



Multi-Criteria Optimization of Window Properties in Hot and Arid Climate: An Integrated Assessment of Energy Efficiency, Thermal Comfort, and Building Life Cycle

Amir Mohammad Hazrati¹ and Afsaneh Zarkesh*²

Received 31/Mar/2025

Revised: 09/Jun/2025
(PP.: 71-90)

Accepted: 08/Oct/2025

Abstract

Introduction: Windows play a critical role in building energy performance, thermal comfort, and environmental sustainability. However, most previous studies have focused on only one of these aspects. This study evaluates the combined effects of window-to-wall ratio (WWR), glazing type, and orientation on energy consumption, thermal comfort, and life-cycle carbon emissions in a school building located in the hot-arid climate of Yazd, Iran.

Methods: A total of 48 simulation scenarios were developed in DesignBuilder by varying WWR (25%, 50%, 75%, and 100%), window orientation (north, south, east, and west), and glazing type (single glazing, low-E double glazing, and low-E triple glazing). Thermal comfort was assessed using PMV and PPD indices, while environmental impacts were analyzed through a 30-year life-cycle assessment.

Results and Discussion: The results indicate that low-E triple glazing with a 25% WWR facing north achieved the lowest cooling energy demand, reducing cooling consumption by 38% compared with single glazing. In contrast, single glazing with a 100% WWR facing south provided the best heating performance. Triple glazing also delivered the most stable thermal comfort conditions, reducing the percentage of dissatisfied occupants during summer from 55% to 45%. Although triple glazing exhibited higher embodied carbon, life-cycle analysis showed that it reduced total carbon emissions by approximately 62% over the building's service life due to lower operational energy consumption.

Conclusion: The findings demonstrate that window design optimization should simultaneously consider energy efficiency, thermal comfort, and environmental impacts. For hot-arid climates such as Yazd, low-E triple glazing combined with a low WWR and northern orientation offers the most sustainable and balanced design solution.

Keywords: Energy Efficiency; Thermal Comfort; LCA; WWR; Window Orientation.

¹ PhD. Student, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tarbiat Modares Uni., Tehran, Iran.

² Assistant Prof., Faculty of Architecture and Urban Planning, Tarbiat Modares Uni., Tehran, Iran.
(Corresponding Author) zarkesh@modares.ac.ir

بهینه‌سازی چندمعیاره ویژگی‌های پنجره در اقلیم گرم و خشک ارزیابی یکپارچه بهره‌وری انرژی، آسایش حرارتی و چرخه عمر ساختمان

امیرمحمد حضرتی¹ و افسانه زرکش^{2*}

تاریخ پذیرش: 16/مهر/1404	تاریخ بازنگری: 19/خرداد/1404	تاریخ دریافت: 11/فروردین/1404
(صفحات: 90-71)		

چکیده

مقدمه: پنجره‌ها به‌عنوان یکی از تأثیرگذارترین عناصر نما، نقش محوری در عملکرد انرژی و آسایش حرارتی ساختمان‌ها دارند و مسئول 25 تا 40 درصد از تلفات حرارتی ساختمان‌های مسکونی و اداری هستند. با وجود این، بیشتر مطالعات پیشین یا تنها به بهینه‌سازی مصرف انرژی پرداخته‌اند یا آسایش حرارتی را بررسی کرده‌اند، بدون توجه همزمان به اثرات زیست‌محیطی چرخه عمر. این تحقیق با رویکردی جامع و یکپارچه، تأثیر ویژگی‌های مختلف پنجره شامل نسبت مساحت پنجره به دیوار نوع شیشه و جهت‌گیری پنجره‌ها را بر سه معیار بهره‌وری انرژی، آسایش حرارتی و انتشار کربن چرخه عمر در یک مدرسه ابتدایی در شهر یزد با اقلیم گرم و خشک ارزیابی می‌کند.

روش تحقیق: شبیه‌سازی‌ها در 48 سناریو با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر و بر اساس تغییرات نسبت مساحت پنجره به دیوار (25، 50، 75 و 100 درصد)، 4 جهت‌گیری (شمال، جنوب، شرق و غرب) و 3 نوع شیشه (تک‌جداره، دوجداره کم‌گسیل و سه‌جداره کم‌گسیل) انجام شده است.

نتایج و بحث: نتایج نشان می‌دهد که شیشه سه‌جداره کم‌گسیل با نسبت مساحت پنجره به دیوار 25 درصد در جهت‌گیری شمالی، کمترین مصرف انرژی سرمایشی (کاهش 38 درصدی نسبت به شیشه تک‌جداره) را دارد، در حالی که شیشه تک‌جداره شفاف با نسبت مساحت پنجره به دیوار 100 درصد در جهت‌گیری جنوبی، بهترین عملکرد گرمایشی (کاهش 42 درصدی نیاز گرمایشی) را ارائه می‌دهد. از منظر آسایش حرارتی، شیشه سه‌جداره کم‌گسیل در تمام فصول سال پایدارترین شرایط را فراهم کرده و درصد افراد ناراضی را در ماه‌های گرم از 55 به 45 درصد کاهش داده است. تحلیل چرخه عمر ساختمان نشان داد که شیشه سه‌جداره با کاهش 62 درصدی انتشار کربن دی‌اکسید در طول 30 سال عمر مفید ساختمان نسبت به شیشه تک‌جداره، گزینه بهینه برای طراحی پایدار در اقلیم گرم و خشک است.

نتیجه‌گیری: این یافته‌ها نشان می‌دهد که طراحی اصولی پنجره‌ها با در نظر گرفتن همزمان معیارهای انرژی، آسایش و زیست‌محیطی، می‌تواند الگویی کارآمد برای ساختمان‌های پایدار در اقلیم‌های مشابه فراهم کند.

واژگان کلیدی: بهره‌وری انرژی، آسایش حرارتی، چرخه عمر ساختمان، نسبت مساحت پنجره به دیوار، جهت‌گیری پنجره‌ها.

¹ دانشجوی دکتری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

² استادیار، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. (نویسنده مسئول) zarkesh@modares.ac.ir

1- مقدمه

پنجره‌ها به‌عنوان واسطه‌ای شفاف میان فضای داخلی و خارجی ساختمان، نقشی محوری در تعامل ساختمان با محیط پیرامون ایفا می‌کنند. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، پنجره‌ها مسئول 25 تا 40 درصد از تلفات حرارتی ساختمان‌های مسکونی و اداری هستند و در ایران، بخش ساختمان مسئول 42 درصد از کل مصرف انرژی کشور است که از این میزان، 60 درصد صرف سرمایش و گرمایش فضا می‌شود. این عناصر حیاتی، علاوه بر تأمین نور طبیعی و ایجاد دید بصری، بر عملکرد انرژی ساختمان، آسایش حرارتی ساکنان و حتی دوام مصالح ساختمانی تأثیرگذارند. انتخاب هوشمندانه نوع شیشه، ابعاد، جهت‌گیری و محل قرارگیری پنجره‌ها در ساختمان، به‌ویژه در مناطقی با اقلیم‌های خاص مانند یزد، می‌تواند به طور قابل‌توجهی بر مصرف انرژی، هزینه‌های بهره‌برداری و کیفیت زندگی ساکنان تأثیرگذار باشد.

با توجه به اهمیت روزافزون بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، طراحی بهینه پنجره‌ها به‌عنوان یکی از راهکارهای اساسی برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها مطرح می‌شود. انتخاب نوع شیشه با ویژگی‌های عایق حرارتی مناسب، کنترل تابش خورشیدی و کاهش نفوذ صوت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شیشه‌های کم‌گسیل، شیشه‌های چند جداره و پوشش‌های خورشیدی نمونه‌هایی از فناوری‌های نوین هستند که می‌توانند به طور چشمگیری عملکرد انرژی پنجره‌ها را بهبود بخشند. همچنین، نسبت مساحت پنجره به دیوار و جهت‌گیری پنجره‌ها نیز بر میزان تابش خورشیدی دریافتی ساختمان و در نتیجه بر مصرف انرژی تأثیرگذار است. یک طراحی مناسب می‌تواند از تابش مستقیم خورشید در تابستان پیش‌گیری و در زمستان از نور خورشید برای گرمایش طبیعی ساختمان استفاده کند، علاوه بر عملکرد انرژی، پنجره‌ها نیز نقش مهمی در ایجاد آسایش حرارتی ساکنان ایفا می‌کنند. با انتخاب صحیح نوع شیشه و طراحی مناسب پنجره‌ها می‌توان از ایجاد نقاط سرد و گرم در ساختمان پیش‌گیری و محیطی با دمای یکنواخت و مطلوب ایجاد

نمود. همچنین، پنجره‌ها می‌توانند در کاهش آلودگی صوتی و بهبود کیفیت هوای داخلی ساختمان نیز مؤثر باشند.

در این راستا، پژوهش حاضر در پی پاسخ به این پرسش اصلی است:

- "در اقلیم گرم و خشک شهر یزد، بهینه‌سازی همزمان سه معیار بهره‌وری انرژی، آسایش حرارتی و انتشار کربن چرخه عمر در طراحی پنجره‌ها چگونه امکان‌پذیر است و کدام ترکیب از ویژگی‌های پنجره (نوع شیشه، نسبت مساحت پنجره به دیوار و جهت‌گیری) می‌تواند بهترین تعادل را بین این سه معیار ایجاد کند؟"

1-1- مروری بر پیشینه تحقیق

پس از انقلاب صنعتی، استفاده از سوخت‌های فسیلی برای ایجاد آسایش حرارتی در محیط‌های داخلی به طور قابل توجهی افزایش یافت. این موضوع سبب شد که سهم قابل توجهی از مصرف انرژی به بخش ساختمان اختصاص یابد و شهرها مسئول تولید 70 درصد از کربن در سطح جهانی شوند (Altomonte et al., 2013, zahng et al., 2018, Moosavi et al., 2022). کاهش مصرف انرژی و در نتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای یکی از مهم‌ترین مسائل بحرانی مرتبط با پایداری و توسعه پایدار در دنیای امروز است (zahng et al., 2017). رشد مداوم جمعیت جهان و شهرنشینی این روند را بیشتر تشدید خواهد کرد و فشار بیشتری بر منابع انرژی و پایداری کلی وارد خواهد ساخت (wang et al., 2018). تغییرات اقلیمی نیز انتظار می‌رود که به‌طور جدی بر مناطق گرم و خشک، از جمله کشورهای خاورمیانه، تأثیر بگذارد. (Fereidani et al., 2021). ایران در دهه‌های آینده با افزایش 2.6 درجه سانتی‌گرادی در میانگین دما و کاهش 35 درصدی بارش مواجه خواهد شد. از سوی دیگر، ایران با انتشار کل گازهای گلخانه‌ای نزدیک به 616.741 میلیون تن دی‌اکسیدکربن، به‌عنوان نخستین کشور مسئول تغییرات اقلیمی در خاورمیانه و هفتمین در جهان شناخته می‌شود (Daneshvar et al., 2019).

