Iranian Concrete Society

Reducing Energy Consumption by Using Foam Concrete in Building Flooring (A Case Study of a Residential Building in Tehran)

***Amir Sina Darabi*[*1], Mehdi Ravanshadnia[2]**

1- MSc in Construction Engineering and Management, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
amirsina.darabi@srbiau.ac.ir
2- Associate Professor and Faculty Member, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

***Received**:27 February 2025* ***Revised**:27 June 2025* ***Accepted**:01 July 2025*
Research paper

Abstract

In Iran, to provide cheaper energy to industry and society, a portion of the energy production costs is subsidized from public revenues. Furthermore, the waste of produced energy, in addition to significant financial losses, inflicts undeniable damage on the national and global environment. This research investigates the impact of various building materials on energy consumption by examining the amount of energy wasted in a 5-story residential building using DesignBuilder software. The results show that using foam concrete, as opposed to pumice, results in 789 kilowatt-hours less energy consumption (total electricity and gas consumption) per year. Additionally, using foam concrete instead of pumice can save 1% in annual energy costs.

Keywords: Energy, Foam Concrete, Pumice, DesignBuilder Software, Residential Building.

---

*Corresponding Author: Amir Sina Darabi
darabi A. S., ravanshadnia M. Reducing Energy Consumption by Using Foam Concrete in Building Flooring (A Case Study of a Residential Building in Tehran). J. Concr. Struct. Mater., 2024; 9(2): 67-86.
http://doi.org/10.30478/jcsm.2025.509246.1385
2538-5828/ © 2025The Authors. Published by Iranian Concrete Society
This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

انجمن علمی بتن ایران

کاهش مصرف انرژی با به‌کارگیری فوم‌بتن در کف‌سازی ساختمان (مطالعه موردی ساختمانی مسکونی در شهر تهران)

امیر سینا دارابی*[1]، مهدی روانشاد نیا[2]

۱. کارشناس ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دانشیار و عضو هیئت‌علمی گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران ۲.

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amirsina.darabi@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده:

در کشور ایران به‌منظور ارائه انرژی ارزان‌تر به صنعت و جامعه، بخشی از هزینه‌های تولید انرژی از محل درآمدهای عمومی تأمین می‌گردد. همچنین اتلاف انرژی تولید شده، علاوه بر خسارت مالی هنگفت، زیان‌های غیرقابل‌انکاری نیز بر محیط‌زیست ملی و جهانی وارد می‌کند. در این پژوهش باهدف بررسی تأثیر مصالح ساختمانی مختلف در میزان مصرف انرژی، میزان هدررفت انرژی در یک ساختمان مسکونی ۵ طبقه با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، بررسی شده است. نتایج نشان داده است که با استفاده از فوم بتن به نسبت استفاده از پوکه معدنی میزان ۷۸۹ کیلووات‌ساعت انرژی (مجموع مصرف برق و گاز) کمتری در سال مصرف شده است. هم چنین در صورت استفاده از فوم بتن به‌جای پوکه معدنی، در هر سال می‌توان ۱٪ در میزان هزینه انرژی صرفه‌جویی اقتصادی داشت.

کلیدواژه‌ها: انرژی، فوم بتن، پوکه معدنی، نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، ساختمان مسکونی.

۱. مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت شهرها در کشور باعث بالارفتن میزان ساخت‌وساز و فعالیت‌های ساختمانی شده است. صنعت ساخت‌وساز از منابع طبیعی متعددی استفاده و مقدار زیادی گازهای گلخانه‌ای تولید می‌کند. ازاین‌رو تأثیر به سزایی بر میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در کشور ایران دارد. از سوی دیگر دولت ایران با تأمین بخشی از هزینه‌های تولید انرژی از محل درآمدهای عمومی و به قیمت عدم انجام بسیاری از پروژه‌های عمرانی، انرژی را با قیمت کمتری نسبت به قیمت جهانی آن در اختیار مردم می‌گذارد. همچنین اتلاف انرژی تولید شده از منابع فسیلی و تجدیدناپذیر، علاوه بر خسارت مالی هنگفت، زیان‌های غیرقابل‌انکاری نیز بر محیط‌زیست ملی و جهانی وارد می‌کند.

تدوین معیار مصرف انرژی، یکی از مهم‌ترین اقدامات مدیریت مصرف جهت تعیین چارچوب مناسب برای اعمال قوانین، دستورالعمل‌ها و پیش‌بینی‌های مربوط به تقاضا و برنامه‌ریزی جهت تولید انرژی است. در اواخر سال ۱۳۹۰ طرح تدوین برچسب انرژی برای ساختمان‌های با کاربری اداری انجام پذیرفت و این استاندارد با نام تعیین معیار مصرف انرژی و دستورالعمل برچسب انرژی در ساختمان‌های غیرمسکونی به شماره ۱۴۲۵۴ به ثبت رسید. ازآنجایی‌که در کشورهای درحال‌توسعه بیش از ۴۰ درصد از کل مصرف انرژی متعلق به بخش ساختمان است، متناسب با ظهور فناوری‌های مختلف، پیچیدگی‌های اجرایی نیز افزایش‌یافته و تصمیم‌گیری در مورد انتخاب بهترین استراتژی‌ها و راهکارهای کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها اهمیت بیشتری پیدا کرده است. از سویی، تعامل بین عناصر طراحی، اقلیم، کاربران، سیستم‌های سرمایش، گرمایش، تهویه و روشنایی بسیار دشوار بوده و تنها با استفاده از شبیه‌سازی تمامی عوامل مداخله‌گر در کارایی انرژی ساختمان قابل‌بررسی است [۱].

در دهه‌های آینده، با احتمال افزایش هزینه انرژی برای گرمایش و سرمایش و روشنایی و نیروی محرک در فرایند تولید صنعتی، سازمان‌ها، منازل و غیره، در عرصه رقابت جهانی در راستای مصرف بهینه و تولید هرچه بیشتر انرژی، کشورهایی موفق خواهند بود که در این رقابت با تحقیق و مطالعه موفق به یافتن و سپس به‌کارگیری راه‌های جلوگیری از اتلاف انرژی شوند. یکی از راهکارهای رویارویی با این مشکل، کاهش مصرف انرژی است.

۲. ضرورت انجام تحقیق

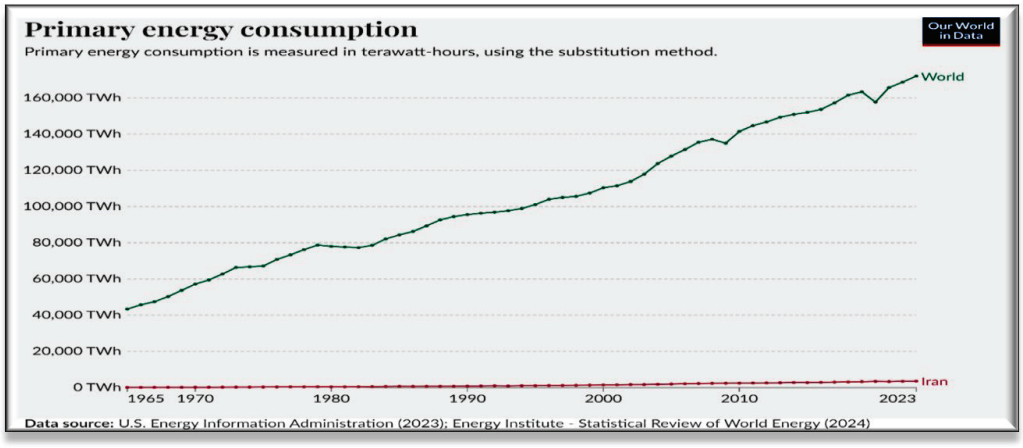
مصرف انرژی در جهان هر چند که در برخی سال‌ها نزولی بوده؛ ولی درکل روندی صعودی داشته و در سال ۲۰۲۳ به ۱۷۲۱۱۹ تریلیون وات‌ساعت رسیده است. در ایران مصرف انرژی در سال ۲۰۲۳ به میزان ۳۵۳۱ تریلیون وات‌ساعت رسیده است. این روند در شکل شماره ۱ نشان داده شده است. هرگاه این مقدار مصرف انرژی را بر جمعیت تقسیم کنیم، وضعیت وخیم کشور ایران واضح‌ترمی‌شود.

میزان متوسط مصرف انرژی برای هر نفر در جهان ۲۱۳۹۴ کیلووات‌ساعت و در آسیا این عدد به ۱۹۲۳۹ کیلووات‌ساعت کاهش می‌یابد. در حالیکه متوسط مصرف انرژی برای هر نفر در ایران ۳۹۵۹۹ کیلووات‌ساعت است. شکل شماره ۲ این موضوع را نشان می‌دهد.

