نشریه مباحث برگزیده در انرژی، دوره ۵، شماره ۱، سال ۱۴۰۳، صفحات ۱ تا ۱۸

مقاله پژوهشی

ممیزی انرژی و ارزیابی فنی–اقتصادی عایق‌کاری دیوارها و نصب پنجره دوجداره با تأکید بر کاهش تقاضای پیک برق در اقلیم گرمسیری: مطالعه موردی یک ساختمان مسکونی در گچساران

مصطفی نجات‌الهی[1*]، سعید قبادپوری[2*]، علی عدنانی[1]

۱- گروه مهندسی انرژی، دانشکده نفت و گاز گچساران، دانشگاه یاسوج، گچساران، ایران
۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
* نویسنده مسئول: nejatolahi@yu.ac.ir، ghobadpourisaeed@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۰

چکیده

استفاده هم‌زمان از تعداد زیادی کولر گازی در مناطق گرمسیری، اوج تقاضای برق تابستانی ایران را از توان پاسخ‌گویی شبکه سراسری فراتر برده و به اعمال خاموشی‌های ساعتی در ساختمان‌ها و صنایع انجامیده است. ازاین‌رو، دولت افزایش ظرفیت تولید برق از طریق احداث نیروگاه‌های جدید گازی، هسته‌ای و خورشیدی را دنبال می‌کند. در کنار این رویکرد عرضه‌محور، کاهش بار سرمایشی ساختمان‌ها می‌تواند با کاهش تقاضای برق در ساعات اوج، راهکاری مؤثر برای کاهش فشار بر شبکه باشد. عایق‌کاری دیوارها و نصب پنجره‌های دوجداره، با کاهش انتقال حرارت از پوسته ساختمان، از مهم‌ترین راهکارهای کاهش بار سرمایشی و درنتیجه تقاضای برق در تابستان به‌شمار می‌روند. بااین‌حال، تعرفه‌های پایین انرژی انگیزه اقتصادی مالکان را برای اجرای این اقدامات کاهش می‌دهد. ازاین‌رو، در این پژوهش اثر این دو راهکار بر مصرف انرژی یک ساختمان مسکونی در گچساران، به‌عنوان شهری گرمسیری، با استفاده از قبوض واقعی و شبیه‌سازی ساعتی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر ارزیابی شد. از میان ضخامت‌های ۱ تا ۲۰ سانتی‌متر عایق پلی‌استایرن، ضخامت ۳ سانتی‌متر، به‌دلیل داشتن کمترین دوره بازگشت سرمایه، برای مقایسه با پنجره‌های دوجداره انتخاب شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که اوج بار سرمایشی سالانه ساختمان در ساعت ۱۳ روز ۱۳ تیر رخ داد. در این زمان، هر دو راهکار اوج تقاضای الکتریکی را حدود ۹ درصد کاهش دادند. بااین‌حال، عایق‌کاری مصرف سالانه برق سرمایشی را ۹/۱ درصد کاهش داد، درحالی‌که کاهش حاصل از نصب پنجره‌های دوجداره ۷/۴۵ درصد بود. همچنین، هزینه اولیه عایق‌کاری ۳۶/۶ درصد کمتر و صرفه‌جویی مالی سالانه آن ۲۵/۳ درصد بیشتر از پنجره‌های دوجداره بود. افزون بر این، عایق‌کاری دیوارها با کاهش بار گرمایشی در زمستان می‌تواند مصرف گاز را کاهش داده و به تداوم گازرسانی به صنایع گازبر ازجمله صنعت سیمان، و کاهش استفاده از مازوت در نیروگاه‌ها کمک کند.

کلید واژگان: ممیزی انرژی، دیزاین-بیلدر، اوج تقاضای برق، اقلیم گرمسیری، بهسازی پوسته ساختمان.

Energy auditing and techno-economic assessment of building envelope retrofits with emphasis on peak electricity demand reduction in a hot climate: A residential case study in Gachsaran

Mostafa Nejatolahi[1*], Saeed Ghobadpouri[2*], Ali Adnani[1]

1- Department of Energy Engineering, Faculty of Gas and Petroleum, Yasouj University, Gachsaran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Yasouj University, Yasuj, Iran
*Corresponding author: nejatolahi@yu.ac.ir, ghobadpourisaeed@gmail.com

Received: 10-09-2026 Accepted: 11-09-2026

Abstract

The simultaneous use of a large number of air-conditioning units in hot regions has driven Iran's summer peak electricity demand beyond the capacity of the national grid, resulting in scheduled hourly power outages in buildings and industries. In response, the government is pursuing an increase in electricity-generation capacity through the construction of new gas-fired, nuclear, and solar power plants. Alongside this supply-side approach, reducing building cooling loads can reduce electricity demand during peak hours and thereby help alleviate pressure on the grid. Wall insulation and the installation of double-glazed windows are among the most important measures for improving the thermal performance of building envelopes, as they reduce heat transfer through the envelope and, consequently, cooling loads and summer electricity demand. However, low energy tariffs reduce building owners' economic incentive to implement these measures. Therefore, this study evaluated their effects on the energy consumption of a residential building in Gachsaran, a city in a hot climate, using actual utility bills and hourly simulation in DesignBuilder. Polystyrene insulation thicknesses ranging from 1 to 20 cm were evaluated. The 3-cm-thick insulation layer had the shortest payback period and was therefore selected for comparison with double-glazed windows. The simulation results showed that the building's annual peak cooling load occurred at 13:00 on 4 July. At this time, both measures reduced peak electrical demand by approximately 9%. However, wall insulation reduced annual cooling electricity consumption by 9.1%, compared with 7.45% for double-glazed windows. In addition, the initial cost of insulation was 36.6% lower, while its annual financial savings were 25.3% higher than those of double-glazed windows. Furthermore, by reducing winter heating loads, wall insulation can reduce natural-gas consumption, help maintain gas supply to gas-intensive industries such as cement plants, and reduce the use of mazut in power plants.

Keywords: Energy auditing, DesignBuilder, peak electricity demand, hot climate, building-envelope retrofit.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

۱- مقدمه

بخش ساختمان و ساخت‌وساز با سهمی حدود ۳۲ درصد از مصرف انرژی و ۳۴ درصد از انتشار دی‌اکسیدکربن جهان، یکی از مهم‌ترین حوزه‌های کاهش مصرف انرژی به شمار می‌رود [۱]. در این بخش، نیاز به سرمایش با رشد جمعیت، افزایش سطح رفاه و گسترش استفاده از تجهیزات تهویه مطبوع افزایش می‌یابد. آژانس بین‌المللی انرژی در گزارش سال ۲۰۱۸ پیش‌بینی کرده است که بدون بهبود بهره‌وری انرژی، تقاضای انرژی برای سرمایش تا سال ۲۰۵۰ بیش از سه برابر خواهد شد. براساس همان گزارش، کولرهای گازی و پنکه‌ها حدود یک‌پنجم برق مصرفی ساختمان‌های جهان را به خود اختصاص داده‌اند. اهمیت این مسئله فراتر از مصرف سالانه است، زیرا استفاده هم‌زمان از تجهیزات سرمایشی در ساعات گرم، حداکثر توان موردنیاز شبکه را افزایش می‌دهد. بنابراین، کاهش نیاز سرمایشی ساختمان‌ها علاوه بر صرفه‌جویی انرژی، از نظر کنترل پیک بار و محدودکردن نیاز به ظرفیت جدید تولید برق اهمیت دارد [۲].

در ایران، تابستان‌های طولانی و گرم، به‌ویژه در مناطق جنوبی، اهمیت این موضوع را بیشتر کرده است. طبق اعلام سخنگوی صنعت برق در مرداد ۱۴۰۲، سهم تجهیزات سرمایشی از تقاضای اوج کشور حدود ۳۲ هزار مگاوات بوده است [۳]. افزایش تقاضا در ساعات گرم و کمبود ظرفیت در دسترس برای تأمین آن، به جیره‌بندی برق و اعمال خاموشی‌های برنامه‌ریزی‌شده منجر شده است. این محدودیت‌ها علاوه بر اختلال در زندگی خانوارها، فعالیت اقتصادی و تولید صنایع را نیز مختل می‌کنند. از سوی دیگر، احداث نیروگاه و توسعه شبکه به سرمایه‌گذاری و زمان نیاز دارد و محدودیت‌های ناشی از تحریم، تأمین تجهیزات و نگهداری زیرساخت‌ها را دشوارتر می‌کند [۴] و [۵]. در چنین شرایطی، کاهش نیاز سرمایشی ساختمان‌ها می‌تواند با کاهش تقاضای برق در ساعات اوج، به محدودکردن خاموشی‌ها و کاهش نیاز به توسعه ظرفیت تولید کمک کند.

عایق‌کاری دیوارها و سقف، اصلاح پنجره‌ها، کنترل تابش خورشیدی و کاهش نفوذ هوا، از اقدامات مؤثر برای کاهش نیاز سرمایشی و گرمایشی ساختمان‌های موجود هستند [۶]. کاهش برق مصرفی تجهیزات سرمایشی در تابستان می‌تواند مصرف سوخت نیروگاه‌های حرارتی را نیز محدود کند. در زمستان، کاهش اتلاف حرارت ساختمان‌ها از جنبه دیگری اهمیت می‌یابد، زیرا افزایش مصرف گاز برای گرمایش، تأمین سوخت نیروگاه‌ها و صنایع را تحت فشار قرار می‌دهد. هنگام کمبود گاز، نیروگاه‌های حرارتی از گازوئیل و مازوت استفاده می‌کنند[۷]. محدودیت گاز صنایع، از جمله کارخانه‌های سیمان، نیز آن‌ها را با ضرورت تأمین سوخت جایگزین و خطر کاهش یا توقف تولید مواجه می‌کند[۸]. بنابراین، کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها می‌تواند علاوه بر کاهش فشار بر شبکه برق تابستان، به تأمین پایدارتر گاز نیروگاه‌ها و صنایع در زمستان، کاهش نیاز به سوخت‌های آلاینده و حفظ منابع گاز برای مصارف مولد و صادرات کمک کند. این منافع، ضرورت بررسی اقدامات اصلاحی ساختمان را فراتر از صرفه‌جویی مالی قبوض نشان می‌دهند.

از میان این اقدامات، عایق‌کاری دیوارهای خارجی و جایگزینی پنجره‌های تک‌جداره با پنجره‌های دوجداره، دو راهکار رایج هستند که عملکرد آن‌ها به اقلیم، مشخصات ساختمان، شرایط بهره‌برداری و هزینه اجرا وابسته است. در عایق‌کاری، افزایش ضخامت موجب افزایش مقاومت حرارتی می‌شود، اما صرفه‌جویی حاصل از هر مقدار افزایش ضخامت، به‌تدریج کاهش می‌یابد. ازاین‌رو، انتخاب ضخامت مناسب و مقایسه آن با تعویض پنجره‌ها باید براساس ارزیابی هم‌زمان عملکرد و هزینه انجام شود [۹، ۱۰]. همچنین، کاهش مصرف سالانه الزاماً با کاهش متناسب تقاضای برق در ساعت اوج همراه نیست. پژوهش کرارتی و الدبیان نشان داده است که انتخاب اقدامات اصلاحی براساس هزینه کاهش تقاضای پیک، در کنار صرفه‌جویی سالانه، می‌تواند در برنامه‌ریزی تأمین برق مؤثر باشد[۱۱].

