

آنالیز بهره‌وری انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در ساختمان‌ها

محمد جواد بردباری^۱، کارشناسی ارشد؛ محمد رستگار^۲، استادیار؛ علی رضا سیفی^۳، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه شیراز- شیراز- ایران - m.j.bordbari@shirazu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه شیراز- شیراز- ایران - mohammadrastegar@shirazu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه شیراز- شیراز- ایران - seifi@shirazu.ac.ir

چکیده: تحلیل بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها از دو قسمت، تخمین مصرف و بهینه‌سازی مصرف انرژی، تشکیل شده‌است که گام اصلی در راستای دست‌یابی به ساختمان‌های هوشمند می‌باشد. از آنجاکه بخشی از پارامترهای مؤثر بر این تحلیل‌ها غیرقطعی می‌باشند، در این مقاله به تحلیل مصرف و بهینه‌سازی انرژی در ساختمان به صورت احتمالی پرداخته می‌شود. بدین منظور، تابع چگالی پارامترهای غیرقطعی ساختمان با استفاده از روش آماری تخمین نقطه‌ای مدل شده و سپس به بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان پرداخته می‌شود. برای محاسبه مصرف انرژی در ساختمان از نرم‌افزار انرژی پلاس و برای بهینه‌سازی از نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود. توابع هدف در بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهادی، چگالی انرژی مصرفی ساختمان و شاخص راحتی ساکنین می‌باشند. از یک ساختمان تجاری دوازده طبقه به منظور نمونه مورد مطالعه استفاده می‌شود. به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، روش احتمالی تحلیل بازدهی مصرف انرژی با روش غیراحتمالی مرسوم مقایسه می‌شود. نتایج حاصل از این ارزیابی به خوبی نشان می‌دهد که در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی در ساختمان، خطای چشم‌گیری در تحلیل بازدهی انرژی آن سبب می‌شود به طوری که میانگین اختلاف بین مقادیر بهینه پارامترهای متغیر حاصل از هر دو روش به ۲۸ درصد می‌رسد. در انتها نیز حساسیت روش پیشنهادی نسبت به تغییر اقلیم و آب‌وهوا ارزیابی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ممیزی انرژی، تحلیل بازدهی انرژی در ساختمان، چگالی مصرف انرژی ساختمان، راحتی حرارتی ساکنین.

Energy Efficiency Analysis Incorporating Uncertainties in Buildings

Mohammad Javd Bordbari¹, MSc; Mohammad Rastegar², Assistant professor; Ali Reza Seifi³, Professor

1-Department of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: m.j.bordbari@shirazu.ac.ir

2-Department of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: mohammadrastegar@shirazu.ac.ir

3-Department of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: seifi@shirazu.ac.ir

Abstract: First step in designing smart homes is energy efficiency analysis including energy optimization and consumption analysis. This paper incorporates the uncertainty of the effective parameters and probabilistically optimizes the energy consumption in a building. To this end, probability density functions (PDFs) of building uncertain parameters are modeled by point estimate method and the energy usage in buildings is optimized. EnergyPlus and MATLAB software are respectively used to compute the energy consumption in a building and to optimize the energy consumption. Energy consumption of the building and the thermal comfort are considered as objective functions of the proposed multi-objective optimization problem. The 12-story commercial building is used as a case study. To assess the proposed method, the proposed probabilistic method is compared with the deterministic method. The results show a significant difference between the deterministic and probabilistic cases. The maximum difference between the mean optimal values of variable parameters in these cases is about 28%. Finally, sensitivity of the results to the climate changes is also investigated in this paper.

Keywords: Energy audit, Energy efficiency in building, Building energy consumption density, Thermal comfort.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۲۱

نام نویسنده مسئول: محمد رستگار

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شیراز - دانشگاه شیراز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - بخش مهندسی قدرت و کنترل

۱- مقدمه

بیش‌تر پارامترهای ساختمان از جمله ضریب هدایت حرارتی دیوارها، ضریب نفوذ هوا، تعداد ساکنین و میزان مصرف وسایل گرمایشی-سرمایشی، ماهیتی غیرقطعی دارند؛ زیرا به تغییرات آب‌وهوا و رفتار ساکنان وابسته هستند [۱۷-۱۵]. هرچند مطالعات اندکی در زمینه تعیین میزان مصرف انرژی در ساختمان با در نظر گرفتن عدم قطعیت وجود دارد [۲۲-۱۸]، اما تاکنون مطالعه‌ای در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و مدل‌سازی از طریق روش آماری تخمین دونقطه‌ای^۵ دیده نشده است. در حالی که اگر از وجود عدم قطعیت در بهینه‌سازی مصرف انرژی صرف نظر شود، تحلیل بازدهی انرژی با واقعیت تفاوت چشم‌گیری خواهد داشت.