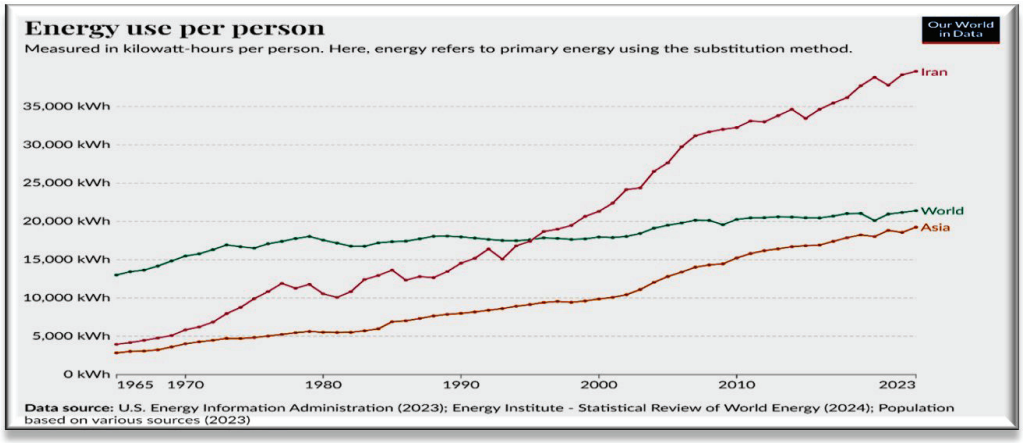
شدت انرژی به‌عنوان مصرف انرژی اولیه به‌ازای هر واحد تولید ناخالص داخلی[1]، بر حسب کیلووات‌ساعت در هر دلار اندازه‌گیری می‌شود. تولید ناخالص داخلی باتوجه‌به تورم و تفاوت در هزینه‌های زندگی بین کشورها تنظیم می‌شود. در سال ۲۰۲۲ متوسط جهانی شدت انرژی ۱/۳ کیلووات‌ساعت و در ایران ۲/۲۱ کیلووات‌ساعت بوده است. در شکل شماره ۳ نشان داده شده است.

[1] (GDP) Gross Domestic Product

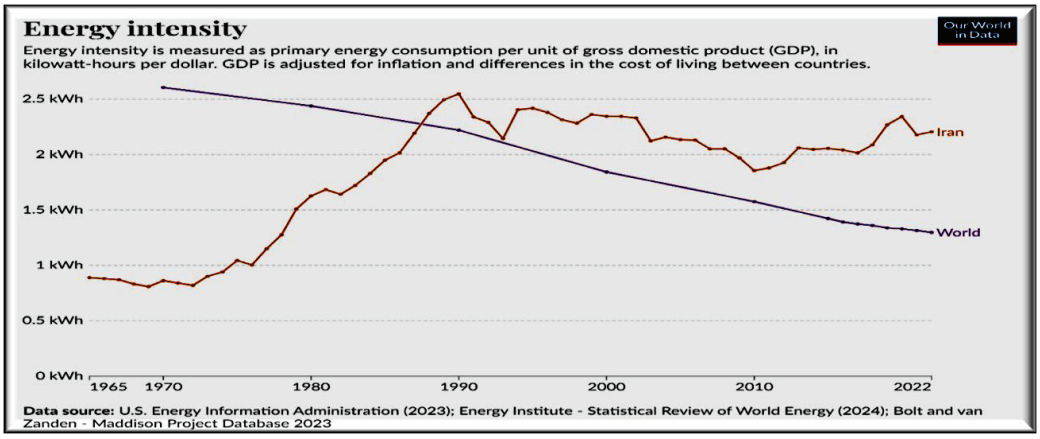
مرجع شکل‌های شماره ۲،۱ و ۳ سایت اینترنتی Our World in Data[۲] است.



شکل ۱. مصرف انرژی در جهان و ایران



شکل ۲. متوسط مصرف انرژی برای هر نفر در جهان، آسیا و ایران



شکل ۳. شدت انرژی در جهان و ایران

[2] www.ourworldindata.org

۳. مرور تحقیقات انجام شده

سلطانی و آتشی [۲] در سال (۲۰۲۴) تحقیقی با عنوان تأثیر دومین پوسته نما بر مصرف انرژی چرخه عمر ساختمان اداری: یک مطالعه تطبیقی، انجام داده‌اند. آن‌ها در این تحقیق استفاده از پوسته دوم نما را به‌عنوان یک مکانیزم بالقوه جهت کاهش مصرف انرژی در یک ساختمان اداری بررسی کردند. روش تحقیق آن‌ها مدل‌سازی، شبیه‌سازی و درنهایت تحلیل یک پوسته دوم بهینه‌سازی شده است و تأثیر آن را هم بر مصرف انرژی عملیاتی هم انرژی چرخه عمر ساختمان بررسی کرده‌اند. نمونه موردمطالعه یک ساختمان اداری دو طبقه و نرم‌افزارهای مورداستفاده گرس‌هاپر سه‌بعدی و زبان برنامه نویسی پایتون است. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از پوسته دوم نما هم منجر به کاهش مصرف انرژی عملیاتی هم انرژی چرخه عمر ساختمان می‌شود. اگرچه مصرف انرژی کل چرخه عمر به طور موقت در سال‌های اولیه عمر ساختمان افزایش می‌یابد؛ اما در سال سی‌ام نسبت به سناریوی پایه کاهش ۳۰ درصدی در مصرف انرژی را نشان داد.

یاری‌نژاد و مهروان [۳] در سال (۱۴۰۳) تحقیقی با عنوان بررسی تأثیر بهینه‌سازی پوسته خارجی و جدار نورگذر بر کاهش مصرف انرژی و زمان بازگشت سرمایه ساختمان‌های آموزشی در اقلیم معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم انجام داده‌اند. ساختمان موردمطالعه آن‌ها یک ساختمان آموزشی در شهر کرمانشاه است. در این تحقیق ۶ نوع عایق حرارتی مختلف با ضخامت متفاوت و با جای‌گذاری‌های مختلف در پوسته خارجی ساختمان و ۹ تیپ پنجره (تفاوت در نوع و ضخامت شیشه و تفاوت در نوع و ضخامت جدار گاز میانی) با کمک نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر بررسی شده‌اند. نتایج نشان داد که در ساختمان موردمطالعه استفاده از عایق پلی‌اورتان در داخلی‌ترین لایه در کلاس درس‌های جنوبی و شمالی باضخامت ۱۰ سانتیمتر عملکرد بهینه را داشته است. در کلاس درس شمالی جدار نور گذر دوجداره با شیشه کم‌گسیل و با ضخامت شیشه ۳ میلی‌متر و جدار میانی ۱۳ میلی‌متری گاز آرگون با ٪۲۸/۴۰ کاهش مصرف انرژی و همچنین در کلاس درس جنوبی با پنجره‌های با جدار نور گذر سه‌جداره و شیشه معمولی ۳ میلی‌متر و ۱۳ میلی‌متر هوا با کاهش ۲۳/۰۴ درصدی مصرف انرژی، مناسب‌ترین عملکرد را در بین سایر تیپ‌ها داشته است. همچنین در محاسبه زمان بازگشت سرمایه مشخص شده است که عایق پشم‌شیشه با زمان بازگشت سرمایه ۲۷/۹۲ سال مناسب‌ترین گزینه عایق‌کاری از جنبه بازگشت سرمایه است.

موسوی‌نوایی و همکاران [۴] در سال (۱۴۰۲) پژوهشی با نام تأثیر استفاده از شکاف هوایی در دیوارها بر کاهش مصرف انرژی یک ساختمان مسکونی انجام داده‌اند. ساختمان موردمطالعه آن‌ها یک ساختمان مسکونی واقع در شهر اهواز بوده است. آن‌ها برای بررسی تأثیر استفاده از شکاف هوایی در دیوارها بر کاهش مصرف انرژی، سه ضخامت مختلف شکاف هوایی (۱ و ۲/۵ و ۵ سانتی‌متر) مورد تجزیه‌وتحلیل قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی انرژی برای این سه دیوار مختلف با دیوار پایه نشان می‌دهد که استفاده از شکاف هوایی سبب کاهش مصرف انرژی کل و بارهای گرمایشی و سرمایشی در ماه‌های مختلف سال در ساختمان شده است. به‌طوری‌که بار سرمایشی ماهیانه ساختمان در گرم‌ترین ماه سال به ترتیب ٪۱۰/۳، ٪۱۲/۸ و ٪۱۴ و در سردترین ماه سال بار گرمایشی ساختمان به ترتیب ٪۳۲/۸، ٪۴۲/۳ و ٪۴۸/۲ کاهش داشته است. همچنین مصرف انرژی گرمایشی سالیانه ساختمان به ترتیب ٪۲۵/۷، ٪۳۰/۹ و ٪۳۳/۶ کاهش و انرژی سرمایشی سالیانه نیز به ترتیب ٪۸/۳، ٪۱۰ و ٪۱۰/۹ کاهش دارد که باتوجه‌به مصرف بالای انرژی سرمایشی سالیانه ساختمان، درصد قابل‌توجهی است.

