛ سال دهم، شماره اول، ۱۴۰۴

۲-۳. شاخص‌های آسایش بصری

Table 2. Discomfort Glare Criteria

میزان آزاردهندگی خیرگی	احتمال خیرگی نور روز
DGP < 0.35	تابش خیره‌کننده نامحسوس
0.35 < DGP < 0.4	تابش خیره‌کننده محسوس
0.4 < DGP < 0.45	تابش خیره‌کننده آزاردهندگ
0.45 < DGP	تابش خیره‌کننده غیرقابل تحمل

۳-۳. شاخص آسایش حرارتی

آسایش حرارتی، اصطلاحی برای توصیف یک محیط حرارتی رضایت‌بخش و بلومن استرس در ساختمان‌ها است که به صورت یک مفهوم جمعی و به‌واسطه هنجارها و انتظارات تعریف شده است (Nicol et al., 2012). در نسخه اولیه استاندارد اشتری (Dear & Brager, 1997) اشاری، ۵۵، شرایط مفروض استانداردهای آسایش حرارتی با تمکر بر مدل‌های تعادل حرارتی بودند. بر این اساس، آسایش حرارتی زمانی به دست می‌آمد که دمای بدن در محدوده‌ای بسیار محدود از تعادل حرارتی قرار گیرد. در این مورد، تلاش فیزیولوژیکی افراد برای اتصال با محیط و احساس آسایش نادیده گرفته می‌شده است و صرفاً عوامل محیطی (دماء، تابش حرارتی، رطوبت و سرعت هوای)، به علاوه عوامل شخصی (فعالیت و لباس) به عنوان عوامل تأثیرگذار بر آسایش حرارتی افراد مطرح می‌شده‌اند (DenWymelenberg, 2014).

میلادی از رابطه بین دمای آسایش داخلی و دمای بیرون، برای تعریف مناطق قابل قبول برای دمای داخلی در ساختمان‌های با تهیه‌کننده طبیعی استفاده می‌کرد؛ بنابراین، باید اصلاحاتی انجام می‌شود تا تفاوت بین رفتار ساکنان و آنچه استانداردها پیش‌بینی می‌کردند به حدائق برسد، پس از مطالعات میدانی بسیار و پرسش از میزان آسایش ساختمان‌های دارای تهیه‌کننده طبیعی، استانداردهای آسایش حرارتی تطبیقی (Adaptive) به وجود آمد. این مدل در حال حاضر توسط استانداردهای بین‌المللی مانند اشتری ۵۵-۲۰۱۳ (ASHRAE Standard 55-2013) و استاندارد اروپایی ای ان ۱۵۲۵۱ (EN 15251) پشتیبانی می‌شود (Sergides et al., 2017; Wang et al., 2019).

این مدل برای تحلیل آسایش حرارتی تطبیقی کاربران استفاده شده است. رابطه محاسبه آسایش حرارتی تطبیقی در استاندارد اشتری ۵۵ به صورت زیر است:

$$Tcomf = 0.31 \times Tm_{out} + 17.8 \quad (2)$$

در این رابطه $Tcomf$ ، بیانگر دمای آسایش داخلی و Tm_{out} میانگین ماهانه دمای خارجی است. در نتایج این

برمی‌آید، کفایت نور دریافتی از یک طرف و عدم خیرگی از سوی دیگر، بیشترین اختلال آسایش بصری را به دنبال خواهد داشت.

۳-۲-۱. کفایت نور روز

این فاکتور از معیارهای پویای اندازه‌گیری نور روز به شمار می‌رود. معیارهای پویای اندازه‌گیری نور روز مبتنی بر داده‌های سری‌های زمانی روشنایی هستند که خود از داده‌های تابش خورشیدی سالانه در منطقه موردنظر استخراج می‌گردد. مزیت معیارهای پویای عملکرد نور روز نسبت به معیارهای ایستادن است که تأثیر تغییرات روزانه نور و نیز شرایط آب و هوایی مد نظر قرار می‌گیرند (Reinhart et al., 2006). در تعاریف، کفایت نور روز عبارت است از نسبت تعداد ساعتی از سال که روشنایی حاصل از نور روز بیش از حدائق روشنایی موردنیاز فضا است بر کل تعداد ساعتی از سال که فضا موردناستفاده قرار می‌گیرد (Reinhart & Walkenhorst, 2001). کفایت نور روز، توسط استانداردهایی مانند استاندارد انجمن مهندسی روشنایی آمریکای شمالی (IESNA)، برای کار خاصی در زمان مشخصی از سال تعیین می‌شود (Alhagla et al., 2019).

۳-۲-۲. احتمال خیرگی نور روز

این شاخص بهمنظور ارزیابی میزان احتمال خیرگی افراد در فضای داخلی در مواجهه با تابش نور روز به کار می‌رود (Van DenWymelenberg, 2014)

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

در رابطه احتمال خیرگی نور روز، E_v روشنایی عمودی بر حسب لوکس است که به چشم می‌رسد و به‌واسطه منبع نور تولید می‌شود، $l_{s,i}$ روشنایی منبع نور بر حسب کندلا بر متربع زاویه $\omega_{s,i}$ (cd/m²) و P_i (rad) و P شاخص موقعیت است که بیانگر تغییر در میزان خیرگی آزاردهندگ است. بر اساس این رابطه، میزان آزاردهندگی خیرگی دید ناظر است. بر اساس این رابطه، میزان آزاردهندگی خیرگی حاصل از نور روز بر اساس جدول (۲) در چهار طبقه دسته‌بندی می‌شود (Bakmohammadi & Noorzai, 2020).

جدول ۲. معیار آزاردهندگی خیرگی (Bakmohammadi & Noorzai, 2020)

تحقیق، تعداد ساعتی که در آن آسایش حرارتی تطبیقی بر مبنای فرمول فوق برقرار بوده است، گزارش می‌شود.

