

تحلیل سلسله‌مراتبی پارامترهای مؤثر بر مصرف انرژی در ساختمان با رویکرد طراحی پایدار

جلال رضائی^۱، طیبه بیاتلو^{۲*}

^۱گروه عمران - مدیریت ساخت، دانشگاه دانش البرز، قزوین، ایران

^۲گروه معماری، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول)

چکیده

در سال‌های اخیر، تغییر الگوهای ساخت‌وساز و بی‌توجهی به اصول طراحی پایدار، منجر به کاهش آسایش حرارتی در ساختمان‌ها و افزایش وابستگی به منابع انرژی فسیلی شده است. این وابستگی، ضمن کاهش منابع انرژی، موجب افزایش گازهای گلخانه‌ای و تهدید پایداری زیست‌محیطی شده است. در چنین شرایطی، بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش ساختمان، که سهمی نزدیک به ۴۰ درصد از کل مصرف انرژی کشور را به خود اختصاص داده، ضرورتی انکارناپذیر محسوب می‌شود. این پژوهش با هدف شناسایی و اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر بر مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی، با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و در چارچوب طراحی پایدار انجام گرفته است. در این راستا، یک ساختمان چهارطبقه در شهر تهران به عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب شد و سناریوهای ساخت متداول و بهینه از نظر مصرف انرژی، شامل عایق‌کاری حرارتی، استفاده از شیشه‌های دوجداره و طراحی سقف شیب‌دار، مورد مقایسه قرار گرفتند. برای اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر، از نرم‌افزار Expert Choice و نظرات خبرگان بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که نسبت سطح پنجره به دیوار (WWR) با وزن ۰٫۳۶، بیشترین تأثیر را بر کاهش مصرف انرژی دارد، و پس از آن عایق‌کاری پوسته خارجی و تعداد نماهای ساختمان در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. از سوی دیگر، پارامترهایی همچون تعداد ساکنین و تعداد طبقات کمترین تأثیر را داشتند. همچنین مقایسه عددی دو سناریو حاکی از آن بود که در طراحی بهینه، مصرف سالانه برق و گاز به ترتیب حدود ۲۳٪ و ۳۲٪ کاهش می‌یابد. یافته‌های این تحقیق ضمن تأیید نقش حیاتی طراحی کالبدی در مصرف انرژی، نشان می‌دهد که بهره‌گیری هم‌زمان از تکنیک‌های بهینه‌سازی و ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند راهگشای دستیابی به ساختمان‌های کم‌مصرف و سازگار با محیط‌زیست باشد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی مصرف انرژی، تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، طراحی پایدار، ساختمان انرژی صفر، توسعه پایدار، ساختمان‌های مسکونی

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد روزافزون جمعیت، توسعه شهری و افزایش تقاضای انرژی، چالش‌های متعددی را در مسیر تحقق توسعه پایدار به وجود آورده است. در این میان، صنعت ساخت‌وساز به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین بخش‌های انرژی، حدود ۴۰٪ از مصرف نهایی انرژی جهان را به خود اختصاص می‌دهد و سهم قابل توجهی در تولید گازهای گلخانه‌ای دارد (Desai, 2020). از این رو، بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها به‌عنوان یکی از رویکردهای کلیدی در کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری انرژی در دستور کار دولت‌ها، مهندسان و برنامه‌ریزان شهری قرار گرفته است.

ساختمان‌ها نه تنها در مرحله بهره‌برداری، بلکه در مراحل ساخت و طراحی نیز سهم قابل توجهی از منابع انرژی را مصرف می‌کنند. انرژی مصرفی در طول چرخه عمر ساختمان (شامل انرژی نهفته و انرژی عملکردی) تأثیر مستقیمی بر پایداری محیط‌زیستی و اقتصادی پروژه‌ها دارد (Eleftheriadis, Mumovic, & Greening, 2017). در کشورهای در حال توسعه، از جمله ایران، الگوهای ساخت‌وساز به‌طور عمده بر اساس روش‌های سنتی و بدون توجه کافی به معیارهای بهره‌وری انرژی صورت می‌گیرد. آمارها نشان می‌دهد که حدود ۴۰٪ از کل مصرف انرژی کشور در بخش خانگی و تجاری رخ می‌دهد، که بخش عمده‌ای از آن ناشی از ناکارآمدی طراحی معماری، فقدان عایق مناسب و استفاده از فناوری‌های غیربهینه است (وزارت نفت، ۱۴۰۰).

با توجه به اهمیت کالبد فیزیکی ساختمان و نقش آن در کاهش مصرف انرژی، شناسایی عوامل مؤثر بر عملکرد حرارتی و بهینه‌سازی آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. پارامترهایی نظیر نسبت پنجره به دیوار، عایق کاری پوسته خارجی، تعداد طبقات، ابعاد ساختمان و جهت‌گیری آن، از جمله عواملی هستند که می‌توانند به‌طور مستقیم بر میزان نیاز سرمایشی و گرمایشی ساختمان اثرگذار باشند.

در این راستا، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، به شناسایی و اولویت‌بندی پارامترهای کالبدی مؤثر بر مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی پرداخته است. استفاده از این روش، امکان تصمیم‌گیری نظام‌مند بر اساس نظرات خبرگان و تحلیل چندمعیاره را فراهم ساخته و از این طریق، می‌توان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مصرف انرژی را با دقت بالا شناسایی و برای بهینه‌سازی طراحی ساختمان‌ها به کار گرفت.

نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند برای مهندسان طراح، مشاوران انرژی، سیاست‌گذاران حوزه مسکن و نهادهای مرتبط با توسعه پایدار شهری مفید واقع شود؛ چرا که با اتکا به آن می‌توان راهکارهایی عملی برای کاهش مصرف انرژی، بهبود عملکرد حرارتی ساختمان‌ها و کاهش آثار زیست‌محیطی ناشی از ساخت‌وساز ارائه داد.

۲- مبانی نظری

۲-۱- توسعه پایدار در معماری مسکونی ایران

مفهوم توسعه پایدار در معماری، به‌ویژه در حوزه مسکن، بر تلفیق طراحی معمارانه با ملاحظات زیست‌محیطی و بهینه‌سازی مصرف انرژی تمرکز دارد. این رویکرد با هدف حفظ منابع طبیعی، کاهش پیامدهای منفی زیست‌محیطی و ارتقای کیفیت زندگی انسانی، در دهه‌های اخیر به‌واسطه نگرانی‌های فزاینده درباره مصرف سوخت‌های فسیلی و اثرات مخرب آن، اهمیت دوچندانی یافته است (Le et al., 2023). در این چارچوب، معماری پایدار به‌عنوان رویکردی نوین و جامع مطرح می‌شود که به طراحی ساختمان‌هایی هماهنگ با اقلیم، کم‌مصرف در انرژی و سازگار با زیست‌بوم انسانی می‌پردازد (Rivera et al., 2022).

معماری پایدار با بهره‌گیری از فناوری‌های نوینی همچون شیشه‌های هوشمند، پنل‌های خورشیدی، دیوارهای دوجداره و مصالح زیست‌سازگار، تلاش دارد تا ردپای زیست‌محیطی ساختمان‌ها را به حداقل رسانده و در عین حال بهره‌وری منابع طبیعی را ارتقاء دهد (Hafez et al., 2023). سه اصل بنیادین این رویکرد عبارتند از: صرفه‌جویی در مصرف منابع، طراحی برای بازیافت‌پذیری، و تمرکز بر انسان‌محوری در محیط‌های مصنوع. اصل نخست به استفاده مؤثر از انرژی و منابع غیرقابل تجدید

اشاره دارد؛ اصل دوم، بازیافت‌پذیری مصالح و کاهش پسماند ساختمانی را دنبال می‌کند؛ و اصل سوم بر ارتقاء آسایش فیزیکی، روانی و اجتماعی کاربران تأکید دارد (الخاص پور و همکاران، ۱۳۹۵).

کاربست این اصول در معماری مسکونی ایران با توجه به اقلیم متنوع، مصالح بومی و غنای فرهنگی مناطق مختلف، امکان‌پذیر و مؤثر است. راهکارهایی نظیر استفاده از انرژی خورشیدی و بادی، طراحی بازشوها و سایه‌بان‌ها براساس مسیر تابش خورشید، و تلفیق عناصر طبیعی همچون گیاهان در نما، نمونه‌هایی از اقدامات مؤثر در جهت کاهش انرژی مصرفی ساختمان‌ها به‌شمار می‌روند (بشردوست، ۱۳۹۸).

افزون بر این، معماری پایدار مستلزم همکاری میان معماران و متخصصان حوزه‌های سازه، تأسیسات مکانیکی و الکتریکی است تا پایداری زیست‌محیطی، اقتصادی و عملکردی به‌طور هم‌زمان حاصل شود. (Rivera et al., 2022) در این میان، عوامل اقلیمی همچون جهت‌گیری ساختمان، نوع مصالح، رنگ نما و فناوری‌های کنترل نور و حرارت، نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف انرژی ایفا می‌کنند. (Le et al., 2023) انتخاب مصالح نیز باید با در نظر گرفتن قابلیت بازیافت، منبع تجدیدپذیر، فرآیند تولید با آسیب کم، غیرسمی بودن و دوام بالا صورت گیرد (الخاص پور و همکاران، ۱۳۹۵). در مجموع، معماری پایدار می‌کوشد تا تعادل میان انسان، ساختمان و طبیعت را برقرار ساخته و از این رهگذر، مصرف انرژی را بهینه، طول عمر ساختمان را افزایش و کیفیت زیست شهری را ارتقاء بخشد (Hafez et al., 2023).

۲-۲- اهداف و ضرورت معماری پایدار در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی

معماری پایدار با هدف ارتقاء کیفیت زندگی انسان‌ها و حفظ منابع طبیعی برای نسل‌های آینده، بر اصولی استوار است که نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها ایفا می‌کنند. از جمله این اصول می‌توان به کاهش وابستگی به منابع انرژی تجدیدناپذیر، بهره‌گیری از انرژی‌های طبیعی (نظیر نور و تهویه طبیعی)، استفاده از مصالح زیست‌سازگار و بهبود کیفیت زیست‌محیطی فضاهای معماری اشاره کرد (گرچی مهلبانی و علی، ۱۳۸۹).

اهداف کلیدی طراحی پایدار در حوزه ساختمان شامل موارد زیر است:

- کاهش مصرف منابع فسیلی از طریق طراحی مناسب فرم و جهت‌گیری ساختمان و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر؛
- کاهش یا حذف مواد سمی و آلاینده‌ها در فرآیند ساخت‌وساز؛
- حفظ و احیای محیط زیست طبیعی از طریق طراحی هماهنگ با اقلیم و بهره‌گیری از فناوری‌های سبز.

ضرورت پیاده‌سازی این رویکرد در معماری امروز، با توجه به رشد نگران‌کننده گازهای گلخانه‌ای، بیش از پیش احساس می‌شود. افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن از ۲۷۰ به ۳۷۷ ppm طی سه قرن گذشته، پیامدهایی همچون تغییرات اقلیمی شدید، سیلاب‌ها، خشکسالی‌ها و کاهش منابع آب شیرین را در پی داشته است (رحیمی و همکاران، ۱۴۰۴). از سوی دیگر، وابستگی مفرط به سوخت‌های فسیلی، آسیب‌پذیری سیستم‌های تأمین انرژی و هزینه‌های بلندمدت نگهداری ساختمان‌ها را افزایش داده است.

در این زمینه، انتخاب مصالح نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. استفاده از چوب‌های سریع‌الرشد یا مواد بازیافت‌پذیر، نمونه‌ای از تصمیمات آگاهانه‌ای است که می‌تواند همزمان به کاهش انرژی نهفته در مصالح و کاهش اثرات زیست‌محیطی منجر شود (گرچی مهلبانی و یاران، ۱۳۸۹).