قدوسی‌فر و فرامرزی اصلی [۵] در سال (۱۴۰۱) تحقیقی با عنوان تحلیل نمای دوپوسته متحرک در بهره‌وری مصرف انرژی در پایداری ساختمان‌های مسکونی شهر تبریز انجام داده‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که برای نمای دوپوسته در فصل‌های سرد با مسدودکردن بالا و پایین نمای دوپوسته، هوای محبوس شده در بین دو پوسته به‌صورت عایق عمل می‌کند و هدررفت انرژی کاهش

می‌یابد. همچنین در فصل‌های گرم از طریق باز گذاشتن بالا و پایین پوسته و ایجاد جریان هوا از بین دو پوسته انتقال حرارت از ساختمان افزایش یافته و در نتیجه دمای داخل آن کاهش می‌یابد.

خیامی و دانشجو [۶] در سال (۱۴۰۱) پژوهشی با عنوان تاثیر نمای دوپوسته متحرک در بهره‌وری مصرف انرژی در ساختمان اداری خیام مشهد انجام داده‌اند. آن‌ها در نهایت به این نتیجه رسیدند که این پوسته متحرک حدودا ۱۳۰ هزار کیلووات‌ساعت در سال، مصرف انرژی ساختمان را کاهش داده است.

فیهان و همکاران [۷] در سال (۲۰۲۱) تحقیقی با نام استفاده از یک چارچوب یکپارچه برای شبیه‌سازی انرژی ساختمان و ارزیابی چرخه عمر برای بهینه‌سازی نمای ساختمان و پنجره‌ها در پوسته خارجی ساختمان انجام داده‌اند. در این مطالعه یک چارچوب یکپارچه شبیه‌سازی انرژی ساختمان[3] و ارزیابی چرخه عمر را جهت انتخاب نماهای پایدار و پنجره‌بندی برای یک ساختمان بررسی کرده‌اند. تأثیر سیستم‌های نمای مختلف، گزینه شیشه‌های بهبودیافته و نسبت پنجره به دیوار متفاوت برای یک ساختمان تقریباً صفر انرژی[4] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تأثیرات محیطی انرژی و کربن (نهفته و عملیاتی) برای هر سیستم نما کمیت‌سنجی و مقایسه شده‌اند. نتایج نشان دادند که با بهبود شیشه‌ها، تقاضای انرژی عملیاتی ۸/۳٪ کاهش یافته است، اما به افزایش ۱۰ درصدی در انرژی نهفته منجر شده است و ۷ تا ۷/۶ ماه زمان لازم است تا این مقدار بازپرداخت شود. شرایط بهینه برای عملکرد ترکیبی گرمایش و سرمایش در ساختمان، نسبت پنجره به شیشه ۰/۲ بود. این نسبت می‌تواند مصرف کل انرژی را ۲٪ یا ۴/۸ کیلووات‌ساعت برای هر مترمربع در سال کاهش دهد. دیوار با لایه عایق فولاد سبک به همراه نمای آجری بیشترین میزان انرژی و کربن نهفته و دیوار حفره‌ای عایق‌کاری‌شده کمترین مقدار را نشان می‌دهد.

اوستا اوغلو و همکاران [۸] در سال (۲۰۲۱) تحقیقی با عنوان بررسی ساختمان مسکونی دارای مصالح ساختمانی جدید سازگار با محیط‌زیست با عملکرد افزایش‌یافته انرژی در مناطق مختلف آب‌وهوایی، مقرون‌به‌صرفه، کم‌انرژی و انتشار کم‌کربن انجام داده‌اند. آن‌ها از مواد افزودنی مختلف مانند پوکه، ورمیکولیت منبسط شده، خاکستر بادی و لجن برای تولید آجرهای سفالی پخته شده و فوم بتن‌های سبک‌وزن در این تحقیق استفاده کردند. به‌عنوان‌مثال به‌جای استفاده از مواد عایق رایج، از بتن‌های سبک حاوی ورمیکولیت منبسط شده استفاده کرده‌اند. یا به‌جای آجرهای معمولی از یک آجر رسی پخته شده جدید استفاده کرده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که استفاده از مصالح ساختمانی جدید صرفه‌جویی انرژی ۱۱ کیلووات‌ساعت در مترمربع در یک ساختمان عایق و صرفه‌جویی انرژی ۳۱/۲ کیلووات‌ساعت در مترمربع در ساختمان بدون عایق را در پی داشت. نرخ صرفه‌جویی انرژی سالانه به ۲۱/۷٪ رسید. بیشترین صرفه‌جویی در مصرف انرژی برای ساختمان با استفاده از برق - گرمایش اتفاق افتاد. بیشترین انتشار کربن در مورد زغال‌سنگ رخ‌داده است. گاز طبیعی تمیزترین راه گرمایش است. الکتریسیته بیشترین انتشار کربن را پس از زغال‌سنگ در منطقه مورد بررسی ایجاد کرد. همچنین کاهش انتشار کربن برای زغال‌سنگ به ۱۸/۷ کیلوگرم در سال و با استفاده از این مصالح جدید حداکثر کاهش انتشار کربن به ۲۲ درصد رسید.

میرسعیدی و میررشید [۹] (۱۳۹۹) در مقاله‌ای با عنوان بررسی میزان تأثیر سامانه دیوار ترومب[5] بر آسایش حرارتی در اقلیم معتدل و مرطوب، تأثیر استفاده از سامانه دیوار ترومب بر دمای هوا در داخل ساختمان مسکونی در گنبدکاووس در دو حالت گرمایش و سرمایش را با نرم‌افزار دیزاین بیلدر[6] بررسی کرده‌اند. آن‌ها از تحقیق خود این‌گونه نتیجه‌گیری کرده‌اند: نتایج این شبیه‌سازی نشان

[3] Building Energy Simulation
[4] Nearly Zero-Energy Building
[5] Trombe wall
[6] Design Builder

میدهد که سامانه دیوار ترومب می‌تواند در گرمایش در اقلیم مدنظر مفید باشد؛ ولی در بهبود شرایط سرمایشی ساختمان نقش کمتری دارد که باتوجه‌به مسائل اقتصادی و فنی باید درباره نقش این سامانه در کاهش مصرف انرژی مطالعه بیشتری انجام گیرد.

فتحعلیان و کارگر [۱۰] (۱۳۹۹) در تحقیقی با نام بررسی تأثیر راهکارهای مختلف بهینه‌سازی انرژی در رده‌بندی انرژی ساختمان به‌وسیله نرم‌افزار دیزاین بیلدر، سه استراتژی برای مدیریت مصرف انرژی در یک ساختمان اداری در شهر سمنان ایران پیشنهاد دادند، این سه استراتژی شامل استفاده از سایه‌بان‌های افقی در خارج و حذف سایه‌بان‌های داخلی، جایگزینی پنجره‌های تک‌جداره با پنجره دوجداره و نصب عایق حرارتی بر روی دیوار خارجی ساختمان بودند. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که این استراتژی‌ها به ترتیب منجر به کاهش ٪۱۵/۲، ٪۱۸/۴ و ٪۸/۲ در مصرف انرژی شده‌اند.

پدروسو و همکاران[۱۱] در سال (۲۰۲۰) پژوهشی با عنوان خصوصیات یک سیستم عایق حرارتی دیوار خارجی چندلایه با کاربرد در آب‌وهوای مدیترانه‌ای، انجام داده‌اند. این تحقیق عملکرد یک سیستم عایق حرارتی چندلایه را با یک فوق عایق حرارتی مورد بحث قرار داده و تحت شرایط آب‌وهوای مدیترانه‌ای مقایسه کرده‌اند. مجموعه‌ای از آزمایش‌های مکانیکی، فیزیکی و ریزساختاری بر روی عایق‌ها انجام شده و در نهایت بهبود عملکرد مکانیکی و مقاومت در برابر آب، زمانی که لایه‌های محافظ در یک سیستم چندلایه اعمال شده‌اند، عملکرد بهتری را نشان داد. هنگامی که عملکرد آن با سایر محصولات چندلایه رایج در بازار مقایسه شد، این راه‌حل جدید نتایج قابل‌رقابتی را ارائه داد که نشان‌دهنده بهبود عملکرد آن‌ها در شرایط عملیاتی واقعی است.

باتارد و همکاران [۱۲] در سال (۲۰۱۸) در تحقیقی با عنوان مدل‌سازی رفتار رطوبت - حرارتی بلندمدت پانل‌های عایق خلأ، به پیش‌بینی بلندمدت عملکرد عایق با پانل‌های خلأ نصب‌شده در ساختمان به‌عنوان عایق حرارتی پرداخته آن را شبیه‌سازی و بررسی نمودند. نتایج شبیه‌سازی‌ها آن‌ها نشان داد که مواد هسته و شرایط دمایی و رطوبت خارجی اهمیت بسیار زیاد روی خصوصیات پانل‌ها دارد.

