



نقش طراحی بازشو و سایبان در مصرف انرژی و آسایش بصری در کلاس‌های درس (نمونه مطالعاتی مدرسه ملاصدرا-گرگان)

لیلا میرسعیدی^{1*}، پیمان خانقلی²

1- استادیار، گروه معماری، واحد گنبد کاووس، دانشگاه آزاد اسلامی، گنبد کاووس، ایران

2- گروه معماری و شهرسازی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

* گنبد کاووس، ایران، lmirsaeedi@gmail.com

چکیده

امروزه با تشدید بحران‌های زیست محیطی توجه به رویکردهایی مانند ساختمان سبز و بهسازی ساختمان‌های موجود در راستای اهداف ساختمان سبز بیشتر شده است، از جمله در ساختمان‌های آموزشی که کیفیت‌های محیطی از جمله آسایش گرمایی و کیفیت بصری در آنها بسیار مهم است. در این پژوهش در راستای بهسازی ساختمان یک مدرسه در حال ساخت با رویکرد ساختمان سبز، دو راهکار بهسازی پوسته خارجی ساختمان و بازشوها و سایبان‌ها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در انتخاب راهکارهای بهسازی، کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی و شاخص‌های نور روز در کنار هزینه اولیه هر راهکار، مبنای مقایسه بوده‌اند. روش پژوهش از نوع شبیه‌سازی و توصیفی تحلیلی بوده است. بر مبنای فرایند پژوهش، مدل پایه ساختمان در نرم افزار دیزاین بیلدر ساخته شد و سپس گزینه‌های مختلف بهسازی پوسته خارجی و اصلاحات بازشوها و سایبان‌ها مدلسازی شدند. این گزینه‌ها بر اساس مطالعات پیشین و شرایط اجرایی و اقتصادی تعیین شده و به چند گزینه محدود شدند. نتایج و خروجی‌های مصرف انرژی و روشنایی بررسی و مقایسه شده و گزینه‌های با اولویت بیشتر مشخص شدند. بر اساس نتایج، ابعاد پنجره‌ها و افزودن سایبان حدود ۲۷ درصد در کاهش مصرف انرژی تأثیر دارد. در مقایسه، بهسازی پوسته خارجی و افزایش عایق‌بندی حدود ۳ درصد در کاهش مصرف انرژی تأثیر دارد. در مقایسه اقتصادی نیز این گزینه اولویت کمتری از بهسازی پنجره و سایبان‌ها دارد. نتایج این تحقیق اهمیت طراحی بازشوها و سایبان‌ها را به ویژه در کاربری‌های آموزشی در اقلیم معتدل و مرطوب در مقایسه با طراحی پوسته خارجی ساختمان مشخص می‌کند.

کلیدواژه‌ها: مدرسه سبز، بازشو و سایبان، مصرف انرژی، آسایش بصری، بهسازی انرژی، گرگان.

The role of fenestration and shading design in energy consumption and visual comfort in classrooms

Leila Mirsaeeidi^{1*}, Payman Khangholi²

1- Assistant Professor, Department of Architecture, GKM.C., Islamic Azad University, Gonbad Kavoos, Iran

2- Department of Architecture and Urban Planning, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

* Gonbad Kavoos, Iran, lmirsaeedi@gmail.com

Received: 06 August 2025 Accepted: 04 January 2026

Abstract

Nowadays, with the intensification of environmental crises, attention has been paid to approaches such as green buildings and buildings Energy Retrofit. Including educational buildings that consume a lot of energy and environmental quality is very important to them. In this study, to improve the building of a school under construction in Gorgan with the green building approach, two strategies for improving the building envelope and fenestration and shadings have been studied and compared. In selecting improvement strategies, reducing energy consumption and cost have been the basis for comparing the solutions. The research methodology was based on simulation and descriptive-analytical approaches. Firstly, the base model of the building was made in DesignBuilder software, and then various options for improving the building envelope and modifying fenestration and shadings were modeled. These options were determined based on previous studies and technical and economic conditions and were limited to a few options. The results and outputs of energy consumption and daylighting were reviewed and compared and the best options were identified. Based on the results, window dimensions and the addition of shading

devices contribute to approximately a 27% reduction in energy consumption. In comparison, enhancing the building envelope and increasing insulation result in about a 3% reduction in energy consumption. In economic comparison, this option has a lower priority than improvement fenestration and shadings. The results of this study indicate the importance of fenestration and shading design, especially in educational buildings in temperate and humid climates compared to the building envelope.

Keywords: Green School, Fenestrations and Shading, Energy Consumption, Visual Comfort, Energy Retrofit, Gorgan.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر با تشدید بحران‌های زیست محیطی و تغییر اقلیم توجه به توسعه پایدار در صنعت ساختمان بیشتر شده است. در این راستا بهینه‌سازی مصرف انرژی و رویکردهای جامع‌تر مانند ساختمان سبز و پایدار مطرح‌اند. فضاهای آموزشی از جمله کاربری‌هایی هستند که اغلب مصرف انرژی زیادی داشته و همچنین اهمیت آسایش و کیفیت‌های محیطی در آنها بسیار مهم است. در این مقاله بر اساس نتایج پروژه بازطراحی مدرسه ملاصدرا در گرگان و در راستای دستیابی به شاخص‌های ساختمان سبز، نتایج حاصل از بهسازی پوسته خارجی و اصلاح بازشوها و سایبان‌ها با اهداف کاهش مصرف انرژی و بهسازی روشنایی ارائه شده و تحلیل‌های اقتصادی برای هر راهکار نیز بررسی و مقایسه گردیده است. سوال اصلی پژوهش این است که از میان راهکارهای بهسازی پوسته خارجی و یا بهسازی پنجره‌ها و سایبان‌ها کدام یک اثر بیشتری در کاهش مصرف انرژی ساختمان آموزشی در اقلیم گرگان دارد؟

ساختمان مدرسه موردنظر در زمان شروع پژوهش در حال ساخت (اسکلت اجرا شده و شروع سفت‌کاری) و در روند انجام پژوهش در حال تکمیل بوده است، این موضوع محدودیت‌های زیادی در اجرای پژوهش ایجاد کرده است. از جمله این که با توجه به عدم امکان تغییرات اساسی در طرح در بسیاری موارد مانند آسایش بصری امکان دستیابی به استانداردهای شاخص‌های نور روز وجود نداشته است و بسیاری از اقدامات تنها در راستای بهبود اهداف ساختمان سبز بوده‌اند و با استانداردها فاصله دارند. همچنین با توجه به موضوع بهسازی پروژه و لزوم توجه به شرایط اجرایی و فنی و توان پیمانکاران و همچنین اهمیت بودجه مورد نیاز در گزینش راهکارها و به ویژه طراحی سایبان‌ها محدودیت‌های بسیاری وجود داشت. در همین راستا با توجه به شرایط و توان اجرایی و اقتصادی پروژه‌ها سایبان‌های خارجی ثابت در نظر گرفته شده است. این موضوع بر خلاف بسیاری از پژوهش‌های دانشگاهی گزینه‌های قابل بررسی را بسیار محدود می‌کرد. در پژوهش‌های علمی و دانشگاهی کارهای بسیار و نوآوری‌های ارزنده‌ای انجام می‌شود اما در زمان کاربرد آن‌ها به ویژه در شرایطی مانند شرایط اجرایی کشور ما بسیاری از این نتایج غیرقابل استفاده و یا به شکل ناقص به کار گرفته می‌شوند. از این رو یکی از اهداف ارائه نتایج این پروژه به شکل مقاله ارائه شرایط واقعی اجرایی با تمام محدودیت‌هایش در تلفیق با نتایج پژوهشی بوده است.

۲- مروری بر پیشینه پژوهش

بهسازی انرژی^۱ در ساختمان‌ها سابقه طولانی دارد و دستورالعمل و استانداردهای مختلف، از جمله استاندارد گواهینامه لید، برای این منظور تدوین شده است. همچنین منابع و دستورالعمل‌های متعددی برای بهینه‌سازی ساختمان‌ها با کاربری‌های مختلف، از جمله کاربری آموزشی، تدوین شده

است. در کتاب راهنمای بهسازی انرژی مدارس، روش‌ها و راهکارهای مختلف بهسازی بر اساس اقلیم و درجه بهسازی انرژی به تفصیل بررسی شده است [۱].

