J. Energy Conversion
Volume: 10, Issue: 3, 2023: 37−55

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۰، شماره ۳، پائیز۱۴۰۲، ص: ۳۷- ۵۵

بهینه سازی چند هدفه تقاضای انرژی ساختمان و طراحی ساختمان انرژی صفر خالص متناسب با شرایط اقلیمی (مطالعه موردی: شهر تهران)

جواد طاهراحمدی[۱]، یونس نوراللهی[۲*]، مصطفی پناهی[۱]

۱-گروه منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
*۲- استاد گروه مهندسی سیستمهای انرژی پایدار، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشگاه تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۵، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۳۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱

چکیده

در سال‌های اخیر، کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش ساختمان، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. مانند سایر نقاط دنیا، بخش ساختمان در ایران نیز سهم زیادی از مصرف انرژی را بخود اختصاص داده است. در نتیجه ساختمان¬های کم مصرف و حتی انرژی صفر، به عنوان راه حل جایگزین در حل این مشکل، مورد توجه دانشمندان، محققان و سیاستگذاران قرار گرفته اند. یکی از چالش های اصلی در طراحی ساختمان انرژی صفر، یافتن بهترین ترکیب از راهکارهای پسیو جهت کاهش مصرف و بهینه‌سازی عملکرد انرژی در ساختمان است به گونه‌ای که عملکرد انرژی ساختمان و آسایش حرارتی ساکنان را تحت تاثیر منفی قرار ندهد. این مقاله یک روش برای بهینه سازی چند هدفه و چند متغیره مبتنی بر شبیه‌سازی ساختمان ارائه می‌دهد که در سه مرحله اصلی انجام شده است: شبیه سازی مصرف انرژی ساختمان، فرآیند بهینه سازی دو هدفه و تصمیم گیری چند معیاره طراحی ساختمان انرژی صفر با کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر. پارامترهای طراحی مورد بررسی عبارتند از: جهت ساختمان، زاویه و عمق و طول بیرون‌زدگی سایه بان‌ها، ضخامت عایق دیوارهای خارجی، نقاط تنظیم دمای سرمایش و گرمایش، نسبت مساحت پنجره به دیوار، ضریب انتقال حرارت پنجره‌ها و ضخامت عایق سقف. علاوه بر این، منابع انرژی های تجدیدپذیر در نظر گرفته شده عبارتند از: پنل‌های فتوولتاییک و توربین بادی. به منظور دستیابی به ساختمان انرژی صفر خالص با در نظر گرفتن حفظ آسایش حرارتی ساکنین، الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی نامغلوب استفاده شده است. در نهایت جهت تعیین بهینه‌ترین پاسخ در نمودار پارتو از روش حذف و انتخاب سازگار با واقعیت استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که شرایط اقلیمی و انتخاب مناسب پارامترهای معماری در کاهش مصرف انرژی ساختمان بسیار مهم و حیاتی هستند. بر اساس نتایج، بکارگیری راهکارهای بهینه‌سازی انرژی در شهر تهران، منجر به کاهش ۲۵,۳ درصدی در مصرف انرژی می‌شود. علاوه بر این، پتانسیل قابل توجهی برای استفاده از سیستم فتوولتاییک در شهر تهران برای تامین انرژی مورد نیاز منازل وجود دارد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** noorollahi@ut.ac.ir

کلمات کلیدی: ساختمان انرژی صفر خالص، بهینه‌سازی چند هدفه، اقلیم معتدل، سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، آسایش حرارتی.

۱-مقدمه

امروزه رشد اقتصادی و رفاه اجتماعی باعث شده است که دولت‌ها بر تامین تقاضای انرژی تمرکز ویژه ای داشته باشند. همچنین، نگرانی‌ها در خصوص امنیت انرژی با افزایش تقاضای انرژی، رشد قیمت نفت و تردیدهای ناشی از اتمام نفت و سوخت‌های فسیلی افزایش یافته است. در حال حاضر، مفهوم امنیت انرژی شامل چالش‌هایی برای تأمین منابع انرژی پایدار، بدون محدودیت و مقرون به صرفه برای تامین برق و سایر بخش‌های مصرف‌کننده می‌شود. در نظر گرفتن

نحوه استناد به این مقاله: جواد طاهراحمدی، یونس نوراللهی، مصطفی پناهی. بهینه سازی چند هدفه تقاضای انرژی ساختمان و طراحی ساختمان انرژی صفر خالص متناسب با شرایط اقلیمی (مطالعه موردی: شهر تهران) مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۲; ۱۰ (۳) : ۵۵-۳۷

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]

کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و بهره برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر نیز یکی دیگر از ابعاد امنیت انرژی است (Harkouss et al. 2018). بر این اساس، توجه به بخش ساختمان، به عنوان بزرگترین بخش مصرف‌کننده انرژی جهان، افزایش یافته است. در حال حاضر، مصرف انرژی در بخش ساختمان (ساختمان‌های مسکونی، غیر مسکونی و صنعت ساخت و ساز) حدود ۳۵ درصد کل تقاضای انرژی جهانی بوده است. بخش مسکونی تقریباً ۶۳ درصد از مصرف نهایی انرژی در ساختمان‌ها را شامل می‌شود و پس از بخش‌های صنعت و حمل و نقل به عنوان سومین مصرف کننده اصلی انرژی در جهان (۲۲ درصد از عرضه انرژی اولیه جهان) رتبه‌بندی می‌شود. همچنین، حدود ۵۵٪ مصرف برق جهان متعلق به ساختمان‌ها میباشد که منجر به سهم ۳۸ درصدی این بخش در انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز شده است (IEA 2023). اگر هیچ اقدامی در خصوص افزایش بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها انجام نگیرد، تقاضای انرژی این بخش افزایش ۳۵ درصدی را تا سال ۲۰۵۰ تجربه خواهد کرد (Santamouris and Vasilakopoulou 2021).

در ایران نیز بخش ساختمان بزرگترین مصرف کننده انرژی کشور است بطوریکه این بخش حدود ۴۳۶/۷ میلیون بشکه معادل نفت خام انرژی مصرف می‌کند که ۳۸۵/۳ میلیون بشکه معادل نفت خام از آن مربوط به استفاده در ساختمان‌های مسکونی و مابقی در ساختمانهای تجاری و اداری است. همچنین ساختمان‌ها به دلیل استفاده از گاز طبیعی و فرآورده‌های نفتی، ۲۳/۲۷ درصد انتشار دی اکسید کربن کشور را نیز به خود اختصاص داده اند (Energy Ministry, 2018). در ایران مصرف انرژی بخش ساختمان به دلایلی نظیر رشد نرخ شهرنشینی، رشد جمعیت، افزایش درآمد، تغییر سبک زندگی مردم و اثرات تغییر اقلیم در حال افزایش است (Abbasizade et al. 2020) که نیاز به بهینه‌سازی مصرف انرژی را افزایش می‌دهد.

امروزه یکی از روش های مفید برای کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش ساختمان، طراحی ساختمان انرژی صفر خالص (NZEB) است که در سال‌های اخیر توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. به عنوان مثال، ایالات متحده آمریکا قانونی را به تصویب رسانده که تا سال ۲۰۵۰، تمامی ساختمان‌ها باید تقریباً انرژی صفر (NZEBs) باشند. علاوه بر این، اتحادیه اروپا نیز ، قانونی را به تصویب رساند به گونه‌ای که تمامی ساختمان‌ها تا سال ۲۰۳۰، می‌بایست NZEBs باشند(European Commission 2018). البته باید توجه داشت که علاوه بر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، پتانسیل قابل توجهی نیز برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان وجود دارد که گام اول حرکت به سمت ساختمان‌های انرژی صفر است.

به منظور طراحی یک ساختمان انرژی صفر، نیاز است که تعریف آن به صورت دقیق بیان شود. مطالعه مقالات متعدد که در زمینه تعریف ساختمان‌های انرژی صفر به چاپ رسیده‌اند (Garcia and Kranzl 2018) (Lu et al. 2019) نشان می‌دهد که هنوز یک تعریف جامع بین‌المللی از ساختمان‌های انرژی صفر، که بتواند موافقت تمام دانشمندان و محققین را در بر داشته باشد وجود ندارد. طاهر احمدی و همکارانش در سال ۲۰۲۰، با مرور مطالعات انجام شده در زمینه تعریف ساختمان انرژی صفر به این نتیجه رسیدند که در طراحی این نوع ساختمان، ابتدا باید مشخص شود که صفر در تعریف به چه موردی اشاره دارد. آنها تعاریف ساختمان انرژی صفر را به چهار دسته تقسیم بندی کردند، که گاهی به اشتباه تصور می شود قابل جایگزینی هستند. در واقع کلمه صفر در تعریف ZEB می‌تواند به انرژی، انتشار CO_2، اگزرژی و هزینه‌های انرژی تخصیص داده شود (Taherahmadi et al. 2020). بر اساس بیان طاهراحمدی، ساختمان‌های انرژی صفر خالص[1] ساختمان‌هایی متصل به شبکه هستند که به همان اندازه که انرژی تولید شده مازاد از منابع تجدیدپذیر در محل را به شبکه صادر می کنند، در مواقع نیاز (مانند شبها) انرژی خود را از شبکه به دست

[1] Net Zero Energy Buildings

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]

می آورند. در حقیقت، این ساختمانها در طول یک سال از نظر مصرف انرژی خنثی هستند (Taherahmadi et al. 2020).

