



بهینه‌سازی انرژی یک ساختمان آموزشی در تهران با پیکربندی‌های مختلف پنجره، پرده، سیستم روشنایی و دمای تنظیم همراه با تحلیل اقتصادی

سید محمدرضا برقی¹ و ناصر بهارلو هوره²

تاریخ دریافت: 1401/10/13

تاریخ پذیرش: 1402/04/21

چکیده: در این مطالعه، بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان دانشکده مکانیک دانشگاه شهید رجایی با استفاده از مدل‌سازی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر انجام شده است. اعتبارسنجی حل، یک بار از طریق نرم‌افزار انسیس فلونت و یک بار به صورت تجربی انجام شده است. مدل‌سازی در دیزاین بیلدر بر اساس محاسبه بار سرمایی و گرمایی و در فلونت به صورت سه‌بعدی بر اساس حل معادلات پیوستگی، تکانه و انرژی با تقریب بوزینسک انجام شده است. با تلفیق پیکربندی‌های مختلف پرده، پنجره، تجهیزات روشنایی و دماهای تنظیم سرمایش و گرمایش، 85 جایگشت مختلف تشکیل می‌شود. برای همه این حالت‌ها محاسبات بار سرمایی و گرمایی انجام شده و از بین آنها 10 حالت برتر معرفی و رتبه بندی شده‌اند. کاربران ساختمان می‌توانند با توجه به محدودیت‌های چهارگانه اقتصادی، کاربری، زیستی و سلیقه‌ای به ترتیب رتبه‌ها را بررسی و یکی از این حالات را انتخاب کنند. نتایج نشان می‌دهد، بهینه‌ترین حالت زمانی است که پنجره دوجداره بدون سایه‌بان، پرده با نوار بازتابی بالا و سیستم روشنایی لامپ فلورسنت تری فسفر با فرکانس بالا و دمای تنظیم گرمایش 20 و دمای سرمایش 28 درجه سلسیوس باشد. با اعمال شرایط بهینه، در طول یک سال به میزان 43/86 درصد در مصرف گاز و 11/65 درصد در مصرف برق صرفه‌جویی می‌شود. این امر موجب کاهش هزینه‌ی برق مصرفی ساختمان به میزان 10/56 درصد معادل 15 میلیون و 200 هزار ریال سالانه می‌باشد. همچنین با اعمال شرایط بهینه، میزان کربن‌دی‌اکسید تولیدی ساختمان 11/83 درصد به صورت سالانه کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: ساختمان آموزشی، بار سرمایشی و گرمایشی، صرفه‌جویی مصرف انرژی، انسیس فلونت، دیزاین بیلدر.

¹ کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

² استادیار، گروه حرارت، سیالات و تاسیسات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

nasser.baharloo@sru.ac.ir

1- مقدمه

حدود 40 درصد از انرژی‌های تولید شده در جهان، در بخش ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Gurji, 2017). این در حالی است که نرخ رشد مصرف حامل‌های انرژی در ایران بیش از سه برابر مقدار جهانی آن است (Zarei et al., 2012). به سادگی می‌توان نتیجه گرفت که اگر تنها مصرف انرژی در بخش ساختمانی کنترل شود، به میزان قابل توجهی از هدررفت انرژی پیش‌گیری خواهد شد. البته باید توجه داشت که انواع مختلف ساختمان‌ها از نظر مصرف انرژی شرایط یکسانی ندارند. ساختمان‌های آموزشی، یکی از انواع ساختمان‌های عمومی هستند که از نظر شرایط مصرف انرژی، اهمیت قابل توجهی دارند. این نوع ساختمان‌ها عموماً قدیم‌ساز هستند و درصد بالایی از آن‌ها به دلیل سبک معماری خاص دوره خود و نوع مصالح به کاررفته در آن‌ها، فاصله‌ی زیادی با شرایط بهینه و به‌روز از نظر بهره‌وری انرژی دارند. با این وجود می‌توان با انجام تغییراتی کوچک در شرایط مصرف یا اجزای سازه ساختمانی، مصرف انرژی در این ساختمان‌ها را بهبود بخشید.

نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر¹ یکی از نرم‌افزارهای رایج برای بررسی شرایط مصرف انرژی در ساختمان است. در بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با انرژی ساختمان از این نرم‌افزار استفاده شده است. به عنوان نمونه گائو و همکاران (Gao et al., 2022)، تأثیر روش‌های مختلف گرمایش ساختمان را بر مصرف انرژی و انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید، در ساختمانی آموزشی بررسی کرده‌اند. در این پژوهش از طریق مدل‌سازی ساختمان در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، نشان داده شده‌است که روش گرمایش الکتریکی مناسب‌ترین شیوه گرمایش از نظر مصرف انرژی و روش گرمایش آب گرم معمولی مناسب‌ترین شیوه از نظر میزان تولید کربن‌دی‌اکسید است. سید حسن عبدالله (Sayed Hassan Abdollah, 2023) نیز در پژوهشی، مسأله بهره‌وری انرژی در مسجدی در مصر را مورد توجه قرار داده است. در این پژوهش ساختمان بنا با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر مدل‌سازی شده و راهکارهایی مبتنی بر دمای داخلی و شرایط روشنایی

ساختمان، برای بهبود مصرف انرژی پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که با جایگزینی واحدهای روشنایی سنتی داخل مساجد با ال‌ای‌دی، می‌توان به میزان 9 درصد در مصرف انرژی کل صرفه‌جویی کرد.

در بسیاری از تحقیقات، تأثیر یک یا چند پارامتر بر کاهش مصرف انرژی در ساختمان بررسی شده است. برای مثال، ژو و همکاران (Zhou et al., 2019) با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر به بررسی عملکرد حرارتی و محیطی یک ساختمان اداری در شمال شرق انگلستان پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تغییر در مقدار نسبت پنجره به دیوار، میزان گرمایش و متناسب با آن سوخت مصرفی را به طور قابل توجهی تغییر می‌دهد. همچنین استفاده از مواد یو والیو² در دیوارهای ساختمانی موجب صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در میزان مصرف انرژی گرمایی می‌شود. همچنین لیو و همکاران (Liu et al., 2021) با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، انرژی مصرفی یک ساختمان آموزشی را با هدف بهینه‌سازی پارامترهای طراحی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در تحقیق آن‌ها، 10 عامل که ممکن است بر مصرف انرژی ساختمان تأثیر بگذارد نظیر ضریب انتقال حرارت سقف، نسبت بهره‌وری انرژی کولرگازی، ضخامت عایق دیوار بیرونی و ... مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، بهترین سطح از هر عامل و ترکیب بهینه همه عوامل بر مبنای حداقلی‌ترین حالت مصرف انرژی در ساختمان مشخص شده است. گرانادوس‌لوپز و همکاران (Granados-López et al., 2023) نیز به بررسی شرایط نور طبیعی در آب‌وهوای مدیترانه‌ای جمهوری مالت پرداخته و محدوده روشنایی معمول را بر اساس استانداردهای بین‌المللی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی ساختمانی چند طبقه در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، راهکارهایی برای بهبود شرایط روشنایی طبیعی ارائه شده‌است. بر این اساس افزایش اندازه پنجره‌ها و جایگزینی پنجره‌های تک‌جداره با پنجره‌های دوجداره که دارای پوشش انتخابی طیفی خارجی هستند، به طور قابل توجهی دسترسی به نور طبیعی را بهبود بخشیده و ساختمان را به شرایط

اقلیم‌های مختلف پرداخته‌اند. در این پژوهش به کمک دو نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر و فلونت، بلوک‌های ساختمانی از نظر حرارتی، شکل داخلی و تعداد حفره بررسی و سپس از نظر دمای ذوب و ضخامت لایه بهینه‌سازی می‌شوند. همچنین هادیان‌پور و همکاران (Hadianpour et al., 2014)، با تمرکز بر روی نماهای دوپوسته و مسأله برافروختگی آنها در ماه‌های گرم سال، تأثیر تغییر اندازه درپچه‌های تهویه و تغییر عمق حفره بین دو پوسته را بر کاهش برافروختگی ساختمانی در شهر یزد مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش برای اعتبارسنجی نرم‌افزار فلونت از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر استفاده شده است. در ادامه براساس شبیه‌سازی به روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در نرم‌افزار فلونت، راهکارهایی بر مبنای تغییر فواصل و ابعاد ارائه شده است که می‌تواند دمای داخل حفره را در ماه‌های گرم سال به صورت میانگین تا 18/8 درجه سلسیوس کاهش دهد. در پژوهشی دیگر، ایزاک وهیب و همکاران (Waheeb and Fahd, 2022)، برای رفع مشکلات ناشی از بیماری کرونا، شرایط تهویه و روشنایی یک ساختمان چندطبقه‌ی مسکونی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزارهای دیزاین‌بیلدر و اتودسک CFD، یک شبیه‌سازی برای مقایسه میزان تهویه طبیعی ایجاد شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با تغییر در طراحی ساختمان علاوه بر استفاده از فضای سبز برای بهبود وضعیت روانی جمعیت، می‌توان به میزان 38 درصد مصرف انرژی را کاهش داد.