معماری پایدار با تکیه بر اصول طراحی هوشمندانه، نقش مهمی در مقابله با تهدیدهای زیست‌محیطی ایفا می‌کند. این رویکرد نه تنها منجر به کاهش مصرف انرژی و آلودگی می‌شود، بلکه با ارتقاء بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی ساختمان، به پایداری اقتصادی و اجتماعی نیز کمک می‌کند. در مقیاس شهری، طراحی پایدار مبتنی بر سه محور اصلی است: (۱) منابع محیطی نظیر انرژی، ریزاقلیم، آب و فضای سبز؛ (۲) مهارت طراحی و به‌کارگیری فناوری‌های نوین؛ و (۳) توجه به نیازها و ارزش‌های اجتماعی (Hafez et al., 2023).

در مجموع، درک دقیق اهداف معماری پایدار و ضرورت‌های آن، پیش‌نیاز تحلیل پارامترهای مؤثر بر مصرف انرژی در ساختمان‌ها به‌شمار می‌رود؛ چرا که هر تصمیم طراحی می‌تواند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر کارایی انرژی ساختمان و اثرات محیط‌زیستی آن تأثیرگذار باشد.

۲-۳- چالش‌های مصرف انرژی در ساختمان با تأکید بر رویکرد توسعه پایدار

ایران با جمعیتی بالغ بر ۸۰ میلیون نفر، از جمله کشورهایی است که مصرف سرانه انرژی در آن بسیار بالا بوده و در برخی موارد با کشورهای پرجمعیتی مانند چین برابری می‌کند (سابا، ۱۳۸۳). بخش ساختمان و مسکن به عنوان یکی از مهم‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در کشور، نقشی اساسی در بحران انرژی ایفا می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که الگوی مصرف انرژی در ساختمان‌های ایران به‌مراتب بالاتر از استانداردهای جهانی است و بازده انرژی در این بخش در مقایسه با کشورهای توسعه‌یافته، بسیار پایین ارزیابی می‌شود. (Lombard et al., 2008, p. 397)

به‌عنوان نمونه، برای تولید هر واحد از تولید ناخالص داخلی، ایران به‌طور متوسط پنج برابر بیشتر از ژاپن انرژی مصرف می‌کند. این امر بیانگر شدت انرژی بالا و ناکارآمدی ساختاری در مدیریت مصرف آن است. از سوی دیگر، رشد سریع جمعیت، شهرنشینی گسترده و افزایش تقاضا برای ساختمان‌های مسکونی و تجاری، منجر به افزایش فشار بر منابع انرژی شده است. در حال حاضر، بیش از ۴۰٪ از مصرف انرژی کشور به بخش ساختمان اختصاص دارد، در حالی که این سهم در کشورهای توسعه‌یافته به‌مراتب کمتر است (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۸).

گزارش سالانه شرکت BP در سال ۲۰۱۳ نشان می‌دهد که ایران با مصرف ۱۶۲٫۲ میلیارد مترمکعب گاز طبیعی، پس از ایالات متحده، روسیه و چین، چهارمین کشور مصرف‌کننده بزرگ گاز طبیعی در جهان بوده است؛ نکته قابل تأمل آن که مصرف گاز ایران از چین با بیش از یک میلیارد نفر جمعیت نیز فراتر رفته است. (BP Statistical Review, 2013)

این میزان بالای مصرف انرژی در ساختمان‌ها، پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی جدی در پی دارد. از یک سو، افزایش هزینه یارانه‌های انرژی و فشار بر بودجه دولت، و از سوی دیگر، تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی، به تشدید گرمایش جهانی، آلودگی هوا و تهدید سلامت عمومی منجر می‌شود. بنابراین، بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش ساختمان، نه‌تنها ضرورتی اقتصادی، بلکه الزامی برای توسعه پایدار زیست‌محیطی است.

در پاسخ به این چالش‌ها، بسیاری از کشورها با بهره‌گیری از راهکارهایی نظیر معماری پایدار، انرژی‌های تجدیدپذیر، فناوری‌های هوشمند و طراحی‌های الگوریتمیک، تلاش کرده‌اند مصرف انرژی در ساختمان‌ها را به‌صورت ساختاری کاهش دهند. (Hong et al., 2015)

انرژی‌های تجدیدپذیر که از منابع طبیعی تأمین می‌شوند، برخلاف سوخت‌های فسیلی، تمام‌شدنی نیستند. مهم‌ترین انواع این انرژی‌ها شامل انرژی خورشیدی^۱، بادی^۲، زمین‌گرمایی^۳، زیست‌توده^۴ و انرژی هیدروالکتریک^۵ است (REN21, 2024). ادغام این منابع با طراحی معماری و سیستم‌های بهره‌برداری، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش مصرف نهایی انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن ایفا کند. نمونه بارز این رویکرد، ساختمان‌های با انرژی صفر^۶ هستند که انرژی مورد نیاز خود را از منابع تجدیدپذیر تأمین می‌کنند. (Zuo & Zhao, 2014)

^۱ انرژی خورشیدی پرکاربردترین نوع انرژی تجدیدپذیر در صنعت ساختمان است و به دو شیوه‌ی حرارتی (سیستم‌های گرمایش خورشیدی آب، طراحی‌های غیرفعال حرارتی) و الکتریکی (Patel, 2024) (پنل‌های فتوولتائیک) استفاده می‌شود. نصب پنل‌های خورشیدی بر روی بام‌ها یا نماهای ساختمان، توانایی تولید انرژی الکتریکی مورد نیاز را دارد.

^۲ انرژی بادی با استفاده از توربین‌های بادی کوچک در مناطق روستایی یا بادخیز، برق مصرفی ساختمان‌ها تأمین می‌شود. هرچند کاربرد آن در مناطق شهری به دلیل مسائل بصری و نویز، کمتر است (Khan & Ghamdi, 2021).

^۳ در اقلیم‌های معتدل می‌تواند بسیار GSHPs انرژی زمین‌گرمایی از گرمای درونی زمین برای تأمین گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها بهره می‌برد. سیستم‌های پمپ حرارتی زمین‌گرمایی (Hafez et al., 2023) کارا باشند.

^۴ در مناطق کشاورزی یا روستاهای مستقل می‌تواند Biomass به معنای استفاده از مواد آلی قابل تجزیه (چوب، ضایعات کشاورزی، فاضلاب) برای تولید انرژی گرمایی یا الکتریکی است (Lewandowski, 2025) جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی باشد.

^۵ REN21 با احداث توربین‌های آبی کوچک بر روی رودخانه‌ها، امکان تولید برق پاک و پایدار فراهم می‌شود، هرچند این گزینه بیشتر برای مناطق خاص با منابع آبی جاری مناسب است (REN21, 2024).

^۶ Net-Zero Energy Buildings

افزون بر مزایای زیست‌محیطی، استفاده از انرژی‌های نو در ساختمان‌ها مزایای اقتصادی بلندمدت نیز به‌همراه دارد؛ از جمله کاهش هزینه‌های انرژی، افزایش ارزش ملک، بهره‌مندی از مشوق‌های دولتی و دریافت گواهی‌نامه‌های سبز بین‌المللی (IEA, 2023) با وجود این، اجرای این رویکردها با چالش‌هایی مانند هزینه‌های اولیه بالا، نیاز به فناوری‌های پیشرفته، نگهداری تخصصی و وابستگی به شرایط اقلیمی مواجه است. (Kamel et al., 2024) با این حال، توسعه فناوری و کاهش قیمت تجهیزات، به‌ویژه در حوزه انرژی خورشیدی، این موانع را در بسیاری از کشورها کاهش داده است. موفقیت بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر در ساختمان‌ها، مستلزم طراحی یکپارچه و اقلیم‌پایه است؛ رویکردی که تحت عنوان طراحی زیست‌اقلیمی^۱ شناخته می‌شود. در این نوع طراحی، متغیرهایی همچون مسیر حرکت خورشید، جهت باد، دمای هوا و رطوبت نسبی به‌عنوان عوامل اصلی در انتخاب فرم، مصالح و سیستم‌های ساختمانی در نظر گرفته می‌شوند (Hafez et al., 2023). همچنین، استفاده از طراحی الگوریتمیک و ابزارهای شبیه‌سازی انرژی و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، امکان تحلیل دقیق و بهینه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان‌ها را فراهم کرده است. در این میان، کشورهای دارای تنوع اقلیمی گسترده نظیر ایران، با بهره‌گیری از ظرفیت‌های بومی چون بادگیرها، قنات‌ها و معماری سنتی اقلیم‌محور، می‌توانند الگویی نوین برای طراحی پایدار ارائه دهند.

با این حال، فقدان سیاست‌گذاری منسجم، ضعف نظام طراحی و ساخت، و آگاهی محدود عمومی درباره مدیریت انرژی، از موانع جدی تحقق این اهداف در کشور به‌شمار می‌رود. در نتیجه، اصلاح الگوی مصرف انرژی در ساختمان‌ها نیازمند یک رویکرد چندسطحی شامل سیاست‌گذاری هوشمند، فرهنگ‌سازی، آموزش، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و بازنگری در فرآیند طراحی و ساخت‌وساز است. تحقق این تحول مستلزم همکاری نهادهای دولتی، دانشگاه‌ها، شرکت‌های ساختمانی و شهروندان خواهد بود.

۲-۴- طراحی ساختمان‌های انرژی صفر

طراحی ساختمان‌های انرژی صفر مستلزم رویکردی چندلایه و یکپارچه است که در آن عوامل اقلیمی، اصول معماری، مهندسی انرژی و فناوری‌های نوین به‌صورت هم‌افزا در فرآیند طراحی و بهره‌برداری لحاظ می‌شوند. نخستین گام در این مسیر، تحلیل دقیق اقلیم و بومی‌سازی طراحی ساختمان بر مبنای ویژگی‌های اقلیمی محل است. داده‌هایی نظیر دمای میانگین سالانه، رطوبت نسبی، شدت و جهت تابش خورشید، الگوهای باد و بارندگی، پایه تصمیم‌گیری برای جهت‌گیری ساختمان، جانمایی بازشوها، انتخاب مصالح و استقرار سایه‌اندازها را شکل می‌دهند. (Hafez et al., 2023) استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی اقلیمی نظیر *Climate Consultant* و *EnergyPlus* در این مرحله می‌تواند به ارزیابی دقیق بارهای انرژی و بهینه‌سازی طراحی کمک شایانی کند. (Bodach et al., 2023)

در مرحله دوم، طراحی معماری غیرفعال به‌عنوان یکی از ارکان اصلی کاهش تقاضای انرژی مطرح است. این رویکرد با بهره‌گیری از شرایط محیطی مانند تابش آفتاب، تهویه طبیعی و نور روز، نیاز به سیستم‌های مکانیکی پر مصرف را کاهش می‌دهد. (Elaouzy & Fadar, 2020) اقداماتی نظیر عایق‌کاری حرارتی در سطوح خارجی، استفاده از پنجره‌های دوجداره با پوشش‌های بازتابنده، طراحی سایه‌اندازهای متناسب با زاویه تابش خورشید، تهویه متقابل، و نورگیری طبیعی به‌طور هم‌زمان منجر به ارتقاء آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی می‌گردد. (Zuo et al., 2014)

پس از کاهش بار انرژی از طریق طراحی غیرفعال، نوبت به انتخاب تجهیزات مکانیکی و الکتریکی پربازده می‌رسد. بهره‌گیری از سیستم‌های تهویه مطبوع با راندمان بالا (مانند VRF)، پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی، بازیافت گرمای هوا، روشنایی LED و لوازم خانگی با رتبه انرژی A+++ می‌تواند به کاهش مصرف انرژی کمک کند (IEA, 2023; Li et al., 2023). لازم است این تجهیزات بر پایه تحلیل واقعی بارهای انرژی انتخاب شوند تا از انتخاب نامتناسب تجهیزات اجتناب گردد.