به علت در دسترس نبودن بسته‌های بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، برخی مطالعات مصرف انرژی ساختمان را با روش‌های شبیه‌سازی انجام دادند که نمی‌تواند منجر به بررسی اثرات پارامترهای مختلف طراحی بر مصرف انرژی شود. یانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۴، مطالعات مربوط به آسایش حرارتی را در اقلیم‌های مختلف جهان مرور کرده و مفهوم مصرف انرژی را در تلفیق با آسایش حرارتی عنوان کردند (Yang et al. 2014). وایت و همکارش نیز در سال ۱۹۹۶، میانگین دمای هوا را به عنوان یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر مصرف انرژی ساختمان در نظر گرفتند و شبیه‌سازی را بر این اساس انجام دادند. این استراتژی هیچگونه پیچیدگی خاصی به همراه نداشت و بر اساس درجه روز گرمایش و سرمایش به نتایج نسبتاً دقیقی نیز دست می‌یافت (White and Reichmuth 1996). علاوه بر این، یائو و همکارش نیز در سال ۲۰۰۵، رویکردهای طراحی خاصی را برای بکارگیری سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر معرفی و استفاده کردند که با یک مدلسازی ساده، نوع استفاده از این سیستم‌ها را در روز مشخص می‌کرد (Yao and Steemers 2005). ییک و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۱، امکان استفاده از یک سیستم water-cooled air-conditioning systems (WACS) را با در نظر گرفتن محدودیت‌های انرژی، اقتصادی و زیست محیطی بررسی کردند. در خصوص مدلسازی تقاضای انرژی و بارهای سرمایشی ساختمان‌های یک منطقه، آنها یک روش تخمین اطلاعات بارهای سرمایشی مبتنی بر شبیه‌سازی را برای ساختمان‌ها پیشنهاد کردند بنحوی که می‌توانست پیش‌بینی بار سرمایشی را نیز انجام دهد (Yik et al. 2001).

اخیراً، روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی مصرف انرژی ساختمان از محبوبیت قابل توجهی در بین محققین برخوردار شده‌اند. در این رویکرد، کل طراحی ساختمان در مقایسه با تغییرات هر یک از اجزای تاثیرگذار بر مصرف انرژی آنالیز می‌شود و امکان تعیین دقیق مقدار بارهای سرمایشی و گرمایشی را فراهم می‌آورد. در صورت بکارگیری متغیرهای طراحی ساختمان در حالت بهینه، می‌توان انتظار داشت که ساختمان پر بازدهی طراحی و ساخته شود که کمترین میزان تقاضای انرژی ممکن را داشته باشد. بهینه‌سازی چند هدفه ابزاری برای بهینه‌سازی توابع با اهداف متناقض به طور همزمان است که مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه را تحت عنوان منحنی پارتو نشان می‌هد. منحنی پارتو برای توابع دو هدفه به صورت دو بعدی و برای توابع سه هدفه به صورت سه بعدی میباشد. هر نقطه از منحنی پارتو یکی از بهترین جواب‌های ممکن است (Harkouss et al. 2018). تحقیقاتی در خصوص ارزیابی اثرات بکارگیری راهکارهای کاهش مصرف انرژی بر بهبود عملکرد ساختمان انرژی صفر و پیاده‌سازی انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی در توابع چند هدفه انجام شده است که در زیر به برخی از آنها اشاره شده است.

دلگرم و همکارانش در سال ۲۰۱۸، روشی را برای آنالیز حساسیت متغیرهای تاثیرگذار بر عملکرد انرژی ساختمان ارائه کردند. بر اساس این مطالعه مشخص شد که پارامترهای طراحی ساختمان نظیر جهت ساختمان، ابعاد پنجره و سایبان و ویژگی‌های حرارتی مصالح دیوار خارجی بر تقاضای انرژی بسیار تاثیرگذار هستند (Delgarm et al. 2018). در مطالعه دیگری در سال ۲۰۱۶، بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان در اقلیم‌های مختلف ایران با بکارگیری پارامترهای طراحی ساختمان در حالت بهینه انجام شد (Delgarm et al. 2016). در سال ۲۰۲۰، نادری و همکارانش نیز از روش بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر شبیه‌سازی برای کاهش مصرف انرژی و تامین آسایش حرارتی با بکارگیری سایبان در ساختمان استفاده کردند (Naderi et al. 2020). علاوه بر این، در سال ۲۰۲۳، ناطقی و همکارانش از روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای تقاضای انرژی ساختمان یک هتل چند طبقه در تهران استفاده کردند و با کاهش مصرف انرژی از طریق طراحی ساختمان در جهت بهینه و زاویه و عمق سایبان، گام اول ساخت یک ساختمان انرژی صفر را مهیا کردند. سپس، طراحی ساختمان انرژی صفر را با بکارگیری انرژیهای تجدیدپذیر از طریق نرم افزار

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]

هومر انجام دادند (Nateghi et al. 2023). در مطالعه دیگری در سال ۲۰۲۱، یک بهینه‌سازی چند هدفه به منظور یافتن بهترین راه‌حل سازش بین هزینه چرخه عمر ساختمان، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و آسایش حرارتی از طریق بهینه‌سازی پارامترهای طراحی شامل جهت ساختمان، نوع پنجره ها و نسبت پنجره به دیوار، عایق بندی دیوار و سقف و میزان نفوذ هوا انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با استفاده کارآمد از انرژی‌های تجدیدپذیر، دستیابی به ساختمان انرژی صفر در مراکش امکان پذیر است (Abdou et al. 2021). همچنین، درسال ۲۰۱۴، اشراقی و همکارانش، پتانسیل استفاده از انرژی خورشیدی را در طراحی یک ساختمان انرژی صفر در تهران بررسی کردند. در این مطالعه، با استفاده از داده‌های آب و هوایی، بارهای سرمایشی و گرمایشی محاسبه شده و استراتژی‌های پسیو نظیر دیوار ترامپ، سایبان و thermal mass به منظور کاهش بارهای حرارتی بکار گرفته شدند. نتایج این مطالعه نشان داده است که بکارگیری این روش‌ها منجر به کاهش ۴۲ درصدی مصرف انرژی می‌شود. به منظور تامین باقیمانده انرژی مورد نیاز، یک پمپ حرارتی جذبی خورشیدی[۲] استفاده شد که ۱۱۵۴۳ کیلووات ساعت انرژی تولید می‌کند؛ درحالیکه، مصرف انرژی این ساختمان ۴۱۰۵ کیلووات ساعت است (Eshraghi 2012). لذا، طراحی ساختمان انرژی صفر، از نظر تئوری در ایران امکانپذیر است. در یک مطالعه دیگر در سال ۲۰۱۹، امکانسنجی طراحی یک ساختمان انرژی صفر در عمان (اقلیم خیلی گرم) بررسی شده است. در این مطالعه، سیستمهای انرژی فعال و پسیو بکار گرفته شدند. عایقکاری پوسته ساختمان، استفاده از سایبان، طراحی بهینه جهت ساختمان، شکل ساختمان، تهویه طبیعی و استفاده از فن در سقف ساختمان به عنوان استراتژی‌های پسیو استفاده شدند. در کنار این، سیستم فتوولتاییک ۲۰ کیلوواتی بر پشت بام این ساختمان و آبگرمکن خورشیدی نیز بکار گرفته شدند. نتایج این تحقیق نشان داده است که ۴۰٪ بار حرارتی مورد نیاز ساختمان از طریق تولید انرژی در سایت تامین شده است و ۳۰٪ از دوره یکساله بررسی عملکرد انرژی ساختمان، مستقل از شبکه بوده است (Al-Saadi and Shaaban 2019).

هدف این مطالعه، ارائه یک رویکرد عمومی و کاربردی برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان ضمن تامین آسایش حرارتی ساکنین در شهر تهران است. این مقاله یک روش MCDM را برای بهینه‌سازی عملکرد ساختمان انرژی صفر خالص ارائه می‌دهد. هدف اصلی این روش پیدا کردن بهترین طراحی ممکن از طریق پاسخ‌های منحنی پرتو است که ترجیحات تصمیم‌گیرنده را منعکس می‌کند. روش مبتنی بر شبیه‌سازی پیشنهاد شده در این مقاله از سه قسمت اصلی تشکیل شده است: شبیه‌سازی انرژی، فرآیند بهینه‌سازی و طراحی ساختمان انرژی صفر. در قسمت اول، مصرف انرژی ساختمان با در نظر گرفتن شرایط طراحی مرجع شبیه‌سازی شده است. سپس، فرآیند بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی با در نظر گرفتن پارامترهای طراحی مختلف شامل زاویه (جهت) ساختمان، زاویه و عمق و طول بیرون زدگی سایه بان‌ها، ضخامت عایق دیوارهای خارجی، نقاط تنظیم دمای سرمایش و گرمایش، نسبت مساحت پنجره به دیوار، ضریب انتقال حرارت پنجره‌ها و ضخامت عایق سقف انجام می‌شود. علاوه بر این، به منظور پیدا کردن جواب بهینه نهایی، روش MCDM بکار گرفته می‌شود و میزان تغییرات هر یک از توابع هدف این مطالعه در مقایسه با حالت مرجع مشخص می‌شود. در نهایت، پس از اعمال مقادیر بهینه پارامترهای طراحی، سهم بگارگیری انواع انرژی‌های تجدیدپذیر بر اساس محدودیت‌های اقلیمی و اقتصادی نیز مشخص می‌شود.