دیوتا و همکاران [۱۳] در سال (۲۰۱۷) پژوهشی با نام تأثیر جهت‌گیری و تأثیر سایه‌اندازی پنجره‌های خارجی بر عملکرد حرارتی ساختمان در اقلیم گرمسیری انجام داده‌اند. آن‌ها تأثیر جهت‌گیری و سایه‌دهی پنجره‌های خارجی برای یک ساختمان بیمارستانی در آب‌وهوای گرمسیری کشور هند را بر عملکرد حرارتی بررسی کردند. آن‌ها استفاده از سایه‌بان پنجره خارجی متحرک مبتنی بر کنترل‌کننده منطقی قابل‌برنامه‌ریزی که با مسیر خورشید مرتبط است را نتیجه گرفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که حداکثر صرفه‌جویی در انرژی در ماه ژوئن به میزان ٪۱۴/۹ و میانگین صرفه‌جویی در انرژی ٪۹/۸ سالانه توسط این نوع سایه‌بان پنجره است.

خلأ اصلی مشاهده‌شده در تحقیقات پیشین عدم توجه به مصالح کف‌سازی و تمرکز بیشتر پژوهش‌ها بر مصالح پوسته خارجی و بازشوهای ساختمان است. در این مقاله باهدف بررسی تأثیر مصالح ساختمانی مختلف و به طور مشخص تأثیر به‌کارگیری فوم بتن و پوکه معدنی در کف‌ها و سقف‌ها بر کاهش مصرف انرژی ساختمان با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، یک ساختمان مسکونی در شهر تهران مطالعه شده است. این مقاله یک روش کاربردی و کم‌هزینه را برای بررسی تحقق استانداردهای مربوط به مصرف انرژی ساختمان‌ها در کشور با استفاده از شبیه‌سازی انرژی معرفی می‌کند.

۴. مبانی نظری تحقیق

۱,۴ روش‌های محاسبه انرژی

نخستین مرحله از محاسبه مصرف انرژی ساختمان تعیین بارهای آن است. بارها، گرمای آنی کسب‌شده یا ازدست‌رفته هستند که با استفاده از رسانش، همرفت و تابش اتفاق می‌افتد. بارهای ساختمان در انواع رسانش در داخل محوطه، نفوذ هوای بیرونی، گرمای ناشی از خورشید، گرمای ناشی از داخل ساختمان و تهویه دسته‌بندی می‌شوند. انتقال گرما در ساختمان در هر لحظه از زمان بر

مبنای فیزیک انتقال حرارت آسان است. اگرچه محاسبه‌های بار تحت‌تأثیر ذخیره گرمایی پیچیده می‌شود. به‌هرحال یک ساختمان بارهای سرمایش و گرمایشی را در هر زمانی تجربه کند، انرژی توسط جرم حرارتی ذخیره و آزاد می‌شود و سبب ایجاد یک تأخیر زمانی در بارگذاری سیستم گرمایش، سرمایش، تهویه و دستگاه تهویه‌مطبوع[7] می‌گردد.

بیشتر برنامه‌های مدل‌سازی انرژی روش‌های مشابهی را برای بارهای لحظه‌ای به کار می‌گیرند؛ اما در این که آن‌ها چگونه تأثیر زمان تأخیر ناشی از جرم حرارتی را محاسبه می‌کنند تفاوت وجود دارد. جامعه مهندسین گرمایش، سرمایش و تهویه‌مطبوع آمریکا[8] دو روش مقدماتی محاسبه جرم حرارتی در ساختمان را تعیین کرده است؛ روش موازنه دما[9] و روش مجموعه زمان تابش[10].

روش موازنه دما مستقیم‌ترین و دقیق‌ترین روش محاسبه بارهای سرمایش و گرمایش است. اگرچه پیچیده و مبتنی بر محاسبات کامپیوتری قوی است. در این روش یک سری از معادله‌های تعادل انرژی ساخته شده و برای هر سطحی در ساختمان حل می‌شود. برنامه‌های انرژی‌پلاس[11] و ESP-r از این روش استفاده می‌کنند.

شبکه گرمایش یکی از انواع روش موازنه دما است. در جایی که ساختمان به زون‌های (فضاهای) حرارتی تقسیم می‌شود و به شکل شبکه‌ای از نقطه‌های اتصال مدل‌سازی می‌شود. هر زون نشان‌دهنده فضایی در ساختمان است که کنترل دمایی یکسانی در تمام آن برقرار است. مدل شبکه گرمایش می‌تواند از موازنه دما پیچیده‌تر باشد. برنامه سان رل[12] از مدل شبکه گرمایش استفاده می‌کند.

روش مجموعه زمان تابش از موازنه دما پیچیدگی کمتری دارد و نیازمند محاسبات کامپیوتری کمتری است. این روش فرض می‌کند که جریان انتقال همرفت گرما، هنگامی که رسانایی و تابش با تأخیر عمل می‌کنند، سریعاً بر بار تأثیر می‌گذارد. هر مکانیزم انتقال حرارت که در فضاها عمل می‌کند به رسانش، همرفت و اجزای تابشی تقسیم می‌شود. عامل‌های وزنی جهت رسانش و تابش اجزا برای محاسبه زمان تأخیر، مورد نیاز است. برنامه TRNSYS از این روش استفاده می‌کند.

روش عملکرد انتقال شیوه جدیدی از روش مجموع زمان تابش است. این روش عامل‌های وزنی را مستقیماً در بارهای رسانش و تابش به کار می‌برد بدون آن که بارها به اجزای رسانش و تابش تقسیم شود. این روش کاربری آسانی داشته و برای محاسبه انرژی سالیانه دقیق است، اگرچه جهت محاسبه بار حداکثر یا بار ساعتی دقت لازم را ندارد. برنامه DOE-2 از این روش استفاده می‌کند.

تعدادی از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز انرژی در زیر نام‌برده‌شده است:

أ DOE-2

ب TRNSYS

ج Energy Plus

د ESP-r

ه SUNREL

و HOT2000

ز Design Builder

---

7 Heating, ventilation, and air conditioning (HVAC)

8 American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)

9 Heat Balance (HB)

10 Regulaer Time of Solarization (RTS)

11 Energy plus

12 SUNREL

۵. روش انجام تحقیق

در این پژوهش جهت مدل‌سازی مصرف انرژی از نرم‌افزار دیزاین بیلدر نسخه ۶,۱,۰,۰۰۶ که در سال ۲۰۱۹ منتشر شد استفاده شده است.

۱,۵ نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر

نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر برای مدل‌سازی ساختمان از جنبه‌های مختلف مانند فیزیک ساختمان (مصالح ساختمانی)، معماری ساختمان، سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی، سیستم روشنایی و غیره کاربرد داشته و قابلیت مدل‌سازی همه جنبه‌های ساختمان را دارد. به‌جز مدل‌سازی بار گرمایشی و سرمایشی ساختمان، مصارف مختلف انرژی ساختمان از قبیل مصرف انرژی گرمایشی، سرمایشی، روشنایی، لوازم‌خانگی، آب گرم مصرفی و غیره را به‌صورت دینامیک مدل‌سازی می‌نماید. این نرم‌افزار همچنین قابلیت محاسبه میزان روشنایی روز و حتی مدل‌سازی سی‌اف‌دی[۱۳] را دارد. از دیگر قابلیت‌های نرم‌افزار مدل‌سازی تهویه طبیعی و مکانیکی، محاسبه آسایش حرارتی در فضاهای داخلی ساختمان، میزان اتلاف و دریافت انرژی از بخش‌های مختلف ساختمان است. نتایج مدل‌سازی‌ها همچنین برای کل سال، برای ماه‌های مختلف و نیز به‌صورت روزانه و ساعتی قابل‌استخراج است. نتایج همه مدل‌سازی‌ها همچنین برای کل ساختمان، طبقه‌های مختلف و نیز تک فضاهای ساختمان قابل‌استخراج است. از قابلیت‌های ویژه این نرم‌افزار امکان استخراج نتایج مدل‌سازی به‌صورت دیاگرام و یا جداول بوده که می‌تواند برای تجزیه‌وتحلیل‌های بعدی استفاده گردد.

برخی از کاربردهای رایج این نرم‌افزار عبارت هستند از:

أ محاسبه مصرف انرژی ساختمان

ب محاسبه میزان کربن نهفته به تفکیک مصالح مصرفی و المان‌های سازه‌ای

ج محاسبه میزان انتشار کربن در زمان بهره‌برداری

د ارزیابی گونه‌های مختلف نما در گرمایش

ه شبیه‌سازی گرمایش ساختمان‌های با تهویه طبیعی

و گزارش مقدار برق مصرف‌شده ناشی از استفاده از نور طبیعی

ز پیش‌بینی توزیع نور طبیعی روز از طریق شبیه‌سازی تابش

ح محاسبه اندازه دستگاه‌های گرمایش و سرمایش

ط مشخصه‌های اجرایی سیستم تهویه‌مطبوع و سیستم تهویه طبیعی که شامل تأثیر توزیع هوای موردنیاز بر دما و سرعت توزیع در هر اتاق با استفاده از سی‌اف‌دی است.