اگرچه راه حل جهانی برای طراحی نماهای ساختمان با بهره‌وری انرژی وجود ندارد، اما طراحی مصالح ساختمانی با تأکید بر عواملی که در مرحله طراحی مصالح بر عملکرد انرژی تأثیر می‌گذارند، می‌تواند به طور قابل توجهی مصرف انرژی را کاهش دهد (Ihara et al., 2015). همچنین، تأثیرات نهفته در ساختمان‌ها اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند و به همین دلیل تمرکز بر تأثیرات چرخه عمر به‌منظور کاهش بیشتر آثار زیست‌محیطی ساختمان‌ها ضروری شده است. ارزیابی چرخه عمر¹ یک روش بین‌المللی پذیرفته شده است که برای این منظور استفاده می‌شود (Iwuanyanwu et al., 2024). پنجره‌ها نقش اساسی در طراحی ساختمان ایفا می‌کنند، زیرا اجازه ورود و خروج نور طبیعی را می‌دهند، گرمای حاصل را مدیریت می‌کنند و تهویه طبیعی را فراهم می‌سازند تا کیفیت هوای داخلی بهبود یابد و راحتی کاربران افزایش یابد. نسبت پنجره به دیوار به عنوان شاخص مؤثر در پیش‌بینی نیاز انرژی برای سرمایش در ساختمان‌های اداری شناخته شده است (Troup et al., 2019). جهت‌گیری مناسب پنجره‌ها نیز روشی کم‌هزینه برای افزایش آسایش حرارتی ساکنان است که هم‌زمان می‌تواند نیاز به انرژی برای سرمایش و گرمایش را کاهش دهد (Albatayneh et al., 2018). مصالح پنجره یکی دیگر از عوامل مهمی است که باید برای ساختمان‌های آموزشی با بهره‌وری انرژی در نظر گرفته شود. تحقیقات به بررسی تأثیر انواع مختلف مصالح شیشه پنجره بر سطح روشنایی، بار سرمایشی و کسب گرما در شرایط آب‌وهوایی مختلف پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، در یک مطالعه درباره انواع شیشه‌کاری پنجره برای یک ساختمان اداری در دب، مشخص شد که شیشه با پوشش بازتابنده بیشترین مزایا را ارائه می‌دهد. (Taleb et al., 2020) در مطالعه‌ای دیگر به انواع مختلف مصالح شیشه بر مصرف انرژی در یک ساختمان مدرسه واقع در اقلیم نیمه‌خشک پرداخته و نشان داده است که پنجره‌های سه جداره و دوجداره با فضای پر شده از آرگون²، صرفه‌جویی به ترتیب 37 و 32 درصد در مصرف انرژی سالانه ارائه می‌دهند (ES-SAKALI et al., 2022). در تحقیقی دیگر نتایج نشان دادند با جایگزینی پنجره‌ها

با شیشه‌های سه جداره دارای پوشش کم‌گسیل، پر شده با گازهای آرگون، کریپتون³ و زنون⁴ و قاب یو.پی.وی.سی⁵، به‌جای شیشه‌های دوجداره شفاف پر شده با گاز آرگون و قاب آهنی، مصرف سالانه گاز برای گرمایش به ترتیب 52.43٪، 55.34٪ و 56.60٪ کاهش یافت و همچنین، اتلاف حرارت از طریق پنجره‌ها به ترتیب 7.97٪، 9.54٪ و 10.49٪ کاهش پیدا کرد. (Naser et al., 2020) نتایج مطالعه‌ای دیگری به بررسی تأثیر انواع مختلف شیشه‌کاری با جهت‌گیری‌های متفاوت پنجره و نسبت پنجره به دیوار (10٪ و 20٪) بر مصرف انرژی در یک اتاق نمونه در یک ساختمان اداری واقع در شرایط آب‌وهوایی گرم شهر اسوان، مصر پرداخت. این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر مدل‌سازی و ارزیابی شد تا عملکرد محیطی قابل‌قبولی برای نمونه مورد مطالعه به دست آید و همچنین تأثیر آن بر میزان انرژی مورد نیاز برای سرمایش، روشنایی و گرمایش بررسی شود. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از یک لایه نانوژل میان دولایه آرگون و دولایه شیشه شفاف تک‌جداره با نسبت پنجره به دیوار (10 درصد) منجر به کاهش قابل‌توجهی در مصرف سالانه کل انرژی برای تمامی جهت‌ها (شمال، غرب، جنوب و شرق) شد که به ترتیب 3.66٪، 12.71٪، 6.51٪ و 4.18٪ صرفه‌جویی در مقایسه با شیشه تک‌لایه شفاف (3 میلی‌متر) به همراه داشت (Mahmoud., 2022). به دنبال تحقیقات قبلی نتایج یک تحقیق با بررسی تغییر مصالح شیشه و تأثیر آن بر چرخه عمر ساختمان نشان داد انرژی نهفته یک پنجره چوبی استاندارد با روکش آلومینیومی و شیشه دوجداره (با ابعاد 1.2 متر × 1.2 متر) به ترتیب 899، 1402 و 5400 مگاژول برای گازهای پرکننده آرگون، کریپتون و زنون محاسبه شده است. همچنین مشخص شد که یک پنجره پر شده با آرگون می‌تواند 95130 کیلووات‌ساعت انرژی را از دست بدهد که منجر به انتشار بیش از 37000 کیلوگرم دی‌اکسیدکربن می‌شود (Asif., 2019). در مطالعه‌ای دیگر استفاده از سه روش ارزیابی چرخه عمر، عملکرد زیست‌محیطی و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان برای تعیین عملکرد و تأثیرات زیست‌محیطی دو ماده قاب پنجره: آلومینیوم و چوب است. نتایج کلی

نکرد. آسیف (2019) نیز کربن تجسم یافته در انواع مختلف شیشه را محاسبه کرد، اما بدون ارتباط دادن آن با عملکرد عملیاتی ساختمان، خلأ اصلی تحقیقاتی: بررسی دقیق پیشینه نشان می دهد که هیچ یک از مطالعات پیشین به طور همزمان و یکپارچه هر سه معیار بهره‌وری انرژی، آسایش حرارتی و اثرات زیست محیطی چرخه عمر را در یک چارچوب تحلیلی جامع بررسی نکرده‌اند. این خلأ به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک خاورمیانه که با چالش‌های خاص انرژی و محیط زیست مواجه هستند، بیشتر احساس می شود. نوآوری‌های این تحقیق در پنج بعد اصلی قابل تبیین است:

اولین نوآوری ارائه رویکرد ارزیابی چندمعیاره یکپارچه است. این تحقیق برای اولین بار در اقلیم گرم و خشک ایران، سه معیار عملکرد انرژی، آسایش حرارتی و اثرات زیست محیطی را به طور همزمان در چهل و هشت سناریو مختلف بررسی می کند. این رویکرد یکپارچه امکان شناسایی تعارض‌ها و هم‌افزایی‌های بین معیارهای مختلف را فراهم می کند.

نوآوری بعدی تحلیل تعارض‌ها و مبادلات بین معیارها است. این مطالعه به طور مشخص موقعیت‌هایی را شناسایی می کند که در آنها بهینه انرژی سرمایه‌یابی با بهینه انرژی گرمایشی متفاوت است، یا گزینه بهینه از نظر آسایش حرارتی با گزینه بهینه از نظر مصرف انرژی یکسان نیست. این تحلیل به طراحان و تصمیم‌گیرندگان کمک می کند تا با آگاهی کامل از مبادلات موجود، بهترین تصمیم را بگیرند.

سومین مورد تمرکز بر اقلیم گرم و خشک ایران است. در حالی که بیشتر مطالعات مشابه در اقلیم‌های معتدل اروپا یا آمریکای شمالی انجام شده‌اند، این تحقیق به طور خاص بر اقلیم گرم و خشک یزد متمرکز است که نمایانگر چالش‌های خاص مناطق خاورمیانه از جمله دماهای بسیار بالا در تابستان، رطوبت بسیار پایین و تابش شدید خورشیدی است. نتایج این مطالعه می تواند مستقیماً در کشورهای همسایه با اقلیم‌های مشابه قابل استفاده باشد. این تحقیق نه تنها به تحلیل نظری می پردازد، بلکه راهنمای عملی برای انتخاب بهترین ترکیب ویژگی‌های پنجره در پروژه‌های واقعی ارائه می دهد. نتایج این تحقیق

نقطه میانی برای دو ماده 29.6 برای آلومینیوم و 7.57 برای چوب بود. در نتایج نقطه انتهایی، تأثیرات بر سلامت انسان و کاهش منابع کاملاً مشخص بود. با امتیاز 13.9 برای آلومینیوم و 3.51 برای چوب، تأثیرات بر سلامت انسان بیشترین نقش را داشت (Ali., 2020) در این پژوهش، یک مدل انرژی ساختمان دقیق اما ساده پیشنهاد شده است تا تکنیک‌های طراحی اولیه پنجره برای اقلیم شهر یزد ارزیابی شود. هدف این پژوهش بررسی تأثیر تغییر شاخصه‌های پنجره بر بهره‌وری انرژی و آسایش حرارتی ساختمان‌های واقع در اقلیم گرم و خشک و ارزیابی تأثیر طراحی این پنجره‌ها بر چرخه عمر ساختمان و انتشار گازهای گلخانه‌ای است.

1-2- خلأ تحقیقاتی و نوآوری تحقیق

مرور جامع پیشینه تحقیقاتی نشان می دهد که مطالعات پیشین عمدتاً به یکی از جنبه‌های زیر پرداخته‌اند: دسته اول مطالعات انرژی‌محور هستند که تمرکز اصلی آنها بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها بوده است. برای مثال، تروپ و همکاران (2019) تأثیر نسبت پنجره به دیوار بر مصرف انرژی در ساختمان‌های اداری را بررسی کردند، اما آسایش حرارتی و اثرات زیست محیطی را در نظر نگرفتند. به همین ترتیب، طالب و آنتونی (2020) انواع مختلف شیشه‌کاری را از منظر عملکرد انرژی در امارات متحده عربی ارزیابی کردند، اما تحلیل چرخه عمر و آسایش حرارتی در محدوده کار آنها قرار نداشت. دسته دوم مطالعات آسایش‌محور هستند که بر ارزیابی شرایط حرارتی داخلی متمرکز شده‌اند. اوچوا و همکاران (2012) به بررسی رابطه بین نسبت پنجره به دیوار و آسایش بصری و حرارتی پرداختند، اما مصرف انرژی و اثرات زیست محیطی را به طور جامع بررسی نکردند. پینو و همکاران (2012) نیز تمرکز اصلی خود را بر شاخص‌های آسایش حرارتی قرار دادند بدون توجه به بعد انرژی و چرخه عمر. دسته سوم مطالعات چرخه عمر محور هستند که به تحلیل اثرات زیست محیطی مصالح ساختمانی پرداخته‌اند. در تحقیق مقایسه چرخه عمر قاب‌های آلومینیومی و چوبی پنجره را انجام داد، اما عملکرد انرژی و آسایش حرارتی را در تحلیل خود لحاظ

می‌تواند مستقیماً در طراحی مدارس، ساختمان‌های اداری و مسکونی در مناطق با اقلیم گرم و خشک به کار گرفته شود. این تحقیق همچنین به پرسش‌های بنیادین طراحی پایدار پاسخ می‌دهد: آیا شیشه‌ای که بهترین عملکرد انرژی را دارد، لزوماً بهترین آسایش حرارتی را نیز فراهم می‌کند؟ آیا صرفه‌جویی در مصرف انرژی عملیاتی، هزینه زیست‌محیطی بالاتر تولید شیشه‌های پیشرفته را جبران می‌کند؟ پاسخ به این پرسش‌ها برای پیشبرد دانش در حوزه ساختمان‌های پایدار ضروری است.