¹ Bioclimatic Design

در گام بعدی، تأمین انرژی مورد نیاز از منابع تجدیدپذیر بخش مهمی از طراحی ساختمان‌های انرژی صفر را تشکیل می‌دهد. استفاده از پنل‌های فتوولتائیک خورشیدی، کلکتورهای حرارتی، سیستم‌های هیبریدی ترکیبی (خورشیدی-بادی)، باتری‌های ذخیره انرژی و اتصال به شبکه برق سراسری، امکان تأمین و حتی مازاد تولید انرژی را فراهم می‌سازد (Wu et al., 2021). علاوه بر آن، بهره‌گیری از سامانه‌های مدیریت هوشمند ساختمان (BEMS) برای پایش داده‌های محیطی (مانند دما، حضور، نور، کیفیت هوا) و تنظیم خودکار عملکرد تجهیزات، یکی از مؤثرترین ابزارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی محسوب می‌شود (Taboada et al., 2024). این سامانه‌ها امکان زمان‌بندی عملکرد سیستم‌ها، خاموشی خودکار در صورت عدم حضور ساکنین، هماهنگی با تعرفه‌های انرژی و اتصال به شبکه هوشمند برق را فراهم می‌سازند که موجب افزایش بهره‌وری و انعطاف‌پذیری در مدیریت انرژی می‌شود (Latief et al., 2017). نهایتاً، طراحی مبتنی بر اصول زیست‌محیطی و استفاده از مصالح پایدار، بعدی اساسی از ساختمان‌های انرژی صفر است. مصالح مورد استفاده باید دارای چرخه عمر طولانی، قابلیت بازیافت، ردپای کربن پایین و سازگار با محیط‌زیست باشند (Sadafi et al., 2021) انتخاب موادی چون بتن سبز، چوب‌های پایدار، عایق‌های طبیعی و مصالح بومی ضمن کاهش اثرات زیست‌محیطی، با اقتصاد محلی نیز همخوانی دارد. تحلیل چرخه عمر (LCA) مصالح و سیستم‌ها، ارزیابی پایداری در تمام مراحل ساخت، بهره‌برداری و بازیافت را ممکن می‌سازد (Pomponi & Moncaster, 2020).

در مجموع، علی‌رغم پیشرفت‌های جهانی در حوزه طراحی پایدار، اجرای عملی ساختمان‌های انرژی صفر در ایران با چالش‌هایی همچون کمبود داده‌های میدانی، هزینه بالای فناوری، ضعف در سیاست‌گذاری منسجم، و عدم آگاهی عمومی مواجه است. در بیشتر مطالعات، به راهکارهای کلی پرداخته شده و توجه کافی به ویژگی‌های اقلیمی، فرهنگی و اقتصادی خاص ایران صورت نگرفته است. از این رو، توسعه چارچوب‌های بومی، انجام مطالعات میدانی و ارتقاء همکاری میان‌بخشی میان نهادهای دولتی، دانشگاهی و خصوصی برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار در معماری مسکونی کشور ضروری است.

۲-۵- الگوها و تجارب جهانی موفق در بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها با رویکرد طراحی پایدار

در سطح جهانی، بسیاری از کشورها با توجه به اهمیت کاهش مصرف انرژی و مقابله با تغییرات اقلیمی، پروژه‌ها و برنامه‌های موفق را در زمینه معماری پایدار و ساختمان‌های کم‌مصرف به اجرا گذاشته‌اند. بررسی این الگوها می‌تواند راهنمای موثری برای بهبود شرایط داخلی و توسعه راهکارهای بومی‌سازی شده باشد.

آلمان با اجرای برنامه‌های «ساختمان‌های انرژی صفر و ساختمان‌های انرژی مثبت»^۱ موفق شده است که با تمرکز بر طراحی غیرفعال، استفاده گسترده از انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته مدیریت انرژی، مصرف انرژی در ساختمان‌ها را به حداقل برساند (European Commission, 2021). این کشور همچنین با ارائه مشوق‌های مالی و قوانین سخت‌گیرانه استانداردهای انرژی، بستر مناسبی برای توسعه ساختمان‌های پایدار فراهم کرده است (BMWK, 2020).

دانمارک در زمینه توسعه شهرک‌های پایدار، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم‌های مدیریت هوشمند انرژی پیشرو است. پروژه‌هایی مانند «Ørestad» در کپنهاگ، نمونه‌ای از طراحی جامع مبتنی بر بهره‌وری انرژی، شبکه‌های توزیع انرژی محلی و سازگاری با شرایط اقلیمی منطقه است (Danish Energy Agency, 2019). علاوه بر این، استفاده از توربین‌های بادی و سیستم‌های گرمایش مرکزی با بهره‌وری بالا، بخش مهمی از استراتژی این کشور محسوب می‌شود (IEA, 2023).

ژاپن با توجه به محدودیت منابع طبیعی خود، تمرکز ویژه‌ای بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها دارد. استفاده از فناوری‌های نوین مانند پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک، سیستم‌های تهویه مکانیکی با بازیافت انرژی و طراحی‌های اقلیمی بهینه، نمونه‌های موفق از این رویکرد هستند (Lopes et al., 2005). ژاپن همچنین در زمینه الگوریتم‌های هوشمند مدیریت مصرف انرژی ساختمان پیشرو است که باعث کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی می‌شود (Syed et al., 2021).

¹ Plus Energy Buildings

در آمریکا، استاندارد LEED^۱ به عنوان یکی از معتبرترین سیستم‌های ارزیابی ساختمان‌های سبز شناخته شده است که معیارهای دقیقی در زمینه مصرف انرژی، استفاده از مواد سازگار با محیط زیست، کیفیت هوا و مدیریت منابع (USGBC, 2023). شهرهای پیشرفته‌ای مانند سانفرانسیسکو و سیاتل پروژه‌های بزرگی با هدف افزایش ساختمان‌های انرژی کارآمد و کاهش انتشار کربن اجرا کرده‌اند (DOE, 2022).

استرالیا با اجرای مقررات سخت‌گیرانه انرژی در بخش ساختمان و توسعه برنامه‌هایی مانند «NABERS»^۲ بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌ها را هدف قرار داده است. استفاده از فناوری‌های خورشیدی و طراحی سازگار با اقلیم‌های متنوع این کشور، از عوامل موفقیت این برنامه‌هاست (Australian Government, 2023).

مرور مبانی نظری و مطالعات پیشین نشان می‌دهد که علی‌رغم گسترش جهانی رویکردهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان و توسعه راهکارهایی چون طراحی غیرفعال، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و فناوری‌های هوشمند، اکثر پژوهش‌های داخلی به بررسی‌های کلی و غیرتخصصی بسنده کرده‌اند و به‌ندرت شرایط اقلیمی، اقتصادی و فرهنگی متنوع ایران را به‌صورت تلفیقی و کاربردی مورد تحلیل قرار داده‌اند. علاوه بر این، نبود چارچوب‌های تحلیلی جامع که بتواند عوامل محیطی، فناورانه و اجتماعی را یکپارچه بررسی کند، یک خلأ مهم در ادبیات پژوهش محسوب می‌شود.

مطالعه حاضر با هدف پر کردن این خلأ، به تحلیل چالش‌ها و ظرفیت‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های ایران با رویکرد توسعه پایدار می‌پردازد، به‌نحوی که پیوند میان بستر بومی، راهکارهای جهانی و نیازهای محلی را روشن سازد.

۳- روش تحقیق و معرفی داده‌ها

در این پژوهش، تحلیل مصرف انرژی در یک ساختمان مسکونی چهار طبقه در شهر تهران انجام گرفته است. ساختمان مذکور شامل هشت واحد مسکونی ۱۵۰ مترمربعی با پلان مستطیلی و ابعاد ۱۸ متر در هر چهار نما (شمالی، جنوبی، شرقی و غربی) است. مراحل اجرایی تحلیل مصرف انرژی بر پایه انجام ممیزی انرژی، تحلیل سازه‌ای، شبیه‌سازی مصرف، و ارزیابی تأثیر بهینه‌سازی‌ها انجام شده است.

فرآیند ممیزی انرژی این ساختمان با هدف تحلیل دقیق وضعیت موجود و بررسی پتانسیل‌های بهینه‌سازی، به صورت ترکیبی از بازدید میدانی، پرسش‌نامه‌های تخصصی، و برداشت فنی اجزای ساختمانی انجام شد. در این مرحله، ویژگی‌های فیزیکی اجزای ساختمان شامل دیوارها، سقف، کف، پنجره‌ها و درزهای نفوذ هوا مستند شد. دیوارهای جانبی با ضخامت ۲۲ سانتی‌متر از آجر معمولی ساخته شده‌اند و فاقد عایق حرارتی می‌باشند. پنجره‌ها از نوع فلزی با شیشه تک‌جلداره بوده و سهم قابل توجهی در تلفات حرارتی داشته‌اند. همچنین، کف طبقه اول و پشت‌بام نیز بدون هرگونه عایق حرارتی طراحی شده بودند.

جدول ۱: مشخصات ساختمان مورد مطالعه

مشخصات عمومی	اطلاعات
محل پروژه	تهران، منطقه ۴
کاربری	مسکونی
سال ساخت	۱۳۹۱
سال بهره‌برداری	۱۳۹۴
تعداد طبقات	۵ طبقه (۴ طبقه مسکونی + همکف)
سطح زیربنا	۱۵۰۰ متر مربع
ابعاد ساختمان: طول و عرض و ارتفاع	۱۵/۷۰ و ۱۸ و ۱۸

^۱Leadership in Energy and Environmental Design

^۲ National Australian Built Environment Rating System

مساحت ساختمان (m^2)	۳۰۰
مساحت تحت سیستم گرمایش (m^2)	۳۰۰
مساحت تحت سیستم سرمایش (m^2)	۳۰۰
حجم کل ساختمان (m^3)	۱۵۰۰
سیستم گرمایشی	شوفاژ، داکت اسپلیت
سیستم سرمایشی	داکت اسپلیت

در گام بعد، به منظور ارزیابی کمی اثر بهینه سازی، دو سناریوی مقایسه ای تعریف شد. در سناریوی اول، وضعیت موجود ساختمان به همراه ویژگی های فیزیکی فعلی، مبنای تحلیل قرار گرفت. در سناریوی دوم، فرض شد که اصلاحاتی نظیر نصب پنجره های دوجداره با گاز آرگون، استفاده از عایق پلی یورتان برای دیوارها، کف و سقف، و همچنین اجرای سقف کاذب در زیر پشت بام انجام شده است. پس از آن، محاسبات توان اتلاف حرارتی در شرایط روز و شب برای هر دو سناریو با استفاده از فرمول های مهندسی و مدل سازی حرارتی صورت پذیرفت.

جدول ۲: خلاصه محاسبات توان اتلاف حرارتی در روز برای ساختمان معمولی چهار طبقه (۸ واحدی)

برای دیوار اجری معمولی (۲۲ سانت آجر، ۳ سانت گچ و خاک و ۳ سانت سیمان)

اجزاء مختلف ساختمان	مساحت (متر مربع)	ضریب انتقال حرارت $Btu/h.ft^2.F^0$	ΔT ($^{\circ}F$)	توان اتلاف حرارت (کیلووات)
سقف	۳۰۰	۰/۴	۴۵	۳۲/۷۳
مجموع دیوارهای شرقی و غربی	۱۸۶*۲	۰/۳۲	۴۵	۲۳/۵۵
دیوار جنوبی	۱۶۰/۲۵	۰/۳۲	۴۵	۷/۲۷
دیوار شمالی	۱۶۲/۰۱	۰/۳۲	۴۵	۷/۲۷
کف	۳۰۰		۳۶/۶	۰/۷۵۷
کنج			۴۵	۱/۴۳
پنجره ها	۱۰۱/۹۵	آهن ۱/۱۷۶ و شیشه ۱/۱۵۵	۴۵	۰/۷۵۷
درب های خروجی	۳۸/۴	۰/۰۹۸	۴۵	۰/۵۳۴
هوای نفوذی از پنجره ها و درها و فن ها			۴۵	۷/۲۷۴
هوای نفوذی مربوط به عبور نفرات از درها			۴۵	۰/۵۷
جمع				۸۲/۱۴۲

توان انرژی جذب شده از شیشه ها = $17/87$ کیلووات می باشد.

کیلووات $64/272 = 17/87 - 82/142$ = کل توان اتلاف حرارت در روز

بر اساس این محاسبات، مجموع توان حرارتی تلف شده در شرایط روز برای ساختمان موجود برابر با $64,27$ کیلووات و در شب $67,68$ کیلووات به دست آمد. در مقابل، در وضعیت بهینه شده، این مقادیر به ترتیب به $7,33$ کیلووات در روز و $36,67$ کیلووات

در شب کاهش یافت. تحلیل عددی نشان می‌دهد که بیشترین میزان کاهش اتلاف حرارت مربوط به دیوارهای جانبی و پنجره‌ها بوده که با اقدامات بهینه‌سازی، عملکرد حرارتی قابل توجهی پیدا کرده‌اند.