در پژوهش‌های مختلف، بهسازی انرژی ساختمان‌ها و راهکارهای آن در کاربری‌های مختلف، به ویژه فضاهای آموزشی، بررسی شده است. ویژگی‌های بازشوها و سایه‌اندازی به دلیل تأثیر بر آسایش بصری و بهینه‌سازی انرژی اهمیت زیادی دارند. تحقیقات نشان داده‌اند که تابش و سایه‌اندازی در اقلیم‌های مختلف ایران نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی ایفا می‌کنند. بسیاری از این پژوهش‌ها به مطالعه بازشوها و سایبان‌ها در فضاهای آموزشی پرداخته‌اند، برخی با تمرکز بر کاهش مصرف انرژی و برخی دیگر بر مولفه‌های آسایش بصری یا هر دو حوزه [۸-۲]. هر پژوهش با توجه به اهداف و متغیرهای مختلف، از جمله اقلیم، نتایج خاصی ارائه می‌دهد که در شرایط مشابه قابل استفاده است. در پژوهش‌های بین‌المللی نیز تلاش‌های بسیاری برای بهبود آسایش بصری، کاهش مصرف انرژی و دستیابی به شاخص‌های بهینه در مدارس انجام شده است [۹]. در پژوهشی، راهبردهای استفاده از روشنایی طبیعی و آسایش بصری در مدارس بررسی شده است [۱۰]. در این مقاله، مقادیر عددی شاخص‌های روشنایی از منابع و استانداردها جمع‌آوری و پیشنهاداتی درباره جنس، ابعاد و ویژگی‌های پنجره ارائه شده است. بسیاری از پژوهش‌ها با شبیه‌سازی انرژی و روشنایی، نسبت بهینه پنجره به دیوار^۲ و شاخص‌های روشنایی کلاس‌ها را بررسی کرده‌اند. این نسبت وابسته به اقلیم، ویژگی‌های پنجره، مکان آن و مشخصات پوسته خارجی است و مقدار ثابت و یکسانی ندارد. همچنین، در پژوهشی در رشت، ابعاد و تناسبات پنجره برای بهینه‌سازی حرارتی و روشنایی در فضاهای آموزشی بررسی شده است [۱۱].

در پژوهش‌های متعدد عوامل و اهداف متنوعی در راستای طراحی پنجره‌ها و بازشوها بررسی شده‌اند، به عنوان مثال در پژوهشی موقعیت بازشوها برای تهویه طبیعی، آسایش حرارتی و کیفیت بصری و نور در روز در کاربری مسکونی در شهر یزد بررسی شده است. در این پژوهش، از میان ۱۶ گزینه شبیه‌سازی شده، مدلی که رضایت کاربران و کارایی شاخص‌های بصری را افزایش داده، به عنوان مدل بهینه انتخاب شده است [۱۲]. در پژوهشی دیگر، تأثیر متغیرهای ابعادی و نسبت سطح به حجم کلاس‌های دبیرستانی تبریز بر آسایش بصری و حرارتی بررسی شد. شبیه‌سازی با استفاده از پلاگین‌های مربوط در محیط نرم‌افزار راینو-گرس‌هاپر انجام شد و نتایج نشان داد نسبت سطح به حجم مطلوب بین ۱.۱۶ تا ۱.۶۹ قرار دارد؛ نسبت کمتر برای اهداف نور روز و خیرگی و نسبت بالاتر برای آسایش حرارتی تطبیقی مناسب‌تر است [۱۳]. در پژوهشی، ۱۵ سناریوی فوتولتائیک یکپارچه با سایبان برای نمای یک اتاق اداری در شیراز با استفاده از نرم‌افزارهای DesignBuilder و PVsyst بررسی شد. نتایج نشان داد سناریوی دارای ۴ لور با زاویه شیب

2. (WWR) Window to Wall Ratio

1. Energy Retrofit

ایتالیا شده‌اند. مانزن نیز در پژوهش‌های متعددی به بهینه‌سازی سایبان‌ها، به‌ویژه سایبان‌های ثابت، پرداخته است [17]. در مقاله‌ای، تأثیر طراحی سایبان‌های خارجی بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در یک هتل ده طبقه در اقلیم گرم و مرطوب عربستان بررسی شده و پس از شبیه‌سازی انرژی ساختمان با نرم‌افزار دیزاین بیلدر و ارزیابی روش‌های مختلف سایه‌اندازی و ویژگی‌های بازشوها، پنج گزینه مورد مطالعه و گزینه مناسب بر اساس تحلیل مصرف انرژی و اقتصادی انتخاب شده است [18]. در مقاله‌ای دیگر، تأثیر انواع و ابعاد مختلف سایبان‌های ثابت خارجی را بر مصرف انرژی در یک ساختمان اداری در اقلیم‌های مختلف ایتالیا بررسی کرده‌اند که بر اساس نتایج بیشترین میزان تأثیر سایبان بر کاهش مصرف انرژی در اقلیم‌های گرم تابستانی و در حدود 20% بوده است [19]. در این تحقیق تأثیر متغیرهای مختلف موثر بر مصرف انرژی (جهت و ارتفاع ساختمان، اقلیم و ...) همزمان با گزینه‌های مختلف سایبان مورد بررسی قرار گرفته است.

پس از بررسی مطالعات پیشین موارد زیر قابل جمع بندی است: مطالعات زیادی در اقلیم‌ها و کاربری‌های مختلف، از جمله مدارس، با هدف کاهش مصرف انرژی و افزایش آسایش بصری انجام شده است. با توجه به تنوع عوامل مؤثر در هر پژوهش، نتایج قابل تعمیم به سایر نمونه‌ها محدود است، اما برخی نتایج می‌تواند در پژوهش حاضر مفید و راهگشا باشد. پژوهش‌های زیادی با هدف بهینه‌سازی و تولید ابزارهای مشابه وجود دارند که در کنار استانداردهای مرتبط قابل استفاده‌اند، اما در این پژوهش به دلیل محدودیت‌های پروژه، بسیاری از این ابزارها کاربرد ندارند. این تفاوت بین پژوهش‌های علمی و پروژه‌های واقعی همیشه وجود دارد و در این پژوهش تلاش شده تا نحوه کاربرد نتایج علمی با توجه به محدودیت‌های پروژه‌های واقعی شرح داده شود.

۴۵ درجه و آزیموت صفر درجه بیشترین بازده انرژی (35.54%) را دارد و همزمان به کاهش مصرف انرژی گرمایشی و کنترل تابش خورشید کمک می‌کند [14]. عوامل و متغیرهای مرتبط با کیفیت نور روز، مصرف انرژی و ویژگی‌های بازشوها بسیار متنوع هستند و هر پژوهش به بخشی از آن‌ها پرداخته است. این پژوهش به بررسی نسبت عرض به ارتفاع پنجره، مکان پنجره و ابعاد سایبان پرداخته و بهترین حالت پنجره افقی با فاصله زیاد از سقف در نمای جنوبی را معرفی کرده است. در پژوهشی دیگر، نسبت بهینه پنجره به دیوار در ساختمان‌های آموزشی کرمان بررسی و مطالعات داخلی و خارجی و پیشنهادات پژوهش‌های قبلی ارائه شده است [15]. این پژوهش به اهمیت عواملی چون ضریب بهره حرارتی خورشیدی پنجره (SHGC) پرداخته و نسبت مناسب پنجره به دیوار در فضاهای آموزشی کرمان با استفاده از پنجره دوجداره 30٪ پیشنهاد شده است. همچنین، مطالعات متعددی در زمینه طراحی سایبان و ابزارهای مرتبط انجام شده است [16-18]. بیشتر این پژوهش‌ها درباره بهینه‌سازی و در موارد کمی طراحی سایبان‌های متحرک و غیر ثابت هستند. با توجه به این که سایبان‌های ثابت اغلب کاربردی‌تر و اقتصادی‌ترند از آن‌ها استفاده بیشتری می‌شود اما کاملاً بهینه نخواهند بود. در پژوهشی، سایبان‌های خارجی بهینه برای ساختمان‌های مسکونی آپارتمانی بررسی شده است. بر اساس نتایج این تحقیق، مدل‌های مختلف سایبان خارجی برای اقلیم‌های مختلف پیشنهاد شده‌اند. همچنین، در این مقاله بهینه‌سازی سایبان‌های خارجی برای پنجره‌های یک آپارتمان با استفاده از شبیه‌سازی انرژی و بهینه‌سازی چند هدفه جبهه‌پارتو¹ انجام شده است [16]. در پژوهشی، برای طراحی سایبان‌های ثابت با هدف بهینه‌سازی انرژی و روشنایی طبیعی در ساختمان‌های اداری، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده و نتایج نشان می‌دهد که سایبان‌های بهینه‌سازی‌شده باعث کاهش 19 تا 30 درصدی مصرف انرژی در مقایسه با حالت بدون سایبان در شهرهای مختلف