مطالعات متعددی به ارزیابی فنی و اقتصادی اصلاح ساختمان‌ها پرداخته‌اند. هروی و قائمی، اقدامات طراحی و اجرایی مؤثر بر عملکرد انرژی ساختمان‌های ایران را بررسی کردند [۱۲]. سلگی و همکاران با استفاده از داده‌های مصرف و شبیه‌سازی یک ساختمان مسکونی در اقلیم سرد ایران، نشان دادند که پایین‌بودن قیمت انرژی می‌تواند دوره بازگشت سرمایه اقدامات بهینه‌سازی را طولانی کند [۱۳]. محمدی و دارائیو نیز در یک ساختمان مسکونی در بوشهر، کاهش مصرف انرژی حاصل از ترکیب عایق‌کاری، اصلاح شیشه‌ها و سایر اقدامات را گزارش کردند و وابستگی نتیجه اقتصادی به یارانه انرژی را نشان دادند [۱]. حاجی‌زاده و همکاران با بررسی سناریوهای اصلاح یک ساختمان مسکونی در تبریز، ظرفیت این اقدامات را برای کاهش مصرف انرژی تأیید کردند[۱۵]. در زمینه تقاضای پیک نیز کرارتی و الدبیان، راهکارهای اصلاح

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

ساختمان‌های مسکونی عربستان را با هدف کاهش هزینه دستیابی به هر کیلووات کاهش پیک و افزایش صرفه‌جویی سالانه بهینه‌سازی کردند[۱۱].

این مطالعات، اهمیت مصرف سالانه، هزینه اجرا و تقاضای پیک را روشن می‌کنند، اما انتخاب راهکار برای ساختمان‌های مناطق گرمسیری ایران همچنان به بررسی شرایط محلی نیاز دارد. به‌ویژه، تعرفه‌های پایین انرژی ممکن است موجب شوند که صرفه‌جویی فنی به منفعت مالی کافی برای مالک تبدیل نشود، درحالی‌که کاهش بار در ساعات اوج برای شبکه ارزشمند باشد. بنابراین، مسئله اصلی تنها تعیین میزان کاهش مصرف نیست، بلکه شناسایی راهکاری است که با هزینه اجرایی کمتر، کاهش مؤثرتری در مصرف انرژی و تقاضای برق ایجاد کند. پاسخ به این مسئله، به تلفیق ممیزی واقعی ساختمان، تحلیل اقتصادی و بررسی مستقل بار الکتریکی نیاز دارد و می‌تواند مبنایی برای اولویت‌بندی حمایت‌های دولتی فراهم کند.

پژوهش حاضر با این هدف، عایق‌کاری دیوارهای خارجی و نصب پنجره دوجداره را در یک ساختمان مسکونی موجود در گچساران بررسی می‌کند. اطلاعات ساختمان، قبوض برق و گاز و داده‌های هواشناسی ساعتی، مبنای ایجاد و ارزیابی مدل شبیه‌سازی در دیزاین‌بیلدر قرار می‌گیرند. پس از بررسی ضخامت‌های مختلف عایق پلی‌استایرن، ضخامت منتخب ۵ سانتی‌متر با پنجره دوجداره از نظر کاهش مصرف سالانه برق سرمایشی، مصرف گاز گرمایشی و تقاضای الکتریکی در ساعت اوج سرمایش ساختمان مقایسه می‌شود. ارزیابی اقتصادی نیز هزینه اجرا، صرفه‌جویی قبوض، دوره بازگشت ساده و سرمایه‌گذاری به‌ازای هر کیلووات کاهش تقاضا را دربر می‌گیرد. این مقایسه، ضمن مشخص‌کردن منفعت مالی اقدامات برای مالک، شواهدی برای حمایت از اصلاح ساختمان‌های مشابه با هدف کاهش فشار بر شبکه برق تابستان و تقاضای گاز زمستان ارائه می‌دهد.

۲- مدل‌سازی

این پژوهش با هدف ممیزی انرژی یک ساختمان مسکونی موجود در گچساران و مقایسه فنی و اقتصادی عایق‌کاری دیوارهای خارجی با نصب پنجره دوجداره انجام شد. مشخصات ساختمان، شرایط بهره‌برداری، قبوض برق و گاز و داده‌های هواشناسی، مبنای تعیین وضعیت مصرف انرژی و ایجاد مدل در دیزاین‌بیلدر با موتور محاسباتی انرژی‌پلاس قرار گرفتند. عملکرد مدل با استفاده از داده‌های واقعی ارزیابی و راهکارها تحت شرایط اقلیمی و بهره‌برداری یکسان مقایسه شدند. معیارهای ارزیابی شامل مصرف سالانه برق سرمایشی و گاز گرمایشی، تقاضای الکتریکی در ساعت مرجع پیک سرمایش ساختمان، هزینه اجرا، صرفه‌جویی مالی و دوره بازگشت ساده سرمایه بودند.

۲-۱- مراحل انجام مطالعه

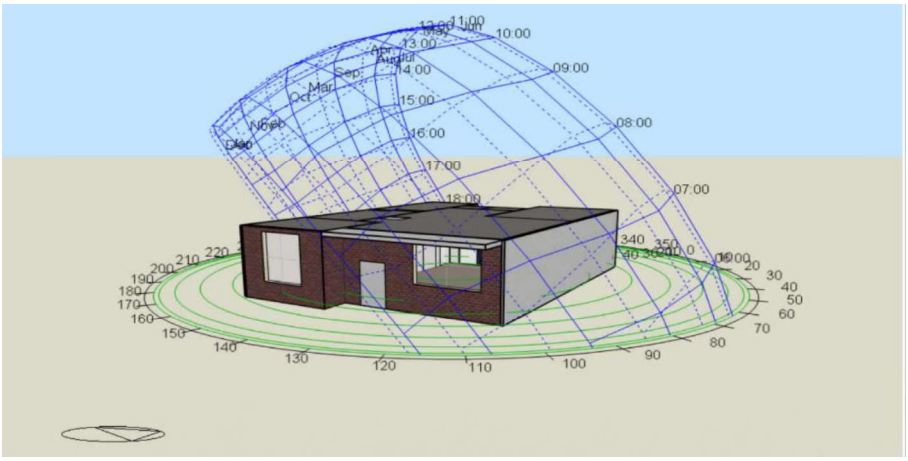
ابتدا اطلاعات هندسی، حرارتی و بهره‌برداری ساختمان گردآوری و مصرف سالانه و شدت مصرف انرژی از قبوض استخراج شد. رده عملکرد ساختمان نیز براساس ضوابط مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان تعیین گردید. سپس مدل پایه ایجاد و خروجی‌های ساعتی آن برای یک سال کامل استخراج شد. بار سرمایشی حرارتی خروجی دیزاین‌بیلدر، در مرحله پس‌پردازش و با استفاده از ضریب عملکرد وابسته به دمای هوای خارج، به توان الکتریکی تبدیل شد. انطباق مدل با داده‌های واقعی با استفاده از شاخص CV(RMSE) و مقایسه ضریب بار مؤثر حاصل از داده‌های حرارتی ارزیابی گردید.

پس از تحلیل اجزای بار در ساعت وقوع پیک سرمایشی ساختمان پایه، ضخامت‌های ۱ تا ۲۰ سانتی‌متر عایق پلی‌استایرن بررسی شدند. هزینه عایق‌کاری با تفکیک بخش ثابت اجرا و بخش وابسته به ضخامت محاسبه شد و ضخامت ۳ سانتی‌متر، با توجه به نتایج فنی و اقتصادی، برای مقایسه با پنجره دوجداره انتخاب گردید. کاهش توان الکتریکی همه سناریوها در همان ساعت مرجع محاسبه شد. در نهایت، دوره بازگشت ساده برای ارزیابی منفعت مالی مالک و هزینه سرمایه‌گذاری به‌ازای هر کیلووات کاهش تقاضا برای مقایسه اثربخشی راهکارها تعیین شدند.

۲-۲- مشخصات ساختمان مورد مطالعه

ساختمان مورد مطالعه یک واحد مسکونی در حال بهره‌برداری در گچساران است که پنج نفر در آن سکونت دارند. مشخصات اصلی ساختمان در جدول ۱ ارائه شده است. اجزای خارجی ساختمان شامل دیوارهای بنایی فاقد عایق حرارتی، سقف تخت، کف در تماس با زمین و پنجره‌ها و نورگیرهای تک‌جداره است. بازشوهای نمای جنوبی و نورگیرهای سقفی با موقعیت و مشخصات متناظر در مدل تعریف شدند. هندسه ساختمان براساس ابعاد واقعی ایجاد و فضاهای داخلی متناسب با کاربری و شرایط بهره‌برداری به نواحی حرارتی تفکیک شدند. مدل هندسی در شکل ۱ نشان داده شده است.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]



شکل ۱- مدل هندسی ساختمان مسکونی مورد مطالعه در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر.

جدول ۱- مشخصات هندسی و بهره‌برداری ساختمان مورد مطالعه.

مشخصه	مقدار
موقعیت ساختمان	گچساران، استان کهگیلویه و بویراحمد
نوع کاربری	مسکونی
تعداد ساکنان	۵ نفر
مساحت مفید ساختمان	۱۴۶
مساحت سقف	۱۴۶
مساحت کف در تماس با زمین	۱۴۶
مساحت خالص دیوارهای خارجی	۷۶/۵
مساحت کل پنجره‌ها و نورگیرهای خارجی	۲۷/۵
مساحت اتاق خواب اول	۱۸
مساحت اتاق خواب دوم	۱۵
مساحت اتاق خواب سوم	۱۵
مساحت فضای پذیرایی	۶۵
مساحت آشپزخانه	۲۶
مساحت سرویس‌های بهداشتی	۷
نوع پنجره‌های موجود	تک‌جداره با قاب فلزی
مجموع ظرفیت اسمی تجهیزات سرمایشی	۴۲۰۰۰ بی‌تی‌یو بر ساعت

در تمام سناریوها، هندسه، جهت‌گیری، مساحت بازشوها، بارهای داخلی، برنامه‌های بهره‌برداری، دماهای تنظیم و مشخصات تجهیزات ثابت نگه داشته شدند. نرخ نفوذ هوا نیز برابر با ۱/۵ بار تعویض هوا در ساعت در نظر گرفته شد. در سناریوهای عایق‌کاری، فقط ضخامت لایه عایق دیوار خارجی تغییر کرد. در سناریوی پنجره، مشخصات حرارتی و نوری مجموعه شیشه و قاب با پنجره دوجداره UPVC دارای فضای میانی پرشده با آرگون جایگزین شد. با ثابت‌بودن نرخ نفوذ هوا، نتایج این سناریو شامل صرفه‌جویی احتمالی ناشی از بهبود درزبندی نیست.