جدول ۳: خلاصه محاسبات توان اتلاف حرارتی در شب برای ساختمان معمولی چهار طبقه (۸ واحدی)

اجزاء مختلف ساختمان	مساحت (متر مربع)	ضریب انتقال حرارت $\text{Btu/h.ft}^2.\text{F}^0$	ΔT (°F)	توان اتلاف حرارت (کیلووات)
سقف	۳۰۰	۰/۴	۵۷/۶	۲۱/۶۸
مجموع دیوارهای شرقی و غربی	۱۸۶*۲	۰/۳۲	۵۷/۶	۲۲/۲۶
دیوار جنوبی	۱۶۰/۲۵	۰/۳۲	۵۷/۶	۹/۳۱
دیوار شمالی	۱۶۲/۰۱	۰/۳۲	۵۷/۶	۹/۴۱
کف	۳۰۰		۳۶/۶	۰/۷۵
کنج			۵۷/۶	۱/۸
پنجره‌ها	۱۰۱/۹۵	آهن ۱/۱۷۶ و شیشه ۱/۱۵۵	۵۷/۶	۱/۱۰
درهای خروجی	۳۸/۴	۰/۰۹۸	۵۷/۶	۰/۶۸۳
هوای نفوذی از پنجره‌ها و درها و فن‌ها			۵۷/۶	۹/۶۸۴
هوای نفوذی مربوط به عبور نفرات از درها			۵۷/۶	۰/۷۲۹
جمع				۷۶/۶۷۷

توان انرژی جذب شده از شیشه‌ها = ۰ می‌باشد. کیلووات ۶۷/۶۸۳ = کل اتلاف حرارت در شب

در گام بعد، برای برآورد مصرف سالانه گاز طبیعی، شاخص درجه‌روز حرارتی در منطقه تهران مورد استفاده قرار گرفت. با فرض شرایط اقلیمی سالانه تهران، مصرف گاز طبیعی در ساختمان موجود برابر با ۲۱۹۰۱ مترمکعب محاسبه شد. این در حالی است که در حالت بهینه‌شده، این مقدار به ۷۲۳۳،۷ مترمکعب کاهش یافت که نشان‌دهنده صرفه‌جویی ۱۴۶۶۷ مترمکعب در سال است.

جدول ۴: خلاصه محاسبات توان اتلاف حرارتی در روز برای ساختمان معمولی چهار طبقه (۸ واحدی)

برای دیوار آجری پیشنهادی (۲۲ سانت آجر، ۳ سانت گچ و خاک و ۴ سانت فاصله هوایی)

اجزاء مختلف ساختمان	مساحت (متر مربع)	ضریب انتقال حرارت $\text{Btu/h.ft}^2.\text{F}^0$	ΔT (°F)	توان اتلاف حرارت (کیلووات)
سقف کاذب زیر شیروانی	۳۰۰	۰/۰۸	۳۹/۳	۲/۹۶
مجموع دیوارهای شرقی و غربی	۱۸۶*۲	۰/۰۸۶	۴۵	۴/۶۷
دیوار جنوبی	۱۶۰/۲۵	۰/۰۸۶	۴۵	۱/۹۵
دیوار شمالی	۱۶۲/۰۱	۰/۰۸۶	۴۵	۱/۹۵
کف	۳۰۰		۳۶/۶	۰/۷۵۷
کنج			۴۵	۱/۴۳
پنجره‌ها	۱۰۱/۹۵	آهن ۱/۱۷۶ و شیشه ۱/۱۵۵	۴۵	۰/۵۱

		۰/۶۱۲۵		
درب‌های خروجی	۳۸/۴	۰/۰۹۸	۴۵	۰/۵۳۴
هوای نفوذی از پنجره‌ها و درب‌ها و فن‌ها			۴۵	۷/۲۷۴
هوای نفوذی مربوط به عبور نفرات از درب‌ها			۴۵	۰/۵۷
جمع				۲۲/۶۰۵

توان انرژی جذب شده توسط شیشه‌ها = $15/7$ کیلووات می‌باشد.

کیلووات $15/7 = 7/325 - 22/605$ = کل اتلاف حرارتی در روز در هر لحظه

این صرفه‌جویی انرژی، معادل حدود ۸۹,۳۱ بشکه نفت خام در سال است. اگر طول عمر مفید ساختمان ۳۰ سال در نظر گرفته شود، میزان انرژی ذخیره‌شده معادل ۲۹۵۹۷۴ لیتر گازوئیل خواهد بود. از منظر زیست‌محیطی، این به معنای جلوگیری از انتشار حدود ۷۴ تن آلاینده CO_2 و سایر گازهای گلخانه‌ای در طی سه دهه است.

نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که حتی در ساختمان‌های موجود نیز با استفاده از مصالح قابل دسترس و تکنولوژی‌های ساده، می‌توان کاهش چشم‌گیری در مصرف انرژی ایجاد کرد. اقدامات بهینه‌سازی در این پروژه، موجب کاهش ۴۴ درصدی در بار گرمایشی ساختمان شده است. اگر این نتایج برای کل متراژ ساختمان لحاظ شود، مقدار صرفه‌جویی انرژی معادل ۰,۱۶ بشکه نفت خام به‌ازای هر مترمربع زیربنا در سال خواهد بود؛ مقداری که نقش مهمی در تحقق اهداف توسعه پایدار و سیاست‌های ملی انرژی خواهد داشت.

براساس جدول ۵، مجموع اتلاف حرارتی شبانه برای ساختمان چهار طبقه (۸ واحدی) با استفاده از مصالح پیشنهادی (دیوار آجری دوجداره، پنجره‌های دوجداره، سقف شیروانی عایق‌شده و ...) معادل $67/683$ کیلووات در هر لحظه می‌باشد. این عدد شامل تمامی مؤلفه‌ها از جمله انتقال حرارت از جداره‌ها، درها، پنجره‌ها و همچنین نفوذ هوا می‌باشد.

جدول ۵: خلاصه محاسبات توان اتلاف حرارتی در شب برای ساختمان معمولی چهار طبقه (۸ واحدی)

برای دیوار آجری پیشنهادی

اجزاء مختلف ساختمان	مساحت (متر مربع)	ضریب انتقال حرارت $Btu/h.ft^2.F^0$	ΔT ($^{\circ}F$)	توان اتلاف حرارت (کیلووات)
سقف کاذب زیر شیروان	۳۰۰	۰/۰۸	۵۰/۳	۶/۱۹
مجموع دیوارهای شرقی و غربی	186×2	۰/۰۸۶	۵۷/۶	۱۳/۶۴۵
دیوار جنوبی	۱۶۰/۲۵	۰/۰۸۶	۵۷/۶	۱/۵۲۵
دیوار شمالی	۱۶۲/۰۱	۰/۰۸۶	۵۷/۶	۱/۵۲۶
کف	۳۰۰		۳۶/۶	۱/۲۴۱
کنج			۵۷/۶	۱/۸
پنجره‌ها	۱۰۱/۹۵	آهن ۱/۱۷۶ و شیشه ۰/۶۱۲۵	۵۷/۶	۱/۱۷
درب‌های خروجی	۳۸/۴	۰/۰۹۸	۵۷/۶	۰/۶۸۳
هوای نفوذی از پنجره‌ها و درب‌ها و فن‌ها			۵۷/۶	۹/۶۸۴
هوای نفوذی مربوط به عبور نفرات از درب‌ها			۵۷/۶	۰/۷۲۹
جمع				۳۶/۶۶۷

توان انرژی جذب شده از شیشه‌ها = ۰ می‌باشد.

کیلووات ۶۷/۶۸۳ = کل اتلافهای حرارتی در شب در هر لحظه

برای محاسبه مصرف گازوئیل برای دو ساختمان (معمولی و بهینه‌سازی شده) به روش زیر عمل می‌شود:

$$E = \frac{H_L \cdot D \cdot 24}{\Delta t \cdot K \cdot V} (CD)$$

$E = Btu$ مصرف انرژی یا سوخت برای پریود تخمینی بر حسب

$$H_L = \frac{Btu}{h}$$

اتلاف حرارتی ساختمان بر حسب

D = تعداد روزهای ۶۵ درجه فارنهایتی برای پریود تخمینی

$\Delta t = F^\circ$ اختلاف درجه حرارت بر حسب

K = راندمان دستگاهی که سوخت مصرف می‌کند

V = ارزش حرارتی سوخت مصرفی

CD = فاکتور تصحیح تجربی برای اثر گرمایی در مقابل

بر اساس محاسبات انجام شده برای یک ساختمان مسکونی چهارطبقه (۸ واحدی) در شهر تهران، در صورت استفاده از سامانه گرمایشی مبتنی بر موتورخانه گازسوز بدون بهینه‌سازی، میزان مصرف سالیانه گاز طبیعی معادل ۲۱۹۰۱ مترمکعب خواهد بود. در حالی که در سناریوی بهینه‌سازی شده (با عایق کاری مناسب، استفاده از مصالح کم‌اتلاف و کاهش نفوذ هوا)، میزان مصرف سالیانه گاز طبیعی به ۷۲۳۳/۷ مترمکعب کاهش می‌یابد. این تفاوت نشان‌دهنده صرفه‌جویی سالیانه‌ای برابر با ۱۴۶۶۷/۳ مترمکعب گاز طبیعی است. معادل‌سازی این مقدار صرفه‌جویی با بشکه معادل نفت خام، رقمی حدود ۸۹/۳۱ بشکه در سال را نشان می‌دهد. اگر این مقدار صرفه‌جویی را به ازای هر مترمربع زیربنای مفید ساختمان (که برابر با ۵۶۰ مترمربع است) در نظر بگیریم، صرفه‌جویی سالیانه در مصرف سوخت برای هر مترمربع برابر با ۰/۱۶ بشکه معادل نفت خام خواهد بود. در ادامه به فرایند طراحی و استقرار سامانه انرژی‌های تجدیدپذیر در ساختمان به منظور پایداری و کاهش مصرف انرژی پرداخته می‌شود.

گام اول: ممیزی انرژی

ممیزی انرژی روشی است برای اندازه‌گیری و ثبت مصرف واقعی انرژی در یک مجموعه ساختمانی، که اساساً با هدف کاهش و کمینه‌سازی مصرف انرژی انجام می‌گیرد. هدف از اجرای این مرحله، درک صحیح و شناخت دقیق وضعیت موجود مصرف حامل‌های انرژی در بخش‌های مختلف ساختمان است.

گام دوم: تدوین ساختار و سیستم مدیریت انرژی و فرهنگ‌سازی

در این مرحله ساختار مدیریتی برای شناسایی فرصت‌های بهبودی که از مرحله ممیزی به‌دست آمده، ایجاد می‌شود. هدف جلوگیری از اتلاف‌ها و ایجاد نظام پایش و مونیتورینگ بر روی تمامی تجهیزات و وسایل «انرژی‌بر» ساختمان، مانند سیستم‌های روشنایی، گرمایشی و سرمایشی است. همچنین تعیین موارد اندازه‌گیری شامل نوع، زمان و استانداردهای اندازه‌گیری به صورت سیستماتیک انجام می‌شود. در این گام فرهنگ‌سازی و آموزش بهره‌برداران ساختمان در استفاده بهینه از تجهیزات نیز اهمیت دارد.

گام سوم: طراحی، تامین و اجرای تجهیزات و تاسیسات بهینه انرژی

پس از اجرای گام‌های اول و دوم که به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی است، در گام سوم بر اساس اطلاعات گردآوری شده در فاز ممیزی، سرمایه‌گذاری برای بهبود امکانات و تجهیزات «انرژی‌بر» انجام می‌شود. تیم مشاور گزارشی تفصیلی از میزان سرمایه‌گذاری و نرخ بازگشت سرمایه تهیه می‌کند تا کارفرما بتواند تصمیم دقیق‌تری بگیرد. عمده پروژه‌ها شامل سیستم‌های سرمایش، گرمایش، تهویه و تغییر روشنایی داخلی و خارجی ساختمان هستند.