و در آخرین مورد با شناسایی تعارض‌های بهینه‌سازی چندمعیاره

این تحقیق برای اولین بار به صراحت نشان می‌دهد که "بهینه برای یک معیار، لزوماً بهینه برای معیار دیگر نیست". برای مثال:

- بهترین گزینه برای انرژی گرمایشی (تک‌جداره 100٪ جنوب) بدترین گزینه برای انرژی سرمایشی است
- بهترین گزینه برای انرژی سرمایشی (سه‌جداره 25٪ شمال) دارای کربن تجسم‌یافته بالاتری است
- حل این تعارض‌ها نیازمند رویکرد بهینه‌سازی چندمعیاره است که در این تحقیق ارائه شده
- این یافته در تضاد با تصور رایج است که "هر گزینه خوب برای انرژی، خوب برای همه معیارهاست".

3-1- مبانی نظری تحقیق

3-1-1- مبانی نظری آسایش حرارتی

آسایش حرارتی یکی از مباحث مهم در طراحی ساختمان‌ها، به‌ویژه در شرایط آب‌وهوایی مختلف، و ایجاد محیط‌های داخلی مطلوب برای ساکنین است. این مفهوم به حالتی اطلاق می‌شود که فرد در آن، دمای محیط را به‌گونه‌ای تجربه می‌کند که احساس رضایت و راحتی داشته باشد. آسایش حرارتی نه‌تنها به دما، بلکه به عوامل متعددی چون رطوبت نسبی، سرعت جریان هوا، تابش سطح‌ها و حتی عوامل شخصی مانند نوع پوشش و فعالیت‌های فرد بستگی دارد (ASHRAE, 2021)

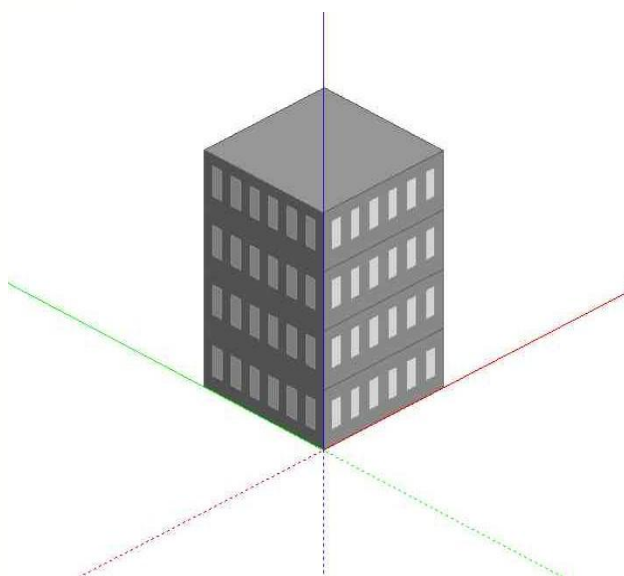
آسایش حرارتی یکی از عوامل کلیدی در مصرف انرژی ساختمان‌هاست؛ زیرا در صورت عدم تأمین آسایش، استفاده از سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع افزایش یافته و مصرف انرژی را به شکل قابل توجهی بالا می‌برد (ISO, Standard 7730, 2005). یکی از مدل‌های مرسوم در بررسی آسایش حرارتی، مدلی است که توسط پروفسور فنکر توسعه یافته است. مدل (پیش‌بینی میزان رضایت)⁶ میزان احساس حرارتی فرد را پیش‌بینی می‌کند و مدل (پیش‌بینی درصد ناراضی‌ها)⁷ درصد افرادی را که در شرایط داده‌شده ممکن است از وضعیت حرارتی ناراضی باشند، محاسبه می‌کند. این مدل به‌عنوان ابزاری قدرتمند در طراحی سیستم‌های تهویه و کنترل شرایط داخلی استفاده می‌شود (Pino et al., 2012)

در یک مطالعه، نسبت سطح پنجره به دیوار خارجی از 10٪ تا 100٪ با فواصل 10٪ و در چهار جهت اصلی بررسی شد. پنجره مورد استفاده در این تحقیق در وسط دیوار خارجی قرار داشت و دارای دو جداره بدون هیچ‌گونه دستگاه سایه‌انداز بود. نتیجه‌گیری این پژوهش نشان داد که استفاده از پنجره‌های بزرگ توصیه نمی‌شود، زیرا در دوره‌های زمستان و تابستان انتقال حرارت ایجاد می‌کنند. نیاز سرمایشی در جهت جنوبی با پنجره‌های بزرگ زیاد است و بالعکس، نیاز گرمایشی در جهت شمالی نیز با پنجره‌های بزرگ زیاد است. علاوه بر این، کمترین مصرف برق با نسبت 30٪ سطح پنجره به دیوار خارجی در جهت شمال و نسبت 20٪ در جبهه‌های جنوبی، شرقی و غربی مشاهده شد. نسبت سطح پنجره به دیوار خارجی بین 50٪ و 70٪ در جهت شمال، 60٪ در جنوب و 50٪-60٪ در جهت‌های شرقی و غربی برای تعادل بین راحتی بصری و معیارهای روشنایی مناسب به دست آمد (Ochoa et al., 2012)

در تحقیق دیگر شبیه‌سازی‌هایی برای نسبت پنجره به دیوار خارجی و دستگاه سایه‌انداز در آب و هوای سرد استونی انجام دادند. نسبت بهینه پنجره به دیوار خارجی بین 40٪ و 60٪ بود. همچنین، راه‌حل بهینه از نظر هزینه نمای خارجی، استفاده از شیشه سه جداره با عبور نور بالا، لعاب با انتشار کم و نسبت پنجره به دیوار خارجی

2-روش تحقیق

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تغییر ویژگی‌های پنجره بر بهره‌وری انرژی، آسایش حرارتی و چرخه عمر ساختمان در یک مدرسه ابتدایی در شهر یزد انجام شده است. رویکرد تحقیق توصیفی-تحلیلی است و با بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های عددی و تحلیل داده‌های اقلیمی انجام گرفته است. در فرآیند این تحقیق، شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر انجام می‌شود که یک بسته نرم‌افزاری جامع تحلیل انرژی است و آسایش حرارتی در تابستان انتخاب شده است. دقت و اعتبار نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر از طریق روش آزمایش شبیه‌سازی که توسط آژانس بین‌المللی انرژی توسعه یافته، تأیید شده است. علاوه بر این، کارایی این نرم‌افزار در شبیه‌سازی تعادل انرژی و سطح آسایش حرارتی در ساختمان‌های مدارس در کشورهای مختلف به اثبات رسیده و در تحقیق‌های متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل‌سازی انجام شده متغیرهای مورد مطالعه در رابطه با پنجره‌ها شامل نسبت سطح پنجره به دیوار، نوع شیشه پنجره‌هاست. رویکرد این تحقیق استفاده از یک نمونه کلاس مدرسه ابتدایی با ابعاد 12 در 12 متر مربع و در سه طبقه با ارتفاع کلی 12 متر انجام شده است (شکل 1)



شکل 1- مدل اصلی
Fig. 1 - Base Model

25٪ همراه با عایق دیواری خارجی به ضخامت 200 میلی‌متر بود. شبیه‌سازی‌های محدودی در اروپا نتیجه گرفت که نسبت 40٪ پنجره به دیوار خارجی با شیشه سه جداره و پوشش لعاب دوتایی با انتشار کم منجر به هزینه بهینه می‌شود (Thalfeldt et al., 2012)

1-3-2-چرخه عمر ساختمان

چرخه عمر ساختمان با تمرکز ویژه بر انتشار کربن یکی از مهم‌ترین ابزارهای ارزیابی زیست‌محیطی است که به‌منظور بررسی جامع آثار زیست‌محیطی ساختمان‌ها، تأسیسات و فرایندهای ساختمانی در طول عمر آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد (ISO, Standard 14040., 2006). مطالعات نشان می‌دهد که ساختمان‌ها مسئول حدود 40٪ از انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی هستند، که بخش عمده‌ای از آن مربوط به کربن عملیاتی و کربن محصور در مصالح ساختمانی است (UNEP., 2020). کربن در چرخه عمر ساختمان به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود: کربن محصور و کربن عملیاتی. کربن محصور شامل تمام انتشارات مرتبط با تولید، حمل و نقل، و نصب مصالح ساختمانی است، در حالی که کربن عملیاتی مربوط به مصرف انرژی در طول عمر ساختمان است (Robati et al., 2021). در فاز طراحی ساختمان، تصمیمات کلیدی در مورد انتخاب مصالح و سیستم‌های ساختمانی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر میزان انتشار کربن داشته باشد. کاربرد چرخه عمر ساختمان در سطوح مختلف تصمیم‌گیری گسترده است. در سطح طراحی، این روش برای بهینه‌سازی طراحی ساختمان، مقایسه گزینه‌های مختلف مصالح و سیستم‌های ساختمانی استفاده می‌شود. در سطح سازمانی، مطالعه چرخه عمر در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک، بهبود فرایندهای ساخت و مدیریت تأمین مصالح کاربرد دارد. مطالعه چرخه عمر ساختمان با چالش‌هایی روبرو است. دسترسی به داده‌های با کیفیت، هزینه و زمان جمع‌آوری داده‌ها، و پیچیدگی‌های روش‌شناختی از جمله این چالش‌ها هستند. همچنین، تعیین مرزهای سیستم و تخصیص اثرات در سیستم‌های پیچیده ساختمانی می‌تواند چالش‌برانگیز باشد (LETI., 2020)

برای بررسی تأثیر ابعاد پنجره‌ها در 4 حالت نسبت پنجره به دیوار (25، 50، 75، 100) درصد از چپ به راست و در 4 جبهه شمالی و غربی و شرقی و جنوبی، مدل‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت (شکل 2).