جدول ۱. پیشینه پژوهش

سال	عنوان	روش/ ابزار پژوهش	نتایج و یافته‌ها
۲۰۱۳ [۱]	راهنمای بازسازی پیشرفته انرژی (روش‌های کاربردی برای بهبود عملکرد انرژی در مدارس)	بررسی راهکارهای بهسازی بر اساس اقلیم و درجه بهسازی انرژی	معرفی مجموعه‌ای از روش‌های بهینه سازی در مدارس
۲۰۲۰ [۹]	بهینه‌سازی طراحی کلاس‌های مدارس ابتدایی از نظر عملکرد انرژی و روشنایی روز با در نظر گرفتن آسایش حرارتی و بصری کاربران	مرور پژوهش‌های بین‌المللی در زمینه بهینه‌سازی مدارس	تمرکز بر آسایش بصری، کاهش مصرف انرژی در مدارس
۲۰۱۷ [۱۰]	مروری بر راهبردهای بهره‌گیری از نور طبیعی در مدارس: وضعیت موجود و روندهای آینده مورد انتظار	بررسی روشنایی طبیعی و آسایش بصری در مدارس	راهبردهای استفاده از روشنایی طبیعی و آسایش بصری در مدارس
۱۳۹۵ [۱۱]	یکپارچه‌سازی تحلیل حرارتی و روشنایی برای بهینه‌سازی اندازه پنجره در ساختمان‌های آموزشی	شبیه‌سازی انرژی و روشنایی و جمع‌آوری مقادیر عددی شاخص‌های روشنایی از منابع و استانداردها	ارائه پیشنهادهایی درباره جنس، ابعاد و ویژگی پنجره‌ها به نسبت بهینه پنجره به دیوار و شاخص‌های روشنایی کلاس‌ها
۱۴۰۰ [۱۲]	بهینه‌سازی موقعیت پنجره‌ها برای بهبود تهویه طبیعی، آسایش حرارتی و روشنایی روز در شهر یزد	شبیه‌سازی ۱۶ گزینه مختلف موقعیت بازشوها برای ارزیابی تهویه طبیعی، آسایش حرارتی و کیفیت بصری در کاربری مسکونی شهر یزد	مدلی که موجب افزایش رضایت کاربران و بهبود شاخص‌های بصری شد، به‌عنوان مدل بهینه انتخاب گردید
۲۰۲۳ [۱۳]	ارزیابی عملکرد فتوولتائیک یکپارچه با سیستم سایبان در بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان در اقلیم گرم و خشک	شبیه‌سازی کلاس‌های دبیرستانی با پلاگین‌های راینو گرس هاپر	نسبت سطح به حجم مطلوب بین ۱۰۱۶ تا ۱۰۶۹؛ نسبت کمتر برای نور روز و خیرگی، نسبت بالاتر برای آسایش حرارتی
۲۰۲۴ [۱۴]	بهینه‌سازی چند متغیره آسایش بصری و حرارتی در کلاس‌های مدارس شهر تبریز با توجه به ابعاد و تناسبات فضا	شبیه‌سازی ۱۵ سناریوی فتوولتائیک یکپارچه با سایبان با نرم‌افزارهای DesignBuilder و PVsyst	بیشترین بازده انرژی (35.54%) برای سناریوی ۴ لوور، شیب ۴۵° و آزیموت ۰°؛ کاهش مصرف انرژی گرمایشی و کنترل تابش خورشید

سال	عنوان	روش/ ابزار پژوهش	نتایج و یافته‌ها
۱۳۹۷ [۱۵]	تعیین نسبت بهینه سطح پنجره به دیوار در نمای جنوبی ساختمان‌های آموزشی شهر کرمان	بررسی نسبت عرض به ارتفاع پنجره، مکان پنجره و ابعاد سایبان بررسی نسبت بهینه پنجره به دیوار در ساختمان‌های آموزشی در کرمان و مرور مطالعات داخلی و خارجی	معرفی بهترین حالت پنجره افقی با فاصله زیاد از سقف در نمای جنوبی
۲۰۱۹ [۱۶]	اشکال بهینه و نزدیک به بهینه سایبان‌های خارجی پنجره در ساختمان‌های مسکونی	شبیه‌سازی انرژی و بهینه‌سازی چندهدفه جبهه پارتو برای طراحی سایبان‌های خارجی پنجره‌های آپارتمان	ارائه مدل‌های مختلف سایبان خارجی بهینه برای اقلیم‌های گوناگون
۲۰۱۴ [۱۷]	بهینه‌سازی ژنتیکی سایبان‌های ثابت خارجی ساختمان	استفاده از الگوریتم ژنتیک برای طراحی سایبان‌های ثابت با هدف بهینه‌سازی انرژی و روشنایی طبیعی در ساختمان‌های اداری	کاهش ۱۹ تا ۳۰ درصدی مصرف انرژی نسبت به حالت بدون سایبان در شهرهای مختلف ایتالیا؛ تأکید بر نقش سایبان‌های ثابت در بهینه‌سازی انرژی
۲۰۱۸ [۱۸]	تأثیر راهبرد سایبان‌های خارجی بر عملکرد انرژی	شبیه‌سازی انرژی ساختمان با نرم‌افزار DesignBuilder و ارزیابی روش‌های مختلف سایه‌اندازی و ویژگی‌های بازشوها	بررسی پنج گزینه سایه‌اندازی و انتخاب گزینه مناسب بر اساس تحلیل مصرف انرژی و ارزیابی اقتصادی
۲۰۱۳ [۱۹]	تأثیر تجهیزات سایه‌انداز خورشیدی بر نیازهای انرژی ساختمان‌های اداری مستقل در اقلیم‌های ایتالیا	بررسی تأثیر انواع و ابعاد مختلف سایبان‌های ثابت خارجی بر مصرف انرژی در ساختمان اداری در اقلیم‌های مختلف ایتالیا	بیشترین تأثیر سایبان در کاهش مصرف انرژی مربوط به اقلیم‌های گرم تابستانی بوده و حدود ۲۰٪ کاهش مصرف انرژی مشاهده شده است

۳- چارچوب نظری پژوهش

3-1- ویژگی‌های بازشوها و سایبان‌ها در کلاس درس

عوامل موثر بر نسبت بهینه پنجره به دیوار شامل ویژگی اقلیم، مشخصات حرارتی پنجره‌ها و دیوارها و سایه‌اندازی می‌باشند. به طور کلی در اقلیم‌های با نوسان زیاد دما، توصیه به کاهش این نسبت است اما در اقلیم‌های با نوسان کم دمایی و معتدل و همچنین با مشخصات حرارتی مناسب دیوارها و پنجره و پیش‌بینی سایه‌اندازی، این نسبت می‌تواند افزایش یابد.

بر اساس مطالعات پیشین نسبت مناسب پنجره به دیوار در اقلیم مدیترانه‌ای و اقلیم‌های مشابه منطقه مورد مطالعه در حدود 20 تا 40٪ در پژوهش‌های مختلف پیشنهاد شده است و بر این اساس و همچنین دستیابی به منظر و دید مناسب در فضاها و افزایش کیفیت فضایی در کنار اصلاح حرارتی دیوارها و وضعیت حرارتی قابل قبول پنجره‌ها، در اصلاح طرح‌ها تلاش می‌شود نسبت مذکور تا حد ممکن افزایش یابد. بر اساس مرور مطالعات پیشین داخلی و خارجی درباره پنجره‌ها و سایبان‌ها در اقلیم‌های مشابه متغیرهای مهم پنجره به شرح جدول 2 جمع‌بندی شدند.

جدول 2 مشخصات پنجره بر اساس مطالعات تجویزی [11, 8, 5, 3, 1]

پیشنهاد	توضیحات
نسبت پنجره (با سایبان) به مساحت فضا (پنجره نورگیر)	WFR 8-11٪ -
نسبت پنجره به دیوار (نما)	WWR 10-15٪ بدون سایه‌اندازی 20 تا 40٪ با سایه‌اندازی
نسبت طول به عرض پنجره	WHR 4 به 1 پنجره‌های افقی و کشیده پنجره‌های متعدد

3-2- ضوابط بهینه‌سازی روشنایی طبیعی

ضوابط و استانداردهای روشنایی طبیعی در منابع موجود به شرح زیر بررسی شدند و در نهایت از روش اول و دوم لید به عنوان روش بررسی روشنایی طبیعی در پروژه‌های موجود استفاده شد. شاخص‌های مورد بررسی در تحلیل روشنایی شامل موارد زیر هستند:

UDI - بازه یا محدوده‌ای است که در آن بهره‌گیری از نور مطلوب فراهم می‌باشد. به بیان دیگر میزان دسترسی یک فضا به نور مطلوب را تعیین می‌نماید.

در محاسبات "UDI300-500/50%" مبنا قرار می‌گیرد.

SDA - حداقل زمانی که سطح فضای داخلی اتاق به روشنایی حداقل (آستانه آسایش) دسترسی دارد. این شاخص به صورت SDA300/50% تعریف می‌شود. ASE - یا قرار گرفتن در معرض نور خورشید. تعداد ساعاتی است که در یک نقطه از سطح کار، نور بیش از محدوده حد آسایش دریافت می‌شود و با ایجاد آلودگی نور سبب از بین بردن آسایش بصری می‌گردد. این شاخص به صورت ASE 1000/250h محاسبه می‌شود و شاخص بررسی خیرگی است. طراحی مناسب بازشوها و سایبان‌ها تا حد زیادی می‌تواند علاوه بر تامین شاخص‌های روشنایی خیرگی را کاهش دهد.