گام چهارم: هوشمندسازی ساختمان

سیستم مدیریت ساختمان، سامانه‌ای است که فعالیت‌ها و امور ساختمان را تحت نظارت دارد و در شرایط لازم به صورت خودکار تغییرات لازم را اعمال می‌کند. این سیستم می‌تواند بر باز و بسته شدن درها، ورود و خروج افراد، سیستم‌های روشنایی، گرمایشی، سرمایشی، تهویه، پرده‌ها و سیستم‌های صوتی و تصویری نظارت داشته باشد. هوشمندسازی بهره‌برداران را قادر می‌سازد تا استفاده بهینه‌تری از تجهیزات داشته باشند و علاوه بر افزایش آسایش و امنیت، تا ۲۰٪ در مصرف انرژی صرفه جویی کنند. این سیستم با یکپارچه‌سازی عناصر اصلی سیستم‌ها، ساختار، سرویس و مدیریت، محیطی پویا و مقرون به صرفه ایجاد می‌کند.

گام پنجم: طراحی، تامین و اجرای سیستم‌های خورشیدی

پس از بهینه‌سازی مصرف انرژی و تعیین میزان مصرف نهایی، ساختمان مجاز به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌شود. با توجه به شرایط اقلیمی و منطقه، سیستم‌های خورشیدی بهترین و در دسترس‌ترین فناوری برای تامین انرژی و آب گرم ساختمان محسوب می‌شوند.

گام ششم: ارزیابی و صدور گواهینامه انطباق با معیار انرژی در ساختمان

در این مرحله، برای اطمینان از صحت اجرای فرایند و تایید بهینه بودن مصرف انرژی و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر، ساختمان توسط کارشناسان مستقل بر اساس استانداردهای بین‌المللی ارزیابی می‌شود و گواهینامه «انطباق با معیار انرژی در ساختمان» دریافت می‌کند (کنسرسیوم طراحی و استقرار انرژی‌های تجدیدپذیر در ساختمان). جدول شماره ۶، راهکارهای متنوع و مؤثری را برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها از منظر بهره‌برداری صحیح از منابع طبیعی و فناوری‌های نوین نشان می‌دهد. تحلیل‌ها و محاسبات انجام‌شده نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های ساده و بومی‌شده عایق‌کاری و طراحی معماری می‌تواند تا ۴۴٪ از مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی در تهران بکاهد. این راهکارها علاوه بر اثربخشی زیست‌محیطی، با شرایط اقتصادی و فرهنگی ایران نیز هم‌خوانی دارند. تلفیق روش‌های طراحی اقلیمی، بهینه‌سازی سامانه‌های مکانیکی، هوشمندسازی و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند نقش کلیدی در دستیابی به اهداف توسعه پایدار ایفا نماید.

جدول ۶: بکارگیری صحیح از منابع جهت بهینه سازی مصرف انرژی

نوع سیستم	عملکرد	محل استفاده
تابش بند خارجی	تابش دریافتی از خورشید را قبل از عبور شیشه و تغییر طول موج کنترل می‌کنند	پشت نماهای شفاف، خارج از ساختمان
جرم حرارتی	ذخیره گرمای تابشی خورشید و آزادسازی آن در شب از تغییر زیاد دمای زیاد منطقه حرارتی در طول روز جلوگیری میکند	دیوارهای داخل و خارج، کف داخلی یا خارجی
مصالح فاز متغیر	با استفاده از ذخیره و آزادسازی انرژی و تغییر فاز از جامد به مایع و بالعکس، از تورانس دمای منطقه حرارتی می‌کاهد	درون جداره‌های خارجی شفاف و کدر

ساختمان		
دیوارهای خارجی ساختمان	با استفاده از ورود یا خروج هوای محبوس شده در فضای تنفس به تهویه طبیعی ساختمان کمک میکند	نمای دو پوسته
پشت بام	تابش خورشیدی دریافتی باعث گرم شدن هوای بین شیشه و کلکتور ها می شود . ورود یا خروج این هوا به تهویه ساختمان کمک می کند.	شومینه خورشیدی
پشت بام	با استفاده از مکش هوا به بیرون و یا دمیدن هوا به داخل موجب تهویه هوای داخل ساختمان می شود.	بادگیر/الوجیک
پشت بام	از گرم شدن بیش از حد پشت بام جلوگیری کرده و مانع از ایجاد پدیده گرمای جزیره ای می شود.	بام سبز

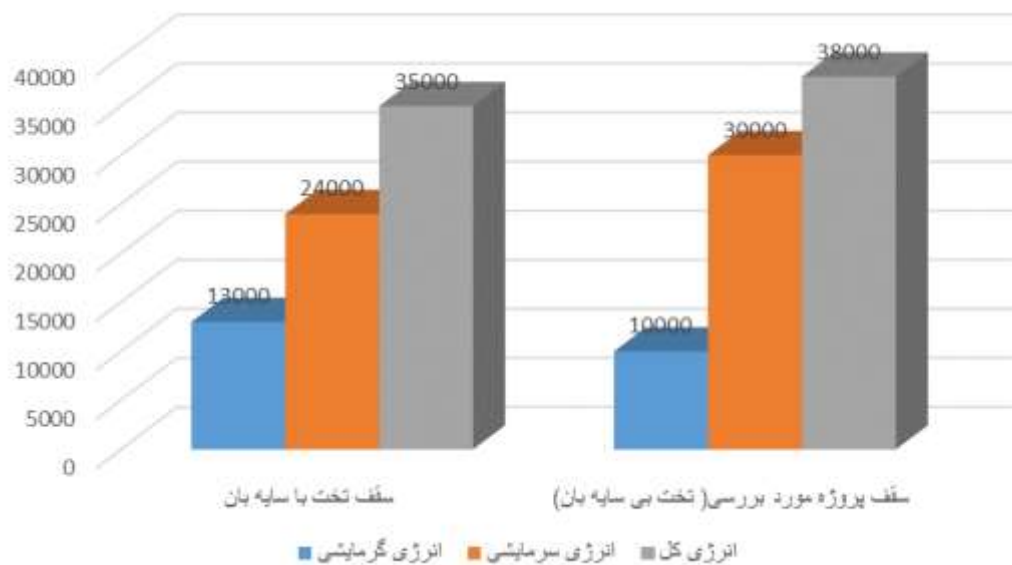
برای ارزیابی اثربخشی راهکارهای ارائه شده، نتایج شبیه سازی ها و تحلیل های عددی به صورت نمودارهای مقایسه ای ارائه شده اند. این نمودارها تأثیر پارامترهای مختلف طراحی معماری نظیر نوع و جهت گیری ساختمان، ابعاد بازشوها، نوع سقف و پوسته ساختمان، و استفاده از عایق های حرارتی را بر کاهش مصرف انرژی سالانه و هزینه های مربوطه نشان می دهند. این نمودارها امکان مقایسه عملکرد ساختمان در دو حالت طراحی سنتی و بهینه را فراهم کرده و مبنای مناسبی برای نتیجه گیری و ارائه پیشنهادهای کاربردی ایجاد می کنند.

نمودار ۱ میزان صرفه جویی انرژی با طراحی مناسب را نشان می دهد. بر اساس این نمودار، استفاده از اصول معماری پایدار همچون جهت گیری مناسب، به کارگیری مصالح عایق، و کنترل تابش خورشید می تواند کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی بخش های سرمایشی و گرمایشی ایجاد کند.



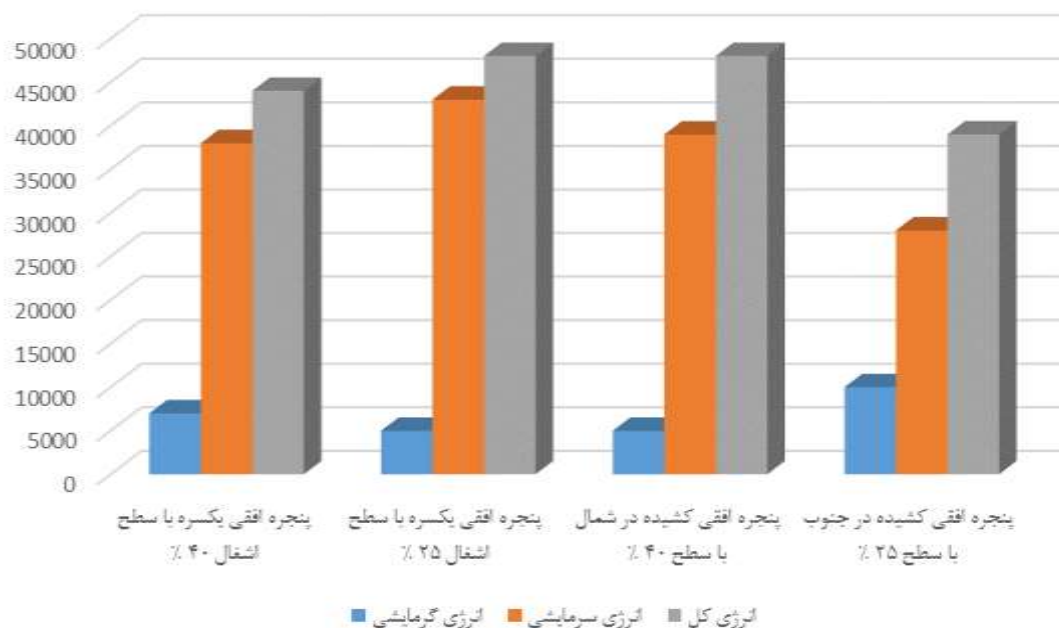
نمودار ۱: میزان صرفه جویی انرژی با طراحی مناسب

نمودار ۲ تأثیر طراحی سقف را بر میزان انرژی سالانه مورد نیاز بررسی می‌کند. نتایج حاکی از آن است که استفاده از سقف‌های عایق و پوشش‌های مناسب، سهم قابل توجهی در کاهش تلفات حرارتی و بهینه‌سازی مصرف انرژی دارد.



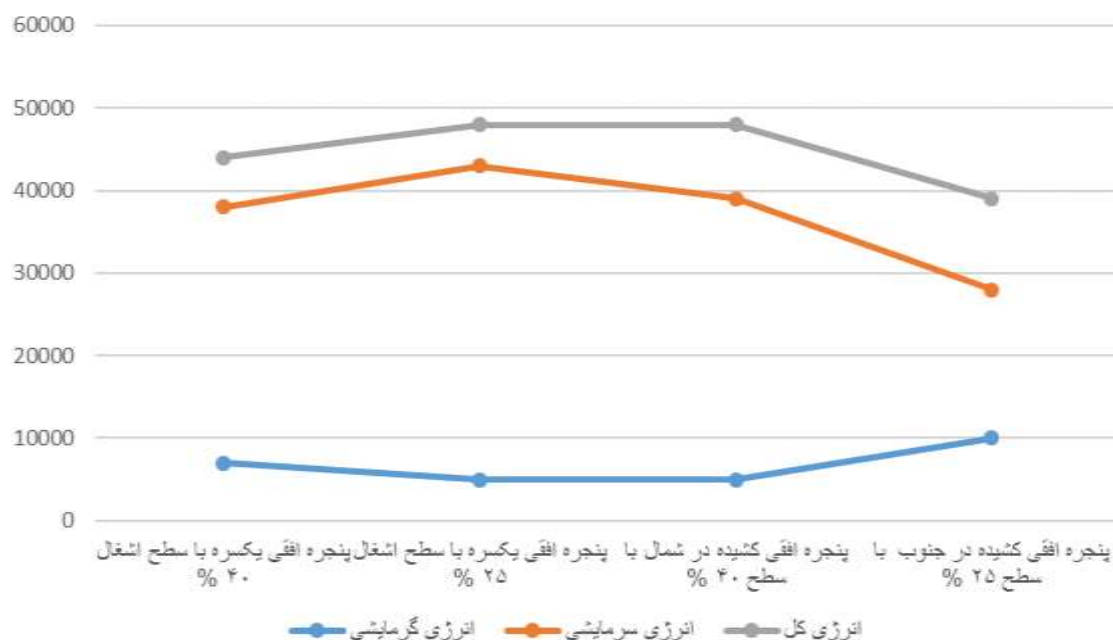
نمودار ۲: تأثیر طراحی سقف در میزان انرژی مورد نیاز کل سالانه

نمودار ۳ نقش ابعاد پنجره‌ها را در میزان انرژی سالانه بررسی کرده است. افزایش سطح بازوها گرچه می‌تواند نور طبیعی را افزایش دهد، اما بدون طراحی اصولی باعث افزایش اتلاف انرژی در زمستان و گرمای ناخواسته در تابستان می‌شود. این نمودار اهمیت انتخاب نسبت بهینه سطح پنجره به دیوار (WWR) را نشان می‌دهد.