در این پژوهش، بهینه‌سازی مصرف انرژی یک ساختمان آموزشی قدیمی در تهران، با استفاده از مدل‌سازی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر انجام شده است. اعتبارسنجی حل از طریق نرم‌افزار انسیس فلونت و همچنین به روش تجربی انجام شده است. حاصل ترکیب و تلفیق پیکربندی‌های مختلف پرده، پنجره، تجهیزات روشنایی و دماهای تنظیم سرمایش و گرمایش، 85 جایگشت مختلف را نتیجه می‌دهد. تمام این 85 حالت از نظر کمترین بار سرمایی و گرمایی رتبه‌بندی شدند ولی به دلیل اختصار در متن مقاله، صرفاً رتبه‌های 1 تا 10 معرفی و تحلیل شد.

استاندارد نزدیک می‌کند. همچنین رشدی و همکاران (Al Roshdi et al., 2022) بر مبنای شبیه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، دو راهکار برای مدیریت مصرف انرژی در کالج بین‌المللی دریایی عمان پیشنهاد کرده‌اند. جایگزینی لامپ فلورسنت با لامپ‌های ال‌ای‌دی و نصب فیلم‌های خورشیدی پنجره‌ای، به ترتیب موجب 16٪ و 7/6٪ کاهش در مصرف انرژی کالج می‌شود. ناتان زور و همکاران (Nathan Zoure and Vincenzo Genovese, 2023) نیز با تمرکز بر شرایط تهویه و روشنایی ساختمان‌های اداری بورکینافاسو، آسایش حرارتی و بهره‌وری انرژی در این ساختمان‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. در پژوهش آنها با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه و مقرون به صرفه بودن، انواعی از پنجره و سایه‌بان بهینه، پیشنهاد شده است.

در برخی از پژوهش‌ها نیز، راه‌های مدیریت مصرف انرژی در ساختمان به صورت مصداقی یا اقلیمی مورد ارزیابی واقع شده است. در این تحقیقات یک یا چند پارامتر موثر در مصرف انرژی در شرایط اقلیمی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال، کومار و همکاران (Kumar et al., 2017)، تأثیر انواع پنجره‌های شیشه‌ای و مصالح ساختمانی را بر میزان مصرف انرژی، در پنج منطقه مختلف از نظر آب‌وهوایی در هندوستان بررسی کرده‌اند. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، میزان اثرگذاری تغییر مصالح در کاهش و افزایش بار حرارتی ساختمان‌ها، مورد مطالعه قرار گرفته است. الحویل و همکاران (Khalid Alhuwayil et al., 2023) نیز تأثیر شرایط محیطی و اقلیم جغرافیایی بر پتانسیل صرفه‌جویی انرژی در سایه‌بان‌های حرارتی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این پژوهش پس از مدل‌سازی هتلی چند طبقه در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، تأثیر شرایط محیطی این دو شهر بر سایه‌بان‌های حرارتی این ساختمان با هم مقایسه می‌شود.

در بسیاری از تحقیقات نیز، علاوه بر نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر از سایر نرم‌افزارهای شبیه‌ساز استفاده شده است. به عنوان نمونه حیدراسلان و همکاران (Haydaraslan and Çuhadaroglu., 2022)، با تمرکز بر مواد تغییر فاز دهنده در بلوک‌های ساختمانی (PCM)، به بررسی آن‌ها در

نوآوری دیگر این تحقیق تعیین ساز و کار متناسب با شرایط ساکنین ساختمان جهت انتخاب حالت بهینه از بین 10 حالت برتر است. برای هر مشخصه حداقل 3 حالت تعریف شده است (مثلا پرده نوع الف، پرده نوع ب و پرده نوع ج). پر واضح است که بهینه‌ترین حالت (رتبه 1 از بین 10 حالت مختلف)، متعلق به حالتی است که از هر مشخصه‌ای بهترین مورد انتخاب شود (بهترین پرده، بهترین پنجره و ...); اما در بسیاری از مواقع در واقعیت، کاربر یا مالک ساختمان با محدودیت‌هایی برای انتخاب تجهیزات یا تنظیمات روبرو است که نمی‌تواند رتبه 1 یعنی بهینه‌ترین حالت را انتخاب کند و ناچار است به رتبه‌های بعدی مراجعه کند. از جمله محدودیت‌ها عبارتند از: 1) محدودیت بودجه، 2) محدودیت فضا و کاربری (مثلا در یک کاربری خاص ممکن است نیاز به نور زیاد در انتخاب نوع پرده محدودیت ایجاد کند)، 3) شرایط زیستی ساکنان (طبع بسیار گرم برخی ساکنان ممکن است مانع از تنظیم دمای بالا در تابستان شود) و 4) سلیقه متفاوت ساکنان. به احتمال بسیار قوی، هر کاربری از بین چهار محدودیت ذکر شده، محدودیت‌هایی خواهد داشت که نمی‌تواند بهینه‌ترین حالت را انتخاب کند. لذا از بین 9 حالت باقیمانده مطابق با الگوریتمی که در قسمت نتایج آمده است، بهینه‌ترین حالتی که سازگار با شرایط کاربر است، انتخاب خواهد شد. در انتهای مقاله، با مقایسه‌ی میزان برق و گاز مصرفی ساختمان و همچنین کربن‌دی‌اکسید تولیدی ساختمان در دو حالت موجود و بهینه، شرایط اقتصادی و زیست محیطی مورد مقایسه قرار گرفته‌است.

2- روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف از نوع کاربردی است؛ چراکه در پی ارائه راهکارهایی برای بهبود شرایط مصرف انرژی در ساختمان‌های آموزشی است. از نظر روش‌شناسی نیز مراحل مختلف این پژوهش بر اساس مطالعات میدانی و گردآوری اطلاعات به طور تجربی، شبیه‌سازی در نرم‌افزار و بهره‌گیری از مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده‌است. در

ابتدا بر مبنای مطالعه میدانی، نقشه ساختمان، شرایط مصرف انرژی و نوع مصالح و اجزای به کاررفته در ساختمان مشخص می‌شود. در ادامه بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای از قبیل مقالات معتبر داخلی و خارجی، پایان‌نامه‌ها و سایت‌های معتبر پژوهشی، اطلاعات کافی برای تجزیه و تحلیل داده‌های میدانی گردآوری می‌شود. برای شبیه‌سازی انرژی ساختمان از نرم‌افزارهای دیزاین-بیلدر و فلونت استفاده شده‌است. دیزاین بیلدر از موتور مدل‌سازی انرژی پلاس استفاده می‌کند. اثبات روایی و پایایی شبیه‌سازی در این نرم‌افزار، به دو شیوه‌ی تجربی و مقایسه‌ای صورت گرفته‌است. در شیوه تجربی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با اطلاعات به دست آمده از پایش میدانی اعتبارسنجی شده‌است. در شیوه مقایسه‌ای نیز، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در دیزاین بیلدر با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس فلونت مقایسه شده‌است. رویکرد اصلی این مقاله مبتنی بر بررسی شرایط بار سرمایی و گرمایی ساختمان است. بر اساس کتاب مرجع "محاسبات تأسیسات ساختمان" (Tabatabaei, 2020)، بار سرمایی یک ساختمان با استفاده از رابطه (1) به دست می‌آید:

$$Q_t = \sum Q_{TR} = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9) \times 1/1 \quad (1)$$