۲- روش کار

[2] Solar absorption heat pump

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]

در این بخش، ابزارها و معادلات مورد استفاده در این تحقیق شامل EnergyPlus، JEPlus، JEPlus+EA، و Homer Pro که با روش‌های مختلفی برای انجام محاسبات استفاده شده‌اند، شرح داده شده است.

۲-۱ شبیه‌سازی ساختمان مورد مطالعه

یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان، نرم‌افزار انرژی پلاس است که توسط دپارتمان انرژی امریکا در سال ۲۰۰۱ معرفی شده است و با دو زبان فورترن و C++ برنامه‌نویسی شده است. این نرم‌افزار، از روش تعادل حرارتی برای محاسبه بارهای حرارتی و برودتی ساختمان استفاده می‌کند. نرم‌افزار انرژی پلاس، بر پایه مشخصات ساختمان شامل ساختار فیزیکی، ساکنین، سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی آن و همچنین با استفاده از داده‌های آب و هوایی سالانه، می‌تواند بارهای گرمایش و سرمایش را به منظور حفظ دما یا محدوده آسایش حرارتی خاص در ساختمان تنظیم کند. اساس کار نرم‌افزار انرژی پلاس بر مبنای توضیحات کاربر از جمله نقشه سه بعدی ساختمان، ترکیب فیزیکی ساختمان، اجزای سیستم‌های مکانیکی مربوطه، الگوریتم‌های حل و برنامه حضور ساکنین است (DOE 2015). در این مطالعه، از نرم افزار انرژی پلاس برای محاسبه مصرف انرژی ساختمان استفاده شده است. علیرغم قابلیت‌های فراوان نرم‌افزار انرژی پلاس، انجام عملیات بهینه‌سازی توسط این ابزار امکانپذیر نمی‌باشد؛ بنابراین، بدین منظور از نرم‌افزار JEPlus استفاده می‌شود (Naderi et al. 2020).

۲-۲ بهینه‌سازی دو هدفه

پس از شبیه‌سازی انرژی ساختمان، مسئله بهینه‌سازی دو هدفه (متغیرهای طراحی، تابع هدف و محدودیت‌ها) فرموله شده و از طریق یک ابزار بهینه‌سازی، بعد از انتخاب الگوریتم مناسب، برای دریافت منحنی پرتو بهینه‌سازی می‌شود. توابع هدف این مطالعه عبارتند از مصرف انرژی و آسایش حرارتی. یکی از مسائل اصلی طراحی ساختمان، تامین آسایش حرارتی ساکنین است. بر اساس استانداردهای ایزو ۷۷۳۰ و ASHRAE 55، آسایش حرارتی شرایط ذهنی است که رضایت از محیط حرارتی را بیان می‌کند. فاکتورهای اصلی تاثیرگذار بر آسایش حرارتی عبارتند از میزان فعالیت ساکنین، نوع پوشش افراد، میزان تابش، دمای هوا، رطوبت هوا و سرعت جریان هوا (Garcia and Kranzl 2018). در این مطالعه، شاخص PMV[3] به صورت معادله شماره (۱) تعریف می‌شود:

$$PMV = f(I_{cl}, M, t_a, t_{mrt}, p_a, v) \quad \text{معادله (۱)}$$

دو فاکتور اول در شاخص بالا مربوط به شرایط ساکنین است: 'I_{cl}' نوع پوشش افراد و M سرعت سوخت و ساز بدن. چهار فاکتور باقیمانده مربوط به شرایط اقلیمی و محیطی می‌شوند: 't_a' دمای هوا با واحد درجه سانتیگراد، t_{mrt} متوسط دمای تابش، 'p_a' رطوبت نسبی و 'v' سرعت هوا با واحد متر بر ثانیه (Zhang et al. 2019).

این مدل از یک موازنه حرارتی و داده‌های تجربی جمع‌آوری شده از یک محفظه هوای کنترل شده تحت شرایط پایدار به دست آمده است. آسایش حرارتی با ترکیبی از شش پارامتر ذکر شده در بالا تعریف می‌شود که PMV در محدوده ۰,۵- تا ۰,۵+، در شرایطی که PPD[4] زیر ۱۰ درصد باشد قرار می‌گیرد (Ansi/Ashrae 2004). رابطه بین PMV و PPD بر اساس معادله شماره ۲ می‌شود:

$$PPD = 100 - 95\exp(-0.03353PMV^4 - 0.2179PMV^2) \quad \text{معادله (۲)}$$

[3] Predicted Mean Vote (PMV)

[4] Predicted Percentage of Dissatisfie

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]

الف) ابزار بهینه‌سازی

در این مقاله، بهینه‌سازی دو هدفه، شامل مصرف انرژی و آسایش حرارتی، با استفاده از کوپل کردن نرم‌افزار انرژی پلاس به jEPlus+EA، نرم‌افزار دارای زبان برنامه‌نویسی جاوا معرفی شده توسط Yi Zhang در موسسه انرژی و توسعه پایدار دانشگاه De Montfort در سال ۲۰۰۹، انجام شده است. jEPlus. پارامترهای طراحی انرژی پلاس را به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری و خروجی‌های انرژی پلاس را به عنوان توابع هدف استفاده می‌کند. این نرم‌افزار همچنین به کاربران اجازه می‌دهد که مطالعه پارامتریکی را بر روی پارامترهای ورودی انرژی پلاس انجام دهند (Zhang 2012).

ب) الگوریتم بهینه‌سازی

الگوریتم NSGA-II[5] توسعه یافته توسط Deb و همکارانش، یکی از مشهورترین و معتبرترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه است که می‌تواند برای بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان نیز بکار گرفته شود. Nassif و همکارانش در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری از NSGA درپراکندگی جواب‌های بهینه در طراحی سیستم‌های هواساز حجم متغیر دارد (Nassif et al. 2004). Brownlee و همکارانش نیز دریافتند که الگوریتم NSGA-II از نظر تعداد جواب‌های بهینه و پراکندگی آن‌ها در بهینه سازی محل قرارگیری پنجره عملکرد قابل قبولی دارد (Brownlee et al. 2011).

فرآیند اصلی این الگوریتم شامل تولید جمعیت، ارزیابی تناسب جمعیت، رتبه‌بندی جمعیت بر اساس فاصله جمعیت (اندازه‌گیری میزان نزدیکی یا دوری افراد به همسایگان خود، با این فرض که دوری نشان دهنده تنوع بیشتر است)، انتخاب جمعیت نخبه، تقاطع دو بعدی و جهش می‌شود. علاوه بر این، ویژگی‌های خاص آن شامل اتخاذ روش‌های مرتب‌سازی سریع غیر مستقیم و برآورد فاصله جمعیت تولید شده می‌شود. با توجه به این ویژگی‌ها، همگرایی و پراکندگی جمعیت تضمین می‌شود. این الگوریتم همچنین دارای پیچیدگی محاسباتی منظمی است که می‌تواند در تشخیص تعداد توابع هدف و سایز جمعیت مفید باشد.

در فرآیند بهینه‌سازی، توابع هدف که شامل مصرف انرژی و آسایش حرارتی می‌شود تعریف شده و سپس متغیرهای تصمیم‌گیری که عمدتاً بر اساس پارامترهای تاثیرگذار بر مصرف انرژی مذکور در مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان انتخاب شده‌اند نیز وارد مسئله بهینه‌سازی می‌شوند. برای هر متغیر، محدوده قابل قبول بر اساس مقالات معتبر و محدودیت‌های مبحث مشخص شده و مقدار گام تغییرات نیز مشخص می‌شود. سپس، حل مسئله آغاز شده و با تمامی مقادیر تعریف شده برای متغیرها، میزان مصرف انرژی ساختمان تعیین می‌شود و تمامی نتایج در نمودار پرتو نشان داده می‌شود. در نهایت با روش تصمیم‌گیری چند معیاره بهترین جواب مسئله مشخص می‌شود.

ج) فرآیند تصمیم‌گیری چند معیاره

به منظور انتخاب بهترین جواب از میان گزینه‌های به دست آمده از فرآیند بهینه‌سازی، نیاز است که از فرآیند تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM)[6] استفاده شود. MCDM یک روش تحقیقاتی با ترکیبی جامع از مفاهیم و روش‌های حل است. این روش به طور گسترده در ارزیابی راه‌حل‌های انرژی پایدار در بخش ساختمان استفاده شده است. با توجه به اینکه تصمیم‌گیری در خصوص طراحی ساختمان‌های انرژی صفر پیچیده است، MCDM می‌تواند به تصمیم‌گیری در خصوص معیارهای مختلف و ترجیحات تصمیم‌گیرنده کمک کند. یکی از روش‌های MCDM، استفاده

5 Non-dominant Sorting Genetic Algorithm (NSGA)

6 Multiple-criteria decision-making

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]

از روش جمع وزنی[۷] است که می‌تواند تابع دو هدفه را به یک تابع تک هدفه تبدیل کند (Hashemi et al. 2016). این روش با بکارگیری معادله شماره ۳ می‌تواند بهترین پاسخ ممکن را از میان نقاط موجود در نمودار پرتو انتخاب کند:

معادله (۳)
$$f_{ws}(x) = \sum_{i=1}^{3} a_i \frac{f_i(x) - f_i(x)^{min}}{f_i(x)^{max} - f_i(x)^{min}}$$

در معادله بالا، $f_i(x)$ توابع هدف هستند که در اینجا شامل مصرف انرژی و آسایش حرارتی می‌شود. همچنین، $f_i(x)^{min}$ و $f_i(x)^{max}$، به ترتیب کمترین و بیشترین مقادیر توابع هدف هستند. a_i نیز فاکتور وزن‌دهی توابع هدف است که در اینجا با مقدار برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

۳-۲ سیستم بهینه هیبریدی و مدیریت تامین انرژی ساختمان

در این تحقیق، با هدف تعیین بهترین سیستم تجدیدپذیر هیبریدی برای تامین انرژی مورد نیاز، از نرم افزار HOMER استفاده شده است. HOMER یک برنامه آنالیز رایانه‌ای است که برای مدل سازی سیستم های میکروگرید تجدیدپذیر ترکیبی، از جمله توربین های بادی، سلول های سوختی، انرژی آبی، زیست توده، مبدل ها، باتری ها، ژنراتورهای معمولی، PV و CHP بسیار کارآمد است.