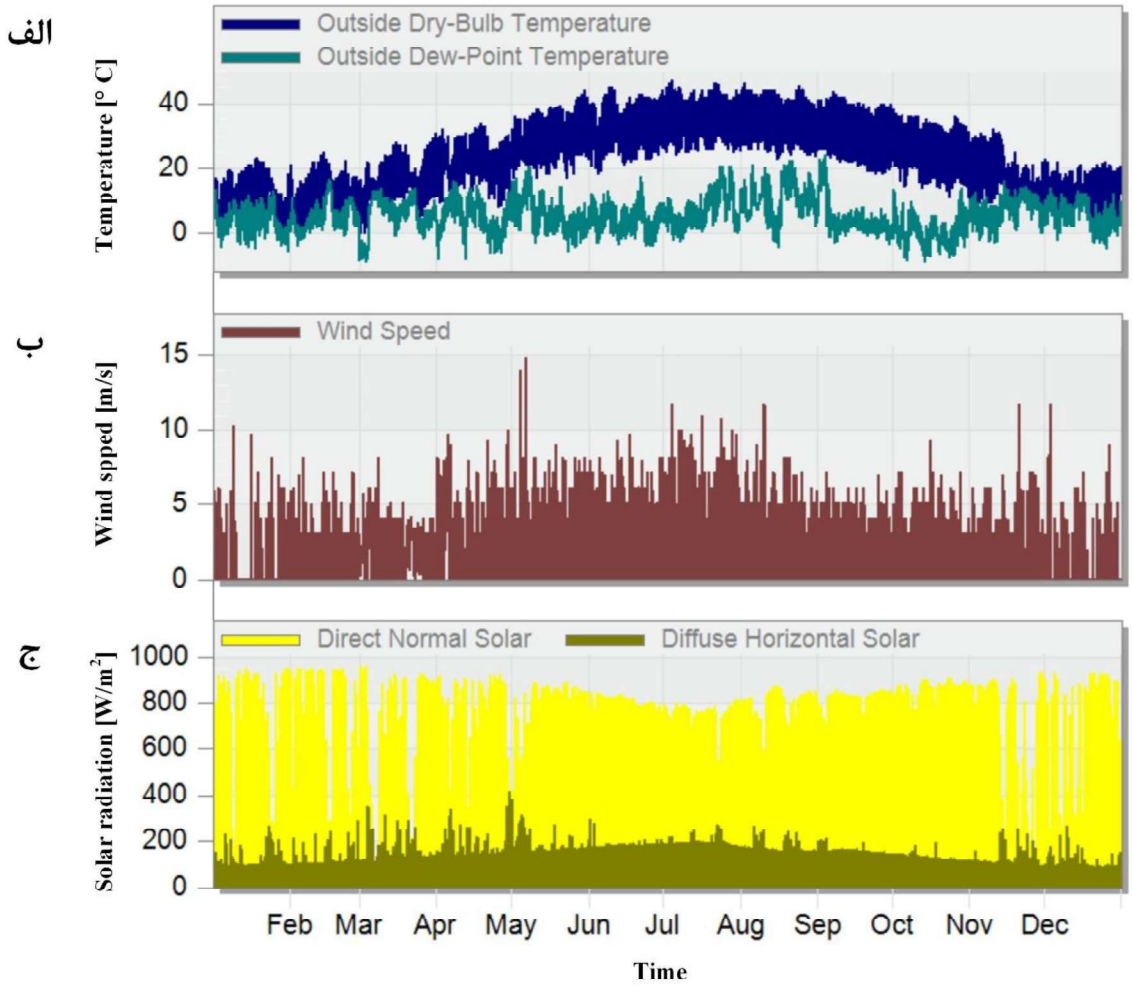
۲-۳- شرایط اقلیمی محل مطالعه

گچساران در استان کهگیلویه و بویراحمد و در ارتفاع تقریبی ۷۲۰ متر از سطح دریا قرار دارد. تابستان‌های طولانی و گرم و تابش شدید خورشیدی، نیاز سرمایشی ساختمان را در بخش قابل‌توجهی از سال افزایش می‌دهند. برای شبیه‌سازی، از فایل هواشناسی ساعتی متناظر با گچساران استفاده شد.

شکل ۲ الف) تغییرات دمای خشک و دمای نقطه شبنم را نشان می‌دهد که به‌ترتیب برای توصیف شرایط دمایی و رطوبتی محیط به کار می‌روند. تغییرات سرعت باد در شکل ۲ ب) و مؤلفه‌های مستقیم و پخشیده تابش خورشیدی در شکل ۲ ج) ارائه شده‌اند. این داده‌ها، شرایط مرزی محاسبات انتقال حرارت، دریافت خورشیدی و بار ناشی از نفوذ هوا را تشکیل دادند. متوسط دمای خشک در بازه متناظر با هر قبض نیز برای بررسی ارتباط مصرف برق با دمای محیط محاسبه شد.

برای تعیین رده انرژی ساختمان از طبقه‌بندی اقلیمی مبحث نوزدهم و برای محاسبه هزینه برق از تعرفه «منطقه گرمسیر ۱» استفاده شد. با توجه به غلبه نیاز سرمایشی، تمرکز اصلی مقایسه بر مصرف برق سرمایشی و تقاضای الکتریکی در ساعت مرجع بود و تغییرات مصرف گاز گرمایشی نیز در ارزیابی انرژی و هزینه لحاظ شد.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]



شکل ۲- تغییرات ساعتی پارامترهای اقلیمی شهر گچساران در طول سال الف) دمای خشک و دمای نقطه شبنم هوا ب) سرعت باد ج) تابش مستقیم و پخشیده خورشیدی.

۲-۴- داده‌های مصرف انرژی

قبوض برق و گاز، مبنای تعیین مصرف واقعی ساختمان و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی قرار گرفتند. برای یکسان‌سازی دوره‌های قرائت، مصرف برق هر دوره بر تعداد روزهای آن تقسیم و با میانگین دمای هوای خارج در همان بازه مرتبط شد. مصرف پایه از دوره‌های بدون فعالیت سیستم سرمایشی برآورد و پس از کسر آن از مصرف کل، برق منتسب به سرمایش تعیین گردید. خروجی‌های شبیه‌سازی نیز برای بازه‌های متناظر با قبوض تجمیع شدند. برای بیان مصرف گاز در واحد مشترک انرژی، حجم ثبت‌شده در قبوض با استفاده از ارزش حرارتی پایین گاز طبیعی به کیلووات‌ساعت تبدیل شد.

$$E_{gas} = \frac{V_{gas} LHV}{3.6} \quad (۱)$$

در این رابطه، V_{gas} حجم گاز برحسب مترمکعب و $LHV=37.68\ MJ/m^3$ ارزش حرارتی پایین گاز طبیعی است.

مقدار حاصل، انرژی سوخت مصرف‌شده است و تبدیل آن به گرمای تحویلی سامانه گرمایش به راندمان سامانه وابسته است.

مصرف تفکیک‌شده سرمایشی برای ارزیابی مدل به کار رفت، درحالی‌که محاسبه شدت مصرف انرژی براساس کل مصرف برق و گاز انجام شد. در تحلیل اقتصادی نیز صرفه‌جویی برق سرمایشی بر مصرف کامل ماهانه اعمال و هزینه قبض با تعرفه پلکانی محاسبه گردید.

۲-۵- داده‌های مصرف انرژی

برای ارزیابی وضعیت اولیه ساختمان، شدت مصرف انرژی تحویلی از مجموع مصرف سالانه برق و انرژی معادل گاز، بدون اعمال ضرایب انرژی اولیه، محاسبه شد.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

$$EUI = \frac{E_{el,annual} + E_{gas,annual}}{A_f} \quad (۲)$$

در این رابطه، A_f مساحت مفید ساختمان و واحد EUI کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال است. رده انرژی براساس پیوست سوم ویرایش پنجم مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان تعیین شد [۱۶]. حدود مرجع متناسب با کاربری مسکونی، زیربنای کمتر یا مساوی ۳۰۰۰ مترمربع و پهنه اقلیمی 2A در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲- حدود شدت مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی با زیربنای کمتر یا مساوی ۳۰۰۰ مترمربع در پهنه اقلیمی 2A.

رده انرژی	حداکثر شدت مصرف انرژی (کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال)
A	۴۳
B	۸۶
C	۱۲۸
D	۱۷۱

حد بالای رده A به‌عنوان مقدار مرجع انتخاب و نسبت شدت مصرف ساختمان به آن با شاخص R بیان شد.

$$R = \frac{EUI}{EUI_{A,\max}} \quad (۳)$$

برای ساختمان مورد مطالعه، شدت مصرف ۱۵۷/۱۳ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال و شاخص R برابر با ۳/۶۵ به دست آمد. براساس حدود جدول ۲، ساختمان در رده انرژی D قرار گرفت.

۲-۶- توسعه مدل شبیه‌سازی ساختمان

مدل حرارتی ساختمان در دیزاین‌بیلدر با موتور محاسباتی انرژی‌پلاس توسعه یافت. هندسه، جهت‌گیری، اجزای ساختمان و موقعیت بازشوها براساس اطلاعات واقعی تعریف شدند. فضاهای اصلی متناسب با کاربری و شرایط بهره‌برداری به نواحی حرارتی مجزا تفکیک و خروجی‌های ساعتی بارهای سرمایشی و گرمایشی برای یک سال کامل استخراج شدند.

۲-۶-۱- مشخصات اجزای ساختمان و شرایط بهره‌برداری

ساختمان پایه دارای دیوارهای بنایی بدون عایق، سقف تخت، کف در تماس با زمین و پنجره‌های تک‌جداره با قاب فلزی بود. دیوارهای داخلی نیز برای محاسبه تبادل حرارت میان نواحی در مدل لحاظ شدند. مشخصات لایه‌های اجزای کدر در جدول ۳، برای دیوار و سقف به‌ترتیب از خارج به داخل و برای کف از سطح داخلی به سمت زمین، ارائه شده است.

برنامه حضور پنج نفر ساکن و بارهای روشنایی و تجهیزات براساس اطلاعات بهره‌برداری تنظیم شد. گرمای محسوس و نهان حضور افراد در محاسبات منظور و نرخ نفوذ هوا برابر با ۱/۵ بار تعویض هوا در ساعت در نظر گرفته شد. این نرخ، بارهای داخلی، دماهای تنظیم و برنامه‌های بهره‌برداری در تمام سناریوها ثابت ماندند. بنابراین، نتایج تعویض پنجره شامل اثر تغییر مشخصات حرارتی و نوری آن است و منفعت احتمالی ناشی از بهبود درزبندی را دربر نمی‌گیرد.

جدول ۳- مشخصات لایه‌های اجزای کدر ساختمان.

جزء ساختمان	لایه از خارج به داخل	ضخامت (mm)	ضریب هدایت حرارتی (W/(m·K))	مقاومت حرارتی لایه (m^2·K/W)
دیوار خارجی	آجرنما	۵۰	۰/۸۴	۰/۰۶۰
	اندود گچ و سیمان	۲۵	۱/۳۵	۰/۰۱۹
	بلوک سیمانی متوسط	۱۰۰	۰/۵۱	۰/۱۹۶
	گچ داخلی	۱۳	۰/۴۰	۰/۰۳۳
سقف	پوشش آسفالتی یا ایزوگام	۱۰	۰/۷۰	۰/۰۱۴
	ملات ماسه‌سیمان	۲۰	۱/۴۰	۰/۰۱۴
	بتن هوادار با چگالی اسمی ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۱۰۰	۰/۱۶	۰/۶۲۵
	بتن مسلح	۳۰۰	۲/۵۰	۰/۱۲۰
کف	سرامیک	۳۰	۱/۲	۰/۴۲۹
	ملات کف‌سازی	۷۰	۰/۴۰	۰/۱۷۵
	بتن درجا	۱۰۰	۱/۱۰	۰/۰۹۱

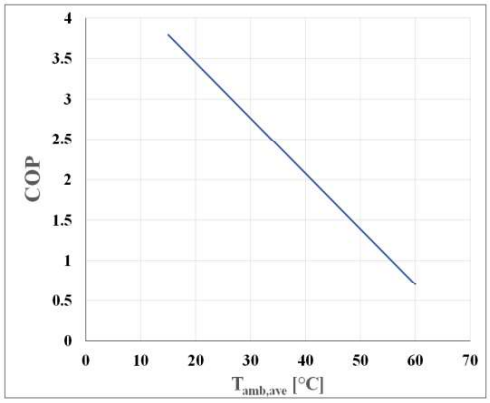
[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

۲-۶-۲- محاسبه مصرف برق سیستم سرمایشی

سرمایش ساختمان با اسپلیت‌هایی به ظرفیت اسمی مجموع ۴۲۰۰۰ بی‌تی‌یو بر ساعت، معادل حدود ۱۲/۳ کیلووات سرمایشی، تأمین می‌شود. بار سرمایشی حرارتی از دیزاین‌بیلدر استخراج و در مرحله پس‌پردازش، با استفاده از ضریب عملکرد وابسته به دمای هوای خارج، به توان الکتریکی تبدیل شد. ضریب عملکرد با رابطه گزارش‌شده توسط لیو و همکاران محاسبه گردید[۱۷].

$$COP(T_{amb}) = 4.815 - 0.0687 T_{amb} \quad (۴)$$

در این رابطه، T_{amb} دمای خشک هوای خارج برحسب درجه سلسیوس است. مطابق شکل ۳، افزایش دما از ۱۵ به ۶۰ درجه سلسیوس، ضریب عملکرد محاسبه‌شده را از حدود ۳/۸ به ۰/۷ کاهش می‌دهد.