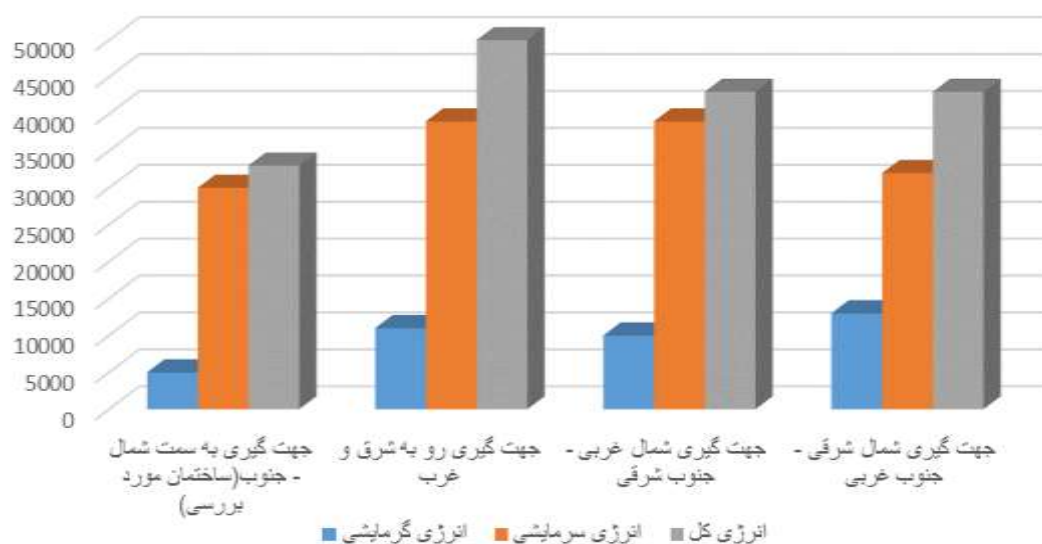


نمودار ۳: تأثیر ابعاد پنجره بر میزان انرژی مورد نیاز سالانه

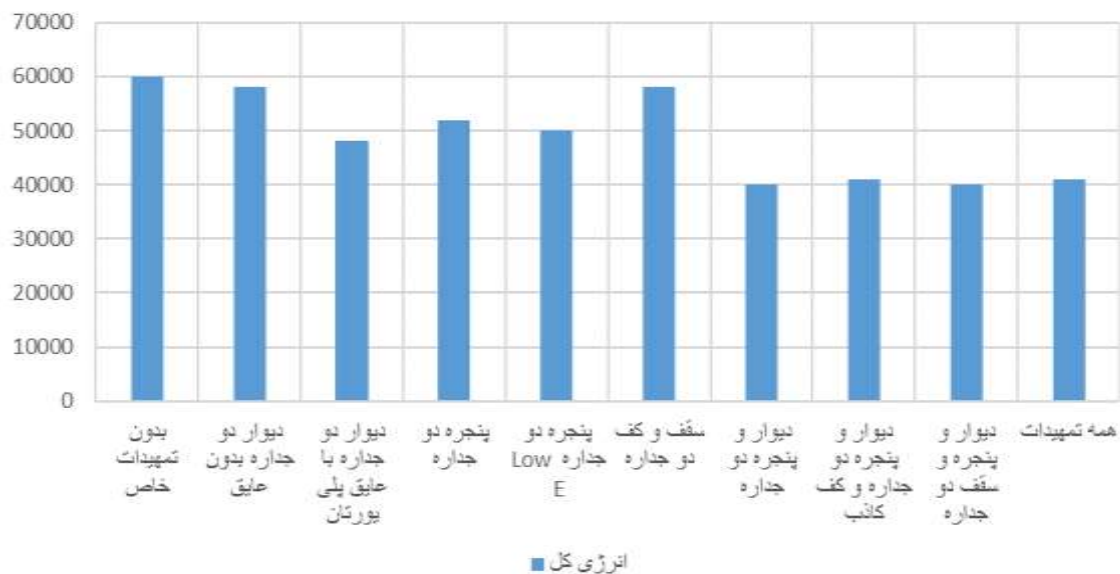
نمودار ۴ اثر جهت‌گیری ساختمان بر انرژی مصرفی را نمایش می‌دهد. نتایج این نمودار تأکید می‌کند که جهت‌گیری مناسب ساختمان نسبت به مسیر حرکت خورشید به ویژه در اقلیم‌های معتدل و گرم، بار گرمایشی و سرمایشی را کاهش می‌دهد و از عوامل کلیدی در طراحی غیرفعال انرژی است.



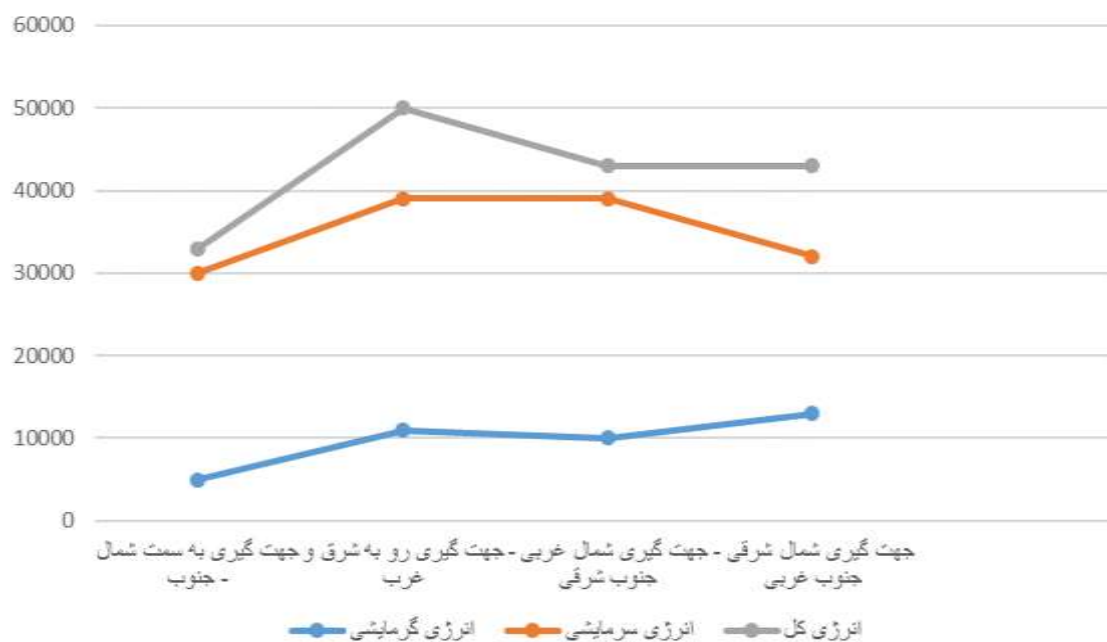
نمودار ۴: تأثیر جهت‌گیری ساختمان بر میزان انرژی مورد نیاز



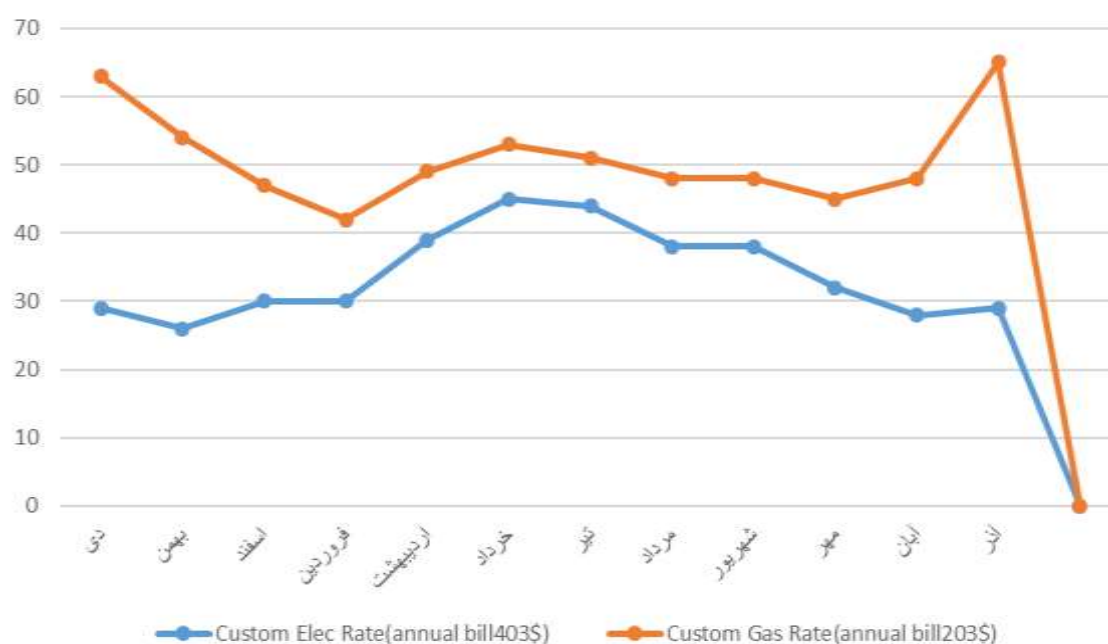
نمودار ۵ مجموع انرژی کل مورد نیاز ساختمان را در حالت‌های مختلف طراحی نشان می‌دهد. طراحی بهینه ساختمان با در نظر گرفتن پارامترهای اقلیمی و طراحی، مصرف انرژی کل را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد.



نمودار ۵: مجموع انرژی کل مورد نیاز ساختمان

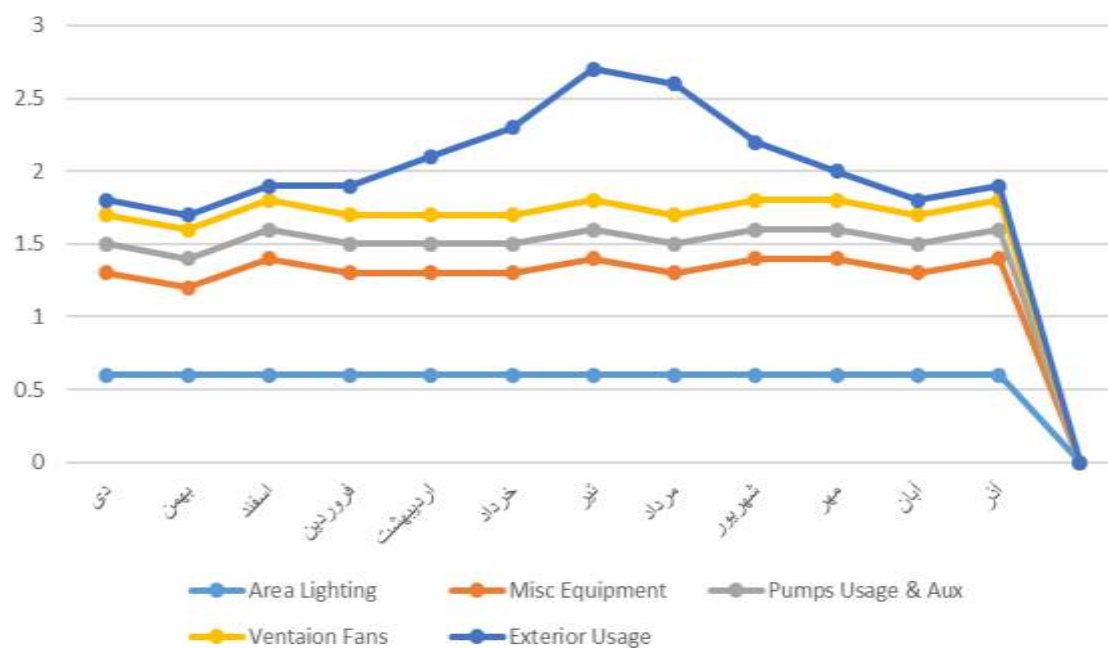


نمودار ۶ هزینه انرژی مصرفی در ماه‌های مختلف سال را نمایش می‌دهد. هزینه‌ها در ماه‌های سرد (دی و بهمن) و گرم (تیر و مرداد) به اوج می‌رسد. طراحی مناسب ساختمان باعث کاهش قابل توجه این هزینه‌ها می‌شود.