ی تفکیک مصرف انرژی به نوع سوخت مصرفی

ک محاسبه هزینه ساخت

موتور شبیه‌ساز نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر نرم‌افزار انرژی‌پلاس است.

انرژی‌پلاس یک برنامه شبیه‌سازی انرژی ساختمان است که مهندسان، معماران و پژوهشگران برای مدل‌کردن مصرف انرژی - برای گرمایش، سرمایش، تهویه، روشنایی و بارهای فرایند - و مصرف آب در ساختمان‌ها استفاده می‌کنند. برخی از ویژگی‌ها و قابلیت‌های قابل‌توجه این نرم‌افزار عبارت‌اند از:

[13] CFD (Computational fluid dynamics)

أ شبیه‌سازی حرارتی پویا و پیشرفته را در گام‌های زمانی زیر ساعتی ارائه می‌دهد.

ب داده‌های دقیق عملکرد محیطی مانند مصرف انرژی، انتشار کربن، راحتی اتاق را در فواصل سالانه، ماهانه، روزانه، ساعتی و زیر ساعتی ارائه می‌دهد.

ج گزارش دریافت‌های خورشیدی در سطوح، دمای سطح و تبادلات تابشی.

د دسترسی به طیف گسترده‌ای از نتایج برای ساختمان‌ها و سیستم‌ها.

ه عملکرد غیرفعال، جرم حرارتی و توزیع دما را ارزیابی می‌کند.

و اندازه سیستم‌های گرمایش و سرمایش را محاسبه می‌کند.

ز با استفاده از روش‌های محاسبه استاندارد صنعت، هزینه‌های عملیاتی و کل چرخه عمر ساختمان را ارزیابی می‌کند.

ح دمای سطح و نرخ جریان هوا را به‌عنوان شرایط مرزی برای تجزیه‌وتحلیل دقیق سی‌اف‌دی صادر می‌کند.

انعطاف‌پذیری و مستندات شبیه‌سازی نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر:

اکثر ابزارها و نرم‌افزارهای دیگر از رویکرد «جعبه سیاه» برای شبیه‌سازی استفاده می‌کنند، به این معنی که شما به ورودی‌ها، خروجی‌های شبیه‌سازی خام و کد مورداستفاده برای اجرای شبیه‌سازی‌ها دسترسی ندارید و بنابراین هرگز نمی‌توانید واقعاً مطمئن باشید که در پشت صفحه چه می‌گذرد. شبیه‌سازی دیزاین‌بیلدر متفاوت است. با انرژی‌پلاس شما به کد منبع و اسنادی که به طور گسترده توسط هزاران متخصص و افراد دانشگاهی آزمایش شده است، دسترسی کامل دارید و هنگامی‌که نیاز به مدل‌سازی نمای ساختمان، سیستم‌ها یا حالت‌های عملیاتی دارید که خارج از جعبه ارائه نمی‌شوند، می‌توانید شبیه‌سازی‌های خود را برای مطابقت باحالت واقعی از طریق طیف وسیعی از روش‌ها سفارشی کنید. فایل‌های ورودی شبیه‌سازی را به‌صورت دستی یا خودکار در یک اسکریپت[۱۴] تغییر دهید. شبیه‌سازی را با استفاده از برنامه‌نویسی زمان اجرا سفارشی کنید. کد منبع انرژی‌پلاس را تغییر دهید. هیچ‌کدام از ابزارهای شبیه‌سازی جریان اصلی دیگری انعطاف‌پذیری زیادی را در یک بسته آسان همانند انرژی‌پلاس برای استفاده ارائه نمی‌دهد.

مشخصات فنی نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر:

أ بارهای گرمایشی و سرمایشی را با روش مورد تأیید استاندارد اشری[۱۵] که در انرژی‌پلاس اجرا شده است، محاسبه می‌کند.

ب داده‌های آب‌وهوای طراحی درون نرم‌افزار گنجانده شده است و بارها را می‌توان در سطح منطقه، سیستم و محل اجرای پروژه گزارش کرد. می‌توانید شبیه‌سازی‌های مدل خود را با استفاده از داده‌های واقعی آب‌وهوای ساعتی اجرا کنید تا بررسی کنید که ساختمان در شرایط عملیاتی واقعی چگونه رفتار می‌کند.

ج نور روز - مدل‌سازی سیستم‌های کنترل روشنایی با استفاده از سنسورهای فوتوالکتریک در هر منطقه (زون)[۱۶] و محاسبه صرفه‌جویی در روشنایی الکتریکی را می‌توانید از بین کم‌نور پلکانی یا پیوسته انتخاب کنید.

د می‌توانید اثرات جایگزین‌های طراحی را بر پارامترهای کلیدی طراحی مانند مصرف انرژی سالانه، ساعات گرمایش بیش از حد یا انتشار دی‌اکسیدکربن بررسی کنید.

---

[۱۴] کدهای برنامه نویسی کوچک

[15] ASHREA

[16] Zone

ه می‌توانید مصرف انرژی را بر اساس سوخت و مصرف نهایی تجزیه کنید.

و هوای داخلی، میانگین دما و برودت تابشی و عملیاتی محاسبه می‌شود.

ز امکان محاسبه انتقال حرارت از طریق المان‌های ساختمان از جمله دیوارها، سقف‌ها، نفوذ، تهویه و غیره.

ح امکان محاسبه بارهای گرمایشی و سرمایشی و میزان تولید دی‌اکسیدکربن.

ط داده‌های عملکرد محیطی بدون نیاز به اجرای ماژول‌های[17]خارجی یا واردکردن داده‌ها نمایش داده می‌شود. هر گونه شبیه‌سازی موردنیاز برای تولید داده‌ها به طور خودکار شروع می‌شود.

ی تهویه طبیعی را می‌توان با گزینه‌ای برای باز شدن پنجره‌ها بر اساس طرح‌های کنترلی از جمله حالت مخلوط مدل‌سازی کرد.

ک سیستم‌های شیشه‌کاری شامل قاب‌ها، تقسیم‌کننده‌ها و آشکارسازی‌ها با جزئیات زیاد با استفاده از دقیق‌ترین الگوریتم‌های شبیه‌سازی موجود مدل‌سازی می‌شوند. سیستم‌های نمای نوآورانه مانند شیشه‌های الکتروکرومیک قابل شبیه‌سازی هستند.

ل سایه‌زنی توسط لوورها[18]، برآمدگی‌ها و باله‌های جانبی و همچنین پرده‌ها و کرکره‌های داخلی و میانی.

م می‌توان ویژگی‌های معماری مانند ستون‌ها، سایبان‌ها و دستگاه‌های سایه‌انداز پیچیده، همچنین تأثیر سایه‌زنی و انعکاس را مشخص کرد.

ن قابلیت تجزیه‌وتحلیل پارامتریک به شما امکان می‌دهد تا تأثیر تغییرات در پارامترهای طراحی را بر روی طیف وسیعی از معیارهای عملکرد بررسی کنید.

۲,۵ صحت سنجی نتایج نرم افزار دیزاین‌بیلدر

فتحعلیان و کارگر شریف‌آباد [۱۰] در سال (۱۳۹۹) در تحقیقی با نام بررسی تأثیر راهکارهای مختلف بهینه‌سازی انرژی در رده‌بندی انرژی ساختمان به‌وسیله نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر و زمردیان و تحصیل دوست [۱۴] در سال (۱۳۹۴) در تحقیقی با عنوان اعتبارسنجی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی در ساختمان، با رویکرد تجربی و مقایسه‌ای، به اعتبارسنجی دو نرم‌افزار شبیه‌ساز انرژی اکوتکت[19] و دیزاین‌بیلدر پرداخته‌اند. ویت و همکاران [۱۵] در سال (۲۰۰۱)، هنینگر و همکاران [۱۶] در سال (۲۰۰۳) و گاتی [۱۷] در سال (۲۰۰۳) هر کدام در تحقیقاتی جداگانه به بررسی اعتبار نرم‌افزار انرژی‌پلاس پرداخته‌اند.

در تمامی تحقیقات فوق، اعتبار و صحت نتایج این نرم‌افزارها تأیید شده است. همچنین با مطالعه نتایج آزمایش‌های زیر که بر اساس استانداردهای مختلف صورت‌گرفته است، می‌توان به صحت نتایج و خروجی‌های نرم‌افزارهای دیزاین‌بیلدر و انرژی‌پلاس اطمینان نمود.

-ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 [18].

- HVAC BESTEST Part 1 - Tests E100 to E200 [19].

- ANSI/ASHRAE/ACCA Standard 183-2007 [20].

-ANSI/ASHRAE Standard 140-2017 [21].

-ANSI/ASHRAE Standard 140-2017 [22].

-ANSI/ASHRAE Standard 140-2017 [23].

---

[17] Modules

[18] Louvers

[19] ECOTECT Autodesk

-Space-Cooling Equipment Performance Analytical Verification Tests CE100 to CE200 [24].
-ANSI/ASHRAE Standard 140-2017 [25].
-HE100 to HE230 DesignBuilder v6.1 with EnergyPlus v8.9 [26].