شکل ۳- تغییرات ضریب عملکرد سیستم سرمایشی برحسب دمای هوای خارج.

توان الکتریکی کل ساختمان در هر ساعت، از مجموع توان سرمایشی و توان مصارف غیرسرمایشی به صورت زیر محاسبه شد:

$$P_{el,h} = \frac{\dot{Q}_{cool,h}}{COP(T_{amb,h})} + P_{base,h} \quad (۵)$$

در این رابطه، $Q_{cool,h}$ قدرمطلق بار سرمایشی حرارتی می‌باشد و $P_{base,h}$ توان روشنایی، تجهیزات و سایر مصارف غیرسرمایشی است. بار حرارتی و توان الکتریکی بر حسب کیلووات بیان می‌شوند. مصرف سالانه برق سرمایشی نیز از مجموع حاصل‌ضرب توان سرمایشی هر ساعت در فاصله زمانی یک ساعت به دست آمد. ساعت وقوع حداکثر بار سرمایشی ساختمان پایه به عنوان ساعت مرجع انتخاب گردید و توان الکتریکی تمام سناریوها در همان ساعت مقایسه شد. به این ترتیب، اثر عایق‌کاری و تعویض پنجره‌ها بر تقاضای برق در زمان مشترک ارزیابی گردید. مقادیر حاصل در ادامه با عنوان تقاضای الکتریکی در ساعت مرجع پیک سرمایش گزارش می‌شوند.

۲-۷- ارزیابی مدل شبیه‌سازی ساختمان پایه

انطباق مدل با داده‌های واقعی از طریق مقایسه مصرف برق و حساسیت بار سرمایشی به دمای محیط ارزیابی شد. برای مقایسه مصرف، خروجی‌های ساعتی مدل در بازه‌های متناظر با قبوض تجمیع و به متوسط مصرف روزانه تبدیل شدند. میزان اختلاف با داده‌های واقعی با شاخص CV(RMSE)، برابر با نسبت ریشه میانگین مربعات خطا به میانگین مصرف واقعی، بیان شد. این شاخص برای متوسط‌های روزانه دوره‌های قرائت محاسبه شد.

برای استخراج ضریب بار مؤثر، مصرف برق واقعی منتسب به سرمایش، پس از کسر مصرف پایه، با استفاده از ضریب عملکرد متناظر با میانگین دمای هر دوره به انرژی سرمایشی حرارتی تبدیل شد.

$$Q^{day}_{cool,i} = E^{day}_{cool,i} COP(T^{day}_{amb,i}) \quad (۶)$$

در این رابطه، $Q_{cool,i}$ انرژی سرمایشی حرارتی روزانه و $E_{cool,i}$ مصرف روزانه برق سرمایشی، هر دو برحسب کیلووات‌ساعت بر روز، هستند. این تبدیل برای داده‌های قبوض با ضریب عملکرد متناظر با میانگین دما تقریب زده شد، درحالی‌که انرژی حرارتی شبیه‌سازی‌شده مستقیماً از خروجی‌های ساعتی دیزاین‌بیلدر به دست آمد.

برای دوره‌های فعال‌بودن سرمایش، رابطه خطی انرژی حرارتی روزانه با میانگین دمای محیط، برای داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌شده جداگانه برازش شد. ضریب بار مؤثر و مقدار ویژه آن از شیب برازش محاسبه شدند.

ضریب بار مؤثر و مقدار ویژه آن از روابط زیر محاسبه شدند:

$$BLC_{eff} = \frac{1000a}{24} \quad (۷)$$

$$BLC_{sp} = \frac{BLC_{eff}}{A_f} \quad (۸)$$

در این روابط، a شیب برازش برحسب کیلووات‌ساعت بر روز کلوین و A_f مساحت مفید ساختمان است. واحدهای BLC_{eff} و BLC_{sp} به‌ترتیب وات بر کلوین و وات بر مترمربع کلوین هستند. اختلاف نسبی ضرایب با مبنا قراردادن مقدار حاصل از داده‌های واقعی تعیین شد. این ضریب، حساسیت مؤثر بار سرمایشی به دمای محیط را نشان می‌دهد و مستقیماً

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

از شیب مصرف برق استخراج نمی‌شود. شکل ۴ صرفاً مقایسه مصرف برق واقعی و پیش‌بینی‌شده را نمایش می‌دهد و خط نقطه‌چین آن برای نمایش روند داده‌هاست. نتایج کمی هر دو معیار ارزیابی در بخش ۳–۲ ارائه می‌شوند.

۲-۸- تعریف و شبیه‌سازی سناریوهای عایق‌کاری و تعویض پنجره‌ها

پس از ارزیابی مدل پایه، عایق‌کاری دیوارهای خارجی و نصب پنجره دوجداره به‌صورت مستقل بررسی شدند. در تمام سناریوها، هندسه، شرایط اقلیمی و بهره‌برداری، بارهای داخلی، نرخ نفوذ هوا، دماهای تنظیم و مشخصات تجهیزات ثابت ماندند. مقایسه براساس مصرف سالانه برق سرمایشی و گاز گرمایشی، حداکثر بار سرمایشی حرارتی، تقاضای الکتریکی در ساعت مرجع پیک سرمایش ساختمان پایه و شاخص‌های اقتصادی انجام شد.

۲-۸-۱- سناریوهای عایق‌کاری دیوارهای خارجی

یک لایه عایق پلی‌استایرن به سطح خالص ۷۶/۵ مترمربعی دیوارهای خارجی افزوده شد. ضخامت‌های ۱، ۲، ۳، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵، ۱۷/۵ و ۲۰ سانتی‌متر بررسی و ساختمان بدون عایق به‌عنوان مبنا انتخاب شد. فاصله کمتر نقاط در ضخامت‌های ابتدایی، امکان بررسی دقیق‌تر تغییرات عملکرد در این محدوده را فراهم کرد. ضریب انتقال حرارت دیوار عایق‌کاری‌شده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$U(d)=\frac{1}{R_{wall}+\frac{d}{k_{ins}}} \quad (۹)$$

در این رابطه، R_{wall} مقاومت حرارتی دیوار موجود با احتساب مقاومت‌های سطحی داخلی و خارجی، d ضخامت عایق برحسب متر و k_{ins} ضریب هدایت حرارتی عایق است. واحد U وات بر مترمربع کلوین است.

انتخاب ضخامت با توجه به کاهش مصرف انرژی، کاهش تقاضای الکتریکی و دوره بازگشت سرمایه انجام شد. در محاسبه هزینه، بخش ثابت اجرا از بخش وابسته به ضخامت تفکیک شد تا افزایش ضخامت به‌اشتباه موجب افزایش متناسب کل هزینه نشود. رابطه هزینه در بخش ارزیابی اقتصادی ارائه می‌شود. براساس بررسی هم‌زمان نتایج فنی و اقتصادی، ضخامت عایق مناسب برای مقایسه نهایی با پنجره دوجداره انتخاب می‌گردد.

۲-۸-۲- سناریوی نصب پنجره دوجداره

در این سناریو، حدود ۲۷/۵ مترمربع بازشوی تک‌جداره موجود با پنجره دوجداره دارای قاب UPVC، دو شیشه ۶ میلی‌متری و فاصله میانی ۱۳ میلی‌متری پرشده با آرگون جایگزین شد. ضریب انتقال حرارت، ضریب کسب حرارت خورشیدی و عبور نور مرئی مطابق مشخصات مجموعه شیشه و قاب انتخاب‌شده در مدل تغییر یافتند. نرخ نفوذ هوا در مقدار ۱/۵ بار تعویض هوا در ساعت ثابت ماند. بنابراین، نتایج این سناریو به تغییر مشخصات حرارتی و نوری پنجره مربوط است و منفعت احتمالی ناشی از بهبود درزبندی را شامل نمی‌شود. خلاصه سناریوها در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- مشخصات سناریوهای عایق‌کاری و تعویض پنجره‌ها.

سناریو	حداکثر شدت مصرف انرژی
عایق‌کاری دیوار	افزودن عایق پلی‌استایرن به ۷۶/۵ مترمربع دیوار خارجی با ضخامت‌های ۱ تا ۲۰ سانتی‌متر
پنجره دوجداره	جایگزینی حدود ۲۷/۵ مترمربع پنجره تک‌جداره با پنجره دوجداره دارای قاب UPVC و لایه آرگون

۲-۸-۳- شاخص‌های مقایسه عملکرد سناریوها

مصرف سالانه برق سرمایشی و گاز گرمایشی، حداکثر بار سرمایشی حرارتی و تقاضای الکتریکی در ساعت مرجع، نسبت به مقادیر متناظر ساختمان پایه بی‌بعد و درصد کاهش آن‌ها گزارش شد. برای مقایسه تقاضای برق، مقدار ۷/۳۰ کیلووات در ساعت مرجع پیک سرمایش ساختمان پایه مبنا قرار گرفت و کاهش توان همه سناریوها در همان ساعت محاسبه شد

۲-۹- ارزیابی اقتصادی راهکارهای بهسازی

ارزیابی اقتصادی شامل محاسبه هزینه اجرا، صرفه‌جویی سالانه برق و گاز، دوره بازگشت ساده و هزینه سرمایه‌گذاری به‌ازای کاهش تقاضای پیک بود. این محاسبات برای ضخامت‌های مختلف عایق انجام شد و گزینه منتخب با پنجره دوجداره مقایسه گردید. برای محاسبه هزینه برق، کاهش مصرف سرمایشی حاصل از شبیه‌سازی از مصرف کل ماهانه ساختمان پایه کسر و تعرفه پلکانی بر مصرف باقی‌مانده اعمال شد. نرخ‌های مورد استفاده برای منطقه گرمسیر ۱، به‌ترتیب برای هزار کیلووات‌ساعت نخست، هزار کیلووات‌ساعت بعدی و مصرف مازاد تا ۲۵۰۰ کیلووات‌ساعت، برابر با ۶۳/۶، ۷۱/۶ و ۷۹/۵ تومان به‌ازای هر کیلووات‌ساعت بودند. با توجه به مصرف محدود گاز ساختمان در اقلیم گچساران، هزینه گاز برحسب

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

حجم مصرف و با نرخ پله اول تعرفه خانگی محاسبه شد. مجموع اختلاف هزینه سالانه برق و گاز میان ساختمان پایه و هر سناریو، صرفه‌جویی مالی سالانه آن راهکار را تشکیل داد.

در برآورد هزینه عایق‌کاری، بخش ثابت اجرا و پوشش نهایی برابر با ۳۹۳۴۰۰ تومان بر مترمربع و بخش وابسته به ضخامت برابر با ۶۶۵۲۰ تومان بر مترمربع به‌ازای هر سانتی‌متر عایق در نظر گرفته شد. این مقادیر، برآورد تعدیل‌شده مطالعه حاضر با استفاده از تفکیک هزینه‌های عایق‌کاری، پوشش دیوار و رنگ‌آمیزی در پژوهش محمدی و دارائیو هستند [۱۴]. بنابراین، هزینه اجرای عایق ۵ سانتی‌متری برابر با ۷۲۶۰۰۰ تومان بر مترمربع شد. هزینه تأمین و نصب پنجره دوجداره UPVC نیز براساس صورت‌هزینه تجاری تولید و نصب، ۲۶۰۰۰۰۰ تومان بر مترمربع برآورد شد [۱۸]. هزینه کل هر راهکار از حاصل‌ضرب هزینه واحد در سطح اجرا به دست آمد و در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- هزینه اجرای راهکارهای منتخب بهسازی.