که Q_1 تا Q_9 به ترتیب نشان‌دهنده بار سرمایی تابشی از پنجره‌ها، بار سرمایی هدایتی از پنجره‌های خارجی، بار سرمایی تشعشی و هدایتی جداره‌های خارجی، بار سرمایی هدایتی جداره‌های داخلی، بار سرمایی محسوس ناشی از تهویه، بار سرمایی محسوس ناشی از ساکنین و وسایل، بار سرمایی نهان مؤثر اتاق، بار سرمایی محسوس بقیه هوای خارج و بار سرمایی نهان بقیه هوای خارج، هستند. عدد $1/1$ ضریب اطمینان است. بار سرمایی هدایتی، نقش ویژه‌ای در محاسبه بار سرمایی کل دارد که در رابطه (1)، مؤلفه‌های Q_2 و Q_3 و Q_4 را شامل می‌شود. معادله کلی این سه مورد به صورت زیر است:

$$Q = UA(T_{\infty 1} - T_{\infty 2}) \quad (2)$$

در معادله فوق، A مساحت جزء مورد نظر (در، پنجره یا دیوار) و $T_{\infty 1}$ و $T_{\infty 2}$ به ترتیب دمای میانگین داخل و دمای میانگین محیط بیرون هستند. همچنان U ضریب کلی هدایت حرارتی پنجره، در یا دیوار است و مطابق با

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (5)$$

معادله بقای تکانه خطی

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\nabla P + \mu_{\text{eff}} \nabla^2 \vec{V} + \vec{S} \quad (6)$$

معادله انرژی

$$\vec{V} \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T + S_T \quad (7)$$

در معادلات فوق V بیانگر سرعت است:

$$\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k} \quad (8)$$

و

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\hat{i} + \frac{\partial}{\partial y}\hat{j} + \frac{\partial}{\partial z}\hat{k} \quad (9)$$

همچنین \vec{S} بیانگر نیروهای حجمی (شناوری) وارد بر سیال است و به کمک تقریب بوزینسک محاسبه می‌شود.

$$\vec{S} = \rho \vec{g} [1 - \beta(T - T_{\text{ref}})] \quad (10)$$

که β ضریب انبساط حجمی (K^{-1}) و \vec{g} بردار شتاب گرانش زمین ($m \cdot s^{-2}$) است. همچنین μ_{eff} ضریب لزجت موثر سیال است که شامل لزجت سیال و لزجت اغتشاشی سیال است.

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (11)$$

که لزجت اغتشاشی سیال به کمک مدل دو معادله‌ای $k - \epsilon$ استاندارد محاسبه می‌شود.

در معادلات فوق، T دما و α ضریب نفوذ حرارتی ($m^2 \cdot s^{-1}$) هستند.

معادلات حاکم همراه با شرایط مرزی مشخص شده با روش حجم محدود گسسته شده‌اند. برای حل مجموعه معادلات از یک روند تکراری استفاده شده و حل تا رسیدن به همگرایی با دقت 10^{-6} ادامه پیدا می‌کند.

3- نتایج و بحث

3-1- اعتبارسنجی

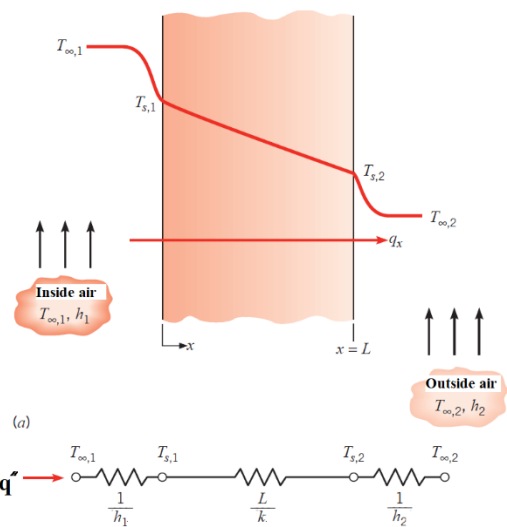
متداول‌ترین روش‌های اعتبارسنجی عبارت‌اند از روش تجربی (مقایسه نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های میدانی) و روش مقایسه‌ای (مقایسه‌ی نتایج نرم‌افزارهای مختلف شبیه‌ساز با یکدیگر) (Zomorodian and Tahsildoost, 2015). در این پژوهش از هر دو روش برای اعتبارسنجی استفاده شده‌است.

3-1-1- اعتبارسنجی تجربی

مدار گرمایی رسم شده در شکل 1 به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_2} \quad (3)$$

که در آن k ضریب انتقال حرارت جداره‌ها و مصالح ساختمانی، L ضخامت جداره‌ها و h_1 و h_2 به ترتیب ضریب انتقال حرارت همرفتی هوای داخل و خارج هستند که از کتاب مرجع انتقال حرارت اینکروپرا (Bergman et al., 2011) به ترتیب مقادیر 15 و 25 وات بر متر مربع کلوین در نظر گرفته شده‌اند.



شکل 1- رسم مدار گرمایی در دیوار (Bergman et al., 2011)

Fig. 1- Picture of the heating circuit in the wall

بار گرمایی ساختمان نیز که حاصل جمع تلفات جداره‌ها و هوای نفوذی است با استفاده از رابطه (4) محاسبه می‌شود (Tabatabaei, 2020):

$$Q_R = (Q_1 + Q_2) \times \text{ضریب اطمینان} \quad (4)$$

که Q_1 و Q_2 به ترتیب نشان‌دهنده بار گرمایی جداره‌ها و بار گرمایی هوای نفوذی هستند.

معادلات حاکم در مدل‌سازی CFD از طریق نرم‌افزار انسیس فلونت

در این تحقیق، معادلات حاکم با فرض جریان پایا و غیر قابل تراکم با فرض ثابت بودن خواص سیال شامل معادلات زیر است (Al-Hazmy, 2005):

معادله پیوستگی

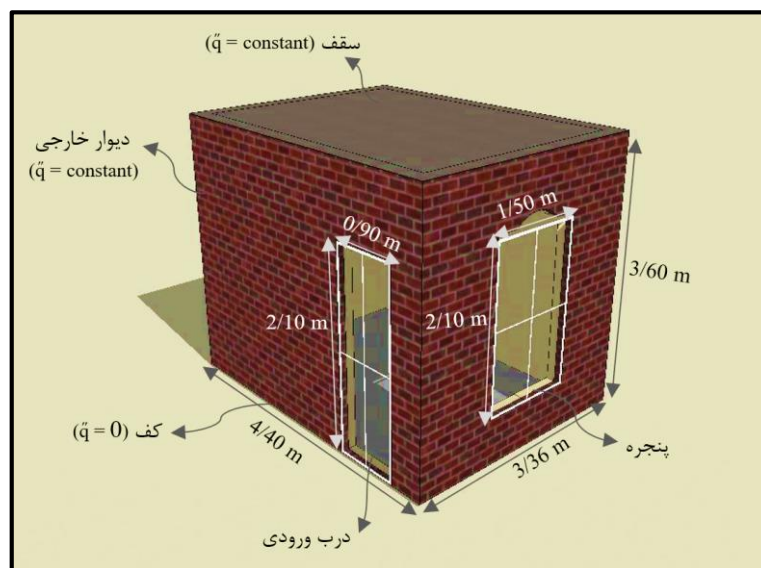
از تطبیق شرایط زمانی، محیطی و اقلیمی نرم افزار مطابق با شکل 2 و مشخصات ابعادی و حرارتی مصالح ساختمان منطبق بر جدول 1، مدل سازی اتاق در نرم افزار دیزاین بیلدر انجام شده است. با مقایسه ی نتایج حاصل از شبیه سازی و پایش تجربی، مطابق با شکل 3 (الف) میانگین خطای شبیه سازی در نمودار دما برابر با 5/6٪ و مطابق با شکل 3 (ب) میانگین خطای شبیه سازی در نمودار رطوبت نسبی برابر با 5/7٪ است که نشان دهنده تطابق خوب بین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده است.