برای تعیین ایده آلِ نوع و سایز تجهیزات در ریز شبکه‌های منفصل و یا متصل به شبکه، این برنامه شش نوع داده ورودی را دریافت میکند، که عبارتند از: الف) داده‌های جغرافیای محل اجرای پروژه، ب) داده‌های هواشناسی (سرعت باد، تابش خورشید، دما و ...)، ج) تقاضای انرژی الکتریکی و گرمایی، د) اطلاعات مربوط به هزینه اقتصادی (هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه بهره داری و نگهداری، هزینه جایگزینی، هزینه سوخت، قیمت خرید و فروش برق، نرخ بهره، طول عمر و حتی جریمه انتشار آلاینده‌ها)، ه) اطلاعات مربوط به ویژگی‌های تجهیزات و ف) اطلاعات فنی.

با استفاده از داده‌های ورودی، نرم افزار HOMER تمام سیستم‌های تجدیدپذیر ترکیبی ممکن را با در نظر گرفتن حداقل هزینه فعلی خالص کل به عنوان تابع هدف مورد تحلیل قرار می‌دهد. سپس، عملی ترین راه حل را برای رفع محدودیت های مشخص شده در داده های ورودی (به عنوان مثال، حداقل و حداکثر ظرفیت ها، قیمت سوخت و هزینه های تولید برق) با کمترین هزینه کل انتخاب می کند.

۳-مدلسازی مورد مطالعاتی

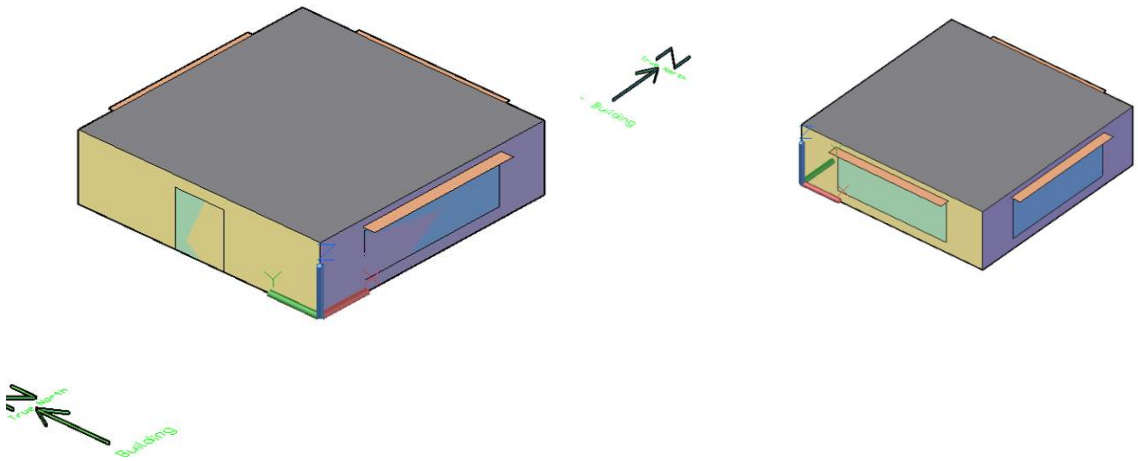
روش معرفی شده در بالا برای یک ساختمان مسکونی در شهر تهران به منظور بهبود عملکرد انرژی و آسایش حرارتی به کار گرفته شده است که تاثیر پارامترهای اقلیمی بر موازنه ساختمان انرژی صفر خالص را نیز نشان می دهد.

۳-۱ ویژگی‌های ساختمان

از آنجاییکه امروزه تمایل به استفاده از ساختمان‌های ویلایی در اطراف شهرهای بزرگ افزایش یافته است، ساختمان مورد مطالعه در این تحقیق یک ساختمان ویلایی با مساحت ۱۰۰ متر مربع و با یک ناحیه حرارتی است. این ساختمان دارای ۳۶ متر مربع پنجره و ۹/۳ مترمربع سایبان خارجی و همینطور شامل یک درب ورودی با مساحت ۵ مترمربع است؛ به عبارت دیگر، نسبت مساحت پنجره به دیوار آن ۳۴/۱۷ درصد است. نمایی از ساختمان مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. علاوه بر این، ویژگی‌های مصالح بکارگرفته شده در ساختمان نمونه نیز در جدول ۱ لیست شده اند که بر اساس مقررات ملی ساختمان در ایران می‌باشد.

[۷] Weighted sum method

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]



شکل ۱-دو نما از ساختمان مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات مصالح استفاده شده در ساختمان مورد مطالعه

ساختار	مصالح	ضخامت (متر)	وزن مخصوص $(\frac{kg}{m^3})$	ضریب انتقال هدایتی $(\frac{w}{m.k})$	حرارت
دیوار خارجی	سنگ نما	۰/۰۲	۲۷۰۰	۱/۶	
	شن	۰/۰۳	۱۸۰۰	۱/۱۵	
	آجر	۰/۱۰۵	۱۷۰۰	۰/۸	
	پلی استایرن	۰/۰۵	۱۰۰۰	۰/۰۶۸	
	گچ و خاک	۰/۰۲۵	۱۵۰۰	۱/۱	
	گچ	۰/۰۰۵	۱۲۰۰	۰/۵۶	
سقف	عایق سقف	۰/۰۲	۱۰۰۰	۰/۲۳	
	سیمان	۰/۱	۱۲۵۰	۰/۵۵	
	بتن	۰/۰۵	۲۳۰۰	۲/۳	
	عایق حرارتی	۰/۰۵	۱۵	۰/۰۴۷	
	تیرچه	۰/۲۵	۱۹۵۰	۰/۶۶	
	گچ و خاک	۰/۰۲۵	۱۵۰۰	۱/۱	
	گچ	۰/۰۰۵	۱۲۰۰	۰/۵۶	
کف	CC03	۰/۱۰۱۶	۲۲۴۳	۱/۳۱	
پنجره	شیشه	۰/۰۰۶		۰/۹	
	گاز	۰/۰۱۲		۰/۱۵۷ $(m^2.k/W)$	
	شیشه	۰/۰۰۶		۰/۹	

پنجره‌های موجود در این ساختمان با سایبان پوشیده شده و بارهای گرمایشی ساختمان با دیگ بخار چگالشی الکتریکی با بازدهی ۸۰ درصد تامین می‌شود. بارهای سرمایشی این ساختمان نیز از طریق استفاده از چیلرها تامین می‌شود که دارای راندمان یا ضریب عملکرد ۷۰ است. دمای ساختمان برای سرمایش و گرمایش، به ترتیب ۲۵ و ۲۲ درجه سانتیگراد تنظیم شده و رطوبت نسبی نیز ۵۰٪ در نظر گرفته شده است. در این ساختمان، پنج نفر ساکن بوده و لوازم

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]

برقی استفاده شده در این ساختمان عبارتند از: کامپیوتر، تلویزیون، ماشین ظرفشویی، ماشین لباسشویی، یخچال، اجاق گاز، هود و فن‌های خروجی توالت. چراغ‌های روشنایی نیز از نوع فلوئورسنت هستند.

۳-۲ تدوین مسئله بهینه سازی

در حالت کلی، مصرف انرژی الکتریکی شامل سرمایش، گرمایش، استفاده از لوازم خانگی و روشنایی می شود. مصرف الکتریسیته سرمایش و گرمایش می تواند با کاهش بارهای حرارتی ساختمان کمینه شود، به گونه ای که آسایش حرارتی نیز تامین شود. بنابراین، در این مقاله دو تابع هدف تعریف می شود:

- ✓ کمینه کردن بارهای حرارتی (سرمایش و گرمایش) ساختمان با بکارگیری راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی
- ✓ بیشینه کردن آسایش حرارتی (کمینه کردن *PPD*).

جدول ۳ لیست متغیرهای تصمیم گیری پوسته ساختمان و مقادیر اولیه و بازه مقادیر ممکن آنها را در فرآیند بهینه سازی نشان می دهد.