۳-۴. ابزار پژوهش

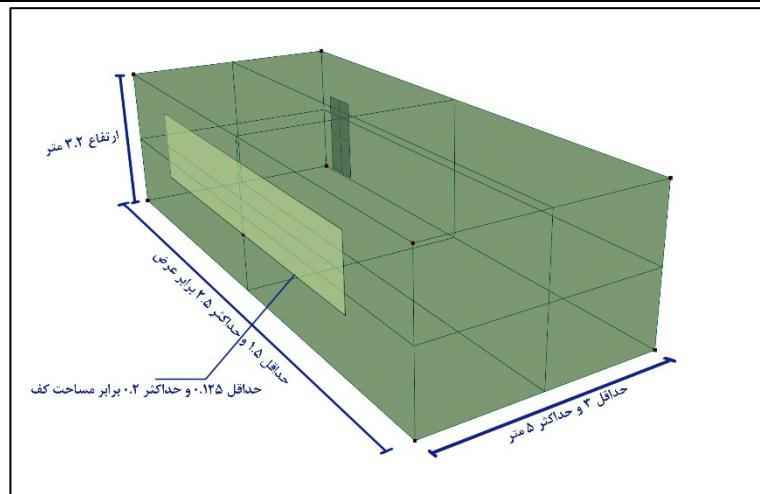
در پژوهش پیش‌رو، برای شبیه‌سازی فضای کلاس درسی از نرم‌افزار گرافیکی راینو و افزونه گرس‌هایپر جهت تعییر پارامتریک حجم و سطح کلاس درسی و نورگیر دیوار جنوبی استفاده شده است. مدل سازی پارامتریک به محقق این امکان را می‌دهد تا تمام امکان‌های موجود در یک بازه تعییر معین را بررسی کند (Gursel Dino & Üçoluk, 2017). بهمنظور اندازه‌گیری عوامل مرتبط با آسایش بصری و حرارتی، از افزونه‌های لیدی‌باگ و هانی‌بی استفاده شده است. برای ارزیابی دقیق تر میزان دریافت نور طبیعی و حد آسایش بصری، از نور مصنوعی در فضا صرف‌نظر شده است. داده‌های اقلیمی موردنیاز مانند شرایط آب‌وهواي و شرایط آسمان از طریق فایل آب‌وهواي کالیبره شده‌ای که از ایستگاه هواشناسی فرودگاه تبریز استخراج و در پایگاه داده‌های لیدی‌باگ موجود است، تأمین شده است. شرایط آسمان در بحث مربوط به میزان نور ورودی به فضا و بحث خیرگی تأثیر بسزایی دارد. حداقل نور موردنیاز در فضای کلاس درسی ۳۰۰ لوکس و آستانه نهایی اجتناب از خیرگی ناراحت‌کننده ۰/۴ در نظر گرفته شده است (Othman and Mazli, 2012).

در این مقاله، بهمنظور بهینه‌سازی از افزونه اکتاپوس (Octopus) به روی گرس‌هایپر استفاده شده است. این افزونه، اصول تکاملی را در طراحی پارامتریک و حل مسئله اعمال می‌کند. در این راستا، برای انتخاب مجموعه جواب بهینه از الگوریتم اس‌پی‌ای ۲ در افزونه اکتاپوس استفاده شده است. لازم به ذکر است که وزن اهداف در این پژوهش، یکسان در نظر گرفته شده است تا پاسخ‌های کارای بهدست‌آمده دارای شرایط مطلوب در تمام توابع باشند.

۳-۵. مدل و شرایط شبیه‌سازی

در این مطالعه مدل موردنرسی، کلاس درسی مقطع متوسطه در شهر تبریز است. دلیل انتخاب این مقطع تحصیلی، دسته‌بندی دانش‌آموzan آن در گروه بزرگ‌سالان استانداردهای مربوط به احساس آسایش فیزیکی فرد در محیط، علی‌الخصوص پیش‌فرض‌های موجود در استاندارد اشری، است.

مدل پایه شبیه‌سازی، کلاسی است که جهت‌گیری شرقی- غربی دارد و ارتفاع فضای $\frac{3}{2}$ متر، عرض آن متغیر در بازه ۳ و ۵ متر و طول آن متغیر و تابعی از عرض است به‌گونه‌ای که حداقل و حداقل طول مضرب $\frac{1}{5}$ تا $\frac{2}{5}$ برابر عرض کلاس است. این نسبت با استناد به ضوابط ارائه شده توسعه سازمان نوسازی مدارس استخراج شده است. با توجه به بررسی آماری که از مدارس این مقطع در شهر تبریز به عمل آمده است، قریب به ۶۵٪ کلاس‌های این مدارس صرفاً یا توانماً دارای نورگیری جنوبی و ۴۵٪ آن‌ها صرفاً یا توانماً دارای نورگیر شمالي بوده‌اند. با استناد به این آمار و با توجه به اقلیم شهر تبریز، کلاس‌های دارای نورگیر جنوبی پرکاربردتر بوده است؛ بنابراین مدل شبیه‌سازی کلاس دارای یک پنجره جنوبی است که مساحت آن متغیر و وابسته به تعییر مساحت کلاس است. علت عدم تقسیم سطح نورگیر به بیش از یک پنجره آن است که زمانی که ماشین ابعاد حد پایین بازه تعريف شده برای طول و عرض کلاس را انتخاب می‌کند، ابعاد پنجره هم به تعییت از این تناسبات کاهش می‌یابد. در این پژوهش برای جلوگیری از کاهش بیش از حد و غیر منطقی مساحت پنجره‌ها از یک بازشو استفاده شده است تا مساحت کلی بازشو استخراج شود. لازم به ذکر است که ارتفاع کف پنجره از کف کلاس به صورت ثابت $\frac{1}{2}$ متر و ارتفاع پنجره به طور ثابت $\frac{1}{5}$ متر در نظر گرفته شده که در این خصوص هم ضوابط سازمان نوسازی مدارس ملاک عمل قرار گرفته است (دفتر فنی سازمان نوسازی، توسعه و تجهیز مدارس، ۱۳۸۶). بعلاوه، یک در با ابعاد ثابت 2×1 متر به عنوان ورودی کلاس در نظر گرفته شده است (شکل ۳).



شکل ۳. مدل کلاس درسی مورد مطالعه

Fig 3. Model of the Classroom Under Study

موقعیت کلاس مدل سازی شده به صورت اتفاقی در طبقه همکف یک مدرسه دوطبقه تعریف شده است. کف این کلاس مجاور با زمین، دو جبهه شرقی و غربی مجاور با کلاس ها و سقف آن مجاور با طبقه فوقانی بوده و اتلاف حرارت از این جوانب صورت نمی گیرد و به اصطلاح، دیوارها و سقف، آدیاباتیک (Adiabatic) تعریف شده اند. تنها، دیوار جبهه جنوبی دیوار خارجی محسوب می شود و مجاور فضای کنترل نشده قرار گرفته

جدول ۳. مشخصات مصالح به کار رفته در دیوار جبهه جنوبی مدل

Table 3. Specifications of Materials Used in the South-Facing Wall of the Model

آجر پلاک	آجر پلاک	آجر گچ					
ملات ماسه سیمان	بلوک لیکا	اندو سیمانی					
ملاس ماسه سیمان	بلوک لیکا	اندو سیمانی					
آجر پلاک	آجر گچ	آجر گچ	آجر گچ	آجر گچ	آجر گچ	آجر گچ	آجر گچ
ملات ماسه سیمان	بلوک لیکا	اندو سیمانی					
آجر پلاک	آجر گچ	آجر گچ	آجر گچ	آجر گچ	آجر گچ	آجر گچ	آجر گچ

پنجره به سطح کف، اهداف یا متغیرهای وابسته شامل عوامل آسایش بصری و حرارتی موردنبررسی قرار گرفته اند و جواب های بهینه استخراج شده اند. همچنین، متغیرهای مداخله گری همچون چیشن و شکل مبلمان، ثابت در نظر گرفته شده اند.