شکل 2 - نسبت پنجره به دیوار در حالات مختلف

Fig.2- WWR in different scenarios

یزد، با اقلیم گرم و خشک خود، شرایط حرارتی خاصی را در طول سال تجربه می‌کند که به‌ویژه در فصول گرم سال تأثیرات قابل توجهی بر راحتی حرارتی ساکنان دارد. تابستان‌های یزد به‌طور معمول بسیار گرم و خشک است، با دماهایی که می‌تواند به بالای 40 درجه سلسیوس برسد. در این شرایط، شاخص PMV معمولاً مقادیر بالای 0.5+ را نشان می‌دهد که به معنای احساس گرمای زیاد است. رطوبت نسبی بسیار پایین (کمتر از 20٪) در تابستان یزد باعث می‌شود که هوای داغ احساس گرمای شدیدی ایجاد کند، حتی اگر دما بالاتر از 35 درجه سلسیوس نرود. این شرایط معمولاً منجر به افزایش شاخص PPD می‌شود، به طوری که درصد افراد ناراضی از شرایط حرارتی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. زمستان‌های یزد معمولاً سرد و خشک است، با دماهایی که گاهی به زیر صفر می‌رسد. در این فصل، شاخص PMV ممکن است مقادیر منفی قابل توجهی داشته باشد که نشان‌دهنده احساس سرمای شدید است. در این شرایط، شاخص PPD افزایش می‌یابد و درصد بیشتری از افراد ممکن است از شرایط حرارتی ناراضی باشند. بنابراین، در زمستان، استفاده از سیستم‌های گرمایشی برای مقابله با سرمای شدید ضروری است. داده‌های اقلیمی شهر یزد شامل دما و باد (شکل 3 و 4) و سایر متغیرهای اقلیمی به عنوان ورودی‌های اصلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین مشخصات فیزیکی و حرارتی مصالح ساختمانی، الگوی استفاده از فضاهای

آموزشی و ویژگی‌های سیستم‌های تأسیساتی در نظر گرفته شده‌اند.

جزئیات سازه‌ای بنا نیز در جدول 2 و 3 آورده شده است. این جزئیات در شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده‌اند. به ویژگی‌های شیشه‌های مورد بررسی در تحقیق نیز در جدول 4 اشاره شده است.

2-1- اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی و روایی نتایج

اعتبار و دقت شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این تحقیق از طریق دو مسیر مورد تأیید قرار گرفته است: اول: اعتبار بین‌المللی نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر. این نرم‌افزار که بر پایه موتور شبیه‌سازی انرژی پلاس توسعه یافته است، از طریق روش آزمایش شبیه‌سازی بست که توسط آرئانس بین‌المللی انرژی تدوین شده، مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. جادکاف و نیمارک (2006) در گزارش جامع خود نشان دادند که انرژی پلاس و نرم‌افزارهای مبتنی بر آن از دقت بالایی در پیش‌بینی مصرف انرژی ساختمان‌ها برخوردار هستند، به طوری که میانگین خطای پیش‌بینی در حدود پنج درصد است. دوم: اعتبارسنجی از طریق مقایسه با مطالعات مشابه در اقلیم‌های همانند. کارایی نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر در شبیه‌سازی ساختمان‌های آموزشی در اقلیم‌های گرم و خشک مشابه یزد در چندین مطالعه معتبر تأیید شده است. اس‌ساکالی و همکاران (2022) در مطالعه خود بر روی یک مدرسه در اقلیم نیمه‌خشک مراکش که ویژگی‌های اقلیمی مشابهی با یزد دارد، از همین نرم‌افزار استفاده کردند و نتایج آنها با اندازه‌گیری‌های میدانی تطابق خوبی (خطای کمتر از هشت درصد) داشت. به همین ترتیب، محمود (2022) در بررسی عملکرد انواع مختلف شیشه در اقلیم گرم و خشک شهر اسوان در مصر که شرایط اقلیمی بسیار نزدیکی به یزد دارد، نشان داد که نتایج شبیه‌سازی با دیزاین‌بیلدر با داده‌های واقعی تطابق قابل قبولی دارند.

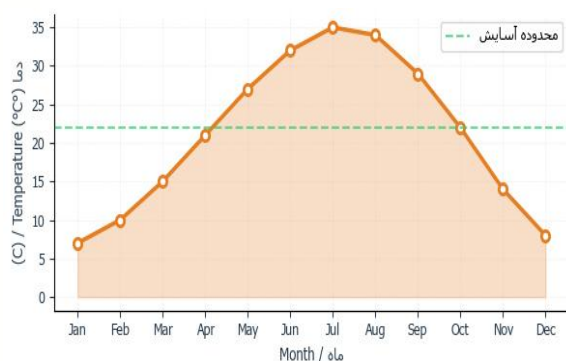
2-1-1- محدودیت‌های روش‌شناختی

با وجود اعتبار بالای روش شبیه‌سازی، این مطالعه دارای محدودیت‌هایی است که باید در تفسیر نتایج در نظر گرفته شوند. اول، این تحقیق یک مطالعه پارامتریک

جدول 1- مقایسه نتایج این مطالعه با مطالعات مشابه در اقلیم‌های گرم و خشک

Tab. 1- Comparison of Results with Similar Studies in Hot and Arid

معیار	محمود (2022) اسوان، مصر	اس ساکالی و همکاران (2022) مراکش	مطالعه حاضر (یزد، ایران)	اختلاف
کاهش انرژی سرمایشی با شیشه سه‌جداره بهترین نسبت پنجره به دیوار بهترین جهت‌گیری برای گرمایش کاهش درصد افراد نارضاضی در تابستان	35%	37%	38%	1-3% (محدوده قابل قبول)
	10% (شمال)	20-30% (شمال)	25% (شمال)	محدوده مطالعات پیشین
	جنوب (100%)	جنوب -80 (100%)	جنوب (100%)	همخوانی زیاد
	داده ندارد	داده ندارد	(بهبود 10%)	مشارکت جدید



شکل 3- دمای ماهیانه شهر یزد

Fig. 3- The average monthly temperature of Yazd city

است که هدف آن شناسایی روندها و الگوهای کلی است، نه پیش‌بینی دقیق مصرف انرژی یک ساختمان خاص با تمام جزئیات آن. دوم، مدل ساده‌شده مورد استفاده در این تحقیق، برخی عوامل ثانویه مانند رفتار دقیق کاربران، تأثیر درختان و سایه‌اندازه‌های خارجی و تأثیر ساختمان‌های مجاور را در نظر نمی‌گیرد. سوم، اعتبارسنجی نهایی نتایج نیازمند اندازه‌گیری میدانی در یک ساختمان واقعی است که در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود. با این حال، همان‌طور که مقایسه با مطالعات مشابه نشان داد، نتایج این تحقیق با الگوهای شناخته‌شده در ادبیات علمی همخوانی خوبی دارد و می‌تواند به‌عنوان مبنایی معتبر برای تصمیم‌گیری‌های طراحی مورد استفاده قرار گیرد.

استفاده از یک مدل ساده‌شده در این تحقیق بر اساس اهداف تحقیق و پیشینه علمی توجیه می‌شود. اولاً، هدف اصلی این مطالعه انجام یک بررسی پارامتریک جامع برای شناسایی تأثیر ویژگی‌های مختلف پنجره است، نه طراحی دقیق یک ساختمان خاص. برای این منظور، مدل ساده‌شده که متغیرهای غیر ضروری را ثابت نگه می‌دارد، امکان شناسایی واضح‌تر تأثیر متغیرهای مورد نظر را فراهم می‌کند. دوم اینکه، این رویکرد در مطالعات معتبر بین‌المللی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. تروپ و همکاران (2019) و اوچوا و همکاران (2012) نیز از مدل‌های ساده‌شده مشابه برای مطالعات پارامتریک خود استفاده کردند. سوم، سادگی مدل باعث می‌شود که نتایج قابلیت تعمیم بیشتری داشته باشند و بتوان آنها را در پروژه‌های مختلف با شرایط متفاوت به کار برد. چهارم، با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، تأثیر خالص و واقعی ویژگی‌های پنجره بر عملکرد ساختمان قابل شناسایی است، بدون اینکه تأثیرات دیگر عوامل با یکدیگر مخلوط شوند.

جدول 4- مشخصات سازه پنجره در سناریوهای مختلف

Tab 4- Window constructions and specifications

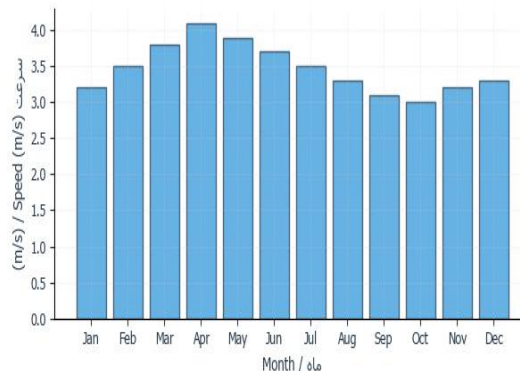
ضریب هدایت	ضخامت	لایه‌ها	شیشه
حرارتی	(میلی متر)		
(وات/مترمربع کلونین)			
5.778	6	شیشه شفاف	تک جداره شفاف با فریم چوبی
1.493	6 13	شیشه شفاف	دوجداره کم گسیل با فریم چوبی
0.780	6 13	شیشه شفاف	سه جداره کم گسیل با فریم چوبی

3- نتایج و بحث

3-1- نیاز انرژی

نمودار گرمایی ارائه شده، تصویری یکپارچه از مصرف کل انرژی سالانه ساختمان در دوازده ترکیب شامل سه نوع شیشه، چهار جهت گیری و نسبت های مختلف پنجره به دیوار ارائه می دهد (تصویر 5 و 5-الف تا ج). استفاده از طیف رنگی سبز تیره تا قرمز، امکان درک سریع الگوهای مصرف انرژی و شناسایی ترکیب های بهینه و نامطلوب را فراهم می سازد. مطابق نمودار، مصرف انرژی سالانه بین 172 تا 335 کیلووات ساعت بر مترمربع متغیر است که این دامنه گسترده، اهمیت تصمیم گیری آگاهانه در انتخاب ویژگی های پنجره در اقلیم گرم و خشک یزد را نشان می دهد.

بررسی نمودار نشان می دهد شیشه تک جداره با رنگ های نارنجی تا قرمز، بیشترین مصرف انرژی را در تمامی شرایط دارد؛ به طوری که در جهت غربی با نسبت پنجره 100 درصد به بیشینه 335 کیلووات ساعت می رسد و حتی در بهترین حالت خود در جهت شمالی با نسبت 25 درصد نیز مصرفی برابر 265 کیلووات ساعت دارد. در مقابل، شیشه سه جداره کم گسیل که با رنگ سبز تیره نمایش داده شده، عملکردی برتر دارد و در ترکیب بهینه خود (جهت شمالی و نسبت پنجره 25 درصد) تنها 172 کیلووات ساعت مصرف می کند که معادل کاهش 48 درصدی نسبت به شیشه تک جداره در شرایط مشابه است. حتی با افزایش نسبت پنجره به 100 درصد، مصرف



شکل 4- نمودار ماهیانه باد در شهر یزد

Fig.4 - Annual wind flow diagram of Yazd

جدول 2- ویژگی های ساختمان مورد مطالعه.