۳,۵. معرفی ساختمان موردمطالعه

ساختمان موردمطالعه یک نمونه واقعی و در شهر تهران واقع‌شده است. ساختمان دارای ۵ طبقه و مساحت هر طبقه در حدود ۱۰۰ مترمربع است. مکان جغرافیایی این ساختمان در ۳۵/۶۸ عرض جغرافیایی و ۵۱/۳۲ طول جغرافیایی قرار داده شده است. ارتفاع ساختمان از سطح دریا ۱۱۹۱ متر، جهت باد غالب از غرب به شرق و سرعت متوسط آن ۱۱/۹ متربرثانیه تعریف شده است. جهت شبیه‌سازی آب‌وهوایی از داده‌های آب‌وهوایی فرودگاه مهرآباد تهران استفاده شده است. دمای محیط اطراف ساختمان در طول سال و همچنین سرعت باد ایجاد شده در اطراف ساختمان بر روند انجام شبیه‌سازی و نتایج تحقیق اثرگذار است.

اجزا ساختمان:

✓ سقف آخر (پشت‌بام) ۵ لایه
- لایه اول ایزوگام (لایه محافظ پلیمری بر پایه قیر و الیاف مصنوعی) به ضخامت ۳ میلی‌متر
- لایه دوم پلاستر سیمان ضخامت ۲ سانتی‌متر
- لایه سوم برحسب مورد فوم بتن یا پوکه معدنی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر
- لایه چهارم بتن مسلح به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر
- و لایه آخر گچ‌وخاک ضخامت ۲ سانتی‌متر

✓ دیوارهای داخلی ۳ لایه
- لایه اول گچ‌وخاک ۲ سانتی‌متر
- لایه دوم آجر با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر
- لایه سوم گچ‌وخاک ۲ سانتی‌متر

✓ کف ساختمان (کف پارکینگ) ۴ لایه
- لایه اول سنگ گرانیت ضخامت ۳ سانتی‌متر
- لایه دوم پلاستر سیمان ۲ سانتی‌متر
- لایه سوم خاک دستی ۲۰ سانتی‌متر
- لایه چهارم بتن مسلح ضخامت ۱ متر

✓ کف و سقف‌های میانی ۵ لایه
- لایه اول سرامیک ۱ سانتی‌متر
- لایه دوم پلاستر سیمان ۲ سانتی‌متر
- لایه سوم بر حسب مورد فوم بتن یا پوکه صنعتی ۱۰ سانتی‌متر
- لایه چهارم بتن مسلح ۲۰ سانتی‌متر
- لایه پنجم گچ‌وخاک ۲ سانتی‌متر

✓ دیوارهای خارجی ۳ لایه

- لایه اول پلاستر سیمان ۲ سانتی‌متر
- لایه دوم آجر ۱۵ سانتی‌متر
- لایه سوم گچ‌وخاک ۲ سانتی‌متر

✓ بازشو ها با نسبت ۳۰٪ نسبت به دیوارها

- پنجره دوجداره، ۲ شیشه ۳ میلی‌متری شفاف با ۶ میلی‌متر هوا و فریم‌های یوپی‌وی‌سی[20] بدون سایه‌بان خارجی - با سایبان داخلی از نوع کرکره آلومینیومی

✓ در هر واحد ۲ دریچه تهویه هوای غیر مکانیکی کرکره‌دار دایره ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر وجود دارد.

✓ تمامی روشنایی‌ها ال‌ای‌دی[21] و نورهای خارجی (نما) سنسور دار با کارکرد ۱۲ ساعته است.

✓ سیستم گرمایشی و آب گرم مصرفی، پکیج و رادیاتور با مصرف گاز و سیستم سرمایشی کولر آبی با مصرف برق است.

✓ زون‌بندی هر واحد

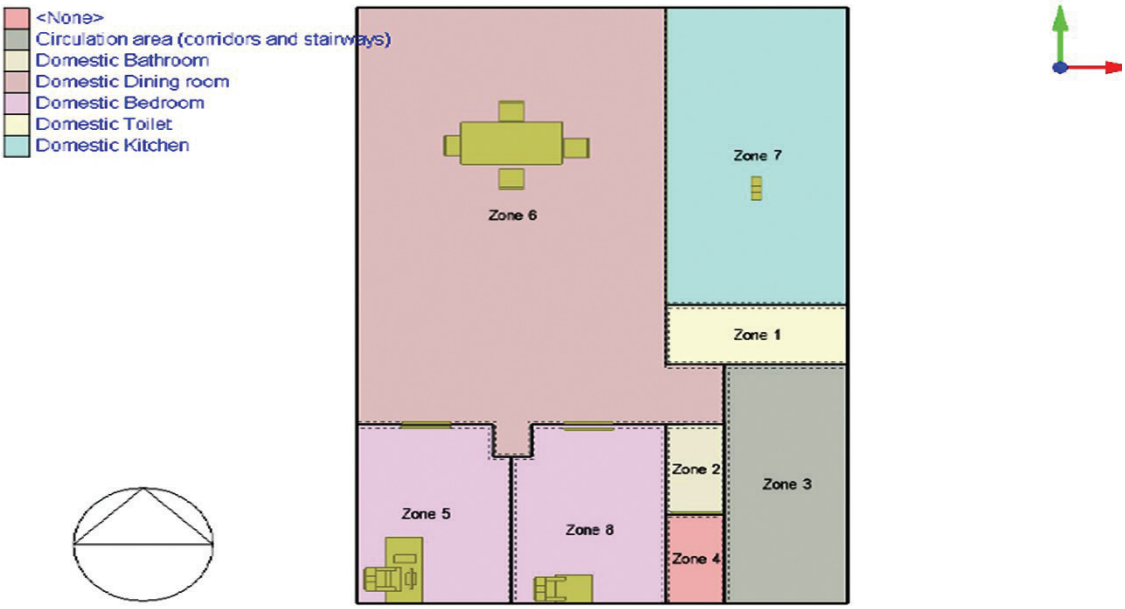
- یک سالن
- یک آشپزخانه اپن[22]
- دو اتاق‌خواب
- یک سرویس بهداشتی
- یک حمام
- یک بالکن که با یکی از خواب‌ها ارتباط دارد

✓ تعداد افراد در هر واحد ۴ نفر می‌باشند

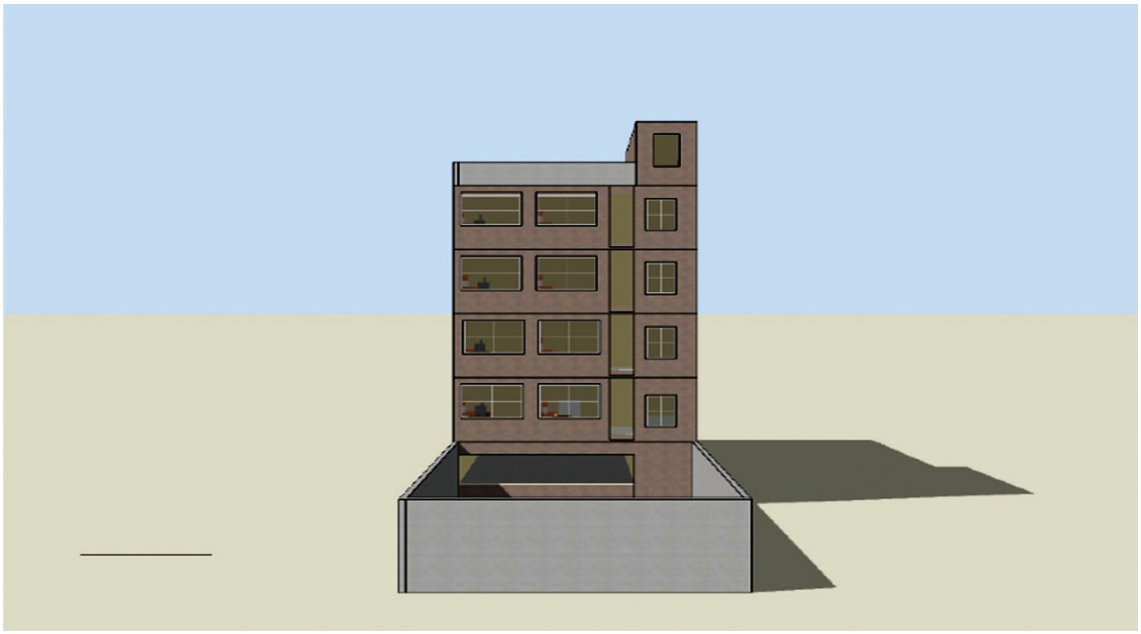
پلان ساختمان به همراه زون‌بندی آن در شکل شماره ۴ به نمایش در آمده است. هم چنین به‌منظور درک بهتر از پروژه، خروجی سه‌بعدی ساختمان از نرم‌افزار ارائه شده است که در شکل شماره ۵ قابل ملاحظه است.