در این مقاله، روشی جدید به منظور بهینه‌سازی احتمالی با در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی دخیل در مصرف انرژی ساختمان پیشنهاد می‌شود. در این راستا، ابتدا تمام پارامترهای مؤثر ساختمان تعریف می‌شوند. پارامترهای مؤثر، پارامترهایی هستند که تغییرات مقدار آن‌ها تأثیرات چشم‌گیری بر میزان مصرف انرژی ساختمان دارد [۲۳]. بخشی از پارامترهای مؤثر مقدارشان قطعی است و چندان حق انتخابی در مورد آن‌ها وجود ندارد. این بخش از پارامترها، همچون پارامترهای غیر مؤثر در بهینه‌سازی به صورت مقداری ثابت در نظر گرفته می‌شوند. بخش دیگری از پارامترهای مؤثر ساختمان، در بازه مشخصی قابل تغییر و انتخاب هستند؛ بنابراین، با در نظر گرفتن بازه تغییرات آن‌ها و با استفاده از روش پیشنهادی، بهینه‌ترین مقدار برای هر متغیر محاسبه می‌شود. همچنین، برخی از پارامترها ماهیت احتمالی و غیرقطعی دارند که برای آن‌ها تابع چگالی احتمال تعریف می‌شود و بر اساس آن سناریوهای مختلفی تولید و در بهینه‌سازی وارد می‌شود. توابع هدف مسئله بهینه‌سازی، میانگین چگالی مصرف انرژی و میانگین شاخص راحتی حرارتی ساکنان می‌باشند. با استفاده از منحنی پارتو^۶، نتایج بهینه نمایش داده می‌شود. از نرم‌افزار متلب برای پیاده‌سازی روش بهینه‌سازی احتمالی استفاده می‌شود. همچنین، به منظور تحلیل مصرف انرژی ساختمان نرم‌افزار پرکاربرد انرژی پلاس^۷ به کار برده می‌شود. برای ارتباط بین این دو نرم‌افزار نیز از نرم‌افزار جی‌پلاس^۸ بهره برده می‌شود. همچنین برای ارزیابی روش پیشنهادی، بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه غیر احتمالی با روش احتمالی پیشنهادی مقایسه خواهد شد. در انتها به منظور نشان دادن میزان کارایی روش پیشنهادی، چندین شهر با آب‌وهوای مختلف در نظر گرفته شده است و با استفاده از روش پیشنهادی به تحلیل بازدهی انرژی ساختمان‌های آن شهرها پرداخته می‌شود تا میزان حساسیت روش پیشنهادی نسبت به تغییرات آب‌وهوا و تغییرات اقلیمی مشخص شود.

به طور خلاصه می‌توان نوآوری‌های این مقاله را به صورت زیر بیان کرد:

- پارامترهای مؤثر غیرقطعی در آنالیز بهره‌وری انرژی ساختمان مدل شده است.