بر اساس مطالعات انجام شده در استانداردهای داخلی و خارجی شاخص‌های روشنایی در جدول زیر جمع‌بندی شده است.

جدول 3 جمع‌بندی ضوابط شاخص‌های روشنایی در فضاهای مختلف مدرسه [۱]

DF	UDI	ASE	SDA	
2-5	-	٪ 15	٪ 75	کلاس درس
2-5	-	٪ 15	٪ 75	کارگاه و آزمایشگاه
2-5	-	٪ 25	٪ 55	سالن‌ها
2-5	-	٪ 25	٪ 55	کتابخانه

2-5	-	% 15	% 55	اداری
-----	---	------	------	-------

بر اساس ضوابط و شرایط استاندارد لید برای دستیابی به امتیاز نورگیری طبیعی illuminance بین 300 تا 3000 lx در همه فضاهای مفید ساختمان باید بالای 75٪ باشد تا یک امتیاز لید کسب شود. در صورت افزایش این مقدار به بالای 90٪ دو امتیاز کسب می‌شود. همچنین در گزینه اول گزارش لید دو شاخص SDA و ASE به طور همزمان بررسی شده و 2 یا 3 امتیاز در صورت برآورده شدن آستانه هر دو شاخص اختصاص می‌یابد.

۴- روش تحقیق

این مقاله بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده در پروژه بهسازی مدارس در حال اجرای استان گلستان در راستای شاخص‌های ساختمان سبز ارائه می‌شود. با توجه به موضوع بازطراحی و بهسازی و این که طرح پروژه‌ها آماده و در حال شروع به ساخت و یا در مرحله اجرای سازه بود محدودیت‌های زیادی وجود داشت. در شکل 1 مدل ساختمان در طرح اولیه دیده می‌شود و اطلاعات مربوط به آن در جدول 4 ارائه شده‌اند. در ابتدا اطلاعات لازم ساختمان و کاربری برای مدل‌سازی از روی نقشه‌ها و مذاکره با کارفرما استخراج گردید. سپس با نرم‌افزار مدل‌سازی Design Builder 6.1.2.009، ساختمان با جزئیات کامل مدل‌سازی شد. برخی اطلاعات لازم مانند دماهای طرح سرمایش و گرمایش و نرخ نفوذ هوا و آب گرم مصرفی، میزان روشنایی الکتریکی موردنیاز فضاها و ... از مباحث مقررات ملی ساختمان استخراج گردید. همچنین در مدل‌سازی‌ها در صورت وجود ساختمان‌های اطراف نیز در نظر گرفته شد.



شکل ۱ مدل پایه ساختمان در نرم افزار شبیه سازی

جدول 4 مشخصات عمومی مدرسه					
نام مدرسه	تعداد طبقات	مساحت سایت	زمینه و بافت	نوع سازه	نوع سقف
پانل سه					پانل سه
بدی					تیرچه بلوک
مدرسه	189	2070	شهری و اسکلت		در طبقات (3D پانل)
ملاصدرای	9	مترمربع	متراکم بتنی	و بام شیبدار	با ضخامت
گروگان				با خرپای	پلی
				فلزی	استایرن
					10cm

تلاش شد ساختمان با حداکثر جزییات که ممکن است در محاسبات انرژی تاثیر گذار باشد شبیه سازی شود. جزییات اطلاعات ورودی به نرم افزار در چک لیست مربوطه در جدول 5 ارائه شده است. متغیرهای تحقیق نیز در جدول 6 ارائه شده اند.

جدول 5 اطلاعات ورودی به نرم افزار شبیه سازی					
فایل آب و هوایی کاربری ساختمان			Epw ایستگاه گرگان آموزشی- مدرسه ترکیبی Design Builder 6.1.2.009		
نرم افزار (های) شبیه سازی مورد استفاده			7 صبح تا 6 بعد از ظهر محدوده زمانی بهره برداری روزانه ساختمان (دو شیفته)		
خلاصه مساحت ساختمان					
مساحت کل ساختمان (M^2)			1899.24		
مساحت فضای کنترل شده (M^2)			1510.9		
مساحت فضای کنترل نشده (M^2)			388.34		
مدل پایه			مدل پیشنهادی		
پوسته					
مقاومت		ضریب انتقال		مقاومت	
حرارتی		حرارت		حرارتی	
$(W/M^2.K)$		$(M^2.K/W)$		$(W/M^2.K)$	
$(W M^2.K/)$					
جداره (۱) دیوار خارجی		0.78		2.762	
جداره (2) بام شیب دار		0.625		3.688	
جداره (3) کف روی خاک		0.5		2.422	
جداره (4) کف روی هوا		1.7		2.958	
نرخ نفوذ هوا (M^3/S)		0.7		0.7	
جداره های نور گذر					
معرفی نوع پنجره		پنجره دو جداره با 6mm گاز آرگون		پنجره دو جداره با 6 mmگاز آرگون	
ضریب گرمای دریافتی خورشیدی ($SHGC$)		ضریب انتقال حرارت (U_{gl}) ($W/m^2.k$)		ضریب گرمای انتقال حرارت (U_{gl}) ($W/m^2.k$)	
0.762		0.812		0.762	
نسبت سطح دیوار به پنجره (%) (WWR)		شمال: 13.81% جنوب: 28.44%		شمال: 23.60% جنوب: 36.69%	
WWR _{TOTAL}		شرق: 8.98% غرب: 14.38%		شرق: 10.38% غرب: 14.38%	
		17.30%		22.92%	
نوع و عمق سایه بان		شمال: ندارد جنوب: ندارد		شمال: بدون سایبان جنوب: سایبان به صورت لوور افقی (3 پره)	
		شرق: ندارد غرب: ندارد		شرق: بدون سایبان غرب: بدون سایبان	

مسکونی در شهر یزد نتایج شبیه‌سازی با نتایج بررسی میدانی مقایسه شده و اختلاف ناچیزی مشاهده شده است [12]. در مقاله‌ای دیگر این نرم‌افزار با رویکردی تجربی و مقایسه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است [21]. در این مطالعه ساختمان مدرسه‌ای در کاشان با این نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و اختلاف 14 درصد میان نتایج شبیه‌سازی و مصرف واقعی انرژی آن گزارش شده است. این میزان طبق استانداردها (کمتر از 15٪) قابل قبول بوده و این نرم‌افزار عملکرد خوبی در شبیه‌سازی نسبت به نرم‌افزارهایی مانند اکوتکت داشته است. در پژوهشی شبیه‌سازی یک ساختمان اداری در سمنان با این نرم‌افزار انجام شده است که اختلاف نتایج شبیه‌سازی و نتایج واقعی کمتر از 7٪ گزارش شده است و روند مصرف انرژی در نتایج شبیه‌سازی مشابه با روند مصرف واقعی در ماه‌های مختلف سال بوده است [22]. در پژوهشی نیز مدل‌های تست اشرفی 140 با نرم‌افزار انرژی پلاس و دو نرم‌افزار شبیه‌سازی انرژی دیگر (DeST, DOE-2.1E) شبیه‌سازی و اعتبارسنجی شده‌اند که اختلاف کمتر از 10٪ در هر سه نرم‌افزار میان مصرف انرژی واقعی و نتایج شبیه‌سازی گزارش شده است [23].

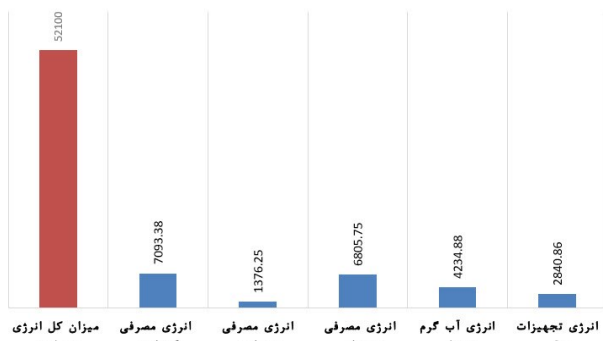
۵- تحلیل و بررسی

5-1- بررسی و تحلیل مصرف انرژی و روشنایی طبیعی

بر اساس نتایج مدل‌سازی و نمودارهای خروجی مصرف انرژی، بیشترین مقدار مصرف برای گرمایش فضاها و سپس روشنایی و آب گرم مصرفی و تجهیزات الکتریکی می‌باشد. بر اساس نتایج میزان مصرف انرژی کل این مدرسه برابر با 52.1 کیلو وات ساعت بر مترمربع (KWh/m²) برای واحد مساحت فضاها کنترل شده است. مقادیر مصرف بخش‌های مختلف در شکل ۲ بر اساس نتایج خروجی نرم‌افزار ارائه شده‌اند.