Tab 2- Characteristics of the studied building

عنوان	ویژگی
نوع بنا	ساختمان آموزشی
موقعیت	یزد، ایران
تعداد طبقات	4
ارتفاع طبقات	3
ظرفیت اشغال	0.37 (استاندارد اشری)
سیستم تهویه مطبوع	فن کویل و چیلر
ضریب عملکرد سیستم سرمایشی	1.8
ضریب عملکرد سیستم سرمایشی	0.85

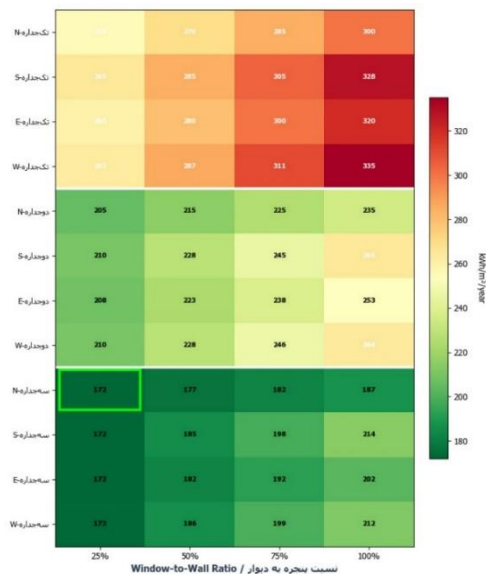
جدول 3- مشخصات مصالح ساختمانی

Tab 3- Specifications of building materials

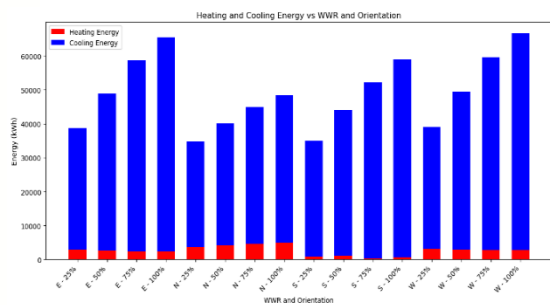
سازه	مساحت (مترمربع)	ضریب هدایت حرارتی (وات/مترمربع کلونین)
سقف	100	0.259
سقف داخلی	300	0.259
کف	100	0.264
دیوار خارجی	369.8	0.350

با ثابت در نظر گرفتن این شرایط بنا با تغییر مصالح پنجره و جهت گیری پنجره ها و نسبت پنجره به دیوار در 48 حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نیازهای گرمایشی و سرمایشی در حالت های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. سپس با تغییر مصالح پنجره در حالت پایه آسایش حرارتی و چرخه عمر ساختمان از نظر انتشار کربن مورد بررسی قرار گرفت.

اهمیت اولویت‌بندی در تصمیم‌گیری طراحی را برجسته می‌کند.

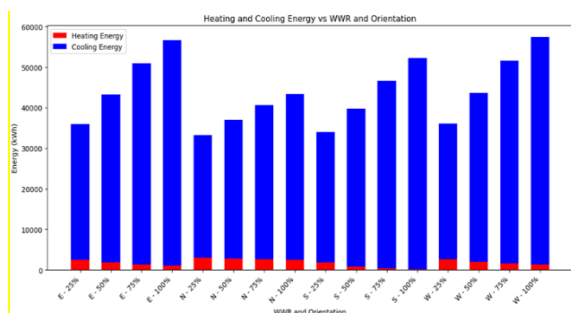


شکل 5- مصرف انرژی سالانه
Fig.5 - Total annual energy



شکل 5- الف - نیاز سالیانه انرژی برای شیشه تک جداره شفاف

Fig.5-A - The annual energy consumption for single clear glass



شکل 5- ب- نیاز سالیانه انرژی برای شیشه دو جداره کم‌گسیل

Fig.5-B - The annual energy consumption for double Low E glass

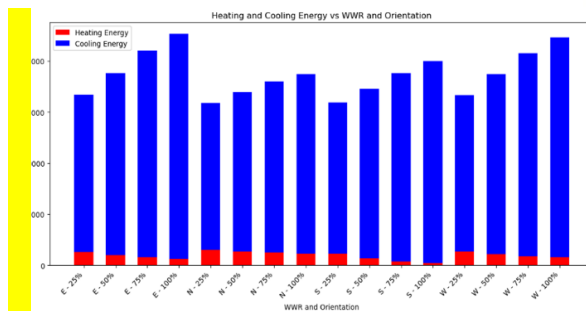
آن به 187 کیلووات‌ساعت محدود می‌شود که همچنان کمتر از بهترین حالت شیشه دوجداره است. شیشه دوجداره با رنگ‌های زرد تا سبز روشن، عملکردی میانی داشته و مصرف انرژی آن بین 205 تا 265 کیلووات‌ساعت متغیر است که نشان‌دهنده بهبود 20 تا 23 درصدی نسبت به شیشه تک‌جداره، اما فاصله قابل‌توجه با شیشه سه‌جداره است. تحلیل الگوهای رنگی نشان می‌دهد جهت‌گیری شمالی در تمامی حالات کمترین مصرف انرژی را دارد، در حالی که جهت غربی به دلیل تابش شدید عصرگاهی بیشترین مصرف را ثبت می‌کند و جهات شرقی و جنوبی در وضعیت میانی قرار می‌گیرند.

از نکات مهم نمودار، تأثیر متفاوت افزایش نسبت پنجره بر مصرف انرژی در انواع شیشه است؛ به‌گونه‌ای که در شیشه سه‌جداره و جهت شمالی، افزایش نسبت پنجره از 25 به 100 درصد تنها 9 درصد افزایش مصرف ایجاد می‌کند، در حالی که همین تغییر در شیشه تک‌جداره و جهت غربی موجب افزایش 26 درصدی می‌شود. این امر نشان می‌دهد با انتخاب شیشه مناسب، امکان استفاده از پنجره‌های بزرگ‌تر بدون افزایش قابل‌توجه مصرف انرژی وجود دارد. در مجموع، نتایج حاکی از آن است که نوع شیشه تأثیری تعیین‌کننده‌تر از جهت‌گیری و نسبت پنجره به دیوار دارد؛ به‌طوری‌که حتی بدترین حالت شیشه سه‌جداره عملکردی بهتر از بهترین حالت شیشه تک‌جداره دارد. بر این اساس، ترکیب شیشه سه‌جداره کم‌گسیل، جهت شمالی و نسبت پنجره 25 درصد به‌عنوان بهینه‌ترین راهکار با حداقل مصرف انرژی شناسایی می‌شود.

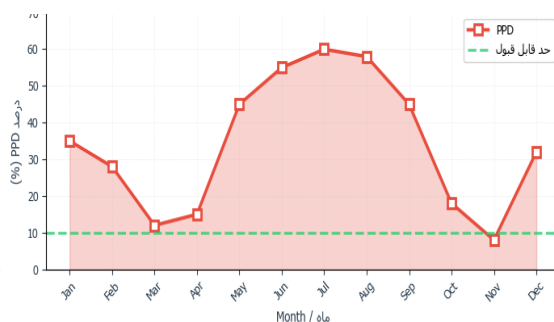
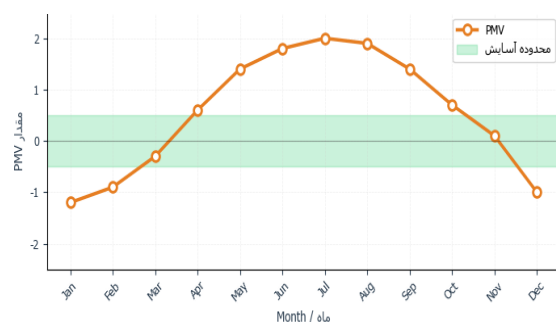
این نمودار همچنین الگوی مشخصی از تعامل بین متغیرها را نمایان می‌سازد که نشان می‌دهد تأثیر نوع شیشه بر مصرف انرژی از تأثیر جهت‌گیری و نسبت پنجره به دیوار بیشتر است، به‌گونه‌ای که حتی بدترین ترکیب شیشه سه‌جداره (جهت غربی با نسبت پنجره صد درصد با دویست و دوازده کیلووات‌ساعت) همچنان عملکرد بهتری نسبت به بهترین ترکیب شیشه تک‌جداره (جهت شمالی با نسبت پنجره بیست‌وپنج درصد با دویست و شصت‌وپنج کیلووات‌ساعت) دارد که این یافته

Fig.5-C -The annual energy consumption for Triple Low E glass

3-2- یافته‌های آسایش حرارتی: تحلیل عملکرد انواع شیشه
در این بخش به تحلیل و مقایسه شاخص‌های آسایش حرارتی پرداخته شده است:

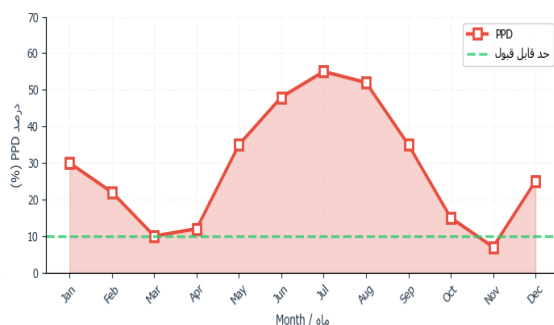
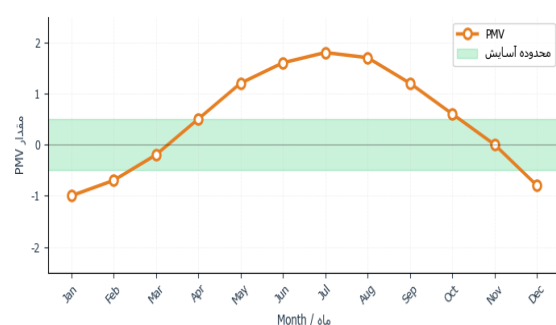


شکل 5-ج- نیاز سالیانه انرژی برای شیشه سه جداره کم‌گسیل



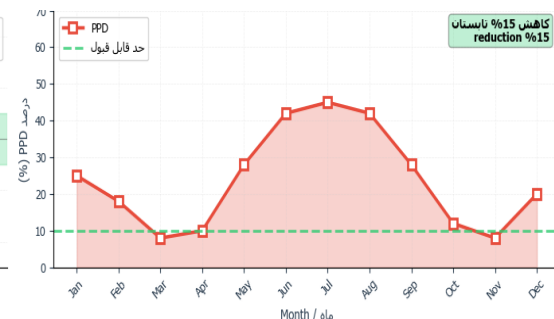
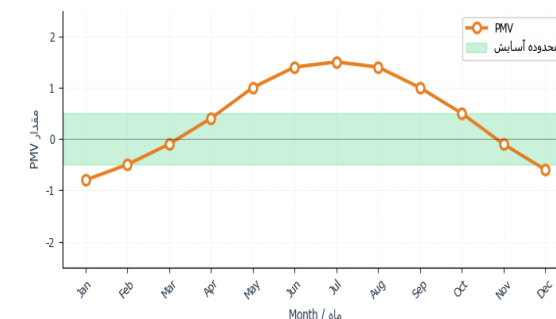
شکل 6 - شاخص‌های رأی متوسط پیش‌بینی‌شده و درصد افراد ناراضی برای شیشه تک‌جداره شفاف