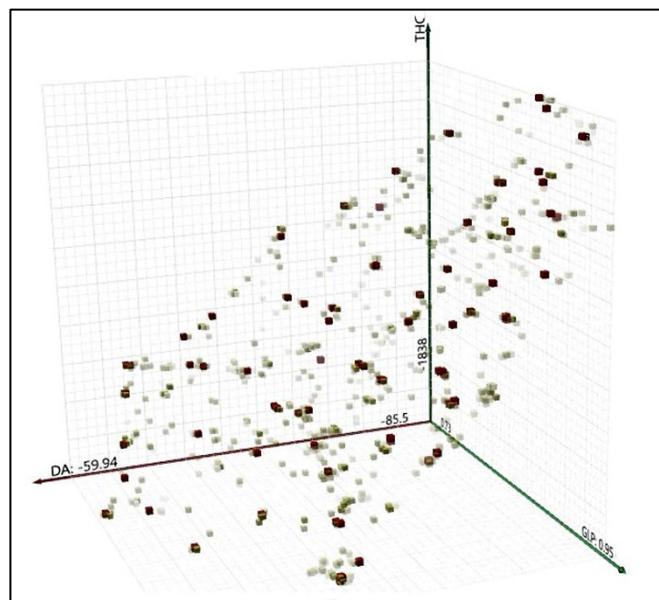
۴. یافته ها

این تحقیق با هدف بهینه یابی نسبت سطح بازشو به کف در

در خصوص زمان های موردنظر برای تحلیل آسایش حرارتی و بصری، زمان های آموزشی به صورت روزانه از ساعت ۷ صبح تا ۶ بعدازظهر مورد تحلیل قرار گرفته اند. لازم به ذکر است که روزهای تعطیل، از جمله روزهای جمعه، تعطیلات تابستانی (اول تیر تا اول مهرماه) و همچنین تعطیلات رسمی از جدول زمانی مربوط حذف شده اند. در روند این تحقیق با تغییر متغیرهای مستقل شامل عرض کلاس، ضریب طول کلاس و نسبت مساحت

توجه به همگرایی نتایج، بهینه‌سازی در نسل ۱۸۵ متوقف گردید. برای انتخاب مجموعه راهحل‌های بهینه، الگوریتم اسپی‌ای‌ای ۲ در بستر افرونهٔ اکتاپوس استفاده شد و مجموعه جواب بهدست آمده در مرز جبههٔ جواب نهایی شامل ۷۰ راه حل است. در شکل (۴)، نقاط قرمزنگ موقعیت ۷۰ راه حل بهینه را در سه محور اهداف تحقیق که متعلق به جبههٔ جواب نهایی بهینه‌سازی هستند، نشان می‌دهند. جواب‌های بهینهٔ جبههٔ جواب نهایی پارتو و مقدار هر یک از اهداف تحقیق در این جواب‌ها در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

مدل یک کلاس درسی با فرضیات ابعادی معرفی شده و بهمنظور تأمین همزمان آسایش حرارتی و آسایش بصری دانش‌آموزان انجام یافته است. در این بستر تحقیقاتی ابعاد کلاس به عنوان متغیرهای مستقل و میزان آسایش حرارتی تطبیقی ساکنان و میزان کفايت نور روز برای فعالیت آموزشی در طول سال و نیز میزان خیرگی ایجاد شده به واسطه نور روز به عنوان متغیر وابسته تعریف شده‌اند. در تنظیمات مربوط به بهینه‌سازی، نرخ نسبتی بر عدد ۰/۵، احتمال جهش ۰/۲، نرخ جهش ۰/۹، نرخ تقاطع متقطع ۰/۸ و تعداد اعضای جامعه بر عدد ۱۰۰ تنظیم شد. با



شکل ۴. موقعیت ۷۰ راه حل بهینهٔ جبههٔ جواب نهایی پارتو در نسل ۱۸۵

Fig 4. Location of 70 Optimal Solutions on the Final Pareto Front in Generation 185

جدول ۴. جواب‌های بهینهٔ جبههٔ جواب نهایی پارتو و مقدار هر یک از اهداف تحقیق در این جواب‌ها

Table 4. Optimal Solutions of the Final Pareto Front and the Value of Each Research Objective in These Solutions