برای اعتبارسنجی به این شیوه، یک ساختمان تک واحده در شهر قم مطابق با شکل 2 در نظر گرفته شده است. بدین منظور پارامترهای «دما» و «رطوبت نسبی» در روز 15 آذر ماه معادل با ششم دسامبر، با قرار دادن ترموگراف در مرکز اتاق، به صورت ساعتی و در طول یک شبانه روز اندازه گیری شده است. برای اندازه گیری دو کمیت دما و رطوبت نسبی، از ترموگراف مدل HTC-1 استفاده شده است. این ترموگراف قابلیت اندازه گیری دما از 0 تا 50 درجه سلسیوس و با دقت 0/1 درجه سلسیوس را دارد. همچنین رطوبت نسبی را از 30 تا 90 درصد و با دقت واحد اندازه گیری می کند. برای اعتبارسنجی تجربی، پس

جدول 1- نوع و مشخصات حرارتی مصالح ساختمان اعتبارسنجی در نرم افزار دیزاین بیلدر

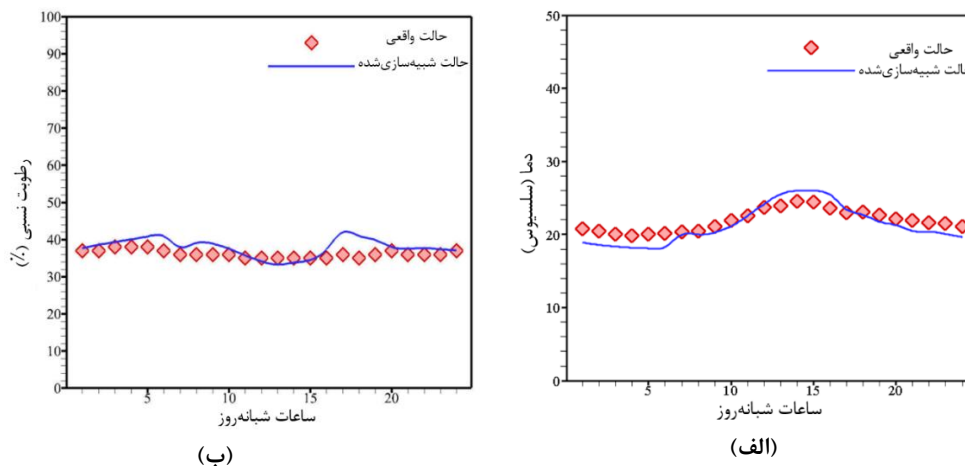
Tab. 1-Type and thermal characteristics of building materials validation in design builder software

موقعیت	جنس لایه (از خارج به داخل)	ضخامت (متر)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ضریب انتقال حرارت کلی (وات بر مترمربع کلوبین)
دیوار خارجی	آجرکاری بیرونی	0/1000	1700/00	1/932
	بلوک بتنی	0/1000	1400/00	
	گچ	0/0130	1000/00	
بام ساختمان	آسفالت	0/0100	2100/00	0/250
	پشم شیشه (رول)	0/1450	12/00	
	گچ تخته	0/0130	2800/00	
کف زمین	عایق	0/3300	2000/00	عایق
	پشم سنگ	0/1450	1300/00	
	مصالح خارجی	0/025	30/00	



شکل 2- شماتیک اتاق بررسی شده در اعتبارسنجی

Fig. 2- Schematic of the room examined in the validation



شکل 3- نمودار مقایسه الف) دما و ب) رطوبت نسبی در حالت‌های واقعی و شبیه‌سازی شده
 Fig. 3- Comparison chart of a) temperature and b) relative humidity in actual and simulated state

بعدی مش بندی شده در شکل 4 (ب) نشان داده شده است.

نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار فلوئنت کانتورهای سه بعدی دما و سرعت حاصل از شبیه‌سازی فلوئنت در مرز نزدیک به دیواره‌ها در شکل 5 نشان داده شده است. مطابق شکل 5 (الف) بخشی از دیواره‌ی مقابل که دمای بسیار بالاتری دارد، دقیقاً صفحه مقابل به هیتر است که گرمای اتاق را تأمین می‌کند. مطابق شکل 5 (ب) سرعت جریان هوا در بالای هیتر به دلیل اثر صعود همرفتی هوای گرم ناشی از حضور هیتر، بالاتر از بقیه قسمت‌هاست.

با توجه به اهمیت بیشتر بار گرمایی جهت انطباق دو نرم‌افزار، شش ماه سرد سال مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور سردترین روز از هر ماه در دو نرم‌افزار مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. دمای میانگین اتاق ناشی از اعمال بار گرمایی، در خروجی هر دو نرم‌افزار استخراج شده و مطابق شکل 6 باهم مقایسه شده‌اند. مطابق با شکل 6 میانگین خطای شبیه‌سازی مقایسه‌ای بر مبنای استخراج دمای اتاق، برابر با 5% به دست آمده‌است که بیانگر تطابق خوب شبیه‌سازی در دو نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر و فلوئنت است. شکل‌های 4 تا 6 نتیجه خروجی مدل‌سازی در نرم‌افزار انسیس فلوئنت هستند که بر اساس فرمول‌های 5 تا 11 حل شده است.

3-1-2- اعتبارسنجی مقایسه‌ای

برای اعتبارسنجی مقایسه‌ای، از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده‌است. بدین منظور ساختمان تک اتاقه‌ی نمایش داده شده در شکل 2 در نرم‌افزار فلوئنت مدل‌سازی شده است. پس از شبیه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، با استخراج پارامترهای دمای داخلی اتاق، دمای محیط و بارهای سیستم برای شش ماه و به صورت میانگین ماهانه، شرایط مرزی برای اتاق مدل شده در نرم‌افزار فلوئنت مطابق با جدول 2 اعمال می‌شود. به جهت تطبیق شرایط در دو نرم‌افزار، بار گرمایی اتاق که با شبیه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر به دست آمده است، در نرم‌افزار فلوئنت از طریق هیتری به ابعاد 0/85 در 1/00 متر اعمال می‌شود. شارهای حرارتی ارائه شده در جدول 2 با استفاده از معادلات 2 و 3 به دست آمده‌اند.

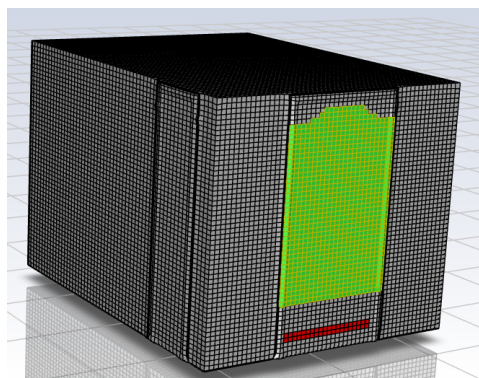
استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال از شبکه در نرم‌افزار فلوئنت مطابق با شکل 4 (الف)، با تغییر در تعداد مش‌های ساختمان مدل شده، شرایط دمایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پس از چند بار بررسی، مشخص می‌شود از تعداد مش 229725 به بعد، دمای میانگین اتاق حاصل از مدل‌سازی ثابت می‌ماند. بنابراین این تعداد مش برای مش‌بندی مدل سه‌بعدی انتخاب می‌شود. شماتیکی از مدل سه

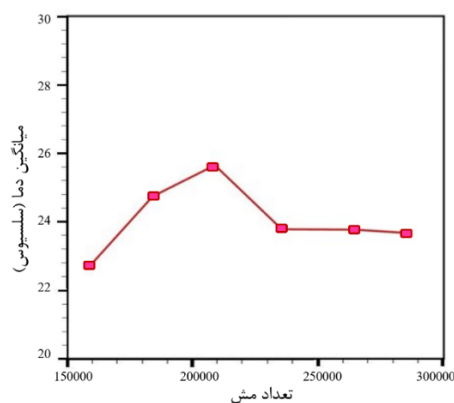
جدول 2- شرایط مرزی در شبیه‌سازی ساختمان اعتبارسنجی در نرم‌افزار فلوئنت

Tab. 2- Boundary conditions in the simulation of validation building in Fluent software