Fig.6- Annual PMV AND PPD For Single Clear glass



شکل 7- شاخص‌های رأی متوسط پیش‌بینی‌شده و درصد افراد ناراضی برای شیشه دو جداره کم‌گسیل

Fig.7-Annual PMV AND PPD For Double Low-E glass



شکل 8 - شاخص‌های رأی متوسط پیش‌بینی‌شده و درصد افراد ناراضی برای شیشه سه جداره کم‌گسیل

Fig.8-Annual PMV AND PPD For triple Low-E glass

شاخص درصد افراد ناراضی نیز به بیش از 30 درصد افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده نارضایتی حرارتی بالای کاربران در این فصل است. نتایج به‌دست‌آمده تأکید می‌کنند که استفاده از شیشه تک‌جداره شفاف در اقلیم گرم و خشک یزد کارایی لازم را برای تأمین آسایش حرارتی در تمامی فصول ندارد. در ماه‌های گرم، انتقال حرارت تابشی از طریق شیشه منجر به افزایش دمای داخلی و نارضایتی کاربران می‌شود، درحالی‌که در ماه‌های سرد، عدم حفظ گرمای داخلی باعث احساس سرمای بیشتر در فضا می‌گردد.

نمودار ارائه‌شده بعدی نشان‌دهنده تأثیر استفاده از شیشه دوجداره کم‌گسیل پر شده با گاز آرگون بر آسایش حرارتی در شهر یزد است (شکل 7) بررسی شاخص‌های آسایش حرارتی شامل شاخص میانگین نظر پیش‌بینی‌شده (PMV) و درصد پیش‌بینی‌شده افراد ناراضی (PPD) نشان می‌دهد که این نوع شیشه در مقایسه با شیشه تک‌جداره شفاف عملکرد بهتری از خود نشان داده است. در ماه‌های سرد سال، مقدار شاخص میانگین نظر پیش‌بینی‌شده به حدود -0.8 تا -1 رسیده که بیانگر احساس خنکی کنترل‌شده و نزدیک به محدوده آسایش حرارتی است. همچنین، درصد پیش‌بینی‌شده افراد ناراضی در این دوره‌ها به‌طور میانگین به کمتر از 30 درصد کاهش یافته است. این بهبود نشان‌دهنده کاهش انتقال حرارت و بهینه‌سازی شرایط داخلی ساختمان است.

در ماه‌های گرم سال، مقدار شاخص میانگین نظر پیش‌بینی‌شده به حدود 1.5 نزدیک شده و درصد پیش‌بینی‌شده افراد ناراضی نیز به بیش از 30 درصد افزایش یافته است. با این حال، این مقادیر در مقایسه با شیشه تک‌جداره کاهش قابل‌توجهی داشته و نشان‌دهنده کاهش بار سرمایشی در ساختمان است. مقایسه با شیشه تک‌جداره شفاف نشان می‌دهد که استفاده از شیشه دوجداره کم‌گسیل پر شده با گاز آرگون باعث بهبود شرایط حرارتی و کاهش مصرف انرژی شده است. انتظار می‌رود در شبیه‌سازی‌های آینده، عملکرد شیشه سه‌جداره کم‌گسیل با کارایی حرارتی بالاتر، به نتایج مطلوب‌تری در کاهش درصد پیش‌بینی‌شده افراد ناراضی و دستیابی به شرایط آسایش حرارتی پایدار منجر شود.

نمودار ارائه شده (شکل 6) تغییرات شاخص‌های رأی متوسط پیش‌بینی‌شده و درصد افراد ناراضی را در طول یک سال در شرایط استفاده از شیشه تک‌جداره شفاف در شهر یزد نشان می‌دهد. باتوجه‌به داده‌های این نمودار، در فصل زمستان (ماه‌های ژانویه تا مارس و نوامبر تا دسامبر)، شاخص رأی متوسط پیش‌بینی‌شده زیر محدوده استاندارد آسایش (-0.5 تا $+0.5$) قرار دارد که نشان‌دهنده شرایط سرد در فضای داخلی است. در این دوره، شاخص درصد افراد ناراضی کمتر از 10 درصد است، به این معنا که درصد کمی از افراد از شرایط حرارتی ناراضی هستند. این امر به دلیل عبور نسبی انرژی خورشیدی از شیشه و گرم شدن فضا توسط تابش خورشیدی اتفاق می‌افتد. در مقابل، در فصل تابستان (ماه‌های می تا سپتامبر)، شاخص رأی متوسط پیش‌بینی‌شده به شدت از محدوده آسایش عبور می‌کند و به مقادیر بالاتر از $+1.5$ می‌رسد. این مقدار نشان‌دهنده شرایط بسیار گرم در داخل ساختمان است که با افزایش میزان تابش خورشیدی و عدم توانایی شیشه تک‌جداره در کنترل حرارت ورودی مرتبط است. در این بازه، شاخص درصد افراد ناراضی نیز به بیش از 30 درصد افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده نارضایتی حرارتی بالای کاربران در این فصل است.

باتوجه‌به داده‌های این نمودار، در فصل زمستان (ماه‌های ژانویه تا مارس و نوامبر تا دسامبر)، شاخص رأی متوسط پیش‌بینی‌شده زیر محدوده استاندارد آسایش (-0.5 تا $+0.5$) قرار دارد که نشان‌دهنده شرایط سرد در فضای داخلی است. در این دوره، شاخص درصد افراد ناراضی کمتر از 10 درصد است، به این معنا که درصد کمی از افراد از شرایط حرارتی ناراضی هستند. این امر به دلیل عبور نسبی انرژی خورشیدی از شیشه و گرم شدن فضا توسط تابش خورشیدی اتفاق می‌افتد. در مقابل، در فصل تابستان (ماه‌های می تا سپتامبر)، شاخص رأی متوسط پیش‌بینی‌شده به شدت از محدوده آسایش عبور می‌کند و به مقادیر بالاتر از $+1.5$ می‌رسد. این مقدار نشان‌دهنده شرایط بسیار گرم در داخل ساختمان است که با افزایش میزان تابش خورشیدی و عدم توانایی شیشه تک‌جداره در کنترل حرارت ورودی مرتبط است. در این بازه،

این یافته‌ها تأکید می‌کند که انتخاب شیشه مناسب تأثیر قابل‌توجهی بر بهینه‌سازی آسایش حرارتی و کاهش هزینه‌های انرژی در ساختمان‌های اقلیم گرم و خشک دارد.

بررسی عملکرد حرارتی شیشه سه جداره کم گسیل در اقلیم گرم و خشک شهر یزد در شکل 8 نشان می‌دهد که این نوع پنجره در مقایسه با شیشه‌های تک‌جداره شفاف و دوجداره کم گسیل، کنترل بهتری بر شرایط آسایش حرارتی داخل ساختمان دارد. نمودار شاخص‌های پیش‌بینی میانگین آرای حرارتی و درصد پیش‌بینی نارضایتی افراد در طول سال نشان می‌دهد که در فصول معتدل (بهار و پاییز)، شرایط حرارتی داخل در محدوده آسایش قرار می‌گیرد و میزان نارضایتی افراد به کمترین حد خود (15 تا 20 درصد) می‌رسد. این در حالی است که شیشه‌های تک جداره شفاف به دلیل ضریب انتقال حرارت بالا، در این فصول نیز نوسانات دمایی زیادی را به فضای داخل منتقل می‌کنند و شیشه‌های دو جداره کم گسیل اگرچه عملکرد بهتری دارند، اما به اندازه نوع سه جداره در کنترل شرایط حرارتی موفق نیستند.

در ماه‌های گرم سال، به‌ویژه خرداد و تیر، شاخص پیش‌بینی میانگین آرای حرارتی برای شیشه سه جداره کم گسیل به حدود $+1.5$ می‌رسد که نشان‌دهنده شرایط گرم و خارج از محدوده آسایش است. با این حال، این شرایط در مقایسه با شیشه تک جداره که می‌تواند منجر به شاخص بالای $+2$ شود و یا شیشه دو جداره کم گسیل با شاخص حدود $+1.8$ ، وضعیت مطلوب‌تری را نشان می‌دهد. همچنین درصد نارضایتی 45 درصدی در این دوره برای شیشه سه جداره، در مقایسه با نارضایتی بالای 60 درصد برای شیشه تک جداره و حدود 55 درصد برای شیشه دو جداره، عملکرد بهتر این نوع پنجره را تأیید می‌کند در فصل زمستان نیز شیشه سه جداره کم گسیل با شاخص پیش‌بینی میانگین آرای حرارتی حدود -1 و درصد نارضایتی 40 درصد، عملکرد بهتری نسبت به انواع دیگر دارد.

با این‌وجود، نتایج نشان می‌دهد که حتی شیشه سه جداره کم گسیل به‌تنهایی نمی‌تواند شرایط آسایش

حرارتی کامل را در اقلیم گرم و خشک یزد تأمین کند و نیاز به راهکارهای تکمیلی مانند سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی مناسب، سایه‌بان‌های متحرک و تهویه طبیعی در فصول معتدل وجود دارد. با این‌حال، استفاده از این نوع شیشه در مقایسه با انواع دیگر، به کاهش قابل‌توجه بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان و بهبود شرایط آسایش حرارتی کمک می‌کند و می‌تواند به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در طراحی ساختمان‌های این اقلیم موردتوجه قرار گیرد.

3-3- چرخه عمر ساختمان

محاسبه کربن تجسم‌یافته در سیستم‌های شیشه‌ای ساختمان بر اساس استانداردهای ISO 14044 و ISO14040 انجام می‌شود.