امروزه رشد بیش‌ازحد مصرف انرژی در ساختمان‌ها یکی از بزرگ‌ترین دغدغه محققان شده است. آن‌ها در تلاش هستند تا بتوانند راه چاره‌ای دریابند که ساکنین در کنار آسایش، کمترین میزان انرژی را مصرف کنند. [۱]. در ابتدا ساختمان‌هایی به نام ساختمان‌های سبز^۱ پیشنهاد شد تا میزان وابستگی به منابع انرژی وابسته به سوخت‌های فسیلی کاهش یابد [۲]. اخیراً به منظور بهبود کارایی ساختمان سبز، ساختمان‌هایی به نام ساختمان انرژی صفر^۲ پیشنهاد شده است که این ساختمان‌ها علاوه بر بهره بردن از منابع انرژی تجدیدپذیر، از روش‌هایی جهت بهبود بازدهی انرژی نیز استفاده می‌کنند [۳]. یکی از برنامه‌های مهم کشورهای جهان، انرژی صفرشدن تمام ساختمان‌ها می‌باشد [۴]. ساختمان‌های انرژی صفر باید انرژی مصرفی خود را به صورت محلی تأمین کنند و اتکابشان به شبکه انرژی به حداقل برسد. اجرای این برنامه بلندمدت بدین معنا نیست که تمام ساختمان‌ها خراب شوند و مجدداً از نو ساخته شوند، بلکه بدین معناست که ساختمان‌های موجود و ساختمان‌های در حال ساخت به صورتی طراحی شوند که به سمت انرژی صفرشدن حرکت کنند. بدین منظور، بایستی در کنار استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در ساختمان، میزان مصرف انرژی ساختمان را نیز کنترل کرد. محاسبه دقیق میزان مصرف انرژی ساختمان و ارائه روش‌هایی در جهت کاهش تلفات و مدیریت انرژی مصرفی را تحلیل بازدهی انرژی^۳ می‌نامند [۱].

طبق تعریف، آنالیز بازدهی انرژی در دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله اول به محاسبه دقیق میزان مصرف انرژی ساختمان پرداخته شده و در مرحله دوم راه‌کارهایی در راستای کاهش تلفات انرژی مصرفی ساختمان ارائه می‌شود. برای پیاده‌سازی مرحله اول، ساختمان با همه اجزا و بخش‌های آن شبیه‌سازی می‌شود [۵]. به دلیل تعدد و پیچیدگی پارامترهای ساختمان شامل تعداد ساکنان، ضریب نفوذ هوا، میزان هدایت عایق‌های حرارتی دیوارها و میزان مصرف وسایل گرمایشی-سرمایشی و روشنایی، اخیراً نرم‌افزارهایی همچون انرژی پلاس^۴، Blast، DOE-2، جهت شبیه‌سازی گرافیکی یا پارامتری ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶]. پس از تخمین میزان مصرف انرژی ساختمان به کمک نرم‌افزارهای مذکور، به طراحی روش‌هایی پرداخته می‌شود که ساختمان را به گونه‌ای طراحی یا بازسازی کنند که کمترین میزان مصرف انرژی را دارا باشد. همچنین، از لحاظ هزینه پرداختی انرژی و آسایش ساکنین نیز در حد مطلوبی قرار داشته باشد. به بیان دیگر، بهینه‌سازی طراحی ساختمان‌ها با توجه به هزینه و آسایش ساکنین بایستی صورت گیرد. بدین منظور، روش‌های بهینه‌سازی متعددی پیشنهاد شده است [۱۴-۷]. در این روش‌ها، بهینه‌ترین مقدار برای پارامترهای طراحی ساختمان پیشنهاد داده می‌شود که به‌ازای آن‌ها کم‌ترین میزان مصرف انرژی و بیش‌ترین راحتی در ساختمان به دست آید. در نهایت می‌توان این پارامترها را در طراحی یک ساختمان جدید یا بازسازی ساختمان موجود به کار برد.

خنک‌کننده، دمای هوای خنک‌کننده، چگالی مصرفی وسایل، چگالی روشنایی و ضریب عمل کرد خنک‌کننده کویل، به تخمین مصرف انرژی ساختمان پرداخته‌اند. نویسندگان [۲۲] در ابتدا با استفاده از روش متامدل^۹ به کاهش تعداد پارامترهای نامعین پرداخته‌اند، سپس با روش مونت کارلو و در نظر گرفتن ۱۳ پارامتر نامعین از قبیل ضریب هدایت حرارتی دیوار، ضریب هدایت حرارتی سقف، ضریب هدایت حرارتی کف و نرخ نفوذ هوا، میزان مصرف انرژی در ساختمان را ارزیابی کرده‌اند. همچنین دیگر پارامترهای ساختمان از قبیل تعداد ساکنین ساختمان، چگالی مصرفی وسایل عددی ثابت در نظر گرفته شده‌است. در عین حال مطالعات زیادی هم در راستای ارائه روش‌های مختلف بهینه‌سازی انرژی در ساختمان یا بهبود آن روش‌ها با تعیین پارامترهای دخیل در مصرف انرژی پیشنهاد شده‌است. روش‌هایی هم چون الگوریتم ژنتیک مرتب‌ساز غیرغالب^{۱۰} [۷]، بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه ازدحام ذرات [۸]، تلفیق بهینه‌سازی ژنتیک و simulated annealing [۹]، تلفیق روش استاتیکی دمای روزانه و الگوریتم ژنتیک [۱۰]، بهینه‌سازی ژنتیک بهبودیافته [۱۱]، تلفیق الگوریتم ژنتیک و هوش مصنوعی [۱۲] جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌است.