ماه	میانگین دمای داخل ساختمان (سلسیوس)	میانگین دمای خارج ساختمان (سلسیوس)	شار حرارتی دیوارهای خارجی (وات بر مترمربع)	شار حرارتی سقف (وات بر مترمربع)	شار حرارتی پنجره و در شیشه‌ای (وات بر مترمربع)	میانگین بار ساختمان در ماه (وات بر مترمربع)
آبان	21/57	11/42	16/24	2/47	16/97	518/59
آذر	21/00	5/59	24/66	3/75	24/97	1280/79
دی	21/00	3/89	27/38	4/16	27/73	1516/11
بهمن	21/00	4/98	25/63	3/90	25/96	1169/01
اسفند	21/19	10/66	16/85	2/56	16/45	646/55
فروردین	21/36	16/30	8/09	3/75	17/06	211/52



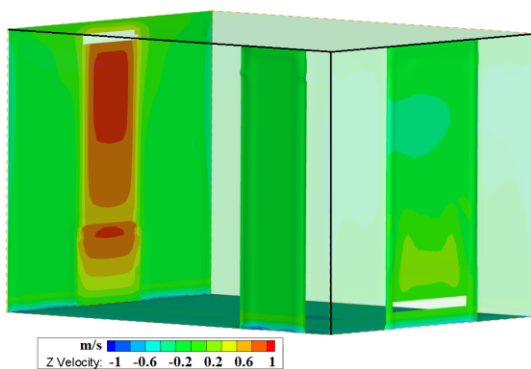
(ب)



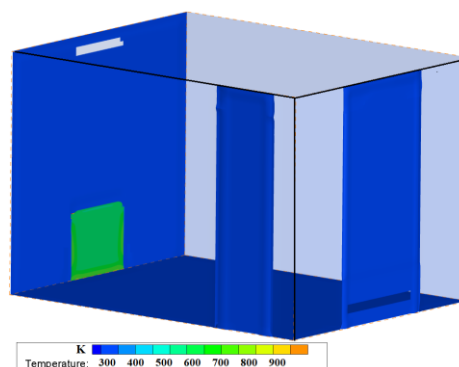
(الف)

شکل 4- الف) نمودار بررسی استقلال از شبکه در مدل‌سازی با نرم‌افزار فلوئنت (ب) شبکه‌بندی سه بعدی اتاق جهت تحلیل در نرم‌افزار فلوئنت

Fig. 4- a) Diagram of network independence in modeling with Fluent software b) 3D room grid for analysis in Fluent software



(ب)



(الف)

شکل 5- کانتورهای سه بعدی حاصل از شبیه‌سازی فلوئنت در مرز نزدیک به دیواره‌ها: الف) دما و ب) سرعت

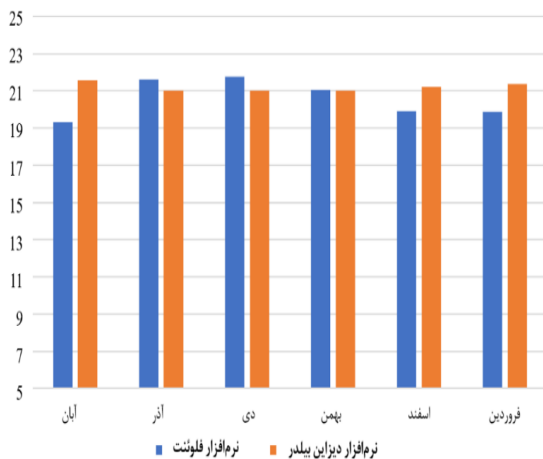
Fig. 5- 3D contours resulting from Fluent simulation in the boundary near the walls: a) temperature and b) velocity

نوع پنجره شامل تک جداره، دوجداره بدون سایه بان و دوجداره‌ی پرده دار، 3 نقطه تنظیم گرمایی شامل 20، 22 و 24 درجه سلسیوس و 3 نقطه تنظیم سرمایی شامل 24، 26 و 28 درجه سلسیوس بررسی شده‌اند. تلفیق انواع هر کدام از این متغیرها، 85 جایگشت یعنی 85 حالت مختلف را نتیجه می‌دهد که همه این حالت‌ها توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و از نظر مصرف انرژی رتبه‌بندی می‌شوند. برای رتبه‌بندی مصرف انرژی در ساختمان، کمینه شدن بار سرمایی و گرمایی به عنوان معیار جایگشت ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود. باید دید با توجه به پارامترهای مختلفی که به آن‌ها اشاره شد، در کدام حالت ساختمان از نظر بار سرمایی و گرمایی در حداقلی‌ترین حالت خود قرار خواهد داشت.

از بین 85 حالت مختلف، در جدول شماره 4، رتبه‌های برتر 1 تا 10 از نظر بار سرمایی، و در جدول شماره 5 نیز رتبه‌های برتر 1 تا 10 از نظر بار گرمایی مشخص شده‌اند. شرایط رتبه 1 بهینه‌ترین حالت در بار سرمایی و بار گرمایی یکسان است. این حالت به عنوان حالت بهینه نهایی ساختمان در نظر گرفته می‌شود. بهینه‌ترین حالت مربوط به حالتی است که پرده با نوارهای بازتابی بالا، پنجره‌ی دوجداره بدون سایه بان، سیستم روشنایی فلورسنت تری‌فسفر با کنترل فرکانس بالا، نقطه تنظیم گرمایی 20 و نقطه تنظیم سرمایی 28 است.

تعیین ساز و کار متناسب با شرایط ساکنین ساختمان جهت انتخاب حالت بهینه از بین 10 حالت برتر، مطابق الگوریتم نشان داده شده در شکل 7 صورت می‌گیرد. پر واضح است که بهینه‌ترین حالت (رتبه 1 از بین 10 حالت مختلف)، متعلق به حالتی است که از هر مشخصه‌ای بهترین مورد انتخاب شود (بهترین پرده، بهترین پنجره و ...). نکته مهم معرفی رتبه‌های بعدی است. چرا که در بسیاری از مواقع در واقعیت، کاربر یا مالک ساختمان با محدودیت‌هایی برای انتخاب تجهیزات یا تنظیمات روبرو است که نمی‌تواند رتبه 1 یعنی بهینه‌ترین حالت را انتخاب کند و ناچار است به رتبه‌های بعدی مراجعه کند.

دمای اتاق شبیه‌سازی شده (سلسیوس)



شکل 6- نمودار مقایسه دمای اتاق شبیه‌سازی شده در دو نرم‌افزار دیزاین بیلدر و فلوئنت

Fig. 6- The comparison chart of simulated room temperature in Design Builder and Fluent software

2-3- مشخصات ساختمان آموزشی موجود

ساختمان مورد نظر، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی واقع در شهر تهران است. این ساختمان دارای زیربنای 1000 متر مربعی بوده و از دو طبقه هم‌شکل دارای 11 کلاس آموزشی و 19 اتاق با کاربری اداری تشکیل شده است. در جدول شماره 3، نوع و مشخصات حرارتی جداره‌های ساختمان بیان شده است.

3-3- بهینه‌سازی مصرف انرژی

برای هر نوع بهینه‌سازی مصرف در ساختمان، با توجه به شرایط ساختمان موجود، تغییر بسیاری از پارامترها از نظر اجرایی ممکن نیست و یا اگر امکان داشته باشد از نظر هزینه به صرفه نخواهد بود. بدین منظور برای بهینه‌سازی ساختمان از نظر بار سرمایی و گرمایی، تأثیر پنج متغیر روشنایی، پنجره، جنس پرده، دمای ایده‌آل سرمایش و گرمایش (نقطه تنظیم گرمایی و سرمایی) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. بدین منظور 3 نوع لامپ مهتابی شامل فلورسنت هالوفسفات با کنترل فرکانس بالا، فلورسنت تری‌فسفر با کنترل فرکانس بالا و فلورسنت هالوفسفات با کنترل فرکانس پایین، 3 نوع پرده شامل پرده با نوارهای بازتابی بالا، متوسط و کم، 3