این محاسبات شامل ارزیابی چرخه عمر از مرحله استخراج مواد اولیه تا پایان عمر محصول است. مر مفید 30 ساله برای تمام سیستم‌ها در نظر گرفته شده است. با توجه به ایده‌آل بودن شرایط اقلیمی ساختمان در شهر یزد تأثیرات اقلیمی محلی در محاسبات لحاظ نشده‌اند. نتایج محاسبات با استفاده از نرم‌افزار دیزان بیلدر و پایگاه داده Inventory of Carbon & Energy اعتبارسنجی شده‌اند. انحراف استاندارد محاسبات کمتر از $\pm 5\%$ است. برای محاسبه کربن تجسم‌یافته از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$\Sigma (EC_m \times Q_m) + EC_p + EC_t$$

در این فرمول EC_m ضریب انتشار کربن مواد اولیه بر حسب کیلوگرم کربن دی‌اکسید بر کیلوگرم، Q_m وزن مواد مصرفی بر حسب کیلوگرم، EC_p انتشار کربن در فرایند تولید بر حسب کیلوگرم کربن دی‌اکسید، EC_t انتشار کربن در حمل‌ونقل بر حسب کیلوگرم کربن دی‌اکسید را مورد اشاره قرار می‌دهد. محدوده جغرافیایی ایران و کارخانه‌های داخلی در نظر گرفته شده است. مسافت حمل‌ونقل به طور میانگین 500 کیلومتر در نظر گرفته شده است. در جدول 4 عوامل مؤثر در محاسبات مورد بررسی قرار گرفته‌اند. واحد ضرایب انتشار مواد اولیه کیلوگرم کربن دی‌اکسید بر کیلوگرم، واحد فرایند تولید کیلوگرم کربن دی‌اکسید بر مترمربع و واحد

$$(11.8 \times 22.5) + 15.3 + 9.2 = 305.13$$

در نمودار بعدی (شکل 9) مقایسه میزان کربن‌های انتشار یافته حاصل از استفاده از هر کدام از شیشه‌ها در بنای ساختمان قابل مشاهده است:

4- نتیجه‌گیری

این تحقیق با رویکردی یکپارچه و چندمعیاره، تأثیر ویژگی‌های مختلف پنجره بر سه بعد بهره‌وری انرژی، آسایش حرارتی و چرخه عمر ساختمان را در اقلیم گرم و خشک شهر یزد مورد ارزیابی قرار داد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی بهینه پنجره‌ها نیازمند درک عمیق تعارض‌ها و هم‌افزایی‌های موجود بین معیارهای مختلف است و انتخاب نهایی باید بر اساس اولویت‌های پروژه و شرایط خاص هر ساختمان صورت گیرد.

حمل و نقل کیلوگرم کربن دی‌اکسید بر تن در کیلومتر است.

3-3-1- محاسبه کربن تجسم یافته

شیشه تک‌جداره با ضخامت 6 میلی‌متر و وزن 15 کیلوگرم بر متر مربع دارای کربن تجسم یافته با مقدار زیر است:

$$(130.5 \times 15.0) + 5.3 + 4.8 = 1982.8$$

شیشه دوجداره با ضخامت 6 میلی‌متر و فاصله گذار 13 میلی‌متری و 95 درصد حجم میانی گاز آرگون و پوشش کم گسیل و وزن مخصوص 30.2 کیلوگرم بر متر مربع دارای کربن تجسم یافته با مقدار زیر است:

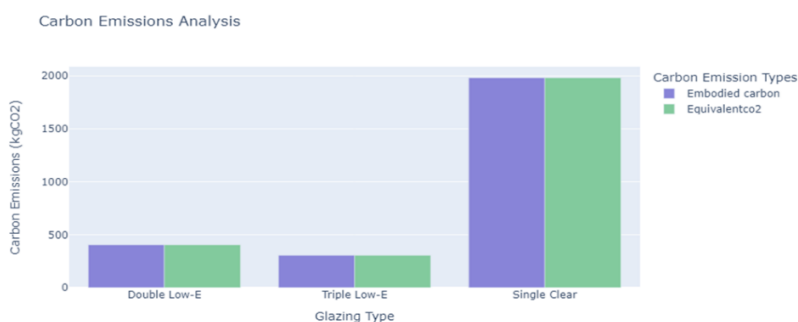
$$(15.3 \times 30.2) + 12.5 + 8.7 = 404.27$$

شیشه سه‌جداره با ضخامت 6 میلی‌متر و فاصله گذار 13 میلی‌متری و 95 درصد حجم میانی گاز آرگون و پوشش کم گسیل و وزن مخصوص 30.2 کیلوگرم بر متر مربع دارای کربن تجسم یافته با مقدار زیر است:

جدول 4- عوامل موثر در محاسبات

Tab 4- Effective factors in LCA calculations

مقدار	حمل و نقل	مقدار	فرایند تولید	مقدار	ضرایب انتشار مواد اولیه
0.045	حمل مواد اولیه	0.12	برش و تمیزکاری	0.9	شیشه فلوت پایه
0.062	حمل محصول نهایی	0.35	مونتاژ واحد شیشه	0.4	پوشش شیشه کم گسیل
		0.08	کنترل کیفیت	0.295	گاز آرگون
				8.24	فاصله گذار آلومینیومی



شکل 9- مقادیر کربن تجسم یافته و معادل بر حسب شیشه استفاده شده در ساختمان

Fig.9 -Embodied and operational carbon values in terms of glass used in the building

تعارض بین بهینه سرمایشی و گرمایشی. نتایج به روشنی نشان داد که پیکربندی بهینه برای کاهش مصرف انرژی سرمایشی با پیکربندی بهینه برای کاهش مصرف انرژی گرمایشی متفاوت است. شیشه سه جداره کم گسیل با نسبت مساحت پنجره به دیوار بیست و پنج درصد در جهت گیری شمالی، کمترین مصرف انرژی سرمایشی را با کاهش سی و هشت درصدی نسبت به شیشه تک جداره ارائه می دهد. این عملکرد برتر ناشی از توانایی بالای این نوع شیشه در جلوگیری از انتقال حرارت تابشی و کاهش بار سرمایشی در ماه های گرم سال است. در مقابل، شیشه تک جداره شفاف با نسبت مساحت پنجره به دیوار صد درصد در جهت گیری جنوبی، بهترین عملکرد گرمایشی را با کاهش چهل و دو درصدی نیاز گرمایشی نشان می دهد. این امر ناشی از قابلیت بالای این نوع شیشه در عبور تابش خورشیدی و بهره گیری از گرمایش غیرفعال در فصل زمستان است. با توجه به اینکه در اقلیم یزد بار سرمایشی غالب است و مصرف انرژی سرمایشی تقریباً دو برابر مصرف انرژی گرمایشی است، اولویت باید با کاهش بار سرمایشی باشد. بنابراین، از منظر صرفاً انرژی، شیشه سه جداره کم گسیل با نسبت پنجره به دیوار پایین در جهت شمالی، گزینه برتر است.

تأثیر نوع شیشه بر آسایش حرارتی. ارزیابی شاخص های آسایش حرارتی شامل شاخص میانگین نظر پیش بینی شده و درصد پیش بینی شده افراد ناراضی نشان داد که شیشه سه جداره کم گسیل در تمام فصول سال پایدارترین شرایط آسایش را فراهم می کند. در فصول معتدل (بهار و پاییز)، این نوع شیشه توانسته شرایط حرارتی داخل را در محدوده آسایش (شاخص میانگین نظر پیش بینی شده بین منفی نیم تا مثبت نیم) نگه دارد و درصد افراد ناراضی را به کمتر از بیست درصد کاهش دهد. در ماه های گرم سال، اگرچه هیچ یک از گزینه های شیشه نتوانسته اند بدون استفاده از سیستم های سرمایشی، شرایط آسایش کامل را فراهم کنند، اما شیشه سه جداره کم گسیل با کاهش درصد افراد ناراضی از پنجاه و پنج درصد (در حالت شیشه تک جداره) به چهل و پنج درصد، عملکرد بهتری نشان داده است. این بهبود ده درصدی در آسایش حرارتی، از نظر کیفیت زندگی

کاربران و بهره وری فضای آموزشی اهمیت قابل توجهی دارد. در فصل زمستان نیز شیشه سه جداره با حفظ بهتر گرمای داخلی و کاهش جریان های همرفتی ناشی از سطوح سرد شیشه، شرایط مطلوب تری را نسبت به شیشه های تک جداره و دوجداره ایجاد کرده است. این یافته ها تأکید می کند که در طراحی ساختمان های آموزشی که آسایش حرارتی دانش آموزان نقش کلیدی در یادگیری دارد، انتخاب شیشه سه جداره از اولویت بالایی برخوردار است.

برتری شیشه سه جداره از منظر چرخه عمر. تحلیل چرخه عمر ساختمان با در نظر گرفتن کربن تجسم یافته در مرحله تولید و کربن عملیاتی ناشی از مصرف انرژی در طول سی سال عمر مفید ساختمان، نشان داد که شیشه سه جداره کم گسیل با وجود کربن تجسم یافته بالاتر در مرحله تولید (سیصد و پنج کیلوگرم کربن دی اکسید بر مترمربع در مقابل یکصد و نود و هشت کیلوگرم برای شیشه تک جداره)، در طول چرخه عمر کامل ساختمان، کمترین انتشار کلی کربن دی اکسید را دارد. محاسبات دقیق نشان داد که شیشه سه جداره در طول سی سال، شصت و دو درصد کمتر از شیشه تک جداره کربن دی اکسید منتشر می کند. این کاهش قابل توجه ناشی از صرفه جویی عظیم در مصرف انرژی عملیاتی است که به مرور زمان، هزینه کربنی بالاتر تولید را جبران می کند. به عبارت دیگر، سرمایه گذاری اولیه بالاتر در شیشه های پیشرفته از منظر زیست محیطی کاملاً توجیه پذیر است و این یافته با اهداف توسعه پایدار و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی همسو است.

نقش حیاتی نسبت مساحت پنجره به دیوار و جهت گیری. نتایج نشان داد که نسبت مساحت پنجره به دیوار و جهت گیری، تأثیری به اندازه نوع شیشه بر عملکرد کلی ساختمان دارند. در جهت شمالی، افزایش نسبت پنجره به دیوار از بیست و پنج به یکصد درصد، منجر به افزایش سی و پنج درصدی مصرف انرژی سرمایشی می شود، در حالی که در جهت جنوبی این افزایش به پنجاه و دو درصد می رسد. این تفاوت قابل توجه نشان می دهد که در اقلیم های گرم و خشک، محدود کردن پنجره ها در جبهه های جنوبی و غربی که تابش شدید خورشید

است. استفاده از پرده‌های داخلی قابل تنظیم برای کنترل نور صبحگاهی نیز مفید است.

رویکرد یکپارچه طراحی: این تحقیق تأکید می‌کند که طراحی پنجره‌ها نباید به صورت جداگانه از سایر عناصر ساختمان انجام شود. ترکیب بهینه پنجره با سیستم‌های سایه‌انداز، عایق‌بندی مناسب دیوارها، و استفاده از تهویه طبیعی در فصول معتدل، می‌تواند به بهینه‌سازی کلی عملکرد ساختمان منجر شود.