جدول ۳- متغیرهای تصمیم گیری مسئله بهینه سازی

متغیر	واحد	نوع	مقدار در حالت پایه	مقادیر	گام
جهت ساختمان	درجه	پیوسته	۰	[۳۵۹-۰]	۱۵
طول پنجره (نسبت مساحت پنجره به دیوار)	درصد	پیوسته	۳۴/۱۷ درصد	[٪۴۴-٪۲۴]	۰/۵
زاویه سایبان	درجه	پیوسته	۹۰	۱۳۵-۰	۵
عمق سایبان	متر	پیوسته	۰/۵	۱ - ۰/۲	۰/۱
طول بیرون زدگی سایه بان از دو طرف پنجره	متر	پیوسته	۰/۱	[۱-۰]	۰/۱
ضخامت عایق دیوار خارجی	متر	پیوسته	۰/۰۱	۰/۲ — ۰/۰۱	۰/۰۱
دمای ست‌پوینت گرمایشی	درجه‌ی سانتیگراد	پیوسته	۲۲	۲۳-۱۹	۰/۵
دمای ست‌پوینت سرمایشی	درجه‌ی سانتیگراد	پیوسته	۲۵	۲۷ - ۲۳/۵	۰/۵

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]

ضخامت گاز میانی شیشه پنجره	متر	پیوسته	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۶ – ۰/۰۱۲	۰/۰۰۱
جنس گاز میانی شیشه پنجره	-	گسسته	هوا	هوا، زنون،کریپتون،آرگون	
ضخامت عایق سقف	متر	پیوسته	۰/۰۱	۰/۰۱ – ۰/۲	۰/۰۱

پارامترهای تنظیم شده برای الگوریتم بهینه‌سازی *NSGA-II* در جدول ۴ نشان داده شده است. این پارامترها بر اساس مطالعات سایر محققین و اجرای مدل اولیه به گونه ای انتخاب شده اند که بهترین دقت برای منحنی پرتو و کمترین زمان محاسبه بهینه سازی را به همراه داشته باشد. در این الگوریتم، تکامل جمعیت زمانی که به ماکزیمم عدد تولید می رسد متوقف می شود. حداکثر تعداد تکرارهای محاسبه شده توسط *NSGA-II* برابر است با سایز جمعیت ضربدر تعداد نسلها، که در این مورد ۱۰۰۰ تکرار است.

جدول ۴- تنظیمات پارامترهای اولیه *NSGA-II*

پارامتر	مقدار
سایز جمعیت	۸
تعداد نسل	۸
احتمال تقاطع (٪)	۱۰۰
احتمال جهش (٪)	۲۰

۴- نتایج

این بخش، خروجی های روش پیشنهادی این مقاله برای طراحی ساختمان انرژی صفر خالص و بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی بهره وری انرژی ساختمان را با در نظر گرفتن محدودیت تامین آسایش حرارتی، ارائه می‌دهد. ابتدا، یک رویکرد جمع وزنی (WSM) برای انتخاب بهینه‌ترین پاسخ ممکن استفاده می شود. در بخش بعدی، نتایج اثرات هر یک از متغیرهای تصمیم‌گیری بر عملکرد انرژی ساختمان مسکونی مورد مطالعه در شهر تهران بررسی می‌شود. نهایتاً، گزینه‌های مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر برای تامین انرژی ساختمان با در نظر گرفتن محدودیت‌های اقلیمی، اقتصادی و زیست محیطی با استفاده از نرم افزار هومر پرو انتخاب می‌شوند.

۴-۱ شبیه‌سازی مصرف انرژی ساختمان

تقاضای انرژی ساختمان با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس شبیه‌سازی شده است. نتایج به دست آمده از فرآیند شبیه‌سازی در جدول ۵ نشان داده شده است. کل بار الکتریکی سالانه ساختمان در شهر تهران۱۸۹/۲ $\text{kWh}/(y.m^2)$ است. بارهای گرمایشی نیز ۳۰/۴۳ $\text{kWh}/(y.m^2)$ است. علاوه بر این، تقاضای انرژی سرمایشی نیز ۷۰/۶۶ $\text{kWh}/(y.m^2)$ است. شکل‌های ۳، ۴ و ۵ توزیع ماهانه بارهای الکتریکی، سرمایش و گرمایش را نشان می‌دهند.

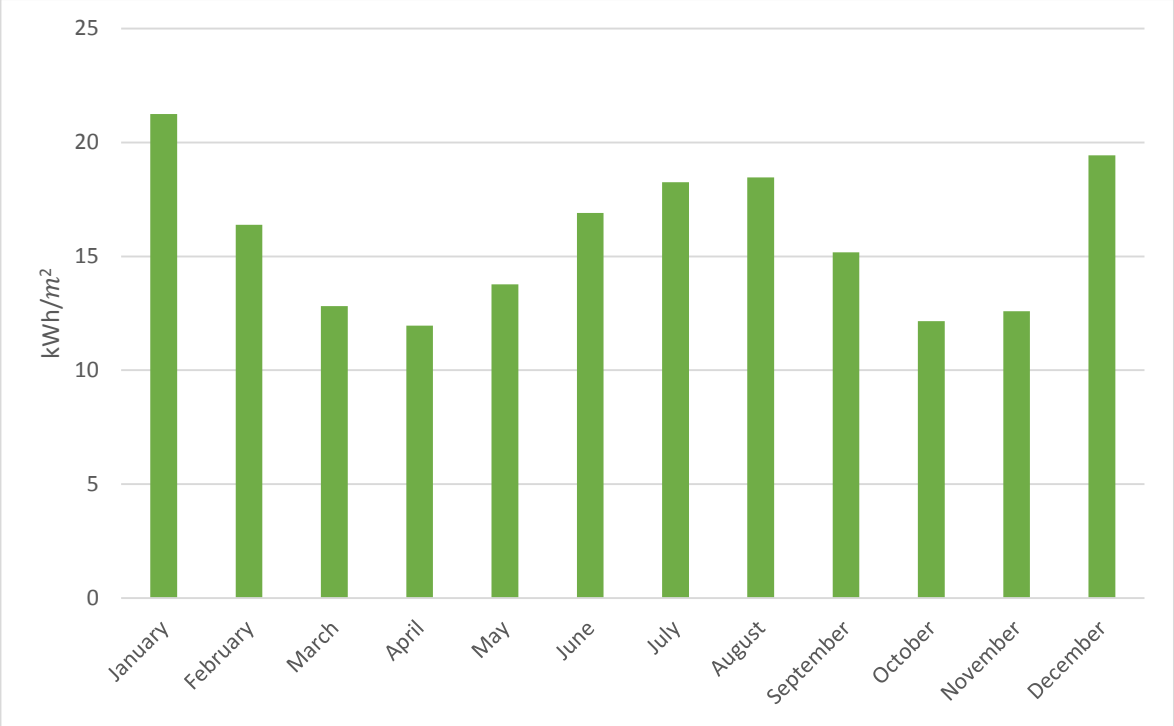
جدول ۵- بارهای الکتریکی و حرارتی سالانه

الکتریسیته کل	گرمایش	سرمایش
$\text{kWh}/(y.m^2)$	$\text{kWh}/(y.m^2)$	$\text{kWh}/(y.m^2)$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]

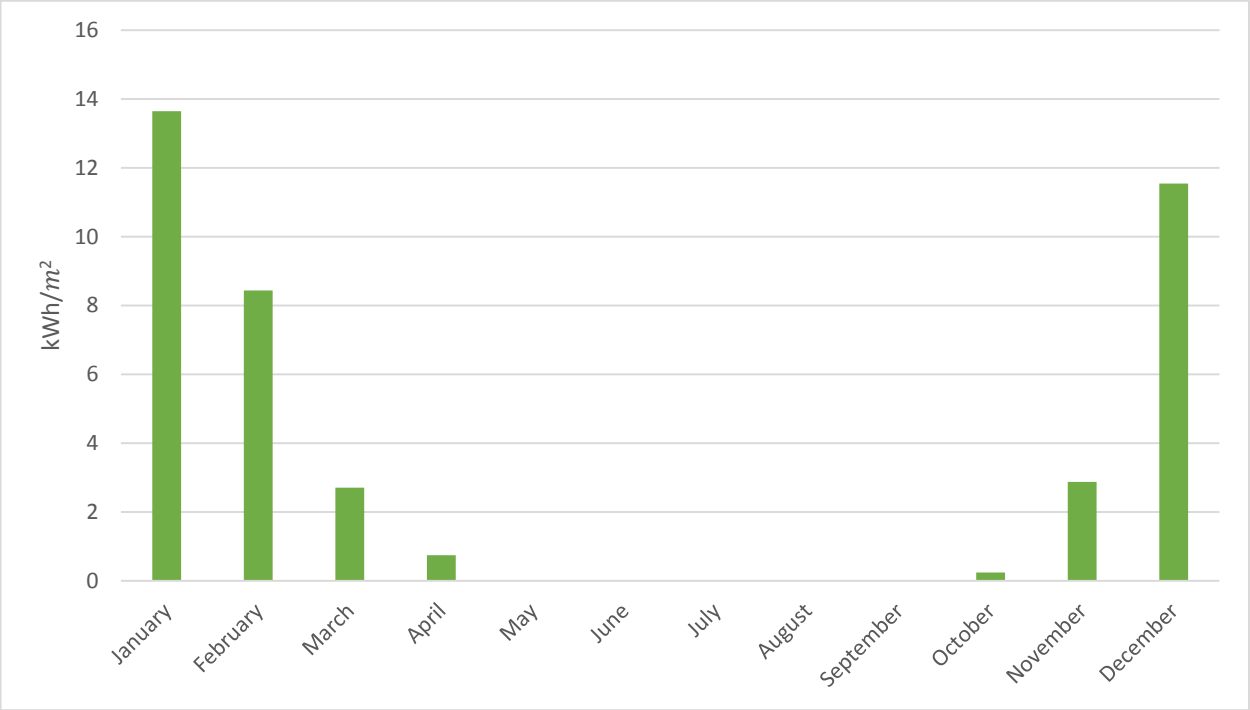
تهران	۱۸۹/۲	۳۰/۴۳	۷۰/۶۶

در نسخه جدید مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان (جدول ۱۹-۸-۱ مبحث، ویرایش سال ۱۳۹۹)، مصرف انرژی ساختمان در سه سطح EC، EC+ و EC++ تعریف شده است که برای اقلیم تهران، مصرف انرژی ساختمان EC+ (ساختمان کم انرژی)، این مقدار ۱۸۰ کیلووات ساعت بر متر مربع در سال عنوان شده است. نتایج شبیه‌سازی این مقاله نیز ۱۸۹ کیلووات ساعت بوده است که با اختلاف ۵٪ در محدوده قابل قبولی از نظر اعتبارسنجی قرار دارد.