جدول 3- نوع و مشخصات حرارتی مصالح ساختمان

Tab. 3- Type and thermal characteristics of building materials

موقعیت	جنس لایه (از خارج به داخل)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	رسانایی حرارتی (وات بر متر کلوین)	ضخامت (متر)
دیوار خارجی	آجرکاری بیرونی	1700/00	0/8400	0/1000
	فوم پلی اتایرن XPS	35/00	0/0340	0/0340
	بلوک بتنی	1400/00	0/5100	0/1000
	گچ	1000/00	0/4000	0/0130
بام ساختمان	آسفالت	2100/00	0/7000	0/0100
	پشم شیشه (رول)	12/00	0/0400	0/1000
	گچ تخته	2800/00	0/2500	0/0130
کف زمین	فوم اوره فرمالدئید	10/00	0/0400	0/1000
	بتن ریخته گری	2000/00	1/1300	0/1000
	کف	1200/00	0/4100	0/0700
	بلوک های کفپوش	650/00	0/1400	0/0300
دیوار جدا کننده	گچ	1000/00	0/4000	0/0130
	آجرکاری داخلی	1700/00	0/4200	0/1150
	گچ	1000/00	0/4000	0/0130

جدول 4- بهینه ترین حالات ساختمان از نظر بار سرمایی

Tab. 4- The most optimal conditions of the building in terms of cooling load

رتبه	بار سرمایی (کیلووات ساعت)	بار گرمایی (کیلووات ساعت)	نقطه ی تنظیم سرمایی (سلسیوس)	نقطه ی تنظیم گرمایی (سلسیوس)	الگوی پنجره	الگوی روشنایی	جنس پرده
1	63392/2	9677/872	28	20	پنجره دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت تری فسفر، کنترل فرکانس بالا	پرده با نوارهای بازتابی بالا
2	63454/94	12535/98	28	22	پنجره دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت تری فسفر، کنترل فرکانس بالا	پرده با نوارهای بازتابی بالا
3	67610/47	12499/30	28	22	پنجره دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت تری فسفر، کنترل فرکانس بالا	پرده با نوارهای بازتابی کم
4	67944/74	16928/93	28	24	پنجره دوجداره پرده دار	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت تری فسفر، کنترل فرکانس بالا	پرده با نوارهای بازتابی کم
5	72346/43	12085/41	28	22	پنجره دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت هالوفسفات، کنترل فرکانس پایین	پرده با نوارهای بازتابی بالا
6	72732/91	16196/55	28	24	پنجره دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت هالوفسفات، کنترل فرکانس پایین	پرده با نوارهای بازتابی بالا
7	76622/93	9995/72	28	20	پنجره دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت هالوفسفات، کنترل فرکانس پایین	پرده با نوارهای بازتابی کم

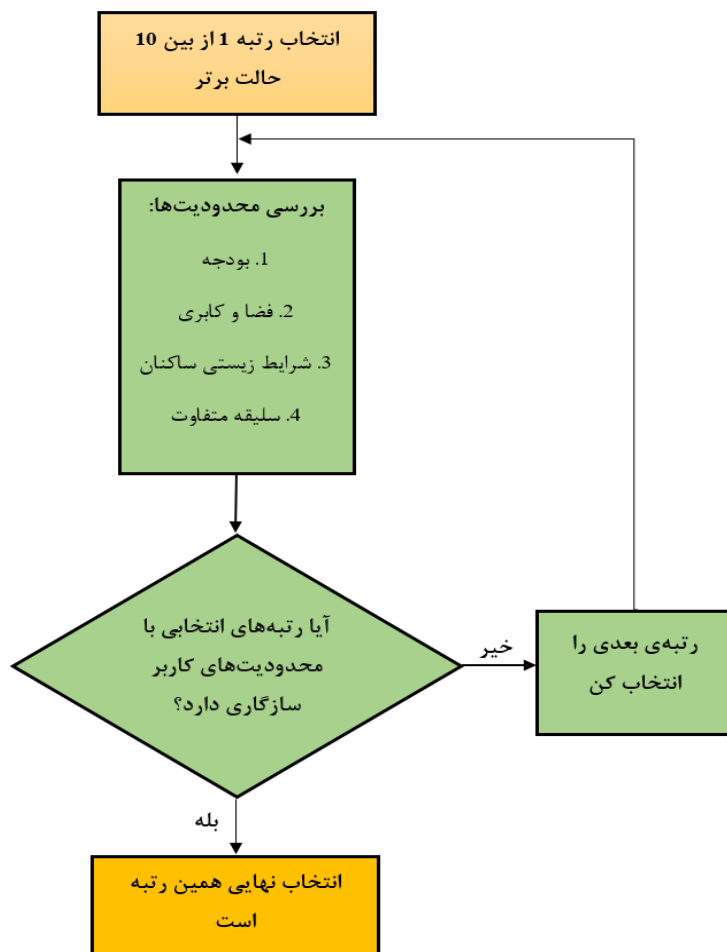


8	76717/52	12151/32	28	22	پنجره دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت هالوفسفات، کنترل فرکانس پایین	پرده با نوارهای بازتابی کم
9	79938/47	11162/77	26	20	پنجره دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت تری فسفر، کنترل فرکانس بالا	پرده با نوارهای بازتابی بالا
10	80273/70	14055/77	26	22	پنجره دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت تری فسفر، کنترل فرکانس بالا	پرده با نوارهای بازتابی بالا

جدول 5- بهینه ترین حالات ساختمان از نظر بار گرمایی

Tab. 5- The most optimal conditions of the building in terms of heating load

رتبه	بار سرمایی (کیلووات ساعت)	بار گرمایی (کیلووات ساعت)	نقطه ی تنظیم سرمایی (سلسیوس)	نقطه ی تنظیم گرمایی (سلسیوس)	الگوی پنجره	الگوی روشنایی	جنس پرده
1	63392/20	9677/87	28	20	پنجره ی دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت تری فسفر، کنترل فرکانس بالا	پرده با نوارهای بازتابی بالا
2	76622/93	9995/72	28	20	پنجره ی دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت هالوفسفات، کنترل فرکانس پایین	پرده با نوارهای بازتابی کم
3	79938/47	11162/77	26	20	پنجره ی دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت تری فسفر، کنترل فرکانس بالا	پرده با نوارهای بازتابی بالا
4	89906/64	11256/34	26	20	پنجره دوجداره ی پرده دار	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت هالوفسفات، کنترل فرکانس پایین	پرده با نوارهای بازتابی بالا
5	84640/32	11426/44	26	20	پنجره ی دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت تری فسفر، کنترل فرکانس بالا	پرده با نوارهای بازتابی کم
6	94803/96	11567/08	26	20	پنجره ی دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت هالوفسفات، کنترل فرکانس پایین	پرده با نوارهای بازتابی کم
7	72346/43	12085/41	28	22	پنجره ی دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت هالوفسفات، کنترل فرکانس پایین	پرده با نوارهای بازتابی بالا
8	76717/52	12151/32	28	22	پنجره ی دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت هالوفسفات، کنترل فرکانس پایین	پرده با نوارهای بازتابی کم
9	67610/47	12499/30	28	22	پنجره ی دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت تری فسفر، کنترل فرکانس بالا	پرده با نوارهای بازتابی کم
10	80273/70	14055/75	26	22	پنجره ی دوجداره بدون سایه بان	سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی متر فلورسنت تری فسفر، کنترل فرکانس بالا	پرده با نوارهای بازتابی بالا



شکل 7- الگوریتم انتخاب حالت بهینه با توجه به شرایط ساکنان و محدودیت‌های کاربری

Fig. 7- Algorithm for choosing the optimal mode according to the conditions of residents and user restrictions

تا بهینه‌ترین حالت که سازگار با شرایط کاربر است انتخاب شود. لازم به ذکر است، نتایج ذکر شده در جدول بر اساس محاسبه بار سرمایی و گرمایی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر استخراج شده که مبنای آن فرمول‌های شماره 1 و 4 است.