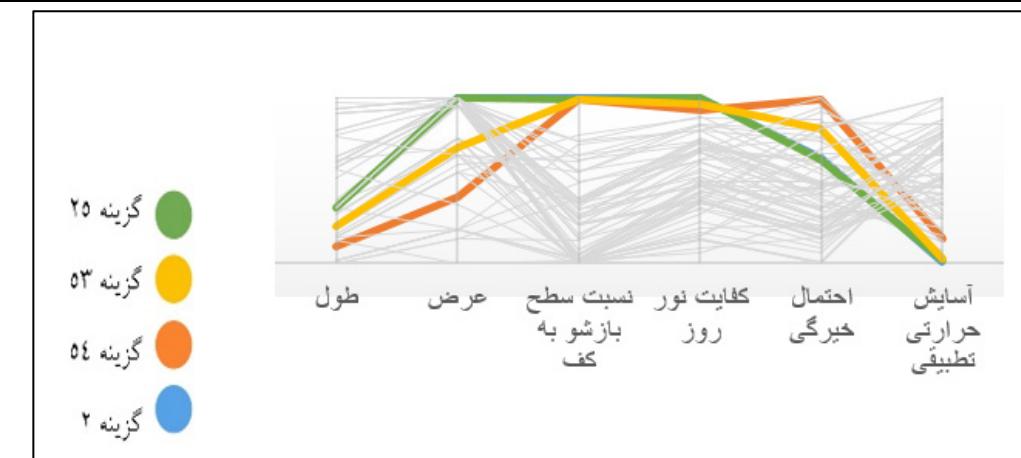
ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف
ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف	ردیف
۱	۴.۷۶	۳۷.۵۰	۷۳.۲۶	۰.۸۰۷۶	۱۷۹۸	۳۶	۲.۲۰	۱۶.۳۳	۷۲.۵۶	۰.۹۳۱۲	۱۸۱۱	ردیف	ردیف	ردیف
۲	۴.۳۱	۲۱.۶۶	۸۴.۵۶	۰.۹۶۴۱	۱۷۰۰	۳۷	۴.۹۳	۳۶.۰۱	۷۶.۱۳	۰.۸۳۲۱	۱۷۸۵	ردیف	ردیف	ردیف
۳	۷.۷۸	۴۳.۲۲	۸۳.۵۶	۰.۸۶۳۴	۱۶۹۹	۳۸	۸.۱۸	۵۷.۶۲	۷۰.۷۹	۰.۷۷۴۱	۱۷۶۱	ردیف	ردیف	ردیف
۴	۷.۸۱	۶۲.۵۰	۶۴.۰۸	۰.۷۳۱۱	۱۷۹۲	۳۹	۱۰.۱۲	۶۲.۵۰	۷۶.۵۱	۰.۸۰۴۱	۱۷۱۹	ردیف	ردیف	ردیف
۵	۴.۱۵	۳۲.۴۰	۷۲.۴۹	۰.۸۳۷۳	۱۸۰۳	۴۰	۳.۹۴	۲۷.۷۳	۷۶.۵۹	۰.۸۸۵۹	۱۷۸۱	ردیف	ردیف	ردیف
۶	۸.۲۰	۵۵.۰۰	۷۴.۸۶	۰.۷۹۶۱	۱۷۳۹	۴۱	۴.۶۱	۲۵.۲۱	۸۳.۲۹	۰.۹۳۵۴	۱۷۰۸	ردیف	ردیف	ردیف
۷	۸.۷۶	۵۷.۶۲	۷۴.۰۹	۰.۷۹۳۷	۱۷۳۳	۴۲	۸.۸۲	۶۰.۰۰	۷۲.۸۲	۰.۷۷۸۱	۱۷۴۴	ردیف	ردیف	ردیف
۸	۹.۳۱	۶۲.۵۰	۷۲.۵۵	۰.۷۷۷۹	۱۷۳۵	۴۳	۵.۲۶	۳۶.۰۱	۷۸.۳۲	۰.۸۴۲۲	۱۷۶۲	ردیف	ردیف	ردیف
۹	۵.۸۸	۴۵.۶۲	۷۱.۲۸	۰.۷۸۳۳	۱۷۸۷	۴۴	۴.۱۶	۳۳.۲۸	۶۹.۸۰	۰.۸۲۹۷	۱۸۱۰	ردیف	ردیف	ردیف
۱۰	۵.۹۹	۴۷.۵۰	۷۰.۲۵	۰.۷۷۵۳	۱۷۸۹	۴۵	۴.۹۲	۳۲.۴۰	۷۸.۵۵	۰.۸۷۵۱	۱۷۵۰	ردیف	ردیف	ردیف
۱۱	۵.۹۴	۴۷.۵۰	۶۹.۹۳	۰.۷۷۶۲	۱۷۸۹	۴۶	۷.۰۲	۴۵.۶۱	۷۷.۹۹	۰.۸۲۶۹	۱۷۳۵	ردیف	ردیف	ردیف
۱۲	۴.۰۵	۳۲.۴۰	۷۱.۵۵	۰.۸۳۶۴	۱۸۰۷	۴۷	۲.۵۱	۱۶.۳۳	۷۶.۷۸	۰.۹۴۶۷	۱۷۸۲	ردیف	ردیف	ردیف
۱۳	۷.۸۱	۶۲.۵۰	۶۴.۲۲	۰.۷۳۰۰	۱۷۹۲	۴۸	۳.۱۰	۱۷.۳۴	۸۱.۲۴	۰.۹۶۶۷	۱۷۲۷	ردیف	ردیف	ردیف
۱۴	۲.۲۷	۱۸.۰۰	۶۴.۷۶	۰.۸۶۹۶	۱۸۳۴	۴۹	۳.۹۲	۳۰.۳۷	۷۳.۳۷	۰.۸۴۶۰	۱۸۰۱	ردیف	ردیف	ردیف
۱۵	۶.۸۸	۵۵.۰۰	۶۷.۰۳	۰.۷۵۰۴	۱۷۸۹	۵۰	۱۰.۷۵	۶۲.۵۰	۷۹.۱۶	۰.۸۱۷۳	۱۷۰۳	ردیف	ردیف	ردیف
۱۶	۵.۷۸	۳۷.۵۰	۸۰.۰۱	۰.۸۴۶۰	۱۷۴۴	۵۱	۴.۶۰	۲۷.۷۳	۸۱.۲۱	۰.۹۰۳۵	۱۷۳۴	ردیف	ردیف	ردیف
۱۷	۷.۲۶	۵۷.۶۲	۶۵.۲۲	۰.۷۴۴۵	۱۷۹۰	۵۲	۵.۳۲	۴۲.۵۹	۶۶.۰۳	۰.۷۸۴۲	۱۸۰۲	ردیف	ردیف	ردیف

رسی و معرفی می شود.

۴-۱. پاسخ‌های بهینه با بیشترین میزان کفايت ور روز

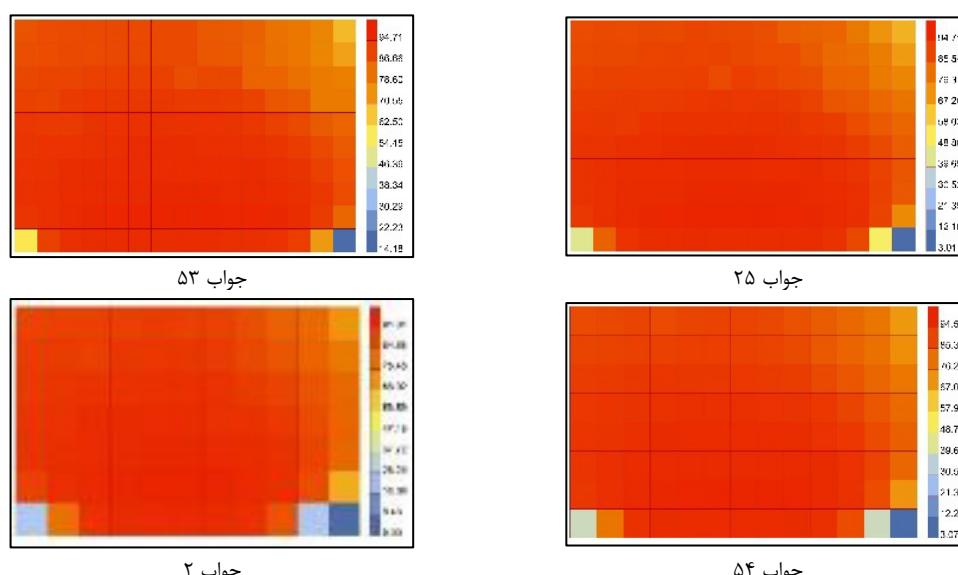
بررسی نتایج حاصل از جبهه جواب نهایی نشان می‌دهد که جواب‌های شماره ۲۵، ۵۳، ۵۴ و ۲ به ترتیب با مقادیر ۵۲۶۸٪، ۵۲۶۸٪، ۳۴۵۴٪ و ۵۱۳۸۵٪ بیشترین میزان کفایت نور روز را نسبت به سایر پاسخ‌ها دارند. باید در نظر گرفت که در برخی از این گزینه‌ها افزایش مساحت بازشو می‌تواند منجر به افزایش میزان خیرگی آزاردهنده شود؛ بنابراین، لزوماً نمی‌توان گزینه‌های فوق را به عنوان برترین گزینه‌ها از منظر آسایش جصربی انتخاب نمود. چراکه عوامل کفایت نور روز و خیرگی، هر دو در مقدار آسایش بصربی دخیل هستند. شکل (۵)، وضعیت فاکتورهای مختلف مربوط به جواب‌های منتخب کفایت نور روز را نشان می‌دهد. شکل (۶) نشانگر کانتورینگ کفایت نور روز در شبکه‌بندی داخلی جواب‌های چهارگانه فوق است.