لازم به ذکر است که این مقدار بر اساس شرایط موجود طرح از جمله برنامه زمانی پیشنهادی آن و تجهیزات معمول محاسبه شده است و قابل مقایسه با استانداردهای مصرف کاربری آموزشی از جمله مقادیر جدول کارایی انرژی در مبحث مقدار نمی‌باشد. مقدار کم آن نسبت به مقدار استاندارد مصرف مبحث 19 به طور عمده به دلایل زیر است:

- برنامه زمانی مدرسه و تعطیلی آن در ماه‌های گرم سال که موجب شده است نیاز به استفاده از وسایل سرمایشی بسیار محدود شود.
- استفاده از سرمایش مکانیکی فقط در فضاها اداری و استفاده از تهویه طبیعی در سایر فضاها از جمله در کلاس‌ها.



مقدار انرژی کل با محاسبه ضریب بهره‌وری انرژی برق به میزان ۳۰٪ در زمان پروژه محاسبه شده است. سایر مقادیر شامل انرژی اولیه است.

شکل 2 مقادیر انرژی مصرفی ساختمان در هر بخش (Wh/M²/year)

افراد				
تعداد دانش‌آموزان هر کلاس		30 نفر		
تعداد کل دانش‌آموزان مدرسه		360 نفر		
سیستم‌های تاسیساتی				
مشخصات کلی سیستم گرمایش	موتورخانه و شوفاژ مرکزی	موتورخانه و شوفاژ مرکزی		
مشخصات کلی سیستم سرمایش	کولر اسپلیت (فضاهای اداری)	کولر اسپلیت (فضاهای اداری)		
دمای تنظیم سیستم‌های تاسیساتی	گرمایش Setback	گرمایش setpoint	سرمایش Setback	سرمایش Setpoint
فضاها	15	20	32	28
روشنایی				
نوع گنبد آسمان	Perez all weather, 3-Direct horizontal irradiance	Perez all weather, 3-Direct horizontal irradiance		Perez all weather, 3-Direct horizontal irradiance
ارتفاع سطح کار ² (m)	0.75	0.75		0.75
بازه زمانی شبیه‌سازی روشنایی	زمان استفاده مدرسه	زمان استفاده مدرسه		زمان استفاده مدرسه
ASE	63.1	87.6		87.6
sDA	51.89	70.01		70.01
UDI ₃₀₀₋₁₀₀₀	98%	97%		97%
ضریب یکنواختی روشنایی	0.21	0.3		0.3

جدول 6 متغیرهای تحقیق

متغیرهای وابسته پژوهش	متغیرهای مستقل پژوهش	متغیرهای کنترل شده
مصرف انرژی	مساحت بازوها	نوع اقلیم، کاربری ساختمان، تعداد بهره‌برداران فضاها،
شاخص‌های آسایش بصری ASE, SDA	مقاومت حرارتی اجزای پوسته خارجی (دیوارها، بام، کف و ...)	سیستم‌های تاسیساتی، نوع پنجره‌ها، نرخ تعویض هوا، دماهای تنظیم، زمان بهره‌برداری

با توجه به این که ساختمان مدرسه موردنظر در حال ساخت بوده است امکان اعتبارسنجی به شکل میدانی وجود نداشته است. البته بعد از تکمیل نیز به دلیل محدودیت‌های اداری و بودجه برخی راهکارهای پیشنهادی (از جمله افزودن سایبان‌ها) اجرا نشده است لذا امکان اعتبارسنجی بعد از بهره‌برداری به دلیل اختلافات وجود ندارد. از این‌رو برای اعتبارسنجی به نتایج پژوهش‌های پیشین ارجاع می‌شود.

نرم افزار دیزاین بیلدر برای شبیه‌سازی و تحلیل اقلیمی فضاها مختلف طراحی شده و موتور نرم‌افزار با موتور شبیه‌ساز Energy plus برای شبیه‌سازی انرژی و daysim, radiance برای شبیه‌سازی روشنایی کار می‌کند. استفاده در این نرم‌افزار در آزمون‌های معتبر سنجیده شده و همچنین از آن در بسیاری از مقالات علمی معتبر به عنوان معیار سنجش استفاده شده است. به طور کلی نتایج اعتبار سنجی نسخه‌های مختلف این نرم‌افزار در وب سایت شرکت دیزاین بیلدر موجود است و با استاندارد اشرفی 140 اعتبارسنجی شده است [20].

در پژوهش‌های بسیاری کارکرد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با این نرم‌افزار بررسی و ارزیابی شده است. از جمله در پژوهشی درباره ساختمان

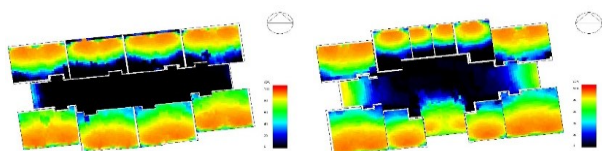
پس از اعمال تغییرات در مدل ساختمان در نرم‌افزار و شبیه‌سازی انرژی در دو گزینه مختلف اصلاح دیوار و بام نتایج در جدول 8 ارائه و مقایسه شده‌اند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی انرژی میزان کاهش مصرف انرژی در صورت افزایش ضخامت هسته پانل سه‌بعدی (گزینه 1) برابر 2.95٪ و در صورت استفاده از بلوک‌های لیکا (گزینه 2) حدود 1.3٪ می‌باشد. با وجود مقاومت حرارتی بیشتر دیوار لیکا به دلیل افزایش ضخامت دیوار و تاثیر بر دریافت روشنایی طبیعی میزان کاهش مصرف انرژی در گزینه 2 کمتر شده است.

جدول 8 تقویت حرارتی سقف و دیوارهای خارجی

مقاومت حرارتی دیوار	مصرف کل انرژی KWh/M2	تغییر نسبت به درصد مدل پایه	تغییر
وضع موجود (مدل پایه)	109.52	0	0
گزینه 1: دیوار 3d panel با هسته عایق 15 و 4 cm بتن در دو سمت + بام اصلاح شده با افزایش 10cm عایق حرارتی	50.570	1.538	2.95 %
گزینه 2: بلوک لیکا 25 cm + بام اصلاح شده با افزایش 10cm عایق حرارتی	51.407	0.701	1.34 %

5-3- اصلاحات بازشوها و بهینه‌سازی روشنایی طبیعی

در بررسی وضعیت روشنایی و بهره‌گیری از نور روز هر دو روش لید و شاخص‌های مختلف آن‌ها بررسی و تحلیل شد. در شکل‌های زیر شاخص‌های روشنایی فاکتور نور روز و شدت روشنایی در پلان‌های طبقات در وضع موجود دیده می‌شوند.



شکل ۳ نقشه روشنایی طبیعی بر اساس شاخص SDA برای طبقه همکف و اول مدل پایه (از چپ به راست)

بر اساس خروجی‌های نور روز در مدرسه و بر اساس گزارش لید شاخص دریافت نور روز برای کل ساختمان در وضع موجود 46.4 است. همچنین در آنالیز خروجی‌های مصرف انرژی نیز مشاهده شد که مصرف انرژی الکتریکی برای روشنایی فضاها بالاست که وضعیت نامطلوب نورگیری طبیعی فضاها را نشان می‌دهد. بررسی نقشه‌های SDA, ASE, UDI نشان می‌دهد در طرح پایه فضاهای اصلی از جمله کلاس‌ها، آزمایشگاه‌ها، کارگاه‌ها و فضاهای اداری دارای وضعیت بهره‌مندی از نور روز و روشنایی مطابق استانداردها (مبحث 19 و 13) هستند. در فضاهای اداری و آموزشی، به ویژه کلاس‌ها میزان خیرگی زیادی در کنار دریافت نور وجود دارد که در طراحی سایبان و بهینه‌سازی بازشوها باید مد نظر قرار گیرد. برای بهبود

بر اساس نتایج مدل‌سازی مصرف برق برای روشنایی در مدرسه سهم زیادی در مصرف انرژی کل آن دارد که نیاز به اصلاح نورگیری فضاها را در راستای بهره‌گیری بیشتر از نور روز نشان می‌دهد. بیشترین میزان اتلاف انرژی ساختمان نیز به ترتیب از طریق نفوذ ناخواسته هوا، دیوارهای خارجی، پنجره‌های خارجی، کف روی خاک، سقف‌ها و کف‌های داخلی و بام اتفاق می‌افتد. در راستای بهینه‌سازی انرژی ساختمان ابتدا گزینه‌هایی برای تقویت حرارتی پوسته خارجی و کاهش اتلاف تعیین شد که در ادامه ارائه شده‌اند. همچنین راهکارهای بهینه‌سازی روشنایی طبیعی و اصلاح بازشوها و سایبان‌ها بررسی شده‌اند.