راهکار	سطح اجرا (m^2)	هزینه تمام‌شده واحد (هزار تومان بر مترمربع)	هزینه کل اجرا (میلیون تومان)
عایق پلی‌استایرن ۳ سانتی‌متری	۷۶/۵	۵۹۳	۴۵/۴
پنجره دوجداره با قاب UPVC	۲۷/۵	۲۶۰۰	۷۱/۵

۲-۹-۱- دوره بازگشت سرمایه

دوره بازگشت ساده برای مقایسه اقتصادی راهکارها از نسبت هزینه اولیه به مجموع صرفه‌جویی سالانه هزینه برق و گاز محاسبه شد.

$$SPP_r = \frac{C_{inv,r}}{S_{annual,r}} \quad (۱۰)$$

در این رابطه، $C_{inv,r}$ هزینه اجرای راهکار برحسب تومان و $S_{annual,r}$ صرفه‌جویی مالی سالانه برحسب تومان در سال است. دوره بازگشت برحسب سال بیان می‌شود.

۲-۹-۲- هزینه سرمایه‌گذاری به‌ازای کاهش تقاضای پیک

هزینه دستیابی به هر کیلووات کاهش تقاضای الکتریکی در ساعت مرجع از رابطه زیر تعیین شد:

$$C_{peak,r} = \frac{C_{inv,r}}{P_{el,0}(h_{ref}) - P_{el,r}(h_{ref})} \quad (۱۱)$$

در این رابطه، h_{ref} ساعت وقوع پیک سرمایشی ساختمان پایه و توان‌های الکتریکی برحسب کیلووات هستند. شاخص $C_{peak,r}$ برحسب تومان بر کیلووات، مبنای مقایسه هزینه کاهش تقاضا در راهکارها قرار گرفت.

۳- نتایج

ابتدا وضعیت مصرف انرژی و رده عملکرد ساختمان پایه و سپس میزان انطباق مدل با داده‌های واقعی بررسی می‌شود. در ادامه، اجزای بار سرمایشی در ساعت پیک تحلیل و اثر ضخامت عایق بر مصرف سالانه و تقاضای الکتریکی در ساعت مرجع ارزیابی می‌شود. عملکرد عایق ۵ سانتی‌متری نیز با پنجره دوجداره مقایسه و نتایج براساس هزینه اجرا، صرفه‌جویی مالی، دوره بازگشت سرمایه و هزینه دستیابی به کاهش تقاضای برق تفسیر می‌شوند.

۳-۱- مصرف انرژی و رده عملکرد ساختمان پایه

براساس قبوض، مصرف سالانه برق ساختمان ۲۲۴۲۹ کیلووات‌ساعت و انرژی معادل مصرف گاز طبیعی حدود ۵۱۳ کیلووات‌ساعت بود. کل انرژی تحویلی سالانه، براساس مقادیر پیش از گردکردن، برابر با ۲۲۹۴۱ کیلووات‌ساعت محاسبه شد. مشخصات مصرف و رده عملکرد ساختمان در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶- مشخصات مصرف انرژی و رده عملکرد ساختمان پایه.

سناریو	حداکثر شدت مصرف انرژی
مصرف سالانه برق	۲۲۴۲۹ کیلووات‌ساعت در سال
انرژی معادل مصرف سالانه گاز طبیعی	۵۱۳ کیلووات‌ساعت در سال
کل انرژی تحویلی	۲۲۹۴۱ کیلووات‌ساعت در سال
مساحت مفید ساختمان	۱۴۶ مترمربع
شدت مصرف انرژی ساده	۱۵۷/۱۳ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال
R	۳/۶۵
رده انرژی ساختمان	D

برق و گاز به‌ترتیب حدود ۹۷/۸ و ۲/۲ درصد از کل انرژی تحویلی ساختمان را تشکیل دادند. بنابراین، تغییر مصرف برق نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش مصرف کل دارد. با توجه به اقلیم گرم منطقه و استفاده از تجهیزات سرمایشی تراکمی،

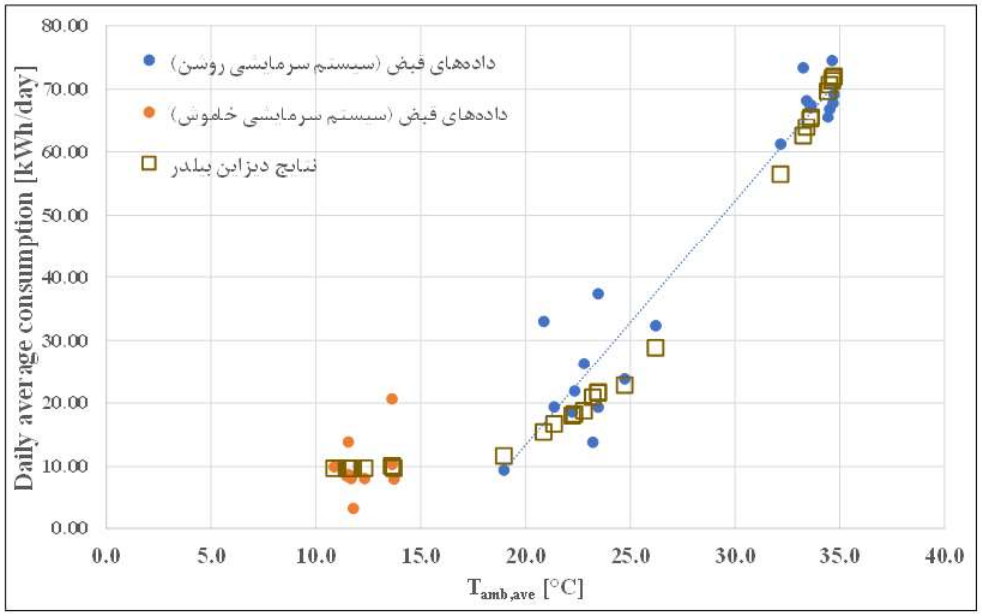
[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

کاهش برق موردنیاز سرمایش یکی از مسیرهای اصلی بررسی‌شده در این پژوهش است. سهم گزارش‌شده برای برق، مجموع مصارف سرمایشی و غیرسرمایشی ساختمان را دربر می‌گیرد. شدت مصرف انرژی ساختمان برابر با ۱۵۷/۱۳ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال به دست آمد. مطابق حدود پیوست سوم ویرایش پنجم مبحث نوزدهم برای ساختمان‌های مسکونی با زیربنای کمتر یا مساوی ۳۰۰۰ مترمربع در پهنه اقلیمی 2A، این مقدار بین حدود بالای رده‌های C و D به‌ترتیب ۱۲۸ و ۱۷۱ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال، قرار دارد؛ ازاین‌رو، رده انرژی ساختمان D تعیین شد [۱۶]. شاخص R برابر با ۳/۶۵ بود که فاصله قابل‌توجه عملکرد ساختمان از حد بالای رده A را نشان می‌دهد. دستیابی به این مرز به حدود ۷۲/۶ درصد کاهش مصرف نیاز دارد. بااین‌حال، ارزش اقدامات اصلاحی تنها به تغییر رده انرژی محدود نیست و کاهش مصرف برق سرمایشی و تقاضای الکتریکی در ساعات گرم، حتی بدون دستیابی به رده A، از نتایج مهم مورد بررسی است.

۳-۲- ارزیابی انطباق مدل پایه با داده‌های واقعی

شکل ۴ متوسط مصرف روزانه برق واقعی و شبیه‌سازی‌شده را در دوره‌های قرائت قبوض، برحسب میانگین دمای هوای خارج نشان می‌دهد. با افزایش دما و فعال‌شدن تجهیزات سرمایشی، مصرف برق افزایش یافت و مدل نیز این روند را بازتولید کرد. پراکندگی بیشتر داده‌های واقعی می‌تواند ناشی از تغییرات حضور ساکنان، دمای تنظیم، مدت کار تجهیزات، بازشدن پنجره‌ها و شرایط تابش و باد باشد؛ عواملی که در مدل با برنامه‌های زمانی و فرضیات مشخص بازنمایی شده‌اند.

شاخص CV(RMSE) برای مقایسه متوسط‌های روزانه مصرف برق در دوره‌های قرائت برابر با ۲۲/۶۸ درصد به دست آمد. این شاخص، اختلاف مقادیر مصرف پیش‌بینی‌شده با داده‌های واقعی را بیان می‌کند. برای بررسی حساسیت حرارتی ساختمان به دمای محیط نیز ضریب بار مؤثر به‌صورت مستقل محاسبه شد. در این محاسبه، برق واقعی منتسب به سرمایش با استفاده از ضریب عملکرد متناظر با میانگین دمای هر دوره به انرژی حرارتی معادل تبدیل و با خروجی حرارتی مدل مقایسه شد. بنابراین، خط نقطه‌چین شکل ۴ صرفاً روند مصرف برق واقعی را نمایش می‌دهد و مبنای استخراج ضریب بار مؤثر نیست. ضریب بار مؤثر حاصل از داده‌های واقعی و شبیه‌سازی به‌ترتیب ۵۵۸/۹۴ و ۵۳۰/۳۵ وات بر کلوین بود. در نتیجه، مدل حساسیت بار سرمایشی به افزایش دمای محیط را ۲۸/۵۹ وات بر کلوین، معادل ۵/۱۲ درصد، کمتر برآورد کرد. مقادیر ویژه این ضریب نیز به‌ترتیب ۳/۸۳ و ۳/۶۳ وات بر مترمربع کلوین به دست آمد. نتایج کمی ارزیابی در جدول ۷ ارائه شده‌اند.



شکل ۴- مقایسه تغییرات متوسط مصرف روزانه برق واقعی و شبیه‌سازی‌شده برحسب میانگین دمای هوای خارج.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

جدول ۷- شاخص‌های ارزیابی انطباق مدل با داده‌های واقعی.

شاخص	داده‌های واقعی	شبیه‌سازی	اختلاف یا نتیجه مقایسه
ضریب بار مؤثر (BLC_{eff})	۵۵۸/۹۴	۵۳۰/۳۵	۲۸/۵۹
ضریب بار مؤثر ویژه	۳/۸۳	۳/۶۳	۰/۲۰
اختلاف نسبی ضریب بار مؤثر	–	–	۵/۱۲ درصد
متوسط مصرف روزانه در دوره‌های قرائت CV(RMSE)	–	–	۲۲/۶۸ درصد

ضریب بار مؤثر، حساسیت حرارتی حاصل از مجموع انتقال حرارت اجزای ساختمان، دریافت خورشیدی، نفوذ هوا، جرم حرارتی و شرایط بهره‌برداری را منعکس می‌کند. نزدیکی ضرایب واقعی و شبیه‌سازی‌شده نشان می‌دهد که مدل، با وجود اختلاف در مقادیر مصرف دوره‌ها، روند تغییر بار سرمایشی با دمای محیط را با اختلاف محدودی بازتولید کرده است. این نتیجه، مبنای استفاده از مدل برای مقایسه نسبی راهکارها تحت شرایط اقلیمی و بهره‌برداری یکسان قرار گرفت. دامنه این ارزیابی به داده‌های قبوض و پاسخ حرارتی وابسته به دما محدود است و به معنای تأیید دقت پیش‌بینی مصرف در تک‌تک ساعات سال نیست

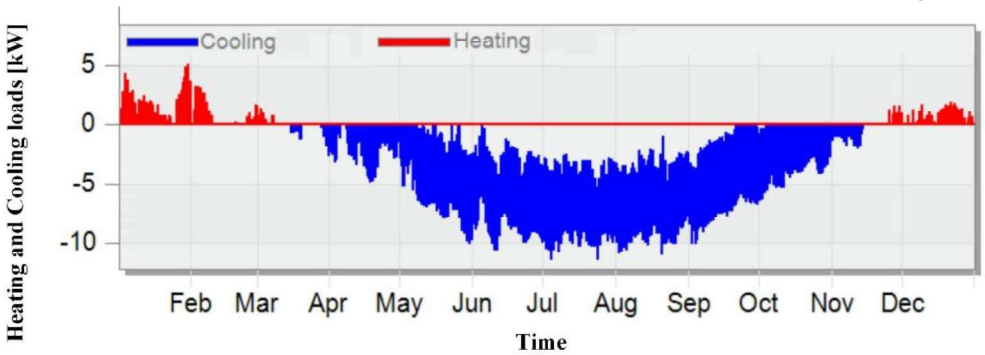
۳-۳- تحلیل بار سرمایشی ساختمان پایه

شکل ۵ تغییرات ساعتی بارهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان پایه را نشان می‌دهد. مطابق قرارداد علامت نرم‌افزار، بار سرمایشی منفی و بار گرمایشی مثبت نمایش داده شده است؛ بااین‌حال، مقادیر سرمایشی در متن و جداول به‌صورت قدرمطلق گزارش می‌شوند. حداکثر بار سرمایشی حرارتی ساختمان در تاریخ ۱۳ تیر ۱۴۰۵ ساعت ۱۳:۰۰ برابر با ۱۰/۹۰ کیلووات بود و توان الکتریکی کل ساختمان در همان ساعت، با احتساب مصارف سرمایشی و غیرسرمایشی، ۷/۳۰ کیلووات محاسبه شد. در این تحقیق، این ساعت، مبنای مقایسه بیشترین تقاضای الکتریکی در نظر گرفته می‌شود.