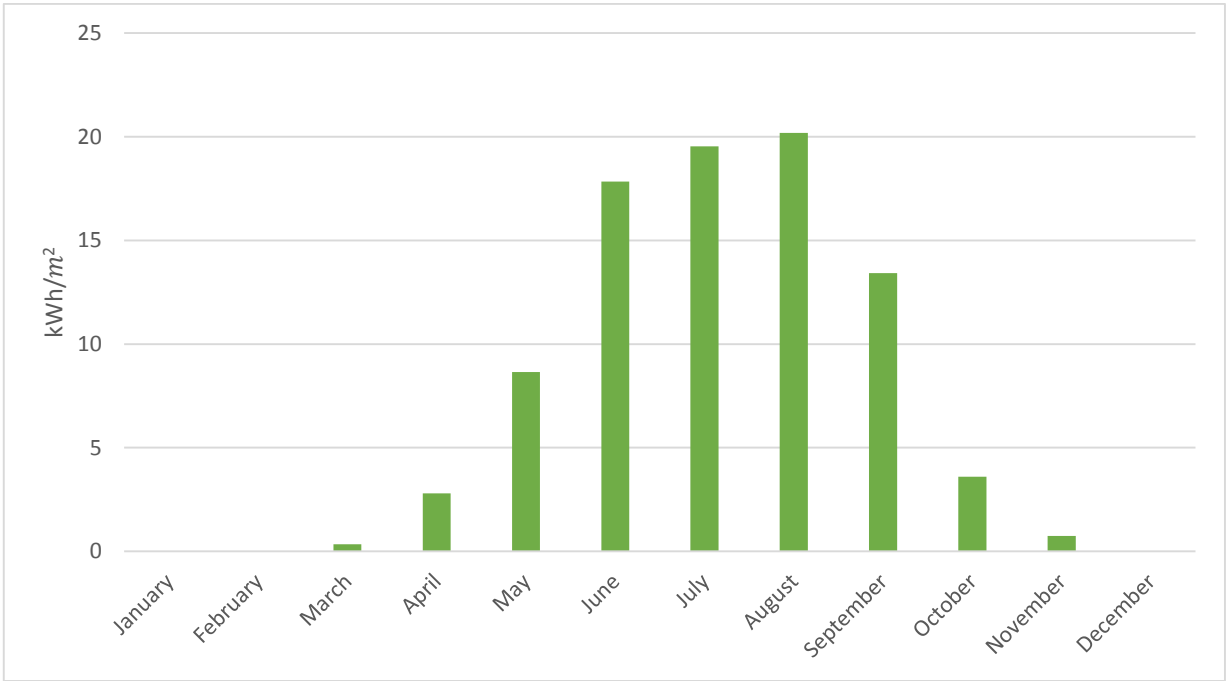


شکل ۳- بار الکتریکی ماهانه kWh/m^2

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]



شکل ۴- بار حرارتی گرمایش فضا kWh/m^2



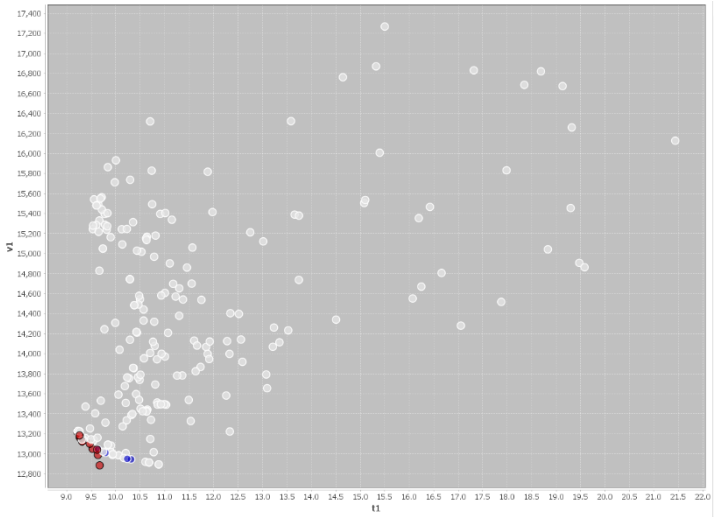
شکل ۵- بار حرارتی سرمایش فضا kWh/m^2

۴-۲ بهینه سازی دو هدفه

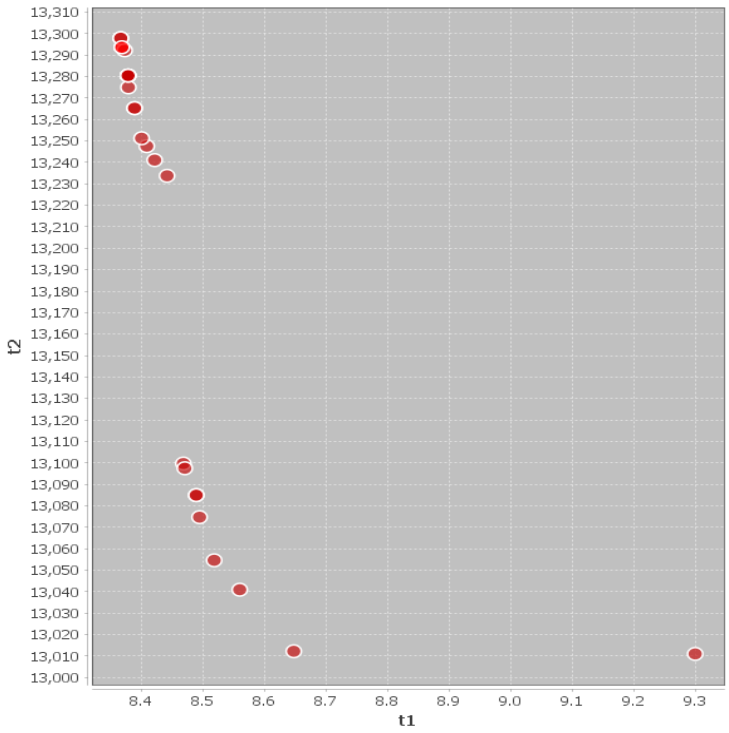
همانطور که قبلاً ذکر شد، کاهش مصرف انرژی در برخی از موارد موجب کاهش آسایش حرارتی می‌شود؛ بنابراین بهینه‌سازی ساختمان مورد مطالعه با در نظر گرفتن متغیرهای تصمیم‌گیری مختلف انجام شده و نتایج آن در قالب نمودارهای گرافیکی دو بعدی در شکل ۶ نشان داده شده است. نکته مهم دیگر این است که تابع هدف اول (مصرف انرژی) شامل گرمایش، سرمایش و روشنایی می‌شود که در بسیاری از موارد، در جهت مخالف یکدیگر تغییر می‌کنند. به عنوان مثال، استفاده از سایبان منجر به کاهش تقاضای انرژی سرمایش شده در حالیکه کاهش ورود نور خورشید

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]

را نیز به همراه دارد که باعث افزایش مصرف انرژی گرمایشی و روشنایی می‌شود (Abbasizade and Abbaspour 2021). بنابراین، انتخاب یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی در این موارد بسیار کمک کننده است به نحوی که می‌تواند از میان جواب‌های مختلف ارائه شده درنمودار پرتو، بهینه‌ترین پاسخ ممکن را انتخاب نماید.



شکل ۶. نمودارهای پرتو بهینه‌سازی دو هدفه ساختمان در شهر تهران. در این شکل محور *t1* نشان دهنده مقدار آسایش حرارتی (*PPD%*) و محور *t2* نشان دهنده انرژی کل (*kWh*) می باشند.



شکل ۷. بهترین جوابهای نمودارهای پرتو بهینه‌سازی دو هدفه ساختمان در شهر تهران. در این شکل محور *t1* نشان دهنده مقدار آسایش حرارتی (*PPD%*) و محور *t2* نشان دهنده انرژی کل (*kWh*) می باشند.

پس از به دست آمدن نمودارهای پرتو، بهینه‌ترین پاسخ برای هر دو تابع هدف، با استفاده از روش مجموع وزنی مشخص می‌شود که نتایج آن در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج بهینه‌سازی نشان داده است که پارامترهای طراحی و متغیرهای تصمیم‌گیری انتخاب شده در این مقاله نه تنها موجب ۲۵/۳ درصدی بهبود تقاضای انرژی شده است، بلکه تاثیر ۵۰ درصدی بر بهبود آسایش حرارتی ساکنین داشته است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]

جدول ۶- اختلاف بین مقدار بهینه و حالت مرجع برای هر تابع هدف

	تابع هدف ۱ (انرژی، کیلووات‌ساعت بر مترمربع)		تابع هدف ۲ (*PPD%*)
شهر تهران	مقدار *base case*	۲۳۶/۹	۲۲/۵
	بهترین مقدار تابع هدف به تنهایی	۱۷۶/۹۹	۱۱/۲۷
	٪ اختلاف	۲۵/۳	۵۰

جدول شماره ۷ پارامترهای طراحی ساختمان بهینه‌سازی شده را نشان می دهد. متغیرهای طراحی بهینه برای دیوارهای خارجی و سقف نشان می دهد که باید ضخات عایق قابل قبولی داشته باشد. بنابراین، یک ضخامت عایق یکسان برای محافظت از ساختمان در برابرشرایط آب و هوایی اقلیم های مختلف کافی نیست. نتایج این بهینه‌سازی نشان داده است که افزایش ضخامت عایق دیوارهای خارجی در تهران می‌تواند به کاهش مصرف انرژی ساختمان و تامین آسایش حرارتی ساکنین کمک شایان توجهی داشته باشد. یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار بر توابع هدف این مقاله، نسبت مساحت پنجره به دیوار است ، بهینه‌ترین حالت آن ۲۴/۱۶ انتخاب شده است.