با توجه به پاسخ‌های بدستآمده از جبهه نهایی، میزان بهینه نسبت سطح بازشو به کف برای تأمین اهداف تحقیق، در بازه ۱۲۵۰ تا ۲۰۰ قرار دارد. بیشینه کفايت نور روز مربوط به جواب شماره ۲۵ با مقدار ۶۲۵۸٪، بیشترین میزان آسایش حرارتی تطبیقی مربوط به پاسخ شماره ۶۰ با مقدار ۱۸۳۶ ساعت آسایش حرارتی در بازه زمانی تعریف شده و کمترین میزان خیرگی آزاردهنده مربوط به پاسخ شماره ۱۳ با مقدار ۷۳۰ است. لازم به یادآوری است که کلیه پاسخ‌های موجود در جبهه جواب نهایی از لحاظ میزان مطلوبیت توأم‌ان دستیابی به اهداف بر هم برتری ندارند. این موضوع به معنی این است که همگی به طور همزمان حد مطلوبی از هر سه هدف را ارائه می‌دهند. با توجه به اینکه در شرایط خاص و بنا به نیازهای طراح ممکن است یکی از اهداف، اولویت بیشتری نسبت به سایرین داشته باشد و یا یکی از اهداف به دلایلی همچون شرایط سایت یا تمایل طراحان به استفاده از نور مصنوعی یا گرمایش مکانیکی اهمیت کمتری داشته باشد، در ادامه به صورت جداگانه پاسخ‌های بهینه‌ای که در جبهه جواب نهایی، بیشترین میزان هر هدف را به خود اختصاص داده‌اند،



شکل ۵. وضعیت فاکتورهای مختلف مربوط به جواب‌های منتخب بیشترین کفايت نور روز

Fig 5. Status of Various Factors Related to the Selected Solutions with the Highest DA



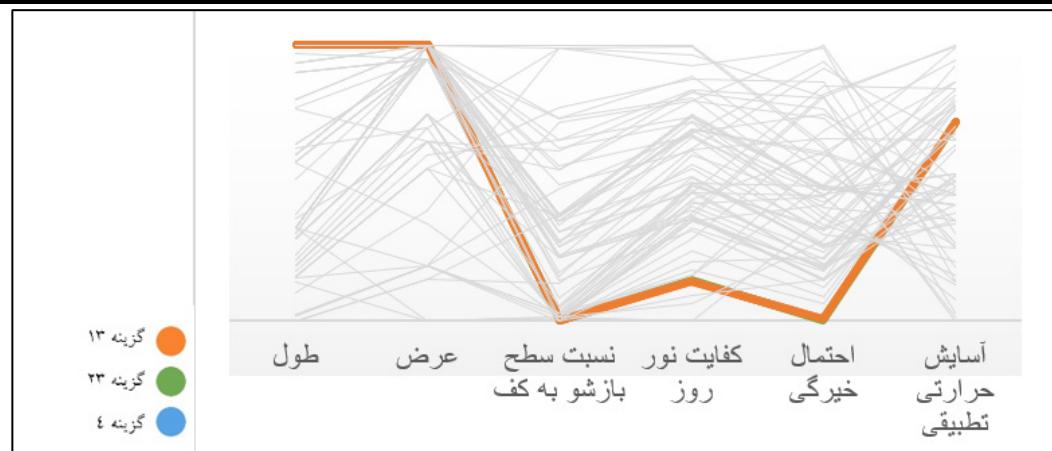
شکل ۶. کانتورینگ‌های کفايت نور روز مربوط به جواب‌های منتخب بیشترین کفايت نور روز

Fig 6. Contours for the Selected Solutions with the Highest DA

که پاسخ‌های شماره ۱۳، ۲۳ و ۴ به ترتیب با مقادیر ۳۰۰۸۳.۰، ۳۰۰۷۵.۰ و ۳۱۱۰۵.۰ دارای کمترین میزان احتمال خیرگی نسبت به سایر پاسخ‌ها هستند. چنانچه ذکر شد کاهش خیرگی و افزایش میزان کفايت نور روز دو هدف متقابل می‌باشد که بر اهمیت بهینه‌سازی چنددهفته تأکید می‌کنند، بنابراین، بهترین پاسخ‌های مربوط به خیرگی را نمی‌توان به عنوان برترین گزینه‌ها از منظر آسایش بصری انتخاب کرد. شکل (۷)، وضعیت فاکتورهای مختلف مربوط به جواب‌های منتخب احتمال خیرگی را نشان می‌دهد. شکل (۸) نشانگر کانتورینگ‌های احتمال خیرگی در شبکه‌بندی داخلی جواب‌های چهارگانه فوق است.