5-2- اصلاحات پوسته خارجی

برای بهسازی و اصلاح پوسته خارجی بر اساس شرایط اجرایی ساختمان و خواسته‌های کارفرما گزینه‌هایی مطرح شدند. در جدول 7 وضع موجود و پیشنهادات اجزای پوسته خارجی ارائه شده‌اند. با توجه به رویکرد معماری سبز در پروژه مقدار حداقل مقاومت حرارتی قابل قبول برای هر جداره میزان ارائه شده برای ساختمان کم‌انرژی در ویرایش 1398 مبحث 19 در نظر گرفته شده است.

جدول 7 پیشنهادات گزینه‌های تغییرات پوسته خارجی

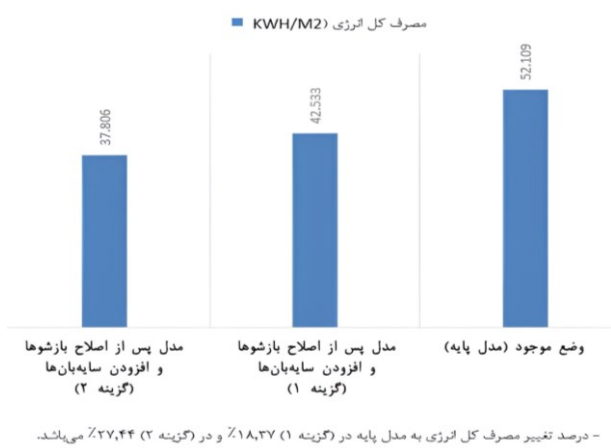
مقاومت حرارتی موجود	پیشنهادی مبحث 19	پیشنهاد تغییرات	مقاومت حرارتی
دیوار خارجی	1.184	گزینه 1: افزایش ضخامت پلی استایرن به 15cm و بتن دو سمت به 4	2
دیوار داخلی		گزینه 2: کاربرد بلوک لیکا 25cm و گچ برگ در داخل	2.7
بام شیبدار	1.60	گزینه 1: افزایش ضخامت لایه بتن به 3 تا 4 سانتی متر در هر طرف برای اصلاح آکوستیکی	
کف روی خاک	1.24	گزینه 2: استفاده از بلوک لیکا 17.5 cm و گچ برگ در داخل تقویت حرارتی با افزودن 5cm پشم‌سنگ به زیر سقف شیبدار و 5 cm به روی سقف تخت	3.6
پنجره‌ها	فریم 0.4 شیشه U=3.17	تقویت حرارتی با افزودن 5cm پشم‌سنگ به صورت پیرامونی	2.37
درهای خارجی	0.17 U=5.8	کافی طبق مبحث 19 استفاده از درهای دو جداره یا عایق	-

همچنین وضعیت روشنایی یک کلاس نمونه شمالی بررسی شد که بر حسب نتایج، کلاس‌های شمالی وضعیت مطلوبی داشته و نیاز به سایبان ندارند. همچنین فضاهایی مانند فضاهای کارگاه و آزمایشگاه در زیرزمین و فضاهای اداری در همکف (با افزودن سایبان پیشنهادی) دارای وضعیت نورگیری مناسبی هستند.

5-5- بررسی مصرف انرژی در گزینه‌های طراحی سایبان

گزینه‌های طراحی سایبان که در بالا در شاخص‌های روشنایی بررسی شدند از لحاظ مصرف انرژی نیز بررسی و مقایسه شدند که نتایج در نمودار شکل ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند گزینه دوم طراحی سایبان که از لحاظ شاخص‌های روشنایی نیز شرایط بهینه داشت کاهش مصرف انرژی بیشتری از گزینه ۱ نیز دارد و به عنوان گزینه بهینه طراحی در هر دو موضوع بهینه‌سازی روشنایی و انرژی پیشنهاد می‌شود.

شکل ۴- مقایسه مصرف انرژی گزینه‌های طراحی سایبان با مدل پایه



بر اساس نتایج شبیه‌سازی نور و انرژی با اصلاح ابعاد بازشوها (افزایش ارتفاع تا زیر تیر سقف) و افزودن سایبان گزینه ۲ کاهش مصرف انرژی در حدود ۲۷٪ نسبت به مدل پایه (به ویژه در بخش انرژی الکتریکی برای روشنایی) به دست آمده است. در این حالت وضعیت نورگیری و همه شاخص‌های مختلف نور روز نسبت به مدل پایه (بر اساس گزارش روشنایی لید) نیز به طور چشمگیری بهبود یافته و به حد استاندارد رسیده است. وضعیت خیرگی نیز در بیشتر فضاهای اصلی از جمله کلاسها و فضاهای اصلی به حد استاندارد قابل قبول رسیده و کل ساختمان در شاخص‌های روشنایی بر اساس گزارش لید (روش اول) در وضعیت استاندارد قرار گرفته است و از ۴/۴٪ به ۶۶/۶٪ رسیده است. در بررسی شاخص Uniformity Ratio(min/avg) برای کل فضا در کلاس‌های شمالی و جنوبی و بیشتر فضاهای اصلی در طرح اصلاح شده نیز مقادیر بالاتر از (U>0.3) می‌باشد.

در شکل ۵ مدل ساختمان پس از اصلاح بازشوها و افزودن سایبان‌ها و همچنین جزئیات سایبان طراحی شده دیده می‌شوند. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود در بعضی فضاها و کلاس‌ها با توجه به پیش‌آمدگی بام و عقب‌نشستگی موجود نیاز به افزودن پره بالایی لوور نیست. در جدول ۱۰ تغییرات نهایی پنجره و سایبان ارائه شده است.

وضعیت آسایش بصری نیاز به افزودن سایبان وجود دارد و بر اساس مطالعات قبلی و روش تجویزی تغییرات ابعاد پنجره و افزودن سایبان بررسی شده است. گزینه‌های مختلف سایبان‌های بررسی شده در مدل‌سازی شامل سایبان افقی، تاقچه نوری و لوورهای افقی است. که بر اساس نتایج اولیه و شرایط اجرایی و فنی گزینه استفاده از سایبان‌های لوور افقی در ادامه در حالت‌های مختلف (طول ۰.۳ تا ۰.۶ و تعداد پره ۳ و ۴ و زاویه دار و بدون زاویه در ۸ حالت مختلف) مدل‌سازی شده و مورد مطالعه قرار گرفت.

5-4- بررسی روشنایی و خیرگی در کلاس جنوبی نمونه

برای بررسی سایر شاخص‌های روشنایی و به ویژه خیرگی یک کلاس جنوبی به عنوان نمونه (کلاس ۵ طبقه اول) با سایبان اولیه طراحی شده انتخاب شد. پس از مدل‌سازی نور روز طبق نتایج جدول ۹ مشاهده می‌شود که SDA مناسب است. اما ASE به حد مجاز نرسیده است و این نشان دهنده وجود خیرگی در مواقعی در کلاس است. برای اصلاح و بهبود وضعیت روشنایی کلاس و رفع خیرگی نیاز به افزودن سایبان است که سایبان‌های مختلف مورد بررسی اولیه قرار گرفت. با توجه به پیشنهاد سایبان‌های افقی برای پنجره‌های جنوبی و بررسی حالت‌های مختلف آن، سایبان‌های افقی ساده به دلیل طول زیاد و سختی اجرا به ویژه سازه نگهدارنده حذف شد. تاقچه‌های نوری نیز به دلیل شرایط اجرایی پیچیده‌تر و اثرات نسبتاً مشابه کنار گذاشته شدند و سایبان‌های لوور افقی از جنس آلومینیوم به عنوان گزینه قابل اجرا انتخاب شد. سپس با مدل‌سازی انواع مختلف لوورهای افقی و تغییر تعداد پره‌ها، عرض پره‌ها، فاصله از پنجره، همپوشانی با دیوار و زاویه پره‌ها در حالت‌های مختلف، دو گزینه به شرح زیر برای ارزیابی نهایی انتخاب شدند:

گزینه ۱: سایبان سه پره با طول ۰/۵ و بدون زاویه با همپوشانی با دیوار به میزان ۰/۲

گزینه ۲: سایبان سه پره با عرض ۰/۵ با زاویه ۱۰ درجه با همپوشانی با دیوار به میزان ۰/۲

نتایج مدل‌سازی گزینه اول (لوور افقی بدون زاویه) نشان می‌دهد شاخص ASE هنوز به حد مطلوب نمی‌رسد و هنوز خیرگی در کلاس وجود دارد زیرا مقدار ASE % in range طبق استاندارد برای کلاس درس باید بیشتر از ۸۵٪ باشد. از این‌رو اصلاح سایبان سه پره با عرض ۰/۵ با همپوشانی با دیوار به میزان ۰/۲ با زاویه ۱۰ درجه برای لوورها مورد بررسی قرار گرفت که جدول زیر نتایج مدل‌سازی این حالت را نشان می‌دهد. در این حالت هر دو شاخص ASE و SDA به حد استاندارد رسیده و شرایط روشنایی کلاس قابل قبول است. در این حالت مقدار UDI نیز ۹۷٪ به دست آمد که مقدار مناسبی است.