برای شناسایی عوامل ایجادکننده پیک سرمایشی، مؤلفه‌های تراز حرارتی ساختمان در ساعت مرجع استخراج و در جدول ۸ ارائه شدند. سهم هر مؤلفه نسبت به مجموع دریافت‌های حرارتی مثبت، برابر با ۱۵/۵۳ کیلووات، محاسبه شد. کف در تماس با زمین و دیوارهای داخلی در این ساعت اثر کاهنده بر بار سرمایشی داشتند و در محاسبه درصدهای جدول وارد نشدند، اما اثر آن‌ها در تراز حرارتی نهایی ساختمان لحاظ شد.

جدول ۸- سهم مؤلفه‌های مختلف از دریافت‌های حرارتی مثبت در ساعت وقوع پیک سرمایشی.

رتبه	مؤلفه بار حرارتی	بار حرارتی (kW)	سهم از دریافت حرارتی مثبت (٪)
۱	دریافت مستقیم خورشیدی از پنجره‌ها	۵/۳۹	۳۴/۷
۲	نفوذ هوای خارج	۲/۹۶	۱۹/۱
۳	انتقال حرارت هدایتی از پنجره‌ها	۲/۲۳	۱۴/۴
۴	انتقال حرارت از سقف	۱/۷۱	۱۱/۰
۵	انتقال حرارت از دیوارهای خارجی	۱/۴۸	۹/۵
۶	تجهیزات الکتریکی	۰/۹۵	۶/۱
۷	روشنایی	۰/۴۶	۳/۰
۸	حضور ساکنان	۰/۳۵	۲/۳
--	مجموع دریافت‌های حرارتی مثبت	۱۵/۵۳	۱۰۰



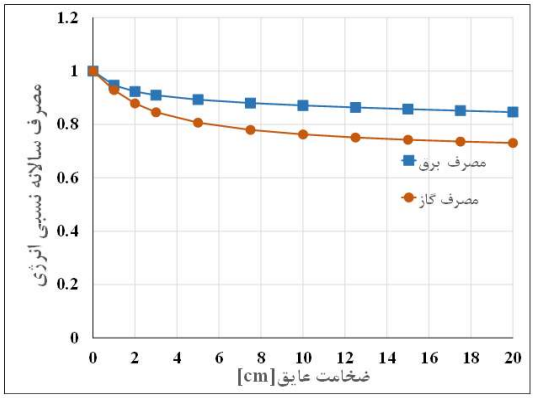
شکل ۵- تغییرات ساعتی بارهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان پایه در طول سال.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

دریافت خورشیدی و انتقال هدایتی پنجره‌ها در مجموع ۷/۶۲ کیلووات، معادل ۴۹/۱ درصد از دریافت‌های حرارتی مثبت، را تشکیل دادند. دریافت خورشیدی به‌تنهایی بیش از دو برابر انتقال هدایتی پنجره‌ها بود. بنابراین، ارزیابی اثر تعویض پنجره باید علاوه بر ضریب انتقال حرارت، تغییر ضریب کسب حرارت خورشیدی را نیز دربر گیرد. سهم بالای پنجره‌ها نشان‌دهنده اهمیت آن‌ها در ایجاد بار است، اما میزان کاهش قابل‌دستیابی به مشخصات پنجره جایگزین وابسته خواهد بود. نفوذ هوای خارج با سهم ۱۹/۱ درصد، پس از دریافت مستقیم خورشیدی، بزرگ‌ترین مؤلفه دریافت حرارت بود. این نتیجه اهمیت هوابندی ساختمان را نشان می‌دهد. بااین‌حال، چون نرخ نفوذ هوا در سناریوهای بررسی‌شده ثابت ماند، نتایج تعویض پنجره شامل منفعت احتمالی بهبود درزبندی نیست. سقف و دیوارهای خارجی به‌ترتیب ۱۱/۰ و ۹/۵ درصد از دریافت‌های حرارتی مثبت را ایجاد کردند. سهم کمتر دیوارها در ساعت پیک، به‌تنهایی معیار کافی برای ارزیابی عایق‌کاری نیست. زیرا عملکرد این اقدام به میزان کاهش انتقال حرارت و تداوم آن در طول فصل سرمایش نیز وابسته است. در مجموع، پنجره‌ها، سقف و دیوارهای خارجی ۶۹/۶ درصد از دریافت‌های مثبت را تشکیل دادند و با احتساب نفوذ هوا، این سهم به ۸۸/۷ درصد رسید. سهم بارهای داخلی نیز حدود ۱۱/۳ درصد بود. بنابراین، در ساعت مورد بررسی، دریافت حرارت عمدتاً به تبادل ساختمان با محیط خارج وابسته بود. کف در تماس با زمین و دیوارهای داخلی به‌ترتیب با مؤلفه‌های منفی ۴/۳۹ و ۰/۳۵ کیلووات، اثر کاهنده بر بار سرمایشی داشتند. این مؤلفه‌ها در درصدهای جدول ۸ وارد نشده‌اند، اما در تراز حرارتی مدل لحاظ شده‌اند. نتایج این تحلیل، زمینه بررسی دو اقدام عایق‌کاری دیوارها و تعویض پنجره‌ها و مقایسه میزان کاهش بار حاصل از آن‌ها را فراهم می‌کند.

۳-۴- تحلیل بار سرمایشی ساختمان پایه

شکل ۶ تغییرات مصرف نسبی سالانه برق سرمایشی و گاز گرمایشی را برحسب ضخامت عایق دیوارهای خارجی نشان می‌دهد. مقادیر هر سناریو نسبت به ساختمان بدون عایق بیان شده‌اند و مقدار ساختمان پایه برابر با یک است. افزودن عایق با محدودکردن انتقال حرارت از دیوارها در تابستان و کاهش اتلاف حرارت در زمستان، مصرف هر دو حامل را کاهش داد. بیشترین آهنگ کاهش مصرف در ضخامت‌های ابتدایی مشاهده شد و با افزایش ضخامت، صرفه‌جویی حاصل از افزودن عایق بیشتر به‌تدریج محدود شد. عایق ۱ سانتی‌متری مصرف سالانه برق سرمایشی را حدود ۵/۳ درصد کاهش داد. این کاهش در ضخامت ۳ سانتی‌متر به حدود ۹/۱ درصد رسید و برای ضخامت‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر به‌ترتیب برابر با ۱۰/۷۳، حدود ۱۲/۹ و ۱۵/۴ درصد بود. عایق ۳ سانتی‌متری حدود ۵۹ درصد از کاهش مصرف برق سرمایشی حاصل از ضخامت ۲۰ سانتی‌متر را تأمین کرد. افزایش ضخامت از ۳ به ۵ سانتی‌متر، حدود ۱/۶ واحد درصد و افزایش آن از ۳ به ۲۰ سانتی‌متر، حدود ۶/۳ واحد درصد به کاهش مصرف نسبت به ساختمان پایه افزود. بنابراین، ضخامت‌های بیشتر همچنان موجب صرفه‌جویی می‌شوند، اما میزان کاهش اضافی مصرف باید در کنار هزینه افزایش ضخامت بررسی شود. مصرف گاز گرمایشی نیز با افزایش ضخامت عایق کاهش یافت. بااین‌حال، به‌دلیل سهم اندک گاز در مصرف اولیه ساختمان، مقایسه درصدهای کاهش دو حامل به‌تنهایی بیانگر اهمیت انرژی و اقتصادی آن‌ها نیست.

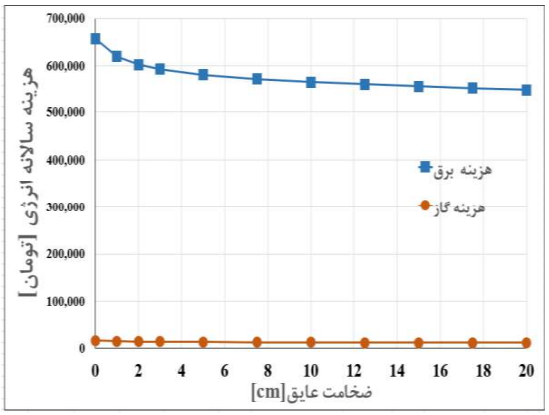


شکل ۶- تأثیر ضخامت عایق دیوارهای خارجی بر مصرف نسبی سالانه برق و گاز.

شکل ۷ تغییرات هزینه سالانه برق و گاز را با افزایش ضخامت عایق نشان می‌دهد. مجموع صرفه‌جویی سالانه هزینه برق و گاز در ضخامت ۳ سانتی‌متر برابر با ۶۷۲۳۴ تومان بود. بخش اصلی منفعت مالی عایق‌کاری از کاهش برق سرمایشی حاصل شد، درحالی‌که کاهش مصرف گاز، به‌دلیل محدودبودن نیاز گرمایشی ساختمان، سهم کمتری در نتیجه اقتصادی داشت. بنابراین، اثر زمستانی عایق‌کاری در این ساختمان مثبت است، اما ارزیابی اقتصادی آن عمدتاً تحت تأثیر صرفه‌جویی برق قرار دارد. عایق‌کاری علاوه بر مصرف سالانه،

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

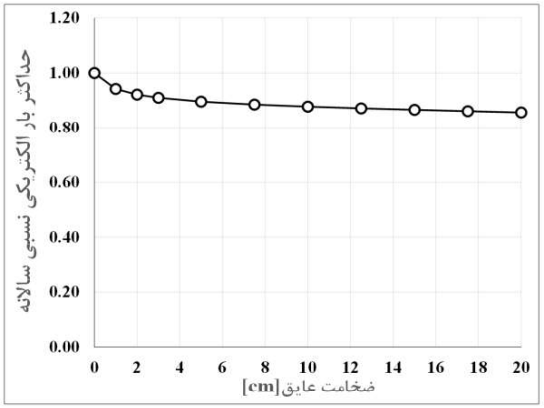
تقاضای الکتریکی در ساعت مرجع پیک سرمایش را نیز کاهش داد.



شکل ۷- تأثیر ضخامت عایق دیوارهای خارجی بر صرفه‌جویی سالانه هزینه برق و گاز.

شکل ۸ تغییرات توان الکتریکی نسبی ساختمان را در این ساعت مشترک نشان می‌دهد. مشابه روند مصرف سالانه، کاهش تقاضا در ضخامت‌های ابتدایی سریع‌تر بود و با افزایش ضخامت، مقدار کاهش اضافی محدودتر شد.