۲-۲- ابزارهای تحلیل مصرف انرژی در ساختمان

همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد، ابزارهای بسیاری برای تحلیل مصرف انرژی در ساختمان ارائه شده‌اند [۵، ۶، ۲۴]. به‌طور کلی می‌توان ایده مورد استفاده در این ابزارها را به دو روش مستقیم و معکوس تقسیم‌بندی کرد [۲۵]. در روش معکوس با استفاده از میزان مصرف انرژی ساختمان، مشخصه‌های ساختمان از قبیل بار پایه‌ای^{۱۱} ساختمان، ضریب بار^{۱۲} ساختمان، آب‌وهوا و ثابت زمانی ساختمان را به دست می‌آورند تا بتوانند رفتار ساختمان را پیش‌بینی کنند. در روش مستقیم با استفاده از توصیفات فیزیکی ساختمان از قبیل موقعیت ساختمان، هندسه ساختمان، جزییات ابزارهای ساختمان و نوع سیستم HVAC^{۱۳} تلاش می‌کنند که میزان مصرف انرژی ساختمان را پیش‌بینی کنند. هردوی این روش‌ها براساس روش ممیزی انرژی مفصل^{۱۴} می‌باشند که در واقع روش دقیقی است برای تخمین میزان مصرف انرژی کل ساختمان یا بخشی از ساختمان از قبیل روشنایی، فن‌ها و سردکن‌ها که از مشخصه‌های متعدد ساختاری و محیطی ساختمان استفاده می‌کند [۲۵]. روش معکوس، روش نسبتاً پیچیده‌ای است که محدود به فرمول پارامترهای مشخصه ساختمان و دقت این پارامترها هست. در حالی که روش مستقیم، یک روش معمول است؛ چراکه اکثر نرم‌افزارهای تحلیل گر مصرف انرژی در ساختمان از قبیل انرژی پلاس، DOE-2، TRNSYS، Energy-10 و BLAST بر مبنای این روش پیاده‌سازی شده‌اند [۵]. هرکدام از این نرم‌افزارها مشخصه‌های مختص خود را دارند. در این بین، نرم‌افزارهای انرژی پلاس و TRNSYS محبوبیت بیشتری دارند. نرم‌افزار TRNSYS نرم‌افزار پیچیده، اما در عین حال دقیقی است

از روش آماری تخمین دونقطه‌ای به منظور مدل‌سازی پارامترهای غیرقطعی استفاده شده‌است.

- به کمک نرم افزار انرژی پلاس انرژی مصرفی ساختمان تخمین زده می‌شود.
- به منظور آنالیز بهره‌وری انرژی ساختمان، مساله بهینه‌سازی چندهدفه تعریف می‌شود.
- روشی پیشنهاد می‌شود که در فضای متلب پارامترهای غیرقطعی مدل‌سازی شده را در الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک دخیل کند و سپس به حل مساله آنالیز بهره‌وری انرژی ساختمان از طریق نرم‌افزارهای انرژی پلاس و جی پلاس بپردازد.

ساختار این مطالعه بدین صورت است که در بخش دوم پیشینه پژوهش بیان می‌شود. سپس در بخش سوم روش پیشنهادی به صورت کامل تشریح خواهد شد. آنگاه در بخش چهارم به منظور ارزیابی روش پیشنهادی ساختمان نمونه‌ای توصیف می‌شود که نتایج بهینه‌سازی انرژی این ساختمان با استفاده از روش پیشنهادی در بخش پنجم مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس حساسیت روش پیشنهادی نسبت به تغییر اقلیم و آب‌وهوا در بخش ششم مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. در انتها نیز در بخش هفتم به نتیجه‌گیری مطالب پرداخته خواهد شد.