جدول ۹ شاخص‌های روشنایی برای کلاس نمونه در حالت ۱ و ۲

وضعیت	ASE % in range	SDA % in Range	
sDA>75% قابل قبول ASE>15% غیرقابل قبول	70.5	100.00	کلاس نمونه در حالت گزینه ۱
sDA>75% قابل قبول ASE<15% قابل قبول	85.9	99.57	کلاس نمونه در حالت گزینه ۲

- بهسازی پوسته خارجی ساختمان در این پروژه هزینه نسبتاً زیادی را در بر دارد اما بر اساس نتایج مدل سازی ساختمان به میزان کمی موجب کاهش انرژی خواهد شد. (حداکثر حدود 3٪) با این وجود به دلیل نیاز به رعایت حداقلی شاخص‌های مدرسه سبز که مقادیر مقاومت حرارتی ساختمان‌های کم انرژی پیشنهاد شده است، این گزینه به نوعی الزامی بوده و با هر میزان هزینه و درصد اثرگذاری در کاهش انرژی در بهسازی پروژه پیشنهاد می‌شود.

- اصلاح بازشوها شامل افزایش سطح پنجره راهکار پیشنهادی دیگر است. با توجه به هزینه بالاتر پنجره‌ها نسبت به دیوار با وجود افزایش هزینه مصالح، این راهکار باعث افزایش روشنایی و کیفیت فضا و همچنین کاهش مصرف انرژی تا حد زیادی در این پروژه می‌شود.

- راهکار افزودن سایبان‌ها با توجه به نوع و جنس سایبان و جزئیات آن هزینه زیادی دربردارد. از سوی دیگر به همراه اصلاح ابعاد پنجره‌ها باعث کاهش مصرف انرژی به بیشترین میزان در میان راهکارهای بهسازی انرژی در این پروژه می‌شود. (حدود 27٪ کاهش مصرف انرژی) همچنین مساله مهم بهبود شرایط آسایش بصری و کاهش خیرگی در فضاهای آموزشی را موجب می‌شود که علی‌رغم افزایش هزینه موضوعی مهم و الزامی در میان راهکارهای ساختمان سبز است.

جدول 12 تحلیل اقتصادی راهکارهای بهسازی مدرسه ملاصدرا

راهکارهای بهسازی	بررسی شده یا جزئیات افزوده شده	قیمت هر متر مربع یا متر	متر مربع / قیمت کل
بام‌ها	اصلاح وضع موجود افزایش عایق پشم‌سنگ رولی با ضخامت 10cm	526.638	606.5
کف‌ها	اصلاح وضع موجود افزایش عایق پشم‌سنگ تخته‌ای با ضخامت 5cm	498.212	561.7
دیوارهای خارجی	اصلاح وضع موجود افزایش عایق پشم‌سنگ تخته‌ای با ضخامت 5cm	498.212	952.9
درهای خارجی	اصلاح مشخصات حرارتی در با افزودن عایق پشم‌سنگ	279.930	19.2
جمع	1079372498.2		
تغییر ابعاد بازشوها	افزایش ابعاد بعضی از پنجره‌ها و درهای خارجی	2000000	57.5
هر مترمربع			0



شکل 5- مدل ساختمان پس از اصلاحات پنجره و سایبان

جدول 10 پیشنهادات نهایی اصلاحات پنجره و سایبان در نماهای مختلف

تغییرات ابعادی	سایبان
نمای جنوبی	کفایت سایبان افقی موجود
طبقه همکف	افزایش ابعاد به 2.2 در 2.4 و افزودن دو لوور به طول 0.5 و زاویه 10 درجه
نمای جنوبی طبقه اول	سایبان به صورت لوور افقی (3 پره) به طول 0.5 و زاویه 10 درجه
نمای شمالی	افزایش ابعاد به 2.2 در 2.4 بدون سایبان
نمای شرقی	افزایش ارتفاع تا 2.2 بدون سایبان با توجه به کاربری راه پله
کاهش عرض پنجره‌های نمای غربی	موجود با افزودن تیغه به عنوان سایبان عمودی بدون سایبان با توجه به کاربری راه پله

بر اساس ارزیابی و تحلیل‌های انجام شده و همچنین ارائه راهکارهای بهسازی در راستای شاخص‌های سبز خلاصه نتایج بهسازی در موضوعات اصلی برای مدرسه ملاصدرا به تفکیک در جدول 11 ارائه شده است.

جدول 11 میزان بهسازی مدرسه ملاصدرا در شاخص‌های سبز

نام پروژه	مدرسه ملاصدرا	گرگان
میزان مصرف انرژی	Kwh/m2	52.1
مصرف انرژی	Kwh/m2	37.8
بهینه‌سازی انرژی	اصلاحات پوسته خارجی	2.95٪ کاهش انرژی کل
بهینه‌سازی انرژی	اصلاحات پنجره ها و سایبانها	27.44٪ کاهش انرژی کل
بهینه سازی روشنایی طبیعی	افزایش درصد روشنایی طبیعی (در گزارش لید)	از 46.4٪ به 66.6٪
	افزایش شاخص SDA (در گزارش لید)	از 51٪ به 70٪
	دریافت امتیاز لید (روش دوم لید)	بدون دریافت امتیاز
	دریافت امتیاز لید (روش اول لید)	تأمین استاندارد

5-6- تحلیل اقتصادی راهکارهای بهسازی

بر اساس مطالعات و محاسبات انجام شده درباره راهکارهای بهسازی به کار رفته در این مدرسه که در جدول 12 خلاصه آن آورده شده است موارد زیر قابل توجه است:

الحاق	سایبان لوور افقی	442320000	91.2	4850000	آلومی نیومی طبق
سایبانها	جزئیات				
جمع		1592320000			

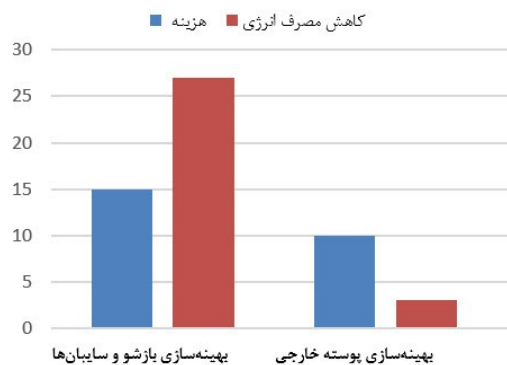
* قیمت‌ها بر اساس فهرست بها محاسبه شده است.

در مجموع و با بررسی نتایج حاصل از این تحقیق موارد زیر به دست آمده است:

- بهسازی ابعاد پنجره‌ها و نسبت پنجره به دیوار تاثیر بسیار زیادی در کاهش مصرف انرژی دارد. (حدود 27٪ در این مطالعه) علاوه بر این با بهبود شاخص‌های روشنایی و افزایش آسایش بصری همراه است که در کاربری آموزشی بسیار مهم هستند.

- در مقایسه بهسازی پوسته خارجی و افزایش عایق‌بندی تاثیر کمتری در کاهش مصرف انرژی دارد. (حدود 3٪ در این مطالعه) در مقایسه هزینه مورد نیاز نیز این گزینه با توجه به اختلاف هزینه بر آورد شده (حدود 1.5 برابر کمتر) اولویت کمتری از بهسازی پنجره و سایه‌اندازی دارد. (شکل 6) هر چند در پروژه‌هایی با رویکرد سبز و ساختمان کم‌انرژی باید حداقل‌های پیشنهادی ارائه شده در استاندارد (گروه ساختمان‌های کم‌انرژی در مبحث 19) را رعایت کرد. در سایر موارد می‌توان حداقل‌های الزامی مبحث 19 را برای تقویت حرارتی پوسته خارجی به کار برد.

- نوع و ابعاد پنجره‌ها و سایبان‌ها بر اساس کاربری و ابعاد فضا و... متفاوت است. اما در کاربری آموزشی و کلاس‌های درس نسبت پنجره به دیوار کل حدود 20٪ (36٪ در نمای جنوبی) و سایبان به صورت لوورهای افقی زاویه‌دار (10 درجه) مناسب‌تر بودند.