توان الکتریکی ساختمان پایه در ساعت مرجع برابر با ۷/۳۰کیلووات بود. با افزودن عایق ۳ سانتی‌متری، نسبت توان به حالت پایه به حدود ۰/۹۱ رسید که بیانگر حدود ۹ درصد کاهش تقاضاست. براساس این نسبت گردشده، توان ساختمان به حدود ۶/۶۴ کیلووات کاهش یافت و کاهش مطلق تقاضا حدود ۰/۶۶ کیلووات بود. در ضخامت ۲۰ سانتی‌متر، توان الکتریکی به ۶/۲۵ کیلووات رسید که معادل ۱/۰۵ کیلووات یا حدود ۱۴/۴ درصد کاهش نسبت به ساختمان پایه است. بر این اساس، عایق ۳ سانتی‌متری تقریباً ۶۳ درصد از کاهش تقاضای حاصل از ضخامت ۲۰ سانتی‌متری را فراهم کرد. افزایش ضخامت از ۳ به ۲۰ سانتی‌متر حدود ۰/۳۹ کیلووات کاهش اضافی در توان الکتریکی ایجاد کرد. این نتیجه نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از کاهش تقاضا با افزودن لایه نسبتاً نازک عایق حاصل می‌شود، درحالی‌که دستیابی به کاهش بیشتر، به افزایش ضخامت و هزینه اجرا نیاز دارد. اثر عایق‌کاری بر بار کل ساختمان به سهم انتقال حرارت دیوارها محدود است و دریافت خورشیدی پنجره‌ها، انتقال حرارت از سایر اجزا، نفوذ هوا و بارهای داخلی همچنان در ایجاد بار سرمایشی نقش دارند. همچنین، مصارف الکتریکی غیرسرمایشی در سناریوها ثابت ماندند. ازاین‌رو، کاهش انتقال حرارت دیوارها به همان نسبت موجب کاهش بار سرمایشی یا توان الکتریکی کل ساختمان نمی‌شود. ضریب عملکرد تجهیزات نیز در ساعت مشترک، به‌دلیل یکسان‌بودن دمای هوای خارج و رابطه محاسباتی، در همه سناریوها یکسان بود. نتایج نشان داد که عایق ۳ سانتی‌متری مصرف سالانه برق سرمایشی و تقاضای الکتریکی در ساعت مرجع را هر دو حدود ۹ درصد کاهش می‌دهد. برای انتخاب ضخامت مورد استفاده در مقایسه نهایی با پنجره دوجداره، در بخش بعد این دستاوردهای فنی در کنار هزینه اجرا و دوره بازگشت سرمایه بررسی می‌شوند.



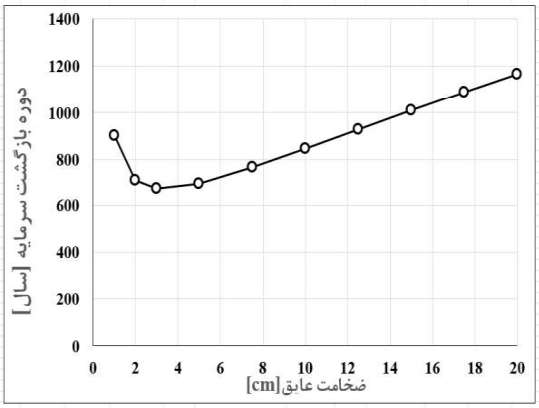
شکل ۸- تأثیر ضخامت عایق دیوارهای خارجی بر حداکثر توان الکتریکی نسبی ساختمان.

۳-۵- ارزیابی اقتصادی ضخامت‌های عایق و انتخاب ضخامت

برای بررسی تناسب هزینه اجرا با صرفه‌جویی حاصل از افزایش ضخامت، دوره بازگشت ساده سرمایه برای تمام ضخامت‌های عایق محاسبه شد. مطابق شکل ۹، دوره بازگشت ابتدا کاهش یافت و در ضخامت ۳ سانتی‌متر به کمترین مقدار، حدود ۶۷۵ سال، رسید. پس از این ضخامت، روند افزایشی شد؛ به‌طوری‌که مقدار متناظر برای عایق ۵ سانتی‌متری حدود ۶۹۶ سال بود. این روند حاصل اثر هم‌زمان ساختار هزینه اجرا و کاهش تدریجی صرفه‌جویی اضافی است. در ضخامت‌های کم، هزینه ثابت اجرا و پوشش نهایی سهم قابل‌توجهی از سرمایه‌گذاری را تشکیل می‌دهد. افزایش ضخامت در این محدوده، بدون تغییر این بخش از هزینه، صرفه‌جویی را به‌اندازه‌ای افزایش می‌دهد که دوره بازگشت کاهش می‌یابد. در ضخامت‌های بیشتر، افزایش هزینه مصالح با رشد متناسب صرفه‌جویی همراه نیست و دوره بازگشت طولانی‌تر می‌شود. عایق ۳ سانتی‌متری با هزینه اجرای حدود ۴۵/۴ میلیون تومان، سالانه ۶۷۲۳۴ تومان صرفه‌جویی در هزینه برق و گاز

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

ایجاد کرد. این ضخامت، ضمن کاهش حدود ۹/۱ درصدی مصرف برق سرمایشی و حدود ۹ درصدی تقاضای الکتریکی در ساعت مرجع، کمترین دوره بازگشت را در میان ضخامت‌های بررسی‌شده داشت. بنابراین، ضخامت ۳ سانتی‌متر براساس معیار دوره بازگشت ساده برای مقایسه نهایی با پنجره دوجداره انتخاب شد. بااین‌حال، حتی کمترین دوره بازگشت نیز بسیار بیشتر از عمر مفید عایق‌کاری بود. در نتیجه، انتخاب ضخامت ۳ سانتی‌متر بیانگر مناسب‌ترین نسبت هزینه اولیه به صرفه‌جویی مالی سالانه در میان ضخامت‌های بررسی‌شده است و تحت تعرفه‌های مورد استفاده، به معنای جذابیت سرمایه‌گذاری صرفاً از محل کاهش قبوض نیست. در ادامه، عملکرد این ضخامت و پنجره دوجداره از نظر مصرف انرژی، کاهش تقاضای برق و هزینه مقایسه می‌شود.



شکل ۹– تغییرات دوره بازگشت ساده سرمایه برحسب ضخامت عایق دیوارهای خارجی.

۳-۶- مقایسه عملکرد عایق ۳ سانتی‌متری و پنجره دوجداره

پس از انتخاب ضخامت عایق، عملکرد عایق‌کاری ۷۶/۵ مترمربع دیوار خارجی با تعویض حدود ۲۷/۵ مترمربع پنجره تک‌جداره مقایسه شد. عایق ۳ سانتی‌متری مصرف سالانه برق سرمایشی را حدود ۹/۱ درصد کاهش داد، درحالی‌که کاهش متناظر برای پنجره دوجداره ۷/۴۵ درصد بود. بنابراین، عایق‌کاری حدود ۱/۶۵ واحد درصد کاهش بیشتری در مصرف برق سرمایشی ایجاد کرد که معادل حدود ۲۲ درصد صرفه‌جویی بیشتر نسبت به تعویض پنجره‌هاست. تقاضای الکتریکی دو سناریو در ساعت مرجع پیک سرمایش تقریباً برابر بود. نسبت توان به ساختمان پایه برای هر دو راهکار حدود ۰/۹۱ به دست آمد که بیانگر حدود ۹ درصد کاهش تقاضاست. با توجه به توان ۷/۳۰ کیلوواتی ساختمان پایه، توان پس از اجرای هر راهکار حدود ۶/۶۴ کیلووات و کاهش آن حدود ۰/۶۶ کیلووات بود. نتایج اصلی در جدول ۹ ارائه شده‌اند.

جدول ۹– مقایسه عملکرد عایق ۳ سانتی‌متری و پنجره دوجداره.

شاخص	عایق ۳ سانتی‌متری	پنجره دوجداره
کاهش مصرف سالانه برق سرمایشی	۹/۱ درصد	۷/۴۵ درصد
نسبت توان الکتریکی به حالت پایه در ساعت مرجع	۰/۹۱	۰/۹۱
توان الکتریکی در ساعت مرجع	۶/۶۴ کیلووات	۶/۶۴ کیلووات
کاهش توان الکتریکی در ساعت مرجع	۰/۶۶ کیلووات	۰/۶۶ کیلووات
کاهش نسبی توان الکتریکی در ساعت مرجع	۹ درصد	۹ درصد

این مقایسه نشان می‌دهد که کاهش مصرف سالانه و کاهش تقاضا در ساعت مرجع، الزاماً به یک رتبه‌بندی یکسان منجر نمی‌شوند. عایق‌کاری در طول سال برق سرمایشی بیشتری ذخیره کرد، اما در ساعت مورد بررسی، اثر دو راهکار بر توان دریافتی از شبکه نزدیک بود. بنابراین، بررسی مستقل این دو شاخص برای انتخاب اقدام مناسب ضروری است. صرفه‌جویی بیشتر عایق‌کاری در حالی حاصل شد که پنجره‌ها در ساختمان پایه، ۴۹/۱ درصد از دریافت‌های حرارتی مثبت ساعت پیک را تشکیل می‌دادند. بخش عمده این دریافت، ناشی از تابش خورشیدی بود و میزان کاهش آن با تعویض پنجره به مشخصات خورشیدی شیشه جایگزین وابسته است. دوجداره‌شدن پنجره، حتی با کاهش انتقال هدایتی، تمام بار مرتبط با سطوح شفاف را حذف نمی‌کند. در مقابل، عایق‌کاری انتقال حرارت از دیوارهای خارجی را در طول دوره سرمایش محدود می‌کند. ازاین‌رو، سهم اولیه یک جزء در دریافت حرارت به‌تنهایی تعیین‌کننده میزان صرفه‌جویی حاصل از اصلاح آن نیست. نتایج پنجره دوجداره به مجموعه شیشه و قاب انتخاب‌شده و فرض ثابت‌بودن نفوذ هوا مربوط است. منفعت احتمالی بهبود درزبندی در این مقایسه منظور نشده است. بنابراین، نتیجه حاضر مبنای مقایسه دو سناریوی تعریف‌شده در ساختمان مورد مطالعه است و عملکرد سایر انواع شیشه یا تعویض پنجره همراه با بهبود هوابندی را بیان نمی‌کند.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

۳-۷- مقایسه اقتصادی عایق ۳ سانتی‌متری و پنجره دوجداره

هزینه اجرای عایق ۳ سانتی‌متری حدود ۴۵/۴ میلیون تومان و هزینه تأمین و نصب پنجره دوجداره حدود ۷۱/۵ میلیون تومان برآورد شد (جدول ۱۰). بنابراین، هزینه اولیه عایق‌کاری حدود ۳۶/۶ درصد کمتر بود. در مقابل، مجموع صرفه‌جویی سالانه هزینه برق و گاز برای عایق‌کاری ۶۷۲۳۴ تومان و برای پنجره دوجداره ۵۳۶۴۴ تومان به دست آمد. در نتیجه، عایق‌کاری حدود ۲۵/۳ درصد صرفه‌جویی مالی بیشتری ایجاد کرد. دوره بازگشت ساده عایق‌کاری حدود ۶۷۵ سال و برای پنجره دوجداره حدود ۱۳۳۳ سال بود. هزینه کمتر و صرفه‌جویی بیشتر عایق‌کاری موجب شد دوره بازگشت آن حدود ۴۹/۴ درصد کوتاه‌تر باشد. بااین‌حال، هر دو مقدار بسیار بیشتر از عمر مفید اقدامات هستند و تحت تعرفه‌های مورد استفاده، صرفه‌جویی قبوض به‌تنهایی انگیزه مالی کافی برای اجرای آن‌ها فراهم نمی‌کند.

جدول ۱۰- مقایسه اقتصادی عایق ۳ سانتی‌متری و پنجره دوجداره.