۲- پیشینه پژوهش

در این بخش ابتدا به مرور کارهای انجام شده در زمینه تحلیل بازدهی انرژی مصرفی ساختمان پرداخته می‌شود. سپس نرم‌افزارها و ابزارهای مربوطه مرور خواهند شد.

۲-۱- تحلیل بازدهی انرژی در ساختمان

مروری بر روش‌های تحلیل بازدهی انرژی نشان می‌دهد که روش‌های متعددی با هدف کاهش مصرف انرژی در ساختمان ارائه شده‌است [۱۲-۷، ۲۲-۱۸]. اکثر محققین تمرکز خود را بر مرحله اول تحلیل بازدهی انرژی، یعنی تخمین میزان مصرف انرژی قرار داده‌اند. مرجع [۱۸] با در نظر گرفتن PDF پارامترهای غیرقطعی و با استفاده از روش مونت کارلو به تخمین انرژی مصرفی ساختمان با استفاده از روش رگرسیون خطی می‌پردازد. تلاش نویسندگان [۱۹]، استفاده از روش احتمالی تخمین دونقطه‌ای^۸ است که بتواند دقیق‌تر و سریع‌تر به تحلیل مصرف انرژی در ساختمان بپردازد. نویسندگان [۲۰] با بهره‌گیری از روش احتمالی مونت کارلو میزان حساسیت پارامترهای غیرقطعی ساختمان را بر میزان مصرف انرژی گرمایی و شاخص راحتی در ساختمان مورد تحلیل قرار داده‌اند. همچنین نویسندگان [۲۱] در ابتدا با استفاده از تحلیل حساسیت، میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای نامعین را بر میزان مصرف انرژی ساختمان محاسبه کرده‌اند؛ سپس پارامترهایی که تأثیر کمتری دارند را نیز همانند بقیه پارامترها قطعی در نظر گرفته‌اند؛ سپس با تعریف تابع چگالی احتمالی (PDF) برای پارامترهای مؤثر از جمله نقطه تنظیم

$$\xi_{i,j} = \frac{\gamma_{i,3}}{2} + (-1)^{3-j} \sqrt{T + \left(\frac{\gamma_{i,3}}{2}\right)^2} \quad (3)$$

که T برابر تعداد متغیرهای تصادفی است و $\gamma_{i,3}$ ضریب ناهمواری می باشد که از طریق رابطه (۴) به دست می آید.

$$\gamma_{i,3} = \frac{\sum_{j=1}^2 \text{prb}(x_{i,j})(x_{i,j} - \mu_{x_i})^3}{(\sigma_{x_i})^3} \quad (4)$$

که $\text{prb}(x_{i,j})$ احتمال رخداد $x_{i,j}$ است. بنابراین مقدار میانگین هر متغیر خروجی از رابطه (۵) حاصل می شود که همان توابع هدف مسأله بهینه سازی می باشند.

$$Z_s \equiv \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^2 [Z_s(i,j)] \times w_{i,j} \quad (5)$$

که s تعداد متغیرهای خروجی و $Z_s(i,j)$ تابع خروجی مسأله است که از رابطه (۶) حاصل می شود.

$$Z_s(i,j) = Z_s(\mu_{x_{n+1}}, \mu_{x_{n+2}}, \dots, x_{i,j}, \dots, \mu_{x_m}) \quad (6)$$

حال به منظور یافتن بهینه ترین مقادیر پارامترهای غیراحتمالی ($\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$) در بازه تعیین شده، به کمینه سازی توابع هدف پرداخته می شود که به صورت زیر بیان می شود:

$$\min F(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_s(X)] \quad (7)$$

محدود به:

$$x_{i_min} < x_i < x_{i_max}, \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