منبع شکل‌های شماره ۴ و ۵ خروجی نرم‌افزار دیزاین بیلدر است.

[20] UPVC
[21] LED
[22] Open



شکل ۴. پلان و زون‌بندی ساختمان



شکل ۵. نمای سه بعدی ساختمان

۶. نتایج

در این پژوهش به تأثیر استفاده از فوم‌بتن جهت اجرای کف‌سازی ساختمان‌ها و به مقایسه مصرف انرژی در دو حالت به‌کارگیری فوم بتن و پوکه معدنی پرداخته شده است. برای درک بهتر این موضوع در ادامه با نشان‌دادن خروجی‌های نرم‌افزار گزارش هدررفت گرما از المان کف سازه مورد بررسی قرار گرفته است. میزان هدررفت انرژی هر یک از المان‌های سازه در حالت استفاده از فوم‌بتن در جدول شماره ۱ و در حالت استفاده از پوکه معدنی در جدول شماره ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. میزان هدررفت انرژی با استفاده از پوکه معدنی در ساختمان

المان سازه	هدررفت انرژی (kW)
پنجره	- ۵۳/۱
دیوار خارجی	- ۶/۸۶
سقف	۰/۱۹
کف طبقات	۰/۰۱
کف ساختمان	۱/۱۲
دیوار داخلی	- ۰/۰۳
پشت بام	- ۰/۳۸

جدول ۲. هدررفت انرژی با استفاده از فوم بتن در ساختمان

المان سازه	هدررفت انرژی (kW)
پنجره	- ۱/۵۲
دیوار خارجی	- ۶/۸۴
سقف	۰/۱۴
کف طبقات	۰/۰۶
کف ساختمان	۱/۱۵
دیوار داخلی	- ۰/۰۳
پشت‌بام	- ۰/۲۵

* هنگامی که انرژی به هر شکلی وارد سیستم می‌شود (و انرژی کل آن را افزایش می‌دهد)، تغییر انرژی یک عدد مثبت است. هنگامی که انرژی از سیستم خارج می‌شود (انرژی کل کاهش می‌یابد، پایدارتر می‌شود)، تغییر انرژی یک عدد منفی است. این تفاوت علامت بر اساس کنوانسیون‌های مهندسی حرارت تنظیم می‌شود و به تحلیل صحیح رفتار ترمودینامیکی سیستم‌ها کمک می‌کند.

از مقایسه دو جدول شماره ۱ و ۲ مشخص است که تنها مقادیر هدر رفت انرژی از کف طبقات، سقف طبقات و پشت‌بام ساختمان تغییر کرده و علت آن تفاوت ضریب هدایت حرارتی فوم‌بتن و پوکه معدنی است. میزان هدر رفت انرژی از سایر المان‌های سازه نظیر پنجره‌ها، دیوارهای داخلی، دیوارهای خارجی و سقف‌ها مقادیر تقریبا یکسانی در هر دو حالت به‌کارگیری از فرم بتن و پوکه معدنی را نشان می‌دهد.

از دیگر خروجی‌های نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر میزان مصرف انرژی به تفکیک بخش‌های مصرف‌کننده انرژی است. این مقادیر در حالت استفاده از فوم‌بتن برای یک دوره یک‌ساله در جدول شماره ۳ و در حالت استفاده از پوکه معدنی در جدول شماره ۴ نشان داده شده است.

جدول ۳. میزان مصرف انرژی درحالت استفاده از پوکه معدنی

هدررفت انرژی(kWh)	بخش مصرف‌کننده
۹۵۴۳	برق مصرفی داخل واحد
۱۱۰۳۳	روشنایی داخلی
۱۲۳۰۵	گرمایش (گاز)
۱۸۴۲۲	سرمایش (برق)
۱۷۶۵۸	آب گرم مصرفی (گاز)
۳۸۴	روشنایی خارج ساختمان

جدول ۴. میزان مصرف انرژی در حالت استفاده از فوم بتن

هدررفت انرژی(kWh)	بخش مصرف‌کننده
۹۵۴۳	برق مصرفی داخل واحد
۱۱۰۳۳	روشنایی داخلی
۱۱۹۰۲	گرمایش (گاز)
۱۸۰۳۶	سرمایش (برق)
۱۷۶۵۸	آب گرم مصرفی (گاز)
۳۸۴	روشنایی خارج ساختمان

همان‌طور که از مقایسه جداول شماره ۳ و ۴ مشخص است، میزان مصرف برق جهت سرماش و میزان مصرف گاز جهت گرمایش در دو حالت استفاده از فوم‌بتن و پوکه معدنی متفاوت است و این امر ناشی از تفاوت در میزان هدر رفت انرژی این دو ماده است. میزان مصرف انرژی سایر تجهیزات در ساختمان مانند روشنایی‌های داخلی و خارجی، برق مصرفی داخل واحد و آب گرم مصرفی در هر دو حالت به‌کارگیری فوم‌بتن و پوکه معدنی یکسان است.

تذکر: در هر دو حالت استفاده از فوم‌بتن و پوکه معدنی، سیستم‌های دیوار، بازشوها، تمامی المان‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای و سایر متغیرها، یکسان در نظر گرفته شده است و تنها مصالح کف‌سازی تغییر می‌کند.

میزان مجموع مصرف برق و مجموع مصرف گاز در کل ساختمان و برای یک دوره یک‌ساله در جداول شماره ۵ و ۶ آورده شده است.

جدول ۵. مجموع میزان مصرف انرژی در حالت استفاده از پوکه معدنی

۳۹۳۸۴	برق(kWh)
۲۹۹۶۳	گاز(kWh)

جدول ۶. میزان مصرف انرژی در حالت استفاده از فوم بتن

۳۸۹۹۸	برق(kWh)
۲۹۵۶۰	گاز(kWh)

باتوجه‌به یافته‌های تحقیق و کاهش مصرف انرژی در صورت به‌کارگیری فوم‌بتن به‌جای پوکه معدنی جهت مصالح کف‌سازی، در این بخش به محاسبه ریالی و مزایا و معایب اقتصادی این مصالح پرداخته شده است. در جدول شماره ۷ مقایسه‌ای از هزینه‌های به‌کارگیری فوم‌بتن در ساختمان آورده شده است.

جدول ۷. مقایسه هزینه‌ها در دو حالت مختلف

	استفاده از فوم بتن	استفاده از پوکه معدنی
کل مصرف برق (کیلووات‌ساعت)	۳۸۹۹۸	۳۹۳۸۴
کل مصرف گاز (کیلووات‌ساعت)	۲۹۵۶۰	۲۹۹۶۳
*مصرف کل گاز (مترمکعب)	۲۸۴۲	۲۸۸۱
**هزینه برق به مدت ۱ سال (ریال)	۳۸۹,۹۸۳,۸۰۰	۳۹۳,۸۴۰,۰۰۰
***هزینه گاز به مدت ۱ سال (ریال)	۱۴,۲۱۱,۹۰۰	۱۴,۴۰۵,۴۵۰
هزینه کل انرژی (ریال)	۴۰۴,۱۹۵,۷۰۰	۴۰۸,۲۴۵,۴۵۰
تفاوت هزینه (ریال)	- ۴,۱۹۵,۷۵۰	–
****هزینه ساخت (ریال)	۱۵۰,۰۰۰,۰۰۰	۰
دوره بازگشت سرمایه (سال)	۳۷/۰۳	–

*نرم‌افزار دیزاین بیلدر به طور پیش‌فرض، جهت سهولت محاسبات، میزان مصرف گاز را به کیلووات‌ساعت بیان می‌کند. جهت تعیین هزینه گاز مصرفی و تبدیل واحد آن به مترمکعب،کیلووات‌ساعت به عدد ۱۰/۴ (ارزش حرارتی هر مترمکعب گاز) تقسیم می‌شود.

**هزینه هر کیلووات‌ساعت برق از جدول تعرفه‌های برق خانگی سال ۱۴۰۳، شرکت توزیع برق تهران بزرگ (www.tbtb.ir) و به طور میانگین و معادل هر کیلووات‌ساعت ۱۰۰۰۰ ریال استخراج شده است.

*** هزینه هر مترمکعب گاز مصرفی از جدول تعرفه‌های گاز خانگی سال ۱۴۰۳، شرکت گاز استان تهران (www.tehran-gasco.ir) و به طور میانگین معادل هر مترمکعب ۵۰۰۰ ریال استخراج شده است.

****این عدد معادل اضافه‌هزینه استفاده از فوم بتن به‌جای پوکه‌ریزی در ساختمان موردمطالعه است.

۷. نتیجه گیری

با مقایسه دو جدول شماره ۵ و ۶

۱- استفاده از فوم‌بتن به‌جای پوکه معدنی، منجر به ۳۸۶/۹۷ کیلووات‌ساعت کاهش مصرف برق شده است. این میزان معادل ٪۰/۹۸ کاهش مصرف است.