محدودیت‌ها و پیشنهادات برای تحقیقات آتی: این مطالعه با محدودیت‌هایی روبرو بوده که رفع آنها در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود. اول، اعتبارسنجی نتایج با اندازه‌گیری‌های میدانی در یک ساختمان واقعی می‌تواند اعتماد به یافته‌ها را افزایش دهد. دوم، بررسی اثرات سایه‌بان‌های متحرک و سیستم‌های کنترل هوشمند پنجره بر عملکرد کلی ساختمان می‌تواند مکمل مناسبی برای این تحقیق باشد. سوم، تحلیل اقتصادی دقیق‌تر با در نظر گرفتن هزینه‌های اولیه، هزینه‌های بهره‌برداری و هزینه‌های نگهداری می‌تواند به تصمیم‌گیری بهتر کمک کند. چهارم، بررسی رفتار واقعی کاربران و تأثیر آن بر مصرف انرژی و آسایش حرارتی می‌تواند دیدگاه جامع‌تری از عملکرد ساختمان ارائه دهد. پنجم، گسترش این مطالعه به سایر اقلیم‌های ایران و منطقه خاورمیانه می‌تواند به ایجاد راهنمای جامع طراحی پنجره برای کل منطقه کمک کند.

در نهایت، این پژوهش نشان داد که طراحی اصولی و علم‌محور پنجره‌ها با در نظر گرفتن همزمان معیارهای انرژی، آسایش و زیست‌محیطی، می‌تواند به طور قابل توجهی به ساخت ساختمان‌های پایدار، کارآمد و راحت در اقلیم‌های گرم و خشک کمک کند. شیشه سه‌جداره کم‌گسیل با نسبت مساحت پنجره به دیوار بهینه و جهت‌گیری مناسب، به عنوان بهترین گزینه برای این اقلیم شناسایی شد و می‌تواند الگویی برای پروژه‌های آتی در منطقه باشد.

پی‌نوشت

¹ Life-cycle assessment

² Argon

³ Krypton

⁴ Xenon

دریافت می‌کنند، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در مقابل، پنجره‌های بزرگ‌تر در جهت شمالی می‌توانند نور طبیعی کافی را بدون افزایش قابل توجه بار سرمایشی فراهم کنند.

نوآوری روش‌شناختی این تحقیق: یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق، ارائه رویکرد یکپارچه برای ارزیابی همزمان سه معیار انرژی، آسایش و زیست‌محیط است. بیشتر مطالعات پیشین به یک یا دو معیار پرداخته بودند، اما این تحقیق نشان داد که بدون در نظر گرفتن همزمان هر سه معیار، ممکن است تصمیمات طراحی به بهینه‌سازی یک جنبه منجر شود اما جنبه‌های دیگر را نادیده بگیرد. برای مثال، اگر تنها معیار انرژی گرمایشی در نظر گرفته شود، ممکن است شیشه تک‌جداره با پنجره‌های بزرگ انتخاب شود که در ماه‌های گرم سال منجر به افزایش شدید بار سرمایشی و کاهش آسایش حرارتی می‌شود. رویکرد چندمعیاره این مطالعه امکان شناسایی این تعارض‌ها و یافتن بهترین تعادل را فراهم می‌کند.

پیشنهاد‌های کاربردی برای طراحان و تصمیم‌گیرندگان: بر اساس یافته‌های این تحقیق، توصیه‌های زیر برای طراحی مدارس و ساختمان‌های مشابه در اقلیم گرم و خشک یزد و مناطق همانند ارائه می‌شود:

برای جبهه‌های شمالی: استفاده از شیشه سه‌جداره کم‌گسیل با نسبت مساحت پنجره به دیوار بیست و پنج تا سی درصد توصیه می‌شود. این ترکیب بهترین تعادل بین نور طبیعی کافی، آسایش حرارتی و مصرف انرژی را فراهم می‌کند.

برای جبهه‌های جنوبی و غربی: محدود کردن نسبت مساحت پنجره به دیوار به حداکثر بیست درصد و استفاده حتماً از شیشه سه‌جداره کم‌گسیل یا دوجداره با پوشش‌های کنترل خورشیدی ضروری است. در این جبهه‌ها، استفاده از سایه‌بان‌های خارجی برای کنترل تابش مستقیم خورشید نیز بسیار توصیه می‌شود.

برای جبهه‌های شرقی: با توجه به دریافت تابش خورشید در ساعات اولیه صبح، نسبت مساحت پنجره به دیوار بیست و پنج تا سی درصد با شیشه سه‌جداره مناسب

Es-Sakali, N., Kaitouni, S. I., Laasri, I. A., Mghazli, M. O., Naimi, Z., Lbibb, R., & Bouardi, A. E. (2022). Assessment of the energy efficiency for a building energy model using different glazing windows in a semi-arid climate. In: 2022 13th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet, Tunisia, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/IREC56325.2022.10001867>

Fereidani, N. A., Rodrigues, E., & Gaspar, A. R. (2021). A review of the energy implications of passive building design and active measures under climate change in the Middle East. *Journal of Building Engineering*, 44, 127152. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.127152>

Grynning, S., Gustavsen, A., Time, B., & Jelle, B. P. (2013). Windows in the buildings of tomorrow: Energy losers or energy gainers? *Energy and Buildings*, 61, 185-192. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.029>

Ihara, T., Gustavsen, A., & Jelle, B. P. (2015). Effect of facade components on energy efficiency in office buildings. *Applied Energy*, 158, 422-432. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.074>

International Energy Agency (IEA). (2013). *Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050*. Paris: OECD/IEA. <https://www.iea.org/reports/transition-to-sustainable-buildings>

International Organization for Standardization (ISO). (2005). *ISO 7730: Ergonomics of the Thermal Environment — Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Calculations of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria*. Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/39155.html>

International Organization for Standardization (ISO). (2006). *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/37456.html>

Iwuanyanwu, O., Gil-Ozoudeh, I., Okwandu, A. C., & Ike, C. S. (2024). Retrofitting existing buildings for sustainability: Challenges and innovations. *Sustainable Construction Journal*. <https://doi.org/10.69610/scj.v2i2.38>

⁵ U.P.V.C

⁶ PMV

⁷ PPD

References

Albatayneh, A., Alterman, D., Page, A., & Moghtaderi, B. (2018). The significance of the orientation on the overall buildings thermal performance-case study in Australia. *Energy Procedia*, 152, 372-377. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.159>

Ali, A. A. M. (2020). An integrated analysis with life cycle assessment, building information modeling, and environmental performance for window materials: Assiut University Hospital Clinic as a case study. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 48(6), 1024-1050. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2020.116835>

Altomonte, S., & Schiavon, S. (2013). Occupant satisfaction in LEED and non-LEED certified buildings. *Building and Environment*, 68, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.06.008>

Asif, M. (2019). Comparative analysis of window technologies for building energy efficiency. *Conference Proceedings*. [Conference paper — DOI not publicly available]

ASHRAE. (2021). *Handbook of Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA. <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbooks/handbook-fundamentals>

Barrett, P., Zhang, Y., Moffat, J., & Kobbacy, K. (2013). A holistic, multi-level analysis identifying the impact of classroom design on pupils' learning. *Building and Environment*, 59, 678-689. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.016>

Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., et al. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319-331. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)

Daneshvar, M. R., Ebrahimi, M., & Nejadsoleymani, H. (2019). An overview of climate change in Iran: facts and statistics. *Environmental Systems Research*, 8, 7. <https://doi.org/10.1186/s40068-019-0135-3>



- Robati, M., Oldfield, P., Nezhad, A. A., Carmichael, D. G., & Kuru, A. (2021). Carbon Value Engineering: A Framework for Integrating Embodied Carbon and Cost Reduction Strategies in Building Design. *Building and Environment*, 192, 107620. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107620>
- Taleb, H. M., & Antony, A. G. (2020). Assessing different glazing to achieve better lighting performance of office buildings in the United Arab Emirates (UAE). *Journal of Building Engineering*, 28, 101034. <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2019.101034>
- Thalfeldt, M., Pikas, E., Kurnitski, J., & Voll, H. (2013). Facade design principles for nearly zero energy buildings in a cold climate. *Energy and Buildings*, 67, 309-321. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.027>
- Troup, L., Phillips, R., Eckelman, M. J., & Fannon, D. (2019). Effect of window-to-wall ratio on measured energy consumption in US office buildings. *Energy and Buildings*, 203, 109434. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109434>
- UNEP. (2020). 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. <https://www.unep.org/resources/report/2020-global-status-report-buildings-and-construction>
- Wang, Z., & Zhao, J. (2018). Optimization of passive envelop energy efficient measures for office buildings in different climate regions of China based on modified sensitivity analysis. *Sustainability*, 10(4), 907. <https://doi.org/10.3390/su10040907>
- Zhang, R., Liu, D., & Shi, L. (2022). Thermal-comfort optimization design method for semi-outdoor stadium using machine learning. *Building and Environment*, 215, 108890. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108890>
- Zhang, Y., Li, Y., & Zheng, H. (2017). Ecological network analysis of energy metabolism in the Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration. *Ecological Modelling*, 351, 51-62. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.02.005>
- Judkoff, R., & Neymark, J. (2006). Model validation and testing: The methodological foundation of ASHRAE Standard 140. *ASHRAE Transactions*, 112(2), 367-382. <https://www.osti.gov/biblio/901646>
- Kumarasamy, K., An, J., Yang, J., & Yang, E. H. (2017). Novel CFD-based numerical schemes for conduction dominant enclosure radiation problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 2225-2264. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.043>
- LETI. (2020). Embodied Carbon Primer: Supplementary guidance to the Climate Emergency Design Guide. London Energy Transformation Initiative, London, UK. <https://www.leti.london/ecp>
- Mahmoud, A. (2022). Investigating the Impact of Different Glazing Types on the Energy Performance in Hot Arid Climate. *Journal of Advanced Engineering Trends*, 42(1), 69-84. <https://doi.org/10.21608/jaet.2022.110547.1148>
- Moosavi, L., Zandi, M., & Bidi, M. (2018). Experimental study on the cooling performance of solar-assisted natural ventilation in a large building in a warm and humid climate. *Journal of Building Engineering*, 19, 228-241. <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2018.05.013>
- Naser, S. A., Haghparast, F., Singery, M., & Sattari Sarbangholi, H. (2020). Providing an Optimal Execution Model for Windows Based on Glazing to Reduce Fossil Fuel Consumption (Case Study: Asman Residential Complex of Tabriz). *Iranica Journal of Energy & Environment*, 11(4), 260-270. <https://doi.org/10.5829/ijee.2020.11.04.02>
- Ochoa, C. E., Aries, M. B. C., van Loenen, E. J., & Hensen, J. L. M. (2012). Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. *Applied Energy*, 95, 238-245. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.042>
- Pino, A., Bustamante, W., Escobar, R., & Pino, F. E. (2012). Thermal and lighting behavior of office buildings in Santiago of Chile. *Energy and Buildings*, 47, 441-449. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.016>

Iran Meteorological Organization. (2021). Climatic Atlas of Iran: 30-year data (1981-2011). Tehran: Iran Meteorological Organization. [Persian]

National Iranian Fuel Conservation Organization. (2022). Strategies for reducing energy consumption in the building sector. Tehran: Saba Publication. [Persian]



سال نهم / شماره دوم / پاییز و زمستان ۱۴۰۴



90