که $F(X)$ نشان دهنده توابع هدف و برابر Z_s می باشد. توابع هدف نیز میانگین چگالی انرژی مصرفی ساختمان و درصد ناراضیاتی حرارتی ساکنین (PPD)، در نظر گرفته می شود. شاخص ناراضیاتی حرارتی یک عامل مهم برای سلامتی انسان است که نشان دهنده میزان ناراضیاتی بدن از دمای محیط هست [۲۶]. مدل های مختلفی برای نشان دادن شاخص ناراضیاتی حرارتی محیط ارائه شده اند. یکی از مدل های متداول روش pmv-ppd می باشد. این روش مدل استاندارد است که با مطالعات آزمایشگاهی توسط فنگر توسعه پیدا کرده است [۲۷]. این مدل از دو شاخص استفاده می کند. اولین شاخص PMV است. خروجی این شاخص عددی بین ۳- تا ۳+ می باشد که در حقیقت این اعداد، درجه هایی هستند که احساس گرم و سرد شدن ساکنین را در یک چرخه ارائه می دهند و بدین صورت تعریف می شوند: ۳- سرد، ۲- خنک، ۱- کمی خنک، ۰ معمولی، ۱+ کمی گرم، ۲+ گرم، ۳+ داغ [۲۷]. علاوه بر این، درصد ناراضیاتی پیش بینی شده (PPD)، شاخص دیگری است که اخیراً توسط فنگر پیشنهاد شده است. این شاخص می تواند میزان ناراضیاتی ساکنان نسبت به دمای محیط اطراف را پیش بینی کند [۲۸]. در این جا نیز، از شاخص PPD استفاده می شود چراکه شاخص جامع و پرکاربردی است.

از آن جاکه مسئله پیش رو یک مسئله بهینه سازی چندهدفه است، باید از یک الگوریتم بهینه سازی چندهدفه به منظور دست یابی به بهینه ترین مقادیر استفاده کرد. در این مقاله، از روش بسیار متداول الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) [۱۶] استفاده می شود.

که برای تحلیل های گذرا و شبیه سازی دستگاه های دینامیکی از قبیل سیستم های مصرف انرژی و سیستم انرژی تجدیدپذیر در ساختمان طراحی شده است [۶]؛ اما نرم افزار انرژی پلاس به عنوان یک موتور شبیه سازی انرژی نسبتاً ساده و با دقت است که توسط دپارتمان انرژی ایالات متحده [۱۵] طراحی شده است. این نرم افزار که از تلفیق و تصحیح دو نرم افزار DOE-2 و BLAST طراحی شده، قادر است به محاسبه دقیق انرژی های مورد نیاز جهت گرمایش و سرمایش بپردازد. همچنین این نرم افزار دارای رابط های گرافیکی و پارامتری بسیاری هست که سبب شده است قابلیت اتصال به نرم افزارهای قدرتمندی چون متلب را پیدا کند [۶]. به همین دلیل در این مطالعه نیز از این نرم افزار جهت محاسبه مصرف انرژی استفاده می شود.

۳- روش پیشنهادی

در پیشینه تحقیق مشاهده شد که تفاوت روش های محققان در تحلیل بازدهی انرژی، در روش های بهینه سازی به کار رفته است. همچنین در بخشی از مطالعات پیشین به غیرقطعی بودن پارامترهای ساختمان اشاره شده و روش هایی برای تخمین انرژی در ساختمان بر مبنای این پارامترهای غیرقطعی ارائه شده بود [۲۲، ۲۱، ۱۹، ۱۸]. در این مطالعه نیز به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت در ساختمان و بهبود روش بهینه سازی، از روش آماری تخمین دو نقطه ای استفاده شده است.

در این مطالعه تمام پارامترهای مؤثر ورودی ساختمان به صورت $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ نشان داده شده است که شامل پارامترهای متغیر احتمالی می باشند. مجموعه $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ مجموعه پارامترهای متغیر و مجموعه $\{x_{n+1}, x_2, \dots, x_m\}$ مجموعه پارامترهای احتمالی هستند. پارامترهای متغیر از قبیل نقطه تنظیم سامانه سرمایش و گرمایش، ضریب عایق حرارتی سقف و دیوارها و ضرایب حرارتی شیشه، متغیرهای تصمیم گیری مسئله بهینه سازی هستند که در بازه $[x_{i_min}, x_{i_max}]$ قابل انتخاب هستند. برای پارامترهای احتمالی تابع چگالی احتمال تعریف می شود و با نمونه گیری از تابع چگالی احتمال پارامترهای مختلف، تولید سناریو جهت انجام بهینه سازی صورت می گیرد. در این مطالعه به منظور تولید سناریو از روش تخمین دو نقطه ای استفاده می شود.