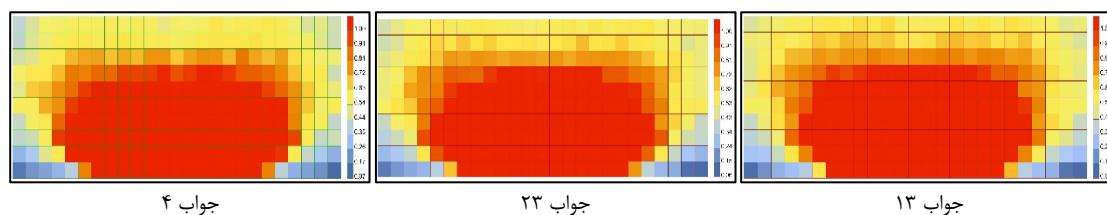
۴-۲. پاسخ‌های بهینه با کمترین احتمال خیرگی

اعدادی که در این بخش به عنوان احتمال خیرگی گزارش می‌شوند، میانگین ماکریم خیرگی در تمام سنسورهای نوری در طول یک سال هستند. با توجه به اینکه هر سنسور ممکن است در طول سال خیرگی را تجربه کند و بیشینه مقادیر آن به عنوان معیار اصلی مدنظر قرار می‌گیرد، اعداد ارائه شده در محدوده تابش خیره‌کننده قرار دارند اما به دلیل اصل مقایسه در بهینه‌سازی اعداد کمتر پاسخ‌های بهتری در حوزه خیرگی هستند. مطالعه میزان احتمال خیرگی در پاسخ‌های جبهه جواب نهایی بیانگر آن است



شکل ۷. وضعیت فاکتورهای مختلف مربوط به جواب‌های منتخب کمترین احتمال خیرگی

Fig 7. Status of Various Factors Related to the Selected Solutions with the Lowest DGP



شکل ۸. کانتورینگ‌های احتمال خیرگی مربوط به جواب‌های منتخب کمترین احتمال خیرگی

Fig 8. Contours for the Selected Solutions with the Lowest DGP

با مقادیر ۱۸۳۶، ۱۸۳۵ و ۱۸۳۴ دارای بیشترین میزان آسایش

حرارتی در مقایسه با سایر پاسخ‌ها هستند. نمودار موجود در شکل

(۹)، وضعیت فاکتورهای مختلف مربوط به جواب‌های منتخب

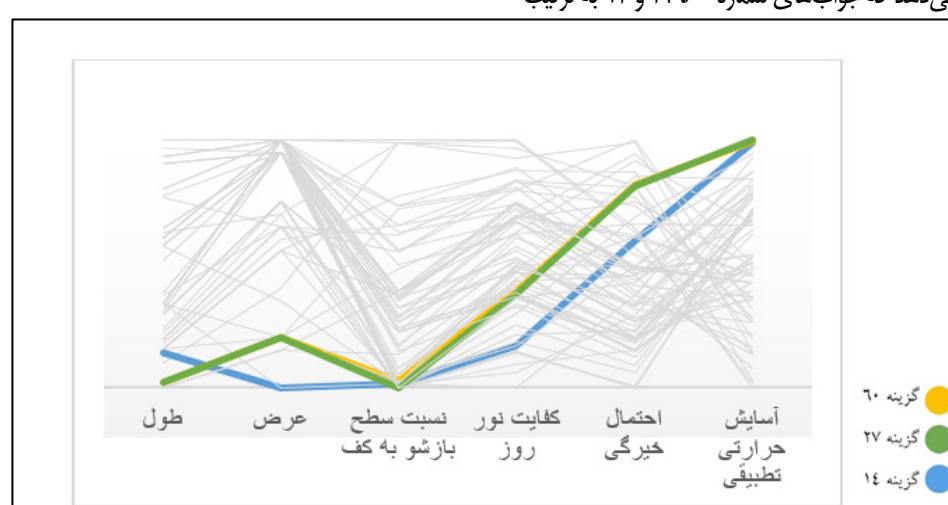
آسایش حرارتی تطبیقی را نشان می‌دهد.

۴-۳. پاسخ‌های بهینه با بیشترین شرایط

آسایش حرارتی تطبیقی

بررسی آسایش حرارتی مدل‌های ارائه شده در جبهه جواب

نهایی نشان می‌دهد که جواب‌های شماره ۲۷ و ۲۸ به ترتیب



شکل ۹. وضعیت فاکتورهای مختلف مربوط به جواب‌های منتخب بیشترین آسایش حرارتی تطبیقی

Fig 9. Status of Various Factors Related to the Selected Solutions with the Highest Adaptive Thermal Comfort

علاوه بر بررسی تنشیبات فوق در سایر شرایط اقلیمی، برخی اهداف مهم دیگر از جمله آسایش صوتی را نیز به صورت توأم موردنظر تحقیق قرار دهند. همچنین نقش سطح به کف کلاس درسی و بهینه یابی ابعاد آن برای تأمین اهداف آسایشی کلاس درسی می‌تواند موضوع مناسب و تکمیل‌کننده پژوهش حاضر باشد.

سپاسگزاری: این مقاله، مستخرج از رساله دکتری با عنوان "بهینه یابی چنددهفه آسایش بصري، حرارتی و صوتی داشناموزان در کلاس‌های درسی" است که باراهنمایی استاید بزرگوار خانم دکتر آیدا ملکی و آقای دکتر یاسر شهبازی و مشاوره آقای دکتر عباس غفاری در دانشگاه هنر اسلامی تبریز انجام گرفته است.

مشارکت نویسنندگان: ایده‌پردازی: آ.م. و.ی.ش؛ روش‌شناسی: ا.س. و.ی.ش؛ نرم‌افزار: ا.س؛ اعتبارسنجی: ا.س. و.ع.غ؛ تحلیل رسمی: ا.س؛ تحقیق و بررسی: ا.س؛ منابع: ا.س؛ مدیریت و تنظیم داده‌ها: ا.س؛ نگارش پیش‌نویس اولیه: ا.س؛ بازبینی و ویرایش متن: آ.م؛ تصویرسازی داده‌ها: ا.س؛ نظرات: آ.م؛ مدیریت پروژه: ا.س؛ تأمین مالی: ا.س؛ تمام نویسنندگان نسخه منتشر شده مقاله را مطالعه کرده و با آن موافقت نموده‌اند.

تأمین مالی: این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است.

تضاد منافع: نویسنندگان هیچ گونه تضاد منافی را اعلام نمی‌کنند.

دسترسی به داده‌ها و مواد: مجموعه داده‌های تولیدشده و یا تحلیل شده در طول پژوهش حاضر از طریق درخواست منطقی از نویسنده مسئول قابل دسترسی هستند.