3-5- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالت موجود و بهینه‌ترین حالت

در شکل 8 (الف) سرمای محسوس در حالت موجود و بهینه مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. مطابق شکل در حالت بهینه، سرمای محسوس ساختمان 37/4 درصد به صورت میانگین کاهش می‌یابد. در شکل 8 (ب) نیز شرایط گرمایش منطقه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل، با اعمال شرایط بهینه، گرمایش

از جمله محدودیت‌ها عبارتند از: 1) محدودیت بودجه یا وسیع اقتصادی جهت تهیه تجهیزات، 2) محدودیت فضا و کاربری (مثلا در یک کاربری خاص ممکن است نیاز به نور زیاد در انتخاب نوع پرده محدودیت ایجاد کند)، 3) شرایط زیستی ساکنان (طبع بسیار گرم برخی ساکنان ممکن است مانع از تنظیم دمای بالا در تابستان شود) و 4) سلیقه متفاوت ساکنان. از آنجایی که کاربر نمی‌تواند برترین گزینه (بهینه‌ترین حالت) را انتخاب کند، لذا از بین 9 حالت باقیمانده ابتدا وضعیتی که رتبه 2 را کسب کرده، بررسی می‌کند. اگر رتبه 2 برطرف کننده محدودیت‌های کاربر بود، این حالت انتخاب نهایی کاربر است در غیر این صورت رتبه 3 را بررسی می‌کند. این بررسی مطابق الگوریتم شکل 10 آنقدر ادامه پیدا می‌کند

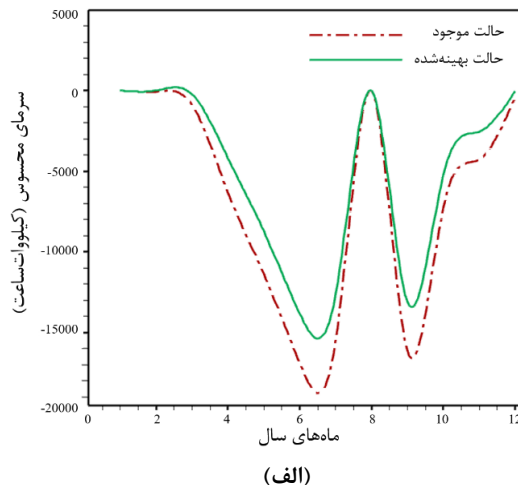
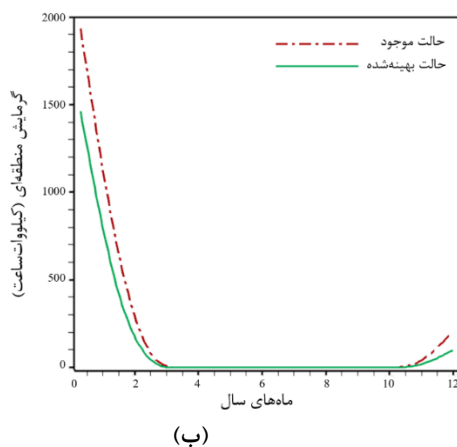
امتحانات و حالت نیمه تعطیل دانشکده است. بر این اساس با بهینه‌سازی ساختمان به میزان قابل توجهی شرایط مصرف گاز و الکتریسیته تغییر می‌کند. به گونه‌ای که با اعمال شرایط بهینه 43/86 درصد در گاز مصرفی و 11/65 درصد در الکتریسیته‌ی مصرفی ساختمان به صورت سالانه صرفه‌جویی می‌شود.

بر اساس نرخ تعرفه برق شرکت توزیع نیروی برق تهران بزرگ و با داشتن میزان مصرف برق ماهانه دانشکده، هزینه مصرف برق ساختمان در حالت موجود و بهینه شده مطابق با شکل 10 (الف) به دست آمده است. مطابق شکل با اعمال شرایط بهینه، در طول یک سال می‌توان به میزان 10/56 درصد معادل 15 میلیون و 200 هزار ریال در هزینه برق مصرفی ساختمان صرفه‌جویی کرد. میزان تولید کربن‌دی‌اکسید یکی از شاخص‌های مهم زیست‌محیطی است. در شکل 10 (ب) میزان تولید کربن‌دی‌اکسید ساختمان در حالت موجود و حالت بهینه به نمایش درآمده است. مطابق شکل با اعمال شرایط بهینه در ساختمان در طول یک سال میزان تولید کربن‌دی‌اکسید به میزان 11/83 درصد کاهش می‌یابد.

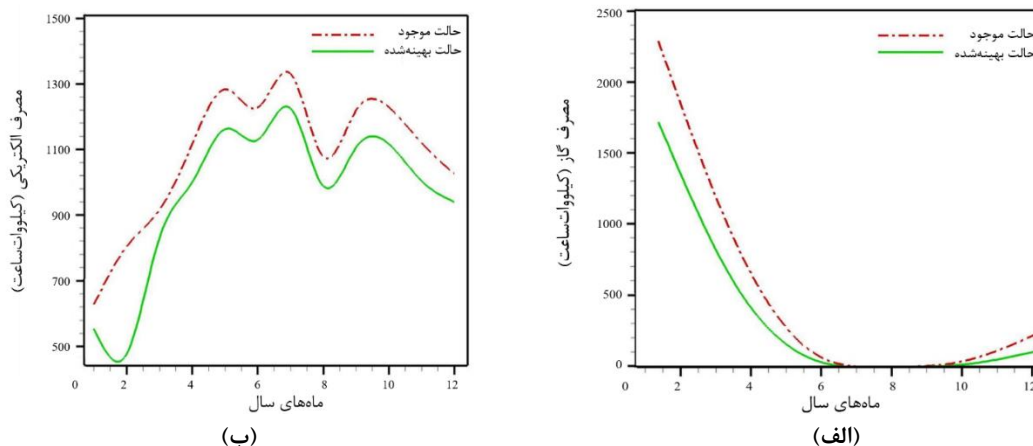
منطقه‌ای ساختمان 26/1 درصد به صورت میانگین کاهش می‌یابد. این نمودارها بر اساس محاسبه بار سرمایی و گرمایی در نرم افزار دیزاین بیلدر استخراج شد که مبنای آن فرمول‌های شماره 1 و 4 است.

3-6- بررسی اقتصادی و زیست محیطی

اشکال 9 (الف) و 9 (ب) به ترتیب میزان گاز و انرژی الکتریکی مصرفی در حالت موجود و حالت بهینه در طول یک سال را نمایش می‌دهد. مطابق با شکل 9 (الف)، تنها در فصول سرد سال است که میزان کمی گاز مصرف می‌شود و در سایر ماه‌ها میزان مصرف گاز قابل توجه نیست. بخش الکتریسیته شامل انرژی مصرفی کلیه‌ی تجهیزات الکتریکی و برقی ساختمان از قبیل ملزومات روشنایی، کامپیوتری، اداری و ... می‌باشد. میزان الکتریسیته مصرفی ساختمان در شکل 9 (ب) نمایش داده شده است. مطابق شکل با نزدیک شدن به فصول گرم سال، مصرف گاز بیشتر می‌شود. به علاوه در بازه زمانی ماه اول تا دوم سال (میلادی) در حالت بهینه، نمودار دچار یک افت می‌شود که این امر به علت قرار گرفتن در بازه زمانی

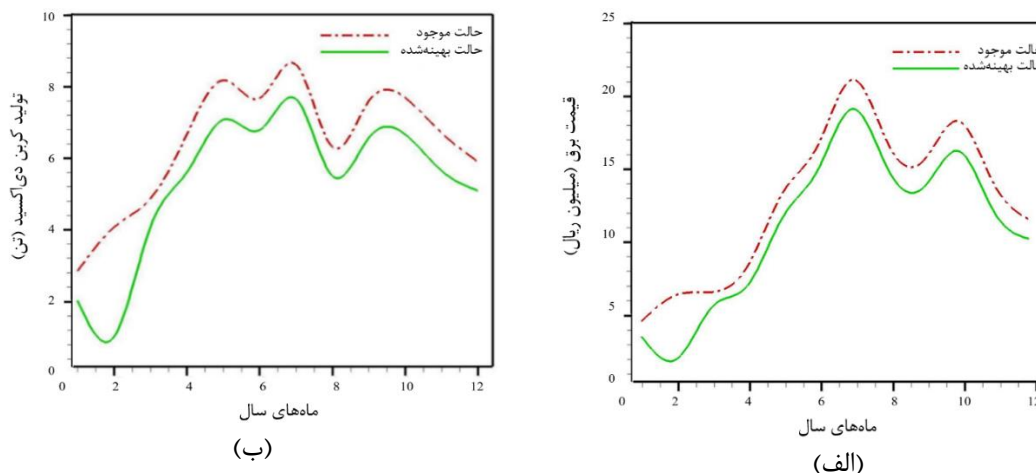


شکل 8- نمودار مقایسه الف) سرمای محسوس در حالت موجود و بهینه‌شده، ب) گرمایش منطقه‌ای در حالت موجود و بهینه‌شده
 Fig. 8- Comparison chart a) sensible cooling in existing and optimized state, b) zone heating in existing and optimized state



شکل 9- مقایسه میزان الف) گاز مصرفی و ب) انرژی الکتریکی مصرفی در حالت موجود و بهینه شده.