شاخص	واحد	عایق ۳ سانتی‌متری	پنجره دوجداره
هزینه اولیه اجرا	میلیون تومان	۴۵/۴	۷۱/۵
مجموع صرفه‌جویی مالی سالانه	تومان در سال	۶۷۲۳۴	۵۳۶۴۴
دوره بازگشت ساده	سال	۶۷۵	۱۳۳۳
کاهش توان الکتریکی در ساعت مرجع	کیلووات	۰/۶۶	۰/۶۶
هزینه سرمایه‌گذاری به‌ازای کاهش تقاضا	میلیون تومان بر کیلووات	۶۹	۱۰۸

با توجه به کاهش تقریباً یکسان توان در دو سناریو، تفاوت هزینه اجرا در شاخص سرمایه‌گذاری به‌ازای کاهش تقاضا نیز منعکس شد. هزینه دستیابی به هر کیلووات کاهش توان در ساعت مرجع برای عایق‌کاری حدود ۶۹ میلیون تومان و برای پنجره دوجداره حدود ۱۰۸ میلیون تومان بود. این مقادیر با استفاده از کاهش توان تقریبی محاسبه شده‌اند و نشان می‌دهند که عایق‌کاری در مقایسه حاضر، کاهش مشابهی در تقاضای برق را با سرمایه‌گذاری حدود ۳۶ درصد کمتر فراهم می‌کند. بنابراین، مزیت عایق ۳ سانتی‌متری نسبت به پنجره دوجداره، در ترکیب هزینه اولیه کمتر، صرفه‌جویی سالانه بیشتر و کاهش تقریباً یکسان تقاضای الکتریکی قرار دارد. این نتیجه، عایق‌کاری دیوارهای فاقد عایق را در میان دو اقدام بررسی‌شده، برای ساختمان‌های مشابه در اولویت قرار می‌دهد.

۳-۸- اهمیت نتایج برای کاهش فشار بر شبکه برق

کاهش مصرف سالانه برق، هزینه انرژی خانوار را کاهش می‌دهد، درحالی‌که کاهش توان موردنیاز تجهیزات سرمایشی در ساعات گرم، از نظر ظرفیت موردنیاز شبکه اهمیت دارد. نتایج این مطالعه نشان داد که عایق‌کاری ۳ سانتی‌متری و نصب پنجره دوجداره هر دو می‌توانند تقاضای الکتریکی ساختمان را در ساعت مرجع حدود ۹ درصد کاهش دهند. در صورت گسترش این اقدامات در ساختمان‌های مشابه، کاهش هم‌زمان تقاضای سرمایشی می‌تواند به محدودکردن فشار بر شبکه و نیاز به توسعه ظرفیت تولید برای ساعات اوج کمک کند. مقایسه اقتصادی نشان داد که دستیابی به این کاهش تقاضا با عایق‌کاری، سرمایه‌گذاری کمتری نیاز دارد. ازاین‌رو، در برنامه‌های حمایتی، هزینه هر کیلووات کاهش تقاضا می‌تواند در کنار میزان صرفه‌جویی سالانه، مبنای اولویت‌بندی اقدامات باشد. با توجه به طولانی‌بودن دوره بازگشت برای مالک، حمایت از بخشی از هزینه اجرا، تسهیلات مالی و اجرای مؤثر الزامات عایق‌کاری می‌تواند زمینه مشارکت مالکان را فراهم کند. اثر شبکه‌ای این اقدامات به اجرای آن‌ها در ساختمان‌های متعدد و هم‌زمانی کاهش تقاضا با ساعات اوج شبکه وابسته است. یافته این پژوهش، کاهش توان در ساعت مرجع ساختمان و هزینه دستیابی به آن است. مقایسه اقتصادی این اقدام با احداث نیروگاه یا توسعه شبکه نیز به اطلاعات هزینه و عملکرد آن گزینه‌ها نیاز دارد. حمایت از عایق‌کاری ساختمان‌ها می‌تواند علاوه بر کاهش برق مصرفی سرمایش و فشار بر شبکه در تابستان، مصرف گاز گرمایشی را در زمستان نیز محدود کند. هرچند سهم گرمایش در ساختمان مورد مطالعه اندک بود، این اثر مکمل نشان می‌دهد که ارزیابی و حمایت از اصلاح ساختمان‌ها باید هر دو منفعت تابستانی و زمستانی را دربر گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر عایق‌کاری دیوارهای خارجی و نصب پنجره‌های دوجداره بر مصرف انرژی و تقاضای برق یک ساختمان مسکونی در اقلیم گرم گچساران ارزیابی شد. غلبه‌ی بار سرمایشی در این اقلیم نشان می‌دهد که کاهش انتقال

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

حرارت از پوسته، مسیری مؤثر برای کاهش مصرف برق سرمایشی و تقاضای پیک در ساعات اوج تابستان است. موضوعی که با توجه به سهم بالای کولرهای گازی در پیک شبکه، اهمیت ویژه‌ای دارد. بررسی ضخامت‌های مختلف عایق پلی‌استایرن نشان داد که هرچند افزایش ضخامت تا ۲۰ سانتی‌متر مصرف انرژی و تقاضای پیک را کاهش می‌دهد، صرفه‌جویی حاشیه‌ای به‌تدریج نزولی می‌شود. با تفکیک هزینه‌ی ثابت اجرا از هزینه‌ی وابسته به ضخامت، ضخامت ۳ سانتی‌متر با کمترین دوره‌ی بازگشت ساده، به‌عنوان گزینه‌ی منتخب برای مقایسه با پنجره‌ی دوجداره انتخاب شد. عایق ۳ سانتی‌متری مصرف سالانه‌ی برق سرمایشی را حدود ۹/۱ درصد کاهش داد، در حالی‌که پنجره‌ی دوجداره این کاهش را به ۷/۴۵ درصد رساند. در ساعت مرجع پیک سرمایش، هر دو راهکار تقاضای الکتریکی را حدود ۹ درصد (معادل ۰/۶۶ کیلووات) کاهش دادند. بنابراین، عایق‌کاری با هزینه‌ی کمتر، کاهش پیک مشابه و صرفه‌جویی سالانه‌ی بیشتری نسبت به پنجره دوجداره ارائه می‌دهد. از دیدگاه اقتصادی، هزینه‌ی اجرای عایق ۳ سانتی‌متری حدود ۴۵/۴ میلیون تومان و پنجره دوجداره حدود ۷۱/۵ میلیون تومان برآورد شد. صرفه‌جویی سالانه به‌ترتیب ۶۷۲۳۴ و ۵۳۶۴۴ تومان و دوره‌های بازگشت ساده حدود ۶۷۵ و ۱۳۳۳ سال محاسبه شد. این ارقام نشان می‌دهد که با تعرفه‌های فعلی انرژی، کاهش قبوض به‌تنهایی انگیزه‌ی کافی برای سرمایه‌گذاری مالکان فراهم نمی‌کند، هرچند عایق‌کاری از نظر هزینه‌ی اولیه، صرفه‌جویی سالانه و هزینه‌ی هر کیلووات کاهش پیک، بر پنجره دوجداره برتری دارد. ارزش اصلی این راهکارها در مقیاس فراتر از یک ساختمان نمایان می‌شود. اجرای گسترده‌ی عایق‌کاری در ساختمان‌های مسکونی مناطق گرمسیری می‌تواند با کاهش هم‌زمان تقاضای پیک، فشار بر شبکه را در ساعات بحرانی کاهش دهد، نیاز به خاموشی و محدودیت برق صنایع را محدود کند و مصرف گاز نیروگاه‌های حرارتی را کاهش دهد. در زمستان نیز کاهش بار گرمایشی ساختمان، مصرف مستقیم گاز را پایین آورده و به تأمین پایدارتر سوخت صنایع و نیروگاه‌ها و کاهش استفاده از سوخت‌های سنگین مانند مازوت کمک می‌کند. بر این اساس، عایق‌کاری ۳ سانتی‌متری دیوارهای خارجی، به‌دلیل هزینه‌ی کمتر و عملکرد فنی مناسب‌تر، در اولویت بالاتری نسبت به تعویض پنجره‌ها در ساختمان‌های مشابه قرار دارد. با توجه به طولانی‌بودن دوره‌ی بازگشت برای مالکان، تحقق این ظرفیت نیازمند حمایت دولت از طریق مشوق‌های مالی، تسهیلات کم‌بهره و الزامات مؤثر برای ساختمان‌های جدید و موجود است. چنین سیاستی می‌تواند به‌طور هم‌زمان مصرف برق تابستانی، مصرف گاز زمستانی و فشار ناشی از کمبود سوخت و ظرفیت تولید را کاهش دهد.

منابع

[1] United Nations Environment Programme (UNEP). Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025. Nairobi, Kenya: UNEP. 2025.

[2] International Energy Agency (IEA). The Future of Cooling. Paris, France: OECD/IEA. 2018. [DOI:10.1787/9789264301993-en]

[۳] خبرگزاری جمهوری اسلامی ایران (ایرنا). (۱۴۰۲، ۱۴ مرداد). مصرف برق با هر یک درجه افزایش دمای هوا چقدر افزایش می‌یابد.

[4] Associated Press. Iran orders a day of business and office closures to relieve electric grid in heat wave. 2025.

[5] Le Monde. In Iran, regular power and water outages disrupt daily life and economic activity. 2025 Aug 7.

[6] Ma Z, Cooper P, Daly D, Ledo L. Existing building retrofits—Methodology and state-of-the-art. Energy and Buildings. 2012; 55:889–902. [DOI:10.1016/j.enbuild.2012.08.018]

[7] U.S. Energy Information Administration (EIA). Iran Country Analysis Brief. Washington, DC: U.S. Department of Energy; 2024 Oct 10.

[۸] ماین نیوز. (۱۴۰۱، ۶ دی). صنعت سیمان حمایت می‌خواهد نه تهدید. کد خبر ۶۳۸۶۳.

[9] Asadi E, da Silva MG, Antunes CH, Dias L. Multi-objective optimization for building retrofit strategies—A model and an application. Energy and Buildings. 2012; 44:81–87. [DOI:10.1016/j.enbuild.2011.10.016]

[10] Fernandes J, Santos MC, Castro R. Introductory review of energy efficiency in buildings retrofits. Energies. 2021; 14(23):8100. [DOI:10.3390/en14238100]

[11] Krarti M, Aldubyan M. Peak demand-based optimization approach for building retrofits—Case study of Saudi residential buildings. Energy Efficiency. 2022; 15:69. [DOI:10.1007/s12053-022-10077-2]

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[12] Heravi G, Qaemi M. Energy performance of buildings—The evaluation of design and construction measures concerning building energy efficiency in Iran. Energy and Buildings. 2014; 75:456–464. [DOI:10.1016/j.enbuild.2014.02.035]

[13] Solgi E, Hamedani Z, Sherafat S, Fernando R, Aram F. The viability of energy auditing in countries with low energy cost—A case study of a residential building in cold climates. Designs. 2019; 3(3):42. [DOI:10.3390/designs3030042]

[14] Mohammadi A, Daraio JA. Improving the energy efficiency of existing residential buildings by applying passive and cost-effective solutions in the hot and humid region of Iran. Space Ontology International Journal. 2021; 9(4):77–96. [DOI:10.22094/soij.2020.680277]

[15] Hajizadeh S, Seyis S, Ashrafian T. Sustainable retrofit solutions for decreasing energy consumption and CO2 emission of a residential building in Tabriz, Iran. Proceedings of the Sixth Building Simulation and Optimisation Conference (BSO 2022). International Building Performance Simulation Association; 2022.

[۱۶] وزارت راه و شهرسازی، دفتر مقررات ملی و کنترل ساختمان. (۱۳۹۲). مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان، ویرایش پنجم، پیوست سوم. تهران: وزارت راه و شهرسازی.

[17] Liu J, Heidarinejad M, Khoshdel Nikkho S, Mattise NW, Srebric J. Quantifying impacts of urban microclimate on a building energy consumption—A case study. Sustainability. 2019; 11(18):4921. [DOI:10.3390/su11184921]

[۱۸] یوپی‌وی‌سی کالا. (۱۴۰۲). قیمت پنجره وین‌تک ۱۴۰۲، جزئیات هزینه تولید و نصب پنجره دوجداره UPVC.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]