References

- Alhagla, Kh., Alaa, M., & Elbassuoni, R. (2019). Optimizing Windows for Enhancing Daylighting Performance and Energy Saving. *Alexandria Engineering Journal*. 58(1):283–90. <https://doi.org/10.1016.j.aej.2019.01.004>
- Bakmohammadi, P., & Noorzai, E. (2020). Optimization of the Design of the Primary School Classrooms in Terms of Energy and Daylight Performance Considering Occupants' Thermal and Visual Comfort. *Energy Reports*. 6 (1):1590–1607. [10.1016/j.egyr.2020.06.008](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.06.008)
- Boubekri M., Lee J. Bub K., & Curry K. (2020). Impact of Daylight Exposure on Sleep Time and Quality of Elementary School Children. *European Journal of Teaching and Education*. 2(2):10–17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111644>
- Custódio, D., Ghisi, E., & Forgiarini Rupp, R. (2024). Thermal comfort in university classrooms in humid subtropical climate: Field study during all seasons. *Building and Environment*. 258(4):115–130. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111644>
- Dear, R., & Brager, K. (1997). *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference - Final Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*. Final Report on RP-884(ASHRAE Transactions) (pp.104-

۵. نتیجه‌گیری

تأمین آسایش بصري و حرارتی داشناموزان از جمله موضوعات پراهمیت در طراحی کلاس‌های درسی است. با توجه به اینکه ابعاد و تنشیبات فضا و اجزای آن در تحقق اهداف فوق تأثیر چشمگیری دارند، پژوهش حاضر در پی دستیابی به نسبت پیشنهاد میان مساحت بازشوی نورگیر و مساحت کلاس درس، در قدم اول، پیشینه تحقیقاتی موجود را مورد بررسی قرار داده است. تحقیق در این مطالعات نشان می‌دهد که اگرچه همگی بر اهمیت تأمین توأم آسایش بصري و حرارتی توجه داشته‌اند اما اغلب، صرفاً جزئیات فضا از جمله سطوح بازشو و نورگیر و یا سایر اجزای پیوستی فضا که میزان نور ورودی را کنترل می‌کنند، موردمطالعه بوده است و به ابعاد خود فضا و بهطور دقیق تر نسبت بین این ابعاد نپرداخته‌اند. پژوهش حاضر در صدد رفع خلاصه تحقیقاتی مذکور بوده و با استفاده از روش‌هایی که دستیابی هم‌زمان به اهداف متعدد و غیرهمسو (همچون میزان خیرگی و عوامل آسایش حرارتی و میزان نور ورودی جهت تأمین روشنایی کافی) را ممکن می‌سازند، به دنبال این نسبت بهینه بوده است. در نهایت و با استفاده از روش فوق پس از همگرایی نتایج حاصل از بهینه‌سازی در نسل ۱۸۵، جواب‌های غیر غالب معرفی شدند. در هر یک از این جواب‌ها علاوه بر ذکر مساحت کف و بازشوی متناسب با آن، به میزان نور دریافتی و خیرگی ممکن و آسایش حرارتی اشاره شده است. بررسی نتایج ۷۰ گانه جبهه جواب نهایی نشان می‌دهد که نسبت سطح بازشو به کف کلاس‌های درسی در بازه ۱۲۵.۰ تا ۲۰۰ متغیر بوده است. بررسی بالاترین میزان سطح بازشو به کف کلاس که متعلق به پاسخ ۲۵ است، نشان می‌دهد که فرضیه تحقیق در خصوص کفایت نور روز صحیح بوده ولی در مورد میزان خیرگی و تأمین آسایش حرارتی ناصحیح 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 کمتر (۱۲۵.۰ و ۱۲۶.۰ و ۱۲۷.۰) در بازه مذکور و در هدف مربوط به آسایش حرارتی تطبیقی نسبت بیشتر (۱۹۹.۰) در این بازه مطلوب‌تر بوده‌اند. هدف از انجام این بررسی تدقیک شده آن است که در صورت عدم تساوی وزن اهداف و تمایل طراح به اعمال وزن بیشتر به یکی از اهداف، امکان استفاده از نتایج این پژوهش فراهم شود. شایان ذکر است که تمام پاسخ‌های ۷۰ گانه حد متعادلی را بین اهداف به دست آورده‌اند و هم‌زمان اهداف مطالعه را تأمین 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

- Sustainable Architecture Goals. *International conference on modern research in civil engineering, architectural and urban development.* 3:65-76. <https://doi.org/10.5186/910528.en>
- Nesma F., Akila B., Djamel A., & Atef A. (2023). Optimizing Visual Comfort in School Buildings Through Parametric Design. *PERIODICO di MINERALOGIA*. 92(3):74-91.
- Nicol, F., Humphreys, M., & Roaf, S. (2012). *Adaptive Thermal Comfort Theory, Principles and Practice*. Routledge publications.
- Niza, I., Mendes da Luz, I., & Eduardo Broday, E. (2023). Thermal Comfort Assessment in University Classrooms: A Discriminant Analysis for Categorizing Individuals According to Gender and Thermal Preferences, *Atmosphere*. 14:1325-1342.
- Othman, A., & Mohd Mazli, M. (2012). Influences of Daylighting towards Readers' Satisfaction at Raja Tun Uda Public Library, Shah Alam. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 68: 244-57.
- Ouria, M. (2019). Solar Energy Potential According to Climatic and Geometrical Parameters of Cities and Buildings: A Case-Study from Tabriz City- Iran. *Urban Climate*. 28: 100469. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.10.0469>.
- Pilechiha P., Mahdavinejad M., Pour Rahimian P., Carnemolla P., & Seyedzadeh S. (2020). Multi-Objective Optimisation Framework for Designing Office Windows: Quality of View, Daylight and Energy Efficiency. *Applied Energy*. 261(5):205-221.
- Reinhart, C., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *Journal of Illuminating Engineering Society of North America*. 3(1): 7-31.
- Reinhart, C., & Walkenhorst, O. (2001). Validation of Dynamic RADIANCE-Based Daylight Simulations for a Test Office with External Blinds. *Energy and Buildings*. 33(7): 683-97.
- Saadatjoo, P., & Saligheh, E. (2021). The Role of Buildings Distribution Pattern on Outdoor Airflow and Received Daylight in Residential Complexes; Case Study: Residential Complexes in Tehran. *Naqsh-e-Jahan: Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 11(3): 67-92. [In Persian]
- Saligheh, E. (2022). Investigating the Effect of Protrusion and Orientation of the Building on Self-Shading of the Building in Hot and Humid Climate (Case Study: Four-Story Buildings on Kish Island). *Journal of Renewable and New Energy*. 9(1): 49-60. [In Persian]
- Saligheh, E., & Saadatjoo, P. (2020). Impact of Central Courtyard Proportions on Passive Cooling Potential in Hot and Humid Regions (Case Study: Single-Story Buildings in Bandar Abbas). *Naqsh-e-Jahan: Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 10(2): 137-52. [In Persian]
- Sergides D., Dimitriou S., Kyrianiou I., & Papanicolas C. (2017). The Adaptive Comfort Factor in Evaluating 125).
- Elwekil, E. (2015). *Optimizing Classroom Acoustic Performance to Promote Children's Education and Wellbeing* (Published Master's thesis). The University of Arizona, Tucson, Arizona.
- Fallaftafti, R., & Mahdavinejad, M. (2015). Optimization of Building Shape and Orientation for Better Energy Efficient Architecture. *International Journal of Energy Sector Management*. 9(4):593-618. <https://doi.org/10.1108/IJESM-09-2014-0001>
- Gursel Dino, I., & Üçoluk, G. (2017). Multiobjective Design Optimization of Building Space Layout, Energy, and Daylighting Performance. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 31(5):201-235. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000669](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000669).
- Javanroodi, K., Vahid, N., & Mahdavinejad, M. (2019). A Novel Design-Based Optimization Framework for Enhancing the Energy Efficiency of High-Rise Office Buildings in Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*. 49(5):362-405. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101597>
- Kent M., Altomonte S., Wilson R., & Tregenza P. (2017). Temporal Effects on Glare Response from Daylight. *Building and Environment*. 113:49-64. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.002>
- Konis, K., Gamas, A., & Kensek, K. (2016). Passive Performance and Building Form: An Optimization Framework for Early-Stage Design Support. *Solar Energy*. 125:161-79. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.020>.
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., & Rubel F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. *Meteorologische Zeitschrift*. 15 (3): 259-263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948.2006.0130>
- Lakhdari, K., Sriti, L., & Painter, B. (2021). Parametric Optimization of Daylight, Thermal and Energy Performance of Middle School Classrooms, Case of Hot and Dry Regions. *Building and Environment*. 204(1): 108-143. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108173>
- Lamberti G., Salvadori G., Leccese F., Fantozzi F., & Bluyssen Ph. (2021). Advancement on Thermal Comfort in Educational Buildings: Current Issues and Way Forward. *Sustainability*. 13(18):107-123. <https://doi.org/10.3390/su131810315>
- Mahdavinejad, M., Tahbaz, M., & Dolatabdi, T. (2016). Optimization of Proportions and How to Use the Light Rack in the Architecture of Classrooms. *Journal of Fine Arts: Architecture & Urban Planning*. 21(2):81-92. <https://doi.org/10.22059/jfaup.2016.60164> [In Persian]
- Moghtadinejad, M., & Pashaei, S. (2016). Investigating the Impact of Parametric Architecture Design Process Based on Algorithmic Design, A New Approach in the Digital Architecture Design in Line with