جدول ۷- خلاصه مقادیر پارامترهای طراحی بهینه

شهر	حالت مرجع	تهران
جهت ساختمان	۰	۱۳۵
نسبت مساحت پنجره به دیوار	٪ ۳۴/۱۷	٪ ۲۴/۱۶
زاویه سایبان	۹۰	۷۰
عمق سایبان	۰/۵	۰/۵
طول بیرون زدگی سایه بان از دو طرف پنجره	۰/۱	۰/۱
ضخامت عایق دیوار خارجی	۰/۰۵	۰/۲
ضخامت عایق سقف	۰/۰۵	۰/۱۲
دمای تنظیم گرمایش	۲۲	۱۹
دمای تنظیم سرمایش	۲۵	۲۷
ضخامت گاز شیشه دو جدار	۰/۰۰۶۵	۰/۰۱۲
جنس گاز شیشه دو جداره	هوا	آرگون

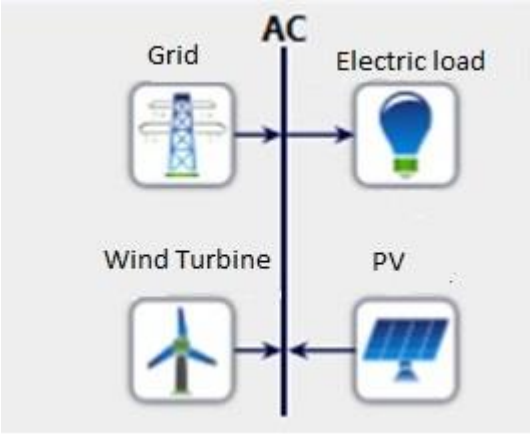
۳-۴ تامین تقاضای انرژی با استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر

شکل ۸، سیستم تجدیدپذیر ترکیبی طراحی شده در نرم افزار *HOMER* جهت تامین انرژی مورد نیاز ساختمان مورد بررسی در شهر تهران را نشان می‌دهد. انرژی مورد نیاز ساختمان از طریق سیستم تجدیدپذیر هیبریدی که شامل سیستم فتوولتاییک و توربین بادی می‌باشد تامین می‌گردد. از آنجا که هدف این بخش مشخص نمودن سیستم بهینه تجدیدپذیر می‌باشد، ظرفیت هر کدام از سیستم‌های فتوولتاییک و توربین بادی به طور مساوی (۱/۸ کیلووات) و در مجموع ۳/۶ کیلووات در نظر گرفته شد تا قابلیت مقایسه وجود داشته باشد.

همانطور که در شکل مشخص است با توجه به تعریف ساختمان انرژی صفر خالص، سیستم به صورت متصل به شبکه طراحی شده است تا امکان واردات و صادرات انرژی با شبکه برق فراهم گردد. از آنجا که در تعریف ساختمان انرژی صفر مورد استفاده در این تحقیق، بیان می‌شود که انرژی مورد نیاز ساختمان انرژی صفر تنها باید از طریق انرژی‌های

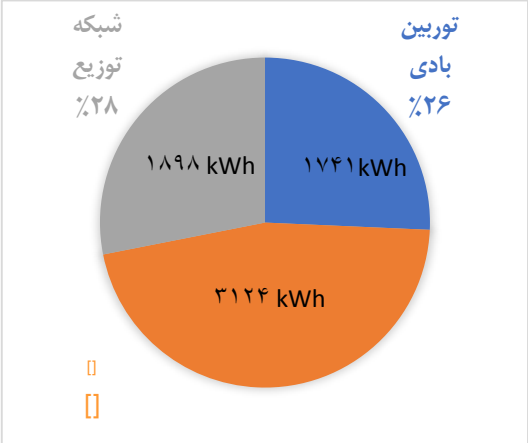
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]

تجدیدپذیر تامین گردد، امکان استفاده از بویلر با سوخت فسیلی جهت تامین انرژی گرمایشی وجود نخواهد داشت. بنابراین، کل تقاضای انرژی ساختمان در قالب بار الکتریکی طراحی گردید.



شکل ۸: سیستم طراحی شده جهت تامین انرژی مورد نیاز[8]

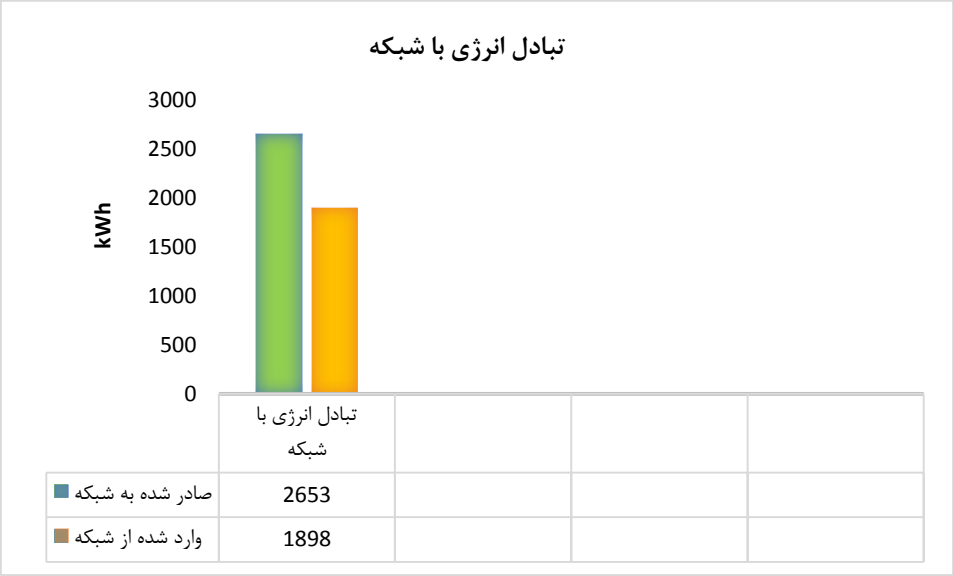
همانطور که در شکل های ۹ نشان داده شده است، سیستم خورشیدی بیشترین درصد مشارکت در تامین انرژی را داشته است. سیستم خورشیدی ۴۶ درصد از انرژی مورد نیاز را تامین می کند که نشان دهنده اهمیت کاربرد سیستم های خورشیدی در شهر تهران و اولویت استفاده از آن در برابر توربین‌های بادی می باشد. همانگونه که در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده است درصد مشارکت شبکه برق در تامین تقاضای انرژی در زمان های بحرانی ۲۸ درصد و کمتر از مقدار انرژی صادر شده به شبکه می باشد. این بدان معناست که با استفاده از تنها ۳/۶ کیلو وات انرژی تجدیدپذیر در ساختمان های ویلایی شهر تهران نه تنها امکان دسترسی به ساختمان های انرژی صفر خالص وجود دارد بلکه می توان انرژی مازاد را به شبکه برق فروخت. اتصال به شبکه نه تنها شرایط واردات/صادرات انرژی را برای ساختمان‌های انرژی صفر فراهم می کند و موجب امنیت انرژی می گردد، بلکه با حذف تجهیزات ذخیره ساز انرژی مانند باطری ها، هزینه سیستم هیبریدی را به شدت کاهش می دهد.



شکل ۹ سهم سیستم‌های مختلف در تامین انرژی ساختمان در شهر تهران

[8] Schematic diagram of the proposed system.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]