نمودار ۶: هزینه انرژی مصرفی در ماه های مختلف سال برای ساختمان مورد بررسی

نمودار ۷ میزان مصرف برق ساختمان دارای عایق را در ماه های مختلف سال نشان می دهد. استفاده از عایق در جداره ها و سقف، مصرف برق برای سرمایش و گرمایش را کاهش داده و نوسانات آن را کنترل کرده است.



نمودار ۷: میزان مصرف برق در ماه های مختلف سال برای ساختمان عایق

۳-۱- بررسی آماری نمونه مورد مطالعه با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP

مصرف انرژی در ساختمان‌ها تحت تأثیر مجموعه‌ای از تکنیک‌های فعال و غیرفعال قرار دارد. تکنیک‌های فعال معمولاً شامل سامانه‌های مکانیکی و تأسیساتی هستند، در حالی که تکنیک‌های غیرفعال به ویژگی‌های معماری و طراحی بدنه ساختمان مربوط می‌شوند. از جمله عوامل مهم در دسته غیرفعال می‌توان به نوع و ضخامت مصالح ساختمانی، ابعاد و نوع پنجره‌ها، عایق‌کاری حرارتی، بهره‌گیری از انرژی خورشید و جهت‌گیری بنا اشاره کرد.

هدف این بخش از پژوهش، شناسایی و اولویت‌بندی مهم‌ترین پارامترهای طراحی مؤثر بر مصرف انرژی ساختمان مسکونی نمونه است. برای این منظور از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به‌عنوان یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بهره گرفته شده است. این روش، با بهره‌گیری از ساختار سلسله‌مراتبی و مقایسه‌های زوجی، امکان تعیین اهمیت نسبی معیارها و گزینه‌ها را فراهم می‌سازد و از قابلیت ارزیابی میزان سازگاری قضاوت‌ها برخوردار است.

در این پژوهش، ابتدا بر اساس مرور ادبیات و انجام مصاحبه‌های تخصصی با کارشناسان حوزه انرژی ساختمان، ساختار سلسله‌مراتبی مسئله طراحی شد. این ساختار در سه سطح شامل "هدف نهایی"، "معیارها" و "گزینه‌ها (پارامترهای طراحی)" تنظیم گردید. هدف کلی، کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی است. سه معیار اصلی در این ساختار عبارت‌اند از:

C1: انرژی سرمایشی (E_cooling)

C2: انرژی گرمایشی (E_heating)

C3: تابش خورشیدی (E_radiation)

پارامترهای طراحی مورد بررسی (گزینه‌های تصمیم‌گیری) به شرح زیر هستند:

AF1: تعداد ساکنین

AF2: مساحت کل ساختمان

AF3: تعداد طبقات

AF4: عایق‌کاری پوسته خارجی

AF5: نسبت پنجره به دیوار (WWR)

AF6: نسبت طول به عرض پلان

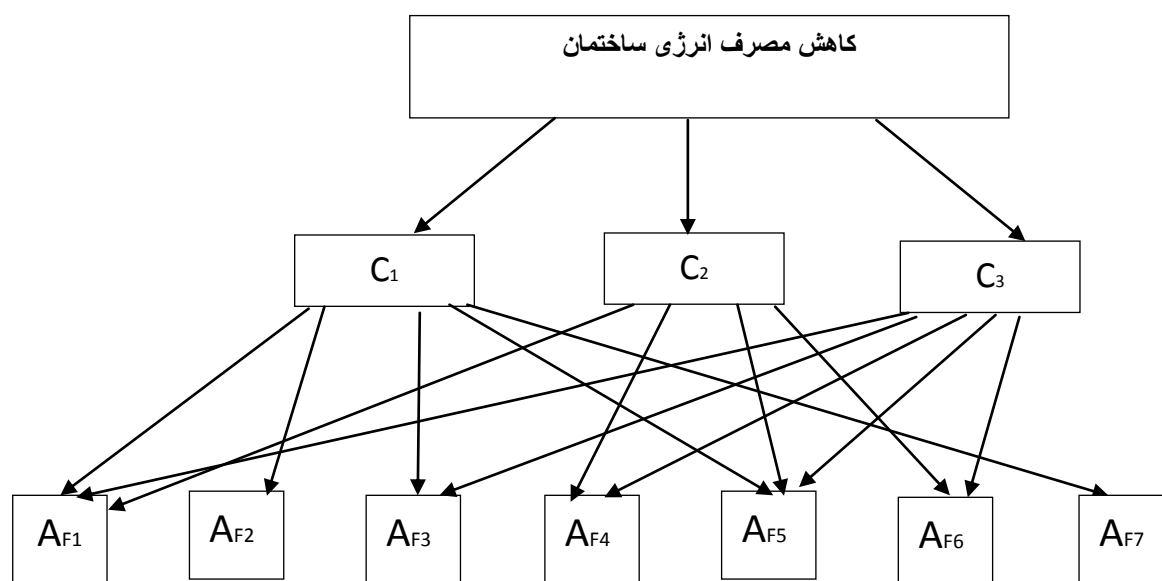
AF7: تعداد جبهه‌های نما (بر) در معرض تابش

برای اجرای تحلیل، نرم‌افزار Expert Choice نسخه ۹،۵ مورد استفاده قرار گرفت. در گام نخست، تیمی از متخصصان در حوزه‌های معماری انرژی، مهندسی مکانیک و بهینه‌سازی مصرف انرژی تشکیل شد. از این افراد خواسته شد تا با استفاده از مقایسه‌های زوجی و بر اساس مقیاس پنج‌گانه لیکرت (از بسیار کم‌اهمیت تا بسیار پراهمیت)، ابتدا میزان اهمیت معیارها را نسبت به هدف، و سپس اهمیت هر پارامتر را نسبت به هر یک از معیارها ارزیابی نمایند.

به‌عنوان نمونه، کارشناسان تأثیر هر یک از پارامترهای طراحی را نسبت به معیار "انرژی سرمایشی (C1)" به صورت مقایسه‌های دوجفتی ارزیابی نمودند. تمامی قضاوت‌ها در قالب واژه‌های توصیفی اهمیت (بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم، بسیار کم) دریافت و در ماتریس‌های تصمیم‌گیری AHP ثبت شدند. سپس، با استفاده از الگوریتم‌های درونی نرم‌افزار، وزن هر پارامتر نسبت به معیارها محاسبه شد. در نهایت، وزن کلی هر پارامتر (با در نظر گرفتن وزن معیارهای اصلی) استخراج گردید.

همچنین، نرخ ناسازگاری محاسبه شد تا اطمینان حاصل شود که نظرات کارشناسان از سازگاری لازم برخوردارند.

ساختار سلسله‌مراتبی پژوهش و ارتباط میان هدف، معیارها و پارامترها در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱: سلسله مراتب موردنظر با هدف کاهش مصرف انرژی ساختمان

۳-۲- تحلیل و اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر بر مصرف انرژی با استفاده از روش AHP

به‌منظور اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر کاهش مصرف انرژی در ساختمان مسکونی نمونه، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP استفاده شده است. در این راستا، ابتدا ساختار سلسله‌مراتبی شامل سه سطح تعریف شد که در آن، هدف نهایی "کاهش مصرف انرژی ساختمان"، معیارهای اصلی شامل انرژی سرمایشی (C1)، انرژی گرمایشی (C2)، و تابش خورشیدی (C3)، و گزینه‌ها (پارامترهای طراحی) شامل هفت پارامتر اصلی بودند.

۳-۳- طراحی پرسش‌نامه

برای ارزیابی نظر متخصصان، پرسش‌نامه‌ای طراحی شد که شامل سه پرسش اصلی به تفکیک معیارهای مذکور بود. نمونه سؤالات به شرح زیر است:

۱. عامل اصلی مؤثر بر میزان تابش خورشیدی ساختمان از نظر شما کدام است؟ لطفاً پارامترهای زیر را به‌ترتیب اولویت امتیازدهی نمایید.

۲. عامل اصلی مؤثر بر نیاز سرمایشی ساختمان از نظر شما کدام است؟

۳. عامل اصلی مؤثر بر نیاز گرمایشی ساختمان از نظر شما کدام است؟

در هر سؤال، پارامترهای ثابت زیر به‌عنوان گزینه‌های امتیازدهی مورد استفاده قرار گرفتند:

الف) تعداد سکنه

ب) متراژ زیربنا

ج) تعداد طبقات

د) رعایت عایق‌کاری پوسته خارجی

ه) نسبت سطح پنجره به نما

و) نسبت طول به عرض

ز) دو یا چند بر (نما) ساختمان

امتیازدهی پاسخها بر اساس مقیاس پنج گانه لیکرت و مقایسه‌های زوجی میان گزینه‌ها انجام شد. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice (نسخه ۹.۵) وزن هر پارامتر نسبت به هر معیار، و سپس وزن هر معیار نسبت به هدف کلی محاسبه گردید.

۳-۴- تحلیل وزن معیارها

در مرحله نخست، وزن معیارها (C1، C2، C3) نسبت به هدف "کاهش مصرف انرژی" به روش مقایسه زوجی و بر اساس قضاوت خبرگان استخراج شد. نتایج این مرحله در جدول ۷ ارائه شده است. نسبت ناسازگاری برابر با ۰/۰۱ محاسبه شد که کمتر از ۰/۱ است و نشان می‌دهد پاسخها از سازگاری قابل قبولی برخوردارند.

۳-۵- تحلیل وزن نهایی پارامترها

در ادامه، وزن نسبی هر یک از هفت پارامتر طراحی نسبت به معیارهای سه گانه محاسبه و سپس وزن نهایی آنها با ترکیب وزن معیارها (ضرب وزنی) به دست آمد. نتایج نهایی در جدول ۸ نمایش داده شده است.

جدول ۷: مقایسه زوجی (دو به دو) معیارها بر اساس هدف

Goal	C1	C2	C3	WG
C1	1	2	3	0.540
C2	1/2	1	2	0.297
C3	1/3	1/2	1	0.163
*Inconsistency ratio=0.01				

جدول ۸: مقایسه زوجی (دو به دو) معیارها بر اساس هدف

اولویت AHP	وزن	پارامتر
۷	۰/۰۳۸	تعداد ساکنین
۶	۰/۰۹۶	تعداد طبقات
۵	۰/۱	نسبت طول به عرض
۴	۰/۱۱۱	مساحت ساختمان
۳	۰/۱۲۵	تعداد بر (نما) ساختمان
۲	۰/۱۶۹	عایق کاری پوسته خارجی
۱	۰/۳۶	نسبت پنجره به دیوار

بر اساس نتایج به دست آمده، پارامتر نسبت سطح پنجره به دیوار با وزن نهایی ۰/۳۶ بیشترین اهمیت را در کاهش مصرف انرژی ساختمان دارد. پس از آن، عایق کاری پوسته خارجی (۰/۱۶۹) و تعداد جبهه‌های نما (۰/۱۲۵) در رتبه‌های بعدی قرار دارند. این نتایج با یافته‌های تجربی و اصول طراحی غیرفعال در اقلیم‌های معتدل سازگار است؛ به طوری که پارامترهایی که مستقیماً بر اتلاف یا جذب حرارت تأثیر دارند، بالاترین اولویت را کسب کرده‌اند.

از سوی دیگر، پارامترهایی مانند تعداد ساکنین یا تعداد طبقات تأثیر غیرمستقیم‌تری بر مصرف انرژی داشته و در پایین‌ترین سطوح اولویت قرار گرفتند. نتایج این تحلیل می‌تواند در تدوین راهبردهای طراحی بهینه و مقرون به صرفه انرژی محور در ساختمان‌های مسکونی مورد استفاده قرار گیرد.