۲- استفاده از فوم‌بتن به‌جای پوکه معدنی، منجر به ۴۰۳/۵۹ کیلووات‌ساعت (معادل ۳۹/۹۸ مترمکعب) کاهش مصرف گاز شده است. این میزان معادل ٪ ۱/۳۴ کاهش مصرف است.

۳- استفاده از فوم‌بتن به‌جای پوکه معدنی، منجر به ۷۸۹/۵۶ کیلووات‌ساعت کاهش مصرف مجموع انرژی شده است. این میزان معادل ٪ ۱/۱۴ کاهش مصرف است.

این مقادیر کاهش در مصرف انرژی به دلیل ضریب هدایت حرارتی کمتر فوم‌بتن نسبت به پوکه معدنی است که منجر به کاهش هدررفت انرژی از المان‌های کف و پشت‌بام ساختمان شده و در نهایت باعث کاهش مصرف انرژی در بخش گرمایش و سرمایش ساختمان گردیده است.

با بررسی جدول شماره ۷

۴- استفاده از فوم‌بتن به‌جای پوکه معدنی، منجر به ۳,۸۵۶,۲۰۰ ریال کاهش هزینه برق مصرفی شده است. این میزان معادل ٪۰/۹۸ کاهش هزینه برق مصرفی است.

۵- استفاده از فوم‌بتن به‌جای پوکه معدنی، منجر به ۱۹۳,۵۵۰ ریال کاهش هزینه گاز مصرفی شده است. این میزان معادل ٪ ۱/۳۴ کاهش هزینه گاز مصرفی است.

۶- استفاده از فوم‌بتن به‌جای پوکه معدنی، منجر به ۴,۰۴۹۰۷۵۰ ریال کاهش هزینه مجموع انرژی شده است. این میزان معادل ٪ ۱ کاهش هزینه مجموع انرژی است.

۷- دوره بازگشت سرمایه در صورت استفاده از فوم‌بتن از ۳۷/۰۳ سال است.

کاهش ۷۸۹/۵۶ کیلووات‌ساعت انرژی با استفاده از فوم بتن در کف‌سازی ساختمان‌ها، طی یک دوره یکساله و برای یک ساختمان ۴ واحدی در شهر تهران است. با در نظر گرفتن تعداد واحدهای در حال ساخت در شهر تهران و با فرض دوره بهره‌برداری ۳۰ ساله برای ساختمان‌های این شهر، در صورت استفاده از این مصالح به‌جای پوکه معدنی میزان صرفه جویی انرژی حاصل از این امر مقدار بسیار قابل ملاحظه‌ای خواهد شد.

به طور کلی با توجه به موارد بررسی شده می‌توان نتیجه گرفت که:

هرچند استفاده از فوم‌بتن باعث کاهش مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست محیطی شده است اما تاثیر اندک آن بر میزان کاهش هزینه انرژی مصرفی و دوره بازگشت سرمایه بالا (البته این زمان زیاد ناشی از پایین بودن تعرفه انرژی در بخش خانگی است و با افزایش این رقم در سالیان آتی، مدت زمان بازگشت سرمایه کاهش خواهد یافت)، سازندگان مسکن را به استفاده از این مصالح ترغیب نخواهد کرد. لذا اختصاص مشوق‌ها و یارانه‌هایی از سوی سازمان‌های تصمیم‌گیرنده در بخش ساخت‌وساز مانند وزارت راه و شهرسازی، سازمان نظام‌مهندسی ساختمان، شهرداری‌ها و سازمان حفاظت از محیط‌زیست، جهت استفاده از این مصالح ضروری به‌نظر می‌رسد.

منابع

[1] Shahidian A, Riazi F, and Amin A.(2015). "Investigating building energy labels in Iran with the approach of energy consumption management," Journal of Mechanical Engineering, vol. 24, no. 3, pp. 47-56. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.16059719.1394.24.3.4.6.

[2] Soltani M, & Atashi A. (2024). "Second Skin of Facade Impact on Office Building Life Cycle Energy Consumption: A Comparative Study." International Journal of Architectonic, Spatial, & Environmental Design, 18(1). http://doi.org/10.18848/2325-1662/CGP/v18i01/117-134

[3] Yari nezhad, A. and Mahravan, A. (2024). "Investigating the effect of optimizing external skins and translucent walls on reducing energy consumption and investment return time of educational buildings in a temperate climate with dry and very hot summers." Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 36(1), 41-60. [In Persian] https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.81531.1175

[4] Mousavi Navai A, Falavand Jozai A, Ghafouri A, & Mahdavi Adeli M. (2024). "The effect of using air gaps in walls on reducing the energy consumption of a residential building." New Applied and Computational Findings in Mechanical Systems, 3(3), 56-64 [In Persian].

[5] Ghoddosifar SM, and Asl MF. (2023) "Analyzing the double skin facade moving in the effi-

ciency of energy consumption in residential buildings sustainability in Tabriz city.," J. Sus. Dev. & Env., vol. 3, no. 4, 4, pp. 21-41. [In Persian] https://civilica.com/doc/1611288.

[6] khayami S, and daneshjoo K. (2022). "The Effect of Dynamic Double Skin Façade on Energy Efficiency in Khayyam Administrative Building," Naqshejahan - Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning, vol. 12, no. 2, pp. [In Persian] http://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1401.12.2.6.8

[7] Feehan A, Nagpal H, Marvuglia A, & Gallagher J. (2021). Adopting an integrated building energy simulation and life cycle assessment framework for the optimisation of facades and fenestration in building envelopes. Journal of Building Engineering, 43, 103138. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103138

[8] Ustaoglu A, Yaras A, Sutcu A, and Gencel A.(2021). "Investigation of the residential building having novel environment-friendly construction materials with enhanced energy performance in diverse climate regions: Cost-efficient, low-energy and low-carbon emission," Journal of Building Engineering, vol. 43, p. 102617. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102617.

[9] Mirrashid M, and Mirsaeedie L. (2020). "The Effect of Thrombus Wall System on Thermal Comfort in Temperate and Humid Climates (Case study of a residential building in Gonbad Kavous)." J. Env. Sci. Tech, vol. 22. [In Persian] https://sid.ir/paper/391780/fa.

[10] Fathalian A, and Kargarsharifabad H. (2020). "Investigating the Effect of Different Energy Saving Strategies on Energy Rating of Building by Design Builder Software (Case Study: Office Building)," j. Env. Sci. Tech., vol. 22, no. 7, pp. 199-214. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jest.2019.42973.4590.

[11] Pedroso M, Flores-Colen, I, Silvestre JD, Gomes MG, Silva L, Sequeira P, & de Brito J. (2020). Characterisation of a multilayer external wall thermal insulation system. Application in a Mediterranean climate. Journal of Building Engineering, 30, 101265. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101265.

[12] Batard A, Duforestel T, Flandin L, & Yrieix B. (2018). Modelling of long-term hygro-thermal behaviour of vacuum insulation panels. Energy and Buildings, 173, 252-267. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.041.

[13] Dutta A, Samanta A, and Neogi S. (2017) "Influence of orientation and the impact of external window shading on building thermal performance in tropical climate," Energy and Buildings, vol. 139, pp. 680-689. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.018.

[14] Zomorodian ZS, Tahsildoost M. (2016) Validation of Energy Simulation Programs: An Empirical and Comparative Approach. IJE, 18 (4). [In Persian] http://necjournals.ir/article-1-803-fa.html

[15] Witte MJ, Henninger RH, Glazer J, & Crawley DB. (2001). Testing and validation of a new building energy simulation program. Proceedings, Building Simulation, International Building Performance Simulation Association (IBSPA), Rio de Janeiro, Brazil.

[16] Henninger RH, Witte MJ, & Crawley DB. (2003). Experience testing EnergyPlus with the IEA HVAC BESTEST E100 - E200 Series. In Proceedings of Building Simulation.

[17] Ghatti V. (2003). Experimental validation of the EnergyPlus low-temperature radiant simulation. Transactions, 109(2), 614-623.

[18] EnergyPlus Testing with ANSI/ASHRAE Standard 140-2001

[19] EnergyPlus Testing with HVAC BESTEST Part 1 - Tests E100 to E200

[20] DesignBuilder v6 Compliance With ANSI/ASHRAE/ACCA Standard 183-2007

[21] ANSI/ASHRAE Standard 140-2017 Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests DesignBuilder v6.1 with EnergyPlus v8.9 27 Jan 2021

[22] ANSI/ASHRAE Standard 140-2017 Space-Cooling Equipment Performance Analytical Verification Tests AE101 to AE445 DesignBuilder v6.1 with EnergyPlus v8.9 27 Jan 2021

[23] ANSI/ASHRAE Standard 140-2017

[24] Space-Cooling Equipment Performance Analytical Verification Tests CE100 to CE200 DesignBuilder v6.1 with EnergyPlus v8.9 27 Jan 2021

[25] ANSI/ASHRAE Standard 140-2017 Space-Heating Equipment Performance Tests

[26] HE100 to HE230 DesignBuilder v6.1 with EnergyPlus v8.9 27 Jan 2021