Fig. 9- Comparison of a) gas consumption and b) electrical energy consumption in existing and optimized state



شکل 10- مقایسه الف) هزینه انرژی الکتریکی مصرفی و ب) میزان کربن دی اکسید تولیدی در حالت موجود و بهینه شده.

Fig. 10- Comparison of the (a) cost of electrical energy consumption and (b) the amount of CO₂ production in existing and optimized state

3- نتیجه گیری

در این مقاله، با شبیه‌سازی ساختمان دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شهید رجایی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، بهینه‌سازی مصرف انرژی صورت پذیرفت. اعتبارسنجی حل هم به روش تجربی و هم به روش مقایسه‌ای (مدل‌سازی در نرم‌افزار فلونت) انجام شده که تطابق خوبی بین نتایج در هر دو روش حاصل شده است. مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش در زیر آمده است. (a) نوآوری اصلی پژوهش، بررسی 85 جایگشت حاصل از ترکیب و تلفیق پیکربندی‌های گوناگون پرده،

پنجره، تجهیزات روشنایی و دماهای تنظیم سرمایش و گرمایش است. تمام این 85 حالت از نظر کمترین بار سرمایی و گرمایی رتبه‌بندی ولی به دلیل اختصار در متن مقاله، صرفاً رتبه‌های 1 تا 10 (در جداول 4 و 5) معرفی و تحلیل شد. (b) بر مبنای رتبه‌بندی پیکربندی‌های مختلف، پیشنهاد می‌شود شرایط مصرف انرژی در ساختمان مطابق با بهینه‌ترین پیکربندی (رتبه 1) بهبود یابد؛ در این حالت پرده با نوارهای بازتابی بالا، پنجره‌ی دوجداره بدون سایه‌بان، سیستم روشنایی فلورسنت



Al Roshdi S, Sudhir C., Basha Sadigh J, Saleel CA, Elahi M. Soudagar M, Abdu Yusuf A, et al. (2022) Case Studies in Thermal Engineering A case study on the electrical energy auditing and saving techniques in an educational institution (IMCO , Sohar , Oman). Case Study Therm Eng J homepage, 31(January), 1–18.

Bergman T. L, Incropera F. P, DeWitt D. P, Lavine A. S. (2011) Lavine, Fundamentals of heat and mass transfer. Editor: Hayton V. A. Printed in the United States of America.

Gao M, Zhang L, Zhang H, Wang W. (2022) Research on the influence of different heating strategies on energy consumption and carbon emission of a teaching building in Urumqi. Energy Reports ,8, 318–26.

Granados-Lópezet D, Gatt Almaziad D, Yousif C, Díez-Mediavilla M, Alonso-Tristán C. (2023) Exploitation of indoor illumination for typical flat dwellings in the Mediterranean area. Energy Reports ,9, 1473–89.

Gurji Mahlabani Y, Mofrad Bushehri A, Azizzadeh Arai R. (2017) The effect of windows in reducing the thermal and cooling load of the building using simulation in Design Builder software. Scientific and Promotional Quarterly of Renewable and New Energies, 4, 1-8. [in Persian]

Hadianpour M, Mahdavi-Nejad M, Bemanian M, Haq-Shenas M. (2014) Capacity measurement of using double-walled shells in the architectural design of hot and dry climate of Iran in order to reduce energy consumption (case example of Yazd city). Journal of Fine Arts - Architecture and Urban Planning, 19, 29-38. [in Persian]

Haydaraslan E, Çuhadaroğlu B. (2022) Determination of the inner forms of hollow blocks containing phase-changing material for different climate regions. Energy Storage and Saving ,1, 102–16.

Khalid Alhuwayil W, Abdullah Almaziad F, Abdul Mujeebu M. (2023) Energy performance of passive shading and thermal insulation in multistory hotel building under different outdoor climates and geographic locations. Case Studies in Thermal Engineering ,45, 1–15.

Kumar GK, Saboor S, Babu TPA. (2017) Study of various Glass window and building wall materials in different climatic zones of India for energy efficient building construction. Energy Procedia, 138, 580–5.

تری فسفر با کنترل فرکانس بالا، نقطه تنظیم گرمایی 20 و نقطه تنظیم سرمایی 28 درجه سلسیوس است. (c) با اجرا کردن بهینه‌ترین حالت، از نظر مصرف الکتریسیته در طول یک سال 11/65 درصد نسبت به حالت موجود صرفه‌جویی حاصل می‌شود. این امر موجب کاهش هزینه‌ی برق مصرفی ساختمان به میزان 10/56 درصد معادل 15 میلیون و 200 هزار ریال سالانه است.

(d) همچنین با اعمال بهینه‌ترین حالت، در طول یک سال به میزان 43/86 درصد در مصرف گاز ساختمان صرفه‌جویی می‌شود. در این شرایط، میزان کربن‌دی‌اکسید تولیدی ساختمان 11/83 درصد به صورت سالانه کاهش می‌یابد.

(e) با توجه به محدودیت‌های چهارگانه اقتصادی، کاربری، زیستی و سلیقه‌ای کاربران ساختمان، اگر امکان اجرا کردن رتبه 1 وجود نداشته باشد، پیشنهاد می‌شود بر مبنای الگوریتم انتخاب حالت بهینه (شکل 7)، حالت بهینه‌ی متناسب با شرایط و محدودیت کاربران از بین رتبه‌های 1 تا 10 توسط مسئولین دانشکده انتخاب شود.

(f) از آن‌جا که در بین 5 حالت برتر، پرتکرارترین حالات جنس پرده، الگوی روشنایی و الگوی پنجره به ترتیب، پرده با نوارهای بازتابی بالا، سیستم روشنایی T8 با قطر 25 میلی‌متر فلورسنت تری فسفر، کنترل فرکانس بالا و پنجره‌ی دوجداره بدون سایه‌بان هستند، بهتر است تجهیزات با این مشخصات در اولویت خرید دانشکده قرار بگیرند.

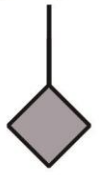
پی‌نوشت

¹Design Builder

²U-VALUE

منابع

Al-Hazmy Majed M. (2006) Analysis of coupled natural convection–conduction effects on the heat transport through hollow building blocks. Energy and Buildings,5, 515–21



Waheeb M, Fahd AH. (2022) Study of natural ventilation and daylight in a multi-storey residential building to address the problems of COVID-19. *Energy Reports*,8, 863–80.

Zarei M, Khademi Zare H, Fakhrzad M. (2012) Optimization of energy consumption basket and clustering of residential buildings by improving fuzzy neural network with weights and AHP architecture. *Public Management Research*, 19, 129-152. [in Persian]

Zhou J, Mohd Nazi WI, Wang Y, Roskilly A. (2019) Investigating the impact of building's facade on the building's energy performance - A case study. *Energy Procedia*, 158, 3144–51.

Zomorodian Z, Tahsildoost M. (2015) Validation of energy simulation software in buildings: with an experimental and comparative approach. *Iranian Energy Journal*, 18, 115-132. [in Persian]

Liu Y, Chen H, Zhang L, Feng Z. (2021) Enhancing building energy efficiency using a random forest model: A hybrid prediction approach. *Energy Reports*,7, 5003–12.

Nathan Zoure A, Vincenzo Genovese P. (2023) Implementing natural ventilation and daylighting strategies for thermal comfort and energy efficiency in office buildings in Burkina Faso. *Energy Reports*,9, 3319–42.

Sayed Hassan Abdollah A. (2023) Improved energy consumption and smart eco system for mosques in hot arid climates. *Ain Shams Engineering Journal* ,14, 1–11.

Tabatabaei, SM. (2020) Calculations of building facilities, *Rozbahan*. [in Persian]