- Huang Q., & Zhang Q. (2017). Optimization of Thermal and Daylight Performance of School Buildings Based on a Multi-Objective Genetic Algorithm in the Cold Climate of China. *Energy and Buildings*. 139(5): 371–384.
- Ziaeef, N., & Vakilinezhad, R. (2022). Multi-Objective Optimization of Daylight Performance and Thermal Comfort in Classrooms with Light-Shelves: Case Studies in Tehran and Sari, Iran. *Energy and Buildings*. 254(5): 111590-615.
- دفتر فنی سازمان نوسازی، توسعه و تجهیز مدارس. (۱۳۸۶). *ضوابط طراحی ساختمان‌های آموزشی، انتشارات سازمان برنامه‌بودجه، تهران*.
- دفتر فنی سازمان نوسازی، توسعه و تجهیز مدارس. (۱۳۹۵). *ضوابط طراحی ساختمان‌های آموزشی، انتشارات سازمان برنامه‌بودجه، تهران*.
- سعادت جو، پریا و الهام سلیقه. (۱۴۰۰). *نقش الگوی چیدمان بلوک های مجتمع مسکونی بر جریان باد فضای باز و نور روز دریافتی ساختمان‌ها؛ نمونه موردی: مجتمع‌های مسکونی شهر تهران، نقش جهان*, ۱۱(۳): ۵۷-۹۲.
- سلیقه، الهام و پریا سعادت جو. (۱۳۹۹). بررسی نقش تناسبات حیاط مرکزی بر سرمایش استای ساختمان در اقلیم گرم و مرطوب (نمونه موردی: ساختمان‌های یک مرتبه شهر بندرعباس)، *نقش جهان*, ۱۰(۲): ۱-۱۵.
- سلیقه، الهام. (۱۴۰۱). بررسی تأثیر پیش‌آمدگی و جهت‌گیری ساختمان بر خودسایه‌اندازی بنا در اقلیم گرم و مرطوب (نمونه موردی: ساختمان‌های چهارطبقه جزیره کیش)، *انرژی‌های تجدید پذیر و نو*, ۱۹(۱): ۴۹-۶۰.
- مهدوی نژاد محمدجواد، طاهباز منصوره، دولت‌آبادی، مهناز. (۱۳۹۵). بهینه‌سازی تناسبات و نحوه استفاده از رف نور در معماری کلاس‌های آموزشی، نشریه هنرهای زیبا: معماری و شهرسازی، ۲۱(۲): ۸۱-۹۲.
- the Energy Performance of Office Buildings in the Mediterranean Coastal Cities. *Energy Procedia*. 134: 683-91.
- Taghizade, K., Heidari, A., & Noorzai, E. (2019). Environmental Impact Profiles for Glazing Systems: Strategies for Early Design Process. *Journal of Architectural Engineering*. 25(2):67-81.
- Talaei M., Mahdavinejad M., Azari R., Prieto A., & Sangin H. (2021). Multi-Objective Optimization of Building-Integrated Microalgae Photobioreactors for Energy and Daylighting Performance. *Journal of Building Engineering*. 42(2):165-179. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102832>.
- Technical Deputy and Supervision of School Equipment and Renovation Organization. (2015). *Regulations for the Design of Educational Buildings (Architectural Planning for Schools)*. Planning and budget organization of the Islamic Republic of Iran. [In Persian]
- Technical Deputy and Supervision Organization of School Equipment and Renovation. (2006). *Regulations and Criteria for the Design of Educational Spaces*. Planning and budget organization of the Islamic Republic of Iran. [In persian]
- Veillette, D., Rouleau, J., & Gosselin, L. (2021). Impact of Window-to-Wall Ratio on Heating Demand and Thermal Comfort When Considering a Variety of Occupant Behavior Profiles. *Frontiers in sustainable cities*. 3(12):101-116.
- Wang W., Hong T., Ning X., Xiaodong X., Chen J., & Shan X. (2019). Cross-Source Sensing Data Fusion for Building Occupancy Prediction with Adaptive Lasso Feature Filtering. *Building and Environment*. 162(4):213-228.
- Wymelenberg, K., & Den, V. (2014). Visual Comfort, Discomfort Glare, and Occupant Fenestration Control: Developing a Research Agenda. *LEUKOS: Journal of Illuminating Engineering Society of North America*. 10(4):207-221.
- Zahiri, S., & Altan, H. (2016). The Effect of Passive Design Strategies on Thermal Performance of Female Secondary School Buildings during Warm Season in a Hot and Dry Climate. *Frontiers in Built Environment*. 2(10):1-15. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2016.00003>
- Zhang A., Bokel R., Van den Dobbelaer A., Sun Y.,