شکل ۱۰. وضعیت تبادل انرژی با شبکه در ساختمان منتخب

۵-نتیجه گیری

طراحی ساختمان انرژی صفر برای معماران و محققان مرتبط با مهندسی معماری و فیزیک ساختمان به یک اولویت اصلی تبدیل شده است. هدف از طراحی ساختمان‌های انرژی صفر نه تنها به حداقل رساندن تقاضای انرژی ساختمان با استفاده از روشهای طراحی پسیو ضمن تامین آسایش حرارتی است، بلکه ساخت ساختمانی است که نیازهای انرژی خود را از طریق روشهای فعال و فن آوریهای تجدیدپذیر تامین می‌کند. این مقاله به بررسی بهترین روش ساخت ساختمان انرژی صفر در اقلیم‌های مختلف ایران با در نظر گرفتن شاخص آسایش حرارتی پرداخته است. با توجه به تفاوت زیاد در تعاریف و رویکردهای محاسباتی مربوط به ساختمان انرژی صفر، در مطالعات مربوط به این ساختمان‌ها ابتدا باید تعریف مشخص و دقیقی ارائه نمود. در این تحقیق، ساختمان انرژی صفر خالص، ساختمانی با بهره‌وری انرژی بالا و متصل به شبکه در نظر گرفته شده است، که به همان اندازه که انرژی تولید شده مازاد از منابع تجدیدپذیر در محل را به شبکه صادر می کند، در مواقع نیاز انرژی خود را از شبکه به دست می آورد. هدف بخش اول این مطالعه به کارگیری یک روش بهینه‌سازی دو هدفه مصرف انرژی و تامین آسایش حرارتی ساکنین به منظور طراحی یک ساختمان مسکونی انرژی صفر خالص است. پس از محاسبه مصرف انرژی ساختمان در EnergyPlus، از الگوریتم NSGAII موجود در بسته نرم افزاری JEPlus+EA برای انجام بهینه سازی دو هدفه استفاده شد. در مسئله بهینه‌سازی معرفی‌شده، پارامترها جهت‌گیری ساختمان، زاویه شیب سایبان، عمق سایبان، ضخامت عایق حرارتی دیوار خارجی، نسبت مساحت پنجره به دیوار، طول بیرون زدگی سایبان از دو طرف پنجره، دمای تنظیم سرمایش، دمای تنظیم گرمایش، ضخامت گاز شیشه دو جداره، جنس گاز شیشه دو جداره و ضخامت عایق حرارتی سقف بودند. توابع هدف در نظر گرفته شده در این بهینه سازی، با وزن برابر در نظر گرفته شدند. در نهایت، با هدف تامین تقاضای انرژی باقیمانده (پس از بهینه‌سازی پارامترهای طراحی)، سیستم هیبریدی تجدیدپذیری شامل پنل خورشیدی و توربین بادی طراحی گردید. با توجه به تعریف ارایه شده از ساختمان انرژی صفر در این تحقیق، سیستم هیبریدی به گونه‌ای طراحی شد که توان صادر شده به شبکه برابر یا بیش از انرژی مصرف شده از شبکه باشد. همچنین برای بررسی تفاوت پتانسیل تولید انرژی تجدیدپذیر در تهران، سیستم هیبریدی با ظرفیت مساوی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد استفاده از پنل‌های خورشیدی اولویت بیشتری نسبت به استفاده از توربین‌های بادی دارد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]

تشکر و قدردانی:
با تشکر از حمایت های مادی و معنوی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) از این مطالعه در قالب طرح شماره ۹۷۰۱۰۷۷۱.

مراجع

[1] Abbasizade F, Abbaspour M (2021) Developing an optimization-based simulation approach for building energy performance evaluation (case study: Iran). Int J Energy Water Resour 5:277–286. https://doi.org/10.1007/s42108-020-00112-2

[2] Abbasizade F, Abbaspour M, Soltanieh M, Kani A (2020) An innovative executive and financial mechanism for energy conservation in new and existing buildings in Iran. Int J Environ Sci Technol

[3] Abdou N, EL Mghouchi Y, Hamdaoui S, et al (2021) Multi-objective optimization of passive energy efficiency measures for net-zero energy building in Morocco. Build Environ 204:108141. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108141

[4] Al-Saadi S, Shaaban A (2019) Zero energy building (ZEB) in a cooling dominated climate of Oman: Design and energy performance analysis. Renew Sustain Energy Rev 112:299–316. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.049

[5] Ansi/Ashrae (2004) ANSI/ASHRAE 55:2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Ashrae 2004:30

[6] Brownlee A, Wright J, Mourshed M (2011) A multi-objective window optimisation problem. In: Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO'11 - Companion Publication. pp 89–90

[7] Delgarm N, Sajadi B, Azarbad K, Delgarm S (2018) Sensitivity analysis of building energy performance: A simulation-based approach using OFAT and variance-based sensitivity analysis methods. J Build Eng 15:181–193. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.11.020

[8] Delgarm N, Sajadi B, Delgarm S (2016) Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort: A new method using artificial bee colony (ABC). Energy Build 131:42–53. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.003

[9] DOE (2015) EnergyPlus TM Documentation Getting Started with EnergyPlus Basic Concepts Manual - Essential Information You Need about Running

[10] Energy Ministry (2018) Iran's energy balance

[11] Eshraghi J (2012) Designing Zero Energy Building for Tehran

[12] European Commission (2018) Nearly zero-energy buildings. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en. Accessed 25 Jan 2024

[13] Garcia JF, Kranzl L (2018) Ambition Levels of Nearly Zero Energy Buildings (nZEB) Definitions: An Approach for Cross-Country Comparison. Buildings 8:. https://doi.org/10.3390/buildings8100143

[14] Harkouss F, Fardoun F, Biwole PH (2018) Multi-objective optimization methodology for net zero energy buildings. J Build Eng 16:57–71. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.12.003

[15] Hashemi SS, Hajiagha SHR, Zavadskas EK, Mahdiraji HA (2016) Multicriteria group decision making with ELECTRE III method based on interval-valued intuitionistic fuzzy information. Appl Math Model 40:1554–1564. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.08.011

[16] IEA (2023) Buildings – Analysis - IEA. https://www.iea.org/reports/buildings. Accessed 17 Feb 2023

[17] Lu Y, Zhang X-P, Huang Z, et al (2019) Definition and Design of Zero Energy Buildings. Green Energy Adv. https://doi.org/10.5772/intechopen.80708

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]

[18] Naderi E, Sajadi B, Behabadi MA, Naderi E (2020) Multi-objective simulation-based optimization of controlled blind specifications to reduce energy consumption, and thermal and visual discomfort: Case studies in Iran. Build Environ 169:106570. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106570

[19] Nassif N, Kajl S, Sabourin R (2004) Evolutionary algorithms for multi-objective optimization in HVAC system control strategy. In: IEEE Annual Meeting of the Fuzzy Information, 2004. Processing NAFIPS '04. pp 51-56 Vol.1

[20] Nateghi S, Mansoori A, Moghaddam MAE, Kaczmarczyk J (2023) Multi-objective optimization of a multi-story hotel's energy demand and investing the money saved in energy supply with solar energy production. Energy Sustain Dev 72:33–41. https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.11.010

[21] Santamouris M, Vasilakopoulou K (2021) Present and future energy consumption of buildings: Challenges and opportunities towards decarbonisation. e-Prime - Adv Electr Eng Electron Energy 1:100002. https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100002

[22] Taherahmadi J, Noorollahi Y, Panahi M (2020) Toward comprehensive zero energy building definitions: a literature review and recommendations. Int J Sustain Energy 0:1–29. https://doi.org/10.1080/14786451.2020.1796664

[23] White JA, Reichmuth R (1996) Simplified method for predicting building energy consumption using average monthly temperatures. In: IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. pp 1834–1839 vol.3

[24] Yang L, Yan H, Lam JC (2014) Thermal comfort and building energy consumption implications – A review. Appl Energy 115:164–173. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.062

[25] Yao R, Steemers K (2005) A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK. Energy Build 37:663–671. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.09.007

[26] Yik FWH, Burnett J, Prescott I (2001) Predicting air-conditioning energy consumption of a group of buildings using different heat rejection methods. Energy Build 33:151–166. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00094-3

[27] Zhang S, He W, Chen D, et al (2019) Thermal comfort analysis based on PMV/PPD in cabins of manned submersibles. Build Environ 148:668–676. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.033

[28] Zhang Y (2012) Use jEPlus as an Efficient Building Design Optimisation Tool. CIBSE ASHRAE Tech Symp 18–19

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]

چکیده انگلیسی:

Multi-objective optimization of energy demand and net zero energy building design based on climatic conditions (Case study: Tehran)

Javad Taher Ahmadi[1], Yunus Nurollahi[2*], Mustafa Panahi[1]

1- Faculty of Natural Resources and Environment, Islamic Azad University - Science and Research Unit, Tehran.
2-Professor of Sustainable Energy Systems Engineering Department, Faculty of Energy and Sustainable Resources Engineering, University of Tehran.

Received: September 2023, Accepted: December 2023

Abstract

In recent years, reducing energy consumption and greenhouse gas emissions in the building sector has attracted a lot of attention. As in other parts of the world, the construction sector in Iran also has a large share of energy consumption. As a result, low consumption and even zero energy buildings, as an alternative solution in solving this problem, have attracted the attention of scientists, researchers and policy makers. One of the main challenges in designing a zero energy building is to find the best combination of passive solutions to reduce consumption and optimize energy performance in the building in such a way that the energy performance of the building and the thermal comfort of the residents are not negatively affected. This article presents a method for multi-objective and multi-variable optimization based on building simulation, which is carried out in three main stages: building energy consumption simulation, two-objective optimization process and multi-criteria decision making for zero energy building design using renewable energy sources. Reproducible. The studied design parameters are: direction of the building, angle and depth and length of the protrusion of the shades, insulation thickness of external walls, temperature adjustment points for cooling and heating, ratio of window to wall area, heat transfer coefficient of windows and thickness of roof insulation. In addition, the considered renewable energy sources are: photovoltaic panels and wind turbines. In order to achieve a net zero energy building, considering maintaining the thermal comfort of the residents, a multi-objective genetic algorithm with non-dominated sorting has been used. Finally, in order to determine the most optimal answer in the Pareto diagram, the elimination and selection method compatible with reality has been used. The results show that climatic conditions and the appropriate selection of architectural parameters are very important and vital in reducing building energy consumption. Based on the results, the use of energy optimization solutions in Tehran leads to a 25.3% reduction in energy consumption. In addition, there is a significant potential for the use of photovoltaic systems in Tehran to provide energy for homes.

Key words: Net Zero Energy Building, Multi-objective optimization, Moderate climate, Renewable energy systems, Thermal comfort.

*corresponding author: **noorollahi@ut.ac.ir**

Cite this article as: Javad Taher Ahmadi, Yunus Nurollahi, Mustafa Panahi, Multi-objective optimization of energy demand and net zero energy building design based on climatic conditions (Case study: Tehran) . Journal of Energy Conversion, 2023, 10(3), 37-55

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-04]