۴- بحث و نتیجه گیری

هدف اصلی این پژوهش، شناسایی و اولویت‌بندی مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی با استفاده از رویکرد تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و در چارچوب اصول طراحی پایدار بود. به‌منظور تحقق این هدف، یک ساختمان چهارطبقه مسکونی نمونه در شهر تهران مورد ارزیابی قرار گرفت و دو سناریوی ساخت: یکی با شرایط معمول و دیگری با طراحی بهینه‌شده، با یکدیگر مقایسه شدند. در سناریوی بهینه، تدابیری همچون استفاده از عایق حرارتی، شیشه‌های دوجداره و سقف شیبدار لحاظ گردید.

نتایج تحلیل عددی نشان داد که در سناریوی بهینه، میزان مصرف سالانه انرژی ساختمان به‌طور محسوسی کاهش یافته است؛ به‌گونه‌ای که مصرف برق حدود ۲۳ درصد و مصرف گاز طبیعی ۳۲،۲۶ درصد کاهش یافته است. این کاهش نشان‌دهنده نقش مؤثر مداخلات طراحی در بهبود بهره‌وری انرژی ساختمان است.

در ادامه، برای اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر کاهش مصرف انرژی، از روش AHP و نرم‌افزار Expert Choice استفاده شد. تحلیل سلسله‌مراتبی نشان داد که نسبت سطح پنجره به دیوار (WWR) با وزن نهایی ۰،۳۶ بالاترین تأثیر را دارد و به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر شناسایی شد. پس از آن، عایق‌کاری پوسته خارجی ساختمان (با وزن ۰،۱۶۹) و تعداد نماهای ساختمان (۰،۱۲۵) در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. در مقابل، پارامترهایی نظیر تعداد ساکنین (۰،۰۳۸) و تعداد طبقات (۰،۰۹۶) دارای کمترین اولویت در کاهش مصرف انرژی بودند.

یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که توجه به ویژگی‌های کالبدی و فیزیکی ساختمان - به‌ویژه نسبت بازوها و کیفیت عایق‌کاری - نقش اساسی در بهینه‌سازی مصرف انرژی ایفا می‌کند. همچنین، نتایج حاصل از مدل AHP می‌تواند به‌عنوان ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری برای طراحان، مهندسان، و سیاست‌گذاران در راستای تدوین راهبردهای توسعه پایدار در صنعت ساختمان مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

در نهایت، این پژوهش با تأکید بر کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در تحلیل پدیده‌های پیچیده، نشان داد که همگرایی میان اصول طراحی معماری و ملاحظات بهره‌وری انرژی، می‌تواند گامی مؤثر در کاهش مصرف منابع، افزایش بهره‌وری اکولوژیکی و ارتقای پایداری محیط‌زیست شهری باشد.

منابع و مآخذ

۱. بشردوست، محمدرضا (۱۳۹۴). مروری بر معماری پایدار و تأثیر آن در حوزه محیط زیست، کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در عمران، معماری و شهرسازی، تهران.
۲. الخاص پور، زهرا، قمیشی، محمد، و قربانی پارام، افشین. (۱۳۹۵). نقش طراحی معماری و تأثیر آن بر بهینه‌سازی مصرف منابع آبی. کنفرانس بین‌المللی نخبگان عمران، معماری و شهرسازی.
۳. رحیمی، علی، فرج زاده اصل، منوچهر و قویدل رحیمی، یوسف. (۱۴۰۴). مروری بر رویکردهای مختلف پایش از پایین به بالای گاز گلخانه‌ای متان. مجله پژوهش‌های خشکسالی و تغییر اقلیم.
۴. سبابا، شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت (۱۳۸۳). گزارش سالانه مصرف انرژی در ایران. تهران.
۵. قاسمی، عبدالرسول، تکلیف، عاطفه، محمدی، تیمور و محمدیان، فرشته. (۱۳۹۸). تحلیل مقایسه‌ای استراتژی‌های کاهش شدت انرژی در ایران (رهیافت سیستم پویای قیمت انرژی-عرضه انرژی-رشد اقتصادی). پژوهشنامه اقتصادی. ۹ (۷۳): ۴۵-۱.
۶. گرجی مهربانی، یوسف، یاران، علی (۱۳۸۹). راهکارهای معماری پایدار گیلان به همراه قیاس با معماری ژاپن. نشریه هنرهای زیبا، ۴۱.
۷. وزارت نفت جمهوری اسلامی ایران (۱۴۰۰). ترازنامه انرژی کشور، سال ۱۳۹۹. شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت.

8. Australian Government (2023). National Australian Built Environment Rating System (Nabers).
9. Bmwk (2020). Energy Efficiency In Buildings – The German Energy Transition. Federal Ministry For Economic Affairs And Energy.
10. Bodach, S., Lang, W., & Hamhaber, J. (2014). Climate Responsive Building Design Strategies Of Vernacular Architecture In Nepal. *Energy And Buildings*, 81, 227-242.
11. Bp Statistical Review Of World Energy (2013). British Petroleum Company.
12. Danish Energy Agency (2019). Energy Outlook And Energy Efficiency Programmes.
13. Desai, B. H. (2020). 14. United Nations Environment Programme (Unep). *Yearbook Of International Environmental Law*, 31(1), 319-325.
14. Doe (2022). U.S. Department Of Energy – Building Technologies Office.
15. Elaouzy, Y., & El Fadar, A. (2022). Energy, Economic And Environmental Benefits Of Integrating Passive Design Strategies Into Buildings: A Review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 167, 112828.
16. Eleftheriadis, S., Mumovic, D., & Greening, P. (2017). Life Cycle Energy Efficiency In Building Structures: A Review Of Current Developments And Future Outlooks Based On Bim Capabilities. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 67, 811-825.
17. European Commission (2021). Energy Performance Of Buildings Directive.
18. Hafez, F. S., Sa'di, B., Safa-Gamal, M., Taufiq-Yap, Y. H., Alrifay, M., Seyedmahmoudian, M., ... & Mekhilef, S. (2023). Energy Efficiency In Sustainable Buildings: A Systematic Review With Taxonomy, Challenges, Motivations, Methodological Aspects, Recommendations, And Pathways For Future Research. *Energy Strategy Reviews*, 45, 101013.
19. Hong, T., Taylor-Lange, S. C., D'oca, S., Yan, D., & Corngati, S. P. (2015). Advances In Research And Applications Of Energy-Related Occupant Behavior In Buildings. *Energy And Buildings*, 116, 694–702.
20. Iea. (2023). *Global Status Report For Buildings And Construction*. International Energy Agency.
21. Kamel, E., Pittau, F., Dal Verme, L. M., Scatigna, P., & Iannaccone, G. (2024). A Parametric Integrated Design Approach For Life Cycle Zero-Carbon Buildings. *Sustainability*, 16(5), 2001.
22. Khan, S. A., & Al-Ghamdi, S. G. (2021). Renewable And Integrated Renewable Energy Systems For Buildings And Their Environmental And Socio-Economic Sustainability Assessment. In *Energy Systems Evaluation (Volume 1) Sustainability Assessment* (Pp. 127-144). Cham: Springer International Publishing.
23. Latief, Y., Berawi, M. A., Supriadi, L., Koesalamwardi, A. B., Petroceany, J., & Herzanita, A. (2017, December). Integration Of Net Zero Energy Building With Smart Grid To Improve Regional Electrification Ratio Towards Sustainable Development. In *Iop Conference Series: Earth And Environmental Science* (Vol. 109, No. 1, P. 012041). Iop Publishing.
24. Le, T. S., Zegowitz, A., Le, C. C., Künzel, H., Schwede, D., Luu, T. H., ... & Nguyen, T. T. (2023). The Development Of Energy-Efficient And Sustainable Buildings: A Case Study In Vietnam. *Sustainability*, 15(22), 15921.
25. Lewandowski, K. (2025). Modern Energy Sources For Sustainable Buildings: Innovations And Energy Efficiency In Green Construction. *Energies*, 18(5), 1121.

26. Li, Y., Mao, Y., Wang, W., & Wu, N. (2023). Net-Zero Energy Consumption Building In China: An Overview Of Building-Integrated Photovoltaic Case And Initiative Toward Sustainable Future Development. *Buildings*, 13(8), 2024.
27. Lombard, L. P., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A Review Of Building Energy Consumption Information. *Energy And Buildings*, 40(3), 394–398.
28. Lopes, L., Hokoi, S., Miura, H., & Shuhei, K. (2005). Energy Efficiency And Energy Savings In Japanese Residential Buildings—Research Methodology And Surveyed Results. *Energy And Buildings*, 37(7), 698-706.
29. Patel, Anand, Energy Efficient Building Design With Solar Passive Heating And Ventilation Systems (June 24, 2024). *Global Journal Of Engineering And Technology Advances*, 2024, 20(02), 012–025.
30. Pomponi, F., & Moncaster, A. (2020). Embodied Carbon In Buildings: A Review Of Data, Methods And Sources. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 139, 110582.
31. Ren21. (2024). *Renewables 2024 Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network For The 21st Century.
32. Rivera, F. P., Zalamea, J., Espinoza, J. L., & Gonzalez, L. G. (2022). Sustainable Use Of Spilled Turbinable Energy In Ecuador: Three Different Energy Storage Systems. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 156, 112005.
33. Sadafi, N. , Jamshidi, N. And Zahedian, M. (2021). Energy Efficient Design Optimization Of A Building Envelope In A Temperate And Humid Climate. *Iranica Journal Of Energy & Environment*, 12(3), 255-263. Doi: 10.5829/Ijee.2021.12.03.10
34. Syed, A. S., Sierra-Sosa, D., Kumar, A., & Elmaghraby, A. (2021). Iot In Smart Cities: A Survey Of Technologies, Practices And Challenges. *Smart Cities*, 4(2), 429-475.
35. Taboada-Orozco, A., Yetongnon, K., & Nicolle, C. (2024). Smart Buildings: A Comprehensive Systematic Literature Review On Data-Driven Building Management Systems. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 24(13), 4405.
36. Usgbc (2023). *Leed V4 For Building Design And Construction*. U.S. Green Building Council.
37. Wu, W., & Skye, H. M. (2021). Residential Net-Zero Energy Buildings: Review And Perspective. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 142, 110859.
38. Zuo, Jian & Zhao, Zhen-Yu, 2014. "Green Building Research—Current Status And Future Agenda: A Review," *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, Vol. 30(C), Pages 271-281.

Hierarchical Analysis of Parameters Affecting Energy Consumption in Buildings with a Sustainable Design Approach

Jalal Rezaei¹, Tayyebah Bayatloo^{2*}

1-Department of Civil Engineering - Construction Management, Danesh Alborz University, Qazvin, Iran

2-Department of Architecture, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. (Corresponding author)

Abstract

In recent years, changing construction patterns and disregard for sustainable design principles have led to a decrease in thermal comfort in buildings and an increase in dependence on fossil energy sources. This dependence, while reducing energy sources, has led to an increase in greenhouse gases and a threat to environmental sustainability. In such circumstances, optimizing energy consumption in the building sector, which accounts for nearly 40 percent of the country's total energy consumption, is an undeniable necessity. This research aims to identify and prioritize the parameters affecting energy consumption in residential buildings, using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method and within the framework of sustainable design. In this regard, a four-story building in Tehran was selected as a study sample and conventional and optimal construction scenarios in terms of energy consumption, including thermal insulation, the use of double-glazed windows, and sloped roof design, were compared. Expert Choice software and expert opinions were used to prioritize the effective parameters. The results showed that the window-to-wall ratio (WWR) with a weight of 0.36 had the greatest impact on reducing energy consumption, followed by the insulation of the outer shell and the number of building facades. On the other hand, parameters such as the number of residents and the number of floors had the least impact. Also, a numerical comparison of the two scenarios indicated that in the optimal design, the annual electricity and gas consumption would be reduced by about 23% and 32%, respectively. The findings of this study, while confirming the vital role of physical design in energy consumption, show that the simultaneous use of optimization techniques and multi-criteria decision-making tools can be the key to achieving low-energy and environmentally friendly buildings.

Keywords: Energy consumption optimization, Analytic Hierarchy Process (AHP), Sustainable design, Zero energy building, Sustainable development, Residential buildings