شکل ۶ مقایسه راهکارهای بهسازی بر حسب هزینه و کاهش مصرف انرژی (درصد)

۶- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق اهمیت طراحی بازشوها و سایبان‌ها را به ویژه در کاربری‌های آموزشی در اقلیم معتدل و مرطوب مشخص می‌کند. در شرایط محدودیت بودجه برای بهسازی در اقلیم‌های مشابه اصلاحات بازشوها و سایبان‌ها در مقایسه با بهسازی پوسته خارجی اولویت بالاتری داشته و به نتایج بهتری خواهد انجامید. هر چند موضوع صرفه اقتصادی با توجه به قیمت حامل‌های انرژی در ایران اغلب به گونه‌ای است که موجب بازگشت سرمایه در زمان طولانی خواهد شد اما در پروژه‌هایی با رویکرد سبز و با توجه به اثرات زیست محیطی به صورت غیر مادی این موضوع قابل بررسی و اهمیت خواهد بود. اولویت بالاتر بهسازی بازشوها در ساختمان مدرسه به

متغیرهایی مانند زمان استفاده از مدرسه که بیشتر در روزهای سرد و معتدل سال است هم مرتبط است و ممکن است در کاربری‌های دیگر این نتایج متفاوت باشند. همچنین اهمیت طراحی سایبان‌ها با اهمیت موضوع آسایش بصری و تامین روشنایی مربوط است که در کاربری‌های دیگر مانند مسکونی و یا تجاری شرایط متفاوتی وجود خواهد داشت و استانداردهای آنها نیز متفاوت است. با توجه به اهمیت بهسازی بازشوها در این اقلیم در پژوهش‌های آینده می‌توان به تعیین نسبت بهینه پنجره و دیوار در کاربری آموزشی و سایر کاربری‌ها در جبهه‌های مختلف ساختمان پرداخت. همچنین تاثیر بازشوها در تهویه و سرمایش علاوه بر دریافت تابش و آسایش بصری موضوعی است که می‌تواند در تحقیقات بعدی مورد توجه قرار گیرد.

۷- تقدیر و تشکر

داده‌های این مقاله بر اساس بخشی از نتایج حاصل از پروژه "بهینه‌سازی طرح 5 مدرسه در حال ساخت با شاخص‌های ساختمان سبز در استان گلستان" که از سوی مهندسان مشاور آسوطرح گرگان در اداره کل نوسازی و توسعه و تجهیز مدارس استان گلستان در سال 1398 تا 1400 انجام شده است استخراج گردیده است. نگارندگان از معاونت فنی و کارشناسان محترم این اداره کل برای همکاری در پیش برد مطالعات تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۸- مراجع

- [1] *Advanced Energy Retrofit Guide: Practical Ways to Improve Energy Performance—K-12 Schools*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Department of Energy, 2013. <https://doi.org/10.2172/1110464>
- [2] F. Mohammadi, S. M. Mofidi Shemirani, and M. Tahbaz, Evaluation and analysis of the efficiency of dynamic metrics evaluating daylight performance (daylight autonomy and useful daylight illuminance) through sensitivity analysis: Case study of an elementary classroom in Tehran, *ArmanShahr Architecture and Urbanism Journal*, Vol. 31, pp. 113–156, 2019. (in Persian) <https://doi.org/10.22034/aaud.2020.113264>
- [3] Z. S. Zomorodian and F. Nasrollahi, Architectural design optimization of school buildings for reduction of energy demand in hot and dry climates of Iran, *International Journal of Architectural Engineering & Urban Planning*, Vol. 23, No. 1–2, 2013. <https://sid.ir/paper/353503/en>
- [4] N. Shafai Moghadam, Z. Zamardian, and M. Tehsildoost, The effectiveness of daylight indicators in estimating sufficient lighting in space based on users' evaluation: Case study of architectural school educational spaces in Tehran, *Scientific Research Quarterly of Architecture and Urban Planning*, Vol. 29, No. 86, 2018. (in Persian) <https://doi.org/10.29252/soffeh.29.3.37>
- [5] M. Ayatollahi, M. A. Fadai Ardestani, H. Naseri Mubarak, and Z. Zamardian, Assessment of daylight and glare in classrooms using dynamic indicators: Case study of the Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, *soffeh Scientific Research Journal*, Vol. 28, No. 83, 2017. (in Persian) https://soffeh.sbu.ac.ir/article_100759_94705ce66d8b5496314ee9b67b30a15f.pdf
- [6] P. Pilehchiha and M. Bagheri, Parametric optimization of openings to achieve visual and thermal comfort, *In proceeding of the 6th National Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development*, Tehran, Iran, 2019. (in Persian) <https://civilica.com/doc/1003002>

- approach, *Iranian Energy Magazine*, Vol. 18, No. 4, 2015. (in Persian)
<http://necjournals.ir/article-1-803-fa.html>
- [22] A. Fathalian and H. Kargarsharifabad, Investigating the effect of different energy saving strategies on energy rating of building by Design Builder software: Case study of an office building, *Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 22, No. 7 (98), pp. 199–214, 2020. (in Persian)
<https://sid.ir/paper/390217/en>
- [23] D. Zhu, T. Hong, D. Yan, and C. Wang, A detailed loads comparison of three building energy modeling programs: EnergyPlus, DeST, and DOE-2.1 E, *Building Simulation*, Vol. 6, pp. 323–335, 2013.
<https://doi.org/10.1007/s12273-013-0126-7>
- [7] P. Pilehchiha and S. Asdian, Optimizing light shelves in educational environments in Tehran, *In proceeding of the International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development Management in Iran*, Tehran, Iran, 2017. (in Persian)
<https://civilica.com/doc/847498>
- [8] M. A. Khanmohammadi, M. Pourahmadi, and M. Farhang, Optimization of building openings based on glare performance in educational buildings in hot and dry climate of Iran, *Architecture and Sustainable Urban Development*, Vol. 7, No. 1, pp. 113–128, 2018.
<https://doi.org/10.22061/jsaud.2019.4362.1302>
- [9] P. N. Bakmohammadi and E., Optimization of the design of primary school classrooms in terms of energy and daylight performance considering occupants' thermal and visual comfort, *Energy Reports*, Vol. 6, pp. 1590–1607, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.06.008>
- [10] V. Costanzo, G. Evola, and L. Marletta, A review of daylighting strategies in schools: State of the art and expected future trends, *Buildings*, Vol. 7, No. 4, p. 41, 2017.
<https://doi.org/10.3390/buildings7020041>
- [11] A. Montaser Koohsari, B. Fayaz, and M. R. Kari, Integrating thermal and lighting analysis to optimize window size of educational buildings, *Naqshejahan*, 2016. (in Persian)
https://bsnt.modares.ac.ir/article_759_fa14d4fe2f19414de3ebd9f63d5c0169.pdf
- [12] H. Neshat Safavi, H. Zolfagharzadeh, M. Mafi, and A. Esfandiari, Optimization of the position of the windows for improved natural ventilation, thermal comfort, and daylight in Yazd City, *Karafan Quarterly Research Journal*, Vol. 18, No. 4, pp. 395–410, 2021. (in Persian)
<https://doi.org/10.48301/kssa.2021.278122.1437>
- [13] L. Jafari and S. M. Solvati, Evaluation of the performance of building-integrated photovoltaic with shading system in optimizing building energy consumption in hot and dry climate: Case study of an office building in Shiraz, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 10, No. 1, pp. 70–85, 2023. (in Persian)
<https://doi.org/10.52547/jrenew.10.1.70>
- [14] E. Saligheh, A. Maleki, Y. Shahbazi, and A. Ghaffari, Multi-variable optimization of visual and thermal comfort in classrooms of Tabriz schools considering spatial dimensions and proportions: Case study of secondary high schools, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 11, No. 2, pp. 90–99, 2024. (in Persian)
<https://doi.org/10.22034/jrenew.2024.196246>
- [15] H. Falah, Determining the optimal window-to-wall ratio in the south façade of educational buildings in Kerman, *Naqshejahan*, Vol. 9, No. 2, pp. 105–111, 2018. (in Persian)
<https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=483830>
- [16] S. Stevanović, S. D., and M. Dehmer, On optimal and near-optimal shapes of external shading of windows in apartment buildings, *Plos One*, Vol. 14, No. 2, 2019.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212710>
- [17] M. Mazan, Genetic optimization of external fixed shading devices, *Energy and Buildings*, Vol. 72, No. 431–440, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.007>
- [18] W. Alhuwayil, M. Kh. Abdul Mujeebu, and A. M. Algarny, Impact of external shading strategy on energy performance of multi-story hotel building in hot-humid climate, *Energy*, Vol. 169, No. 1166–1174, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.069>
- [19] L. Bellia, F. De Falco, and F. Minichiello, Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 54, No. 1, pp. 190–201, 2013.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.039>
- [20] ASHRAE 140-2017 / BESTEST Results for DesignBuilder v6.1, ANSI/ASHRAE Standard 140-2017 (aka BESTEST) validation test results for DesignBuilder v6.1 with EnergyPlus, DesignBuilder .Co, 2021.
<https://designbuilder.co.uk/download/validation>
- [21] Z. Zamardian and M. Tahsildoost, Validation of energy simulation software in buildings: With an experimental and comparative