روش تخمین دو نقطه ای، اصلاح شده روش تخمین نقطه ای است. در این روش ابتدا هر متغیر تصادفی با $x_i, i = n+1, \dots, m, \forall i$ نمایش داده می شود. آنگاه از هر متغیر تصادفی j تا نمونه گرفته می شود که $j=1, 2$ است. سپس فاکتور مکان $x_{i,j}$ و فاکتور وزن w_{ij} هر متغیر تصادفی با استفاده از روابط (۱) و (۲) به دست آورده می شود.

$$x_{i,j} = \mu_{x_i} + \xi_{i,j} \sigma_{x_i} \quad (1)$$

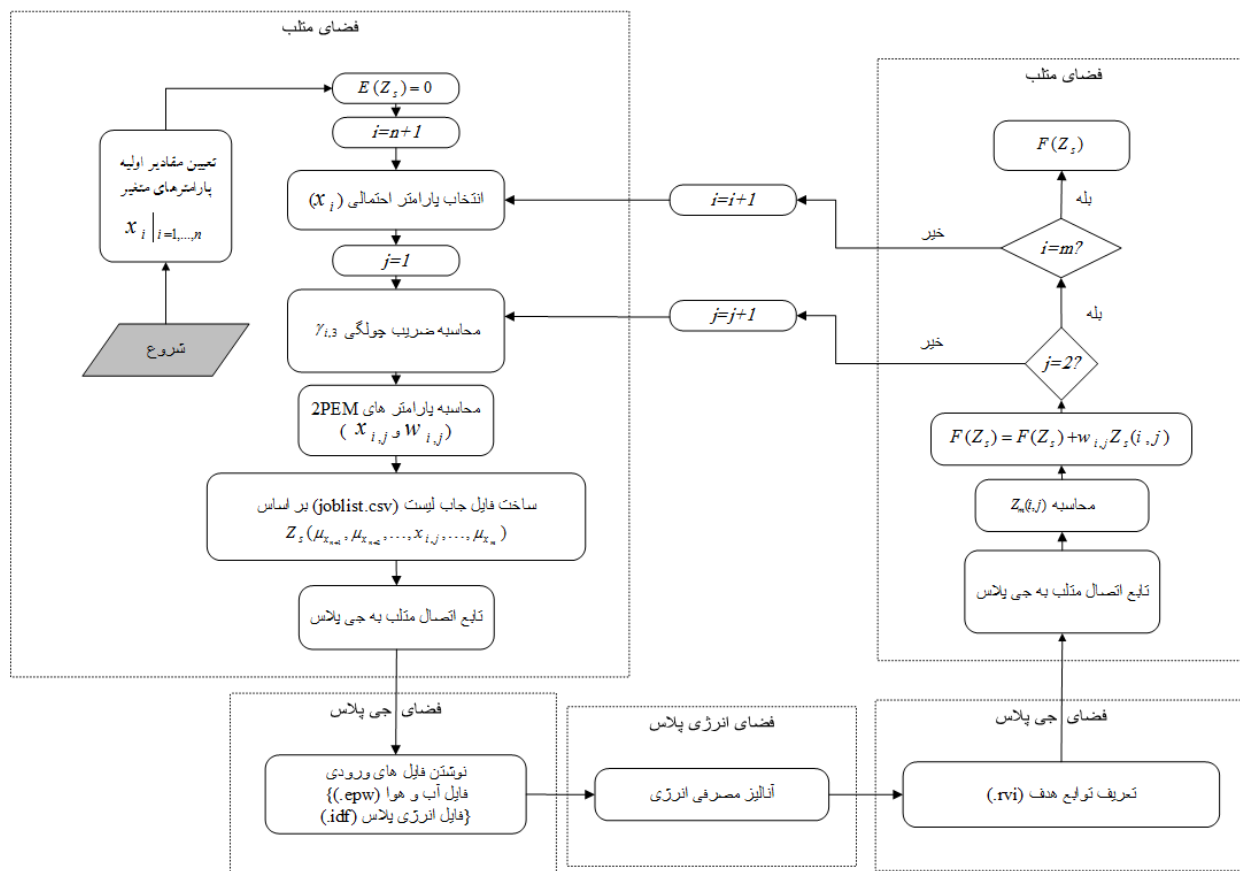
$$w_{i,j} = \frac{1}{T} (-1)^j \frac{\xi_{i,3-j}}{2\sqrt{T + \left(\frac{\gamma_{i,3}}{2}\right)^2}} \mu_{x_i} + \sigma_{x_i} \quad (2)$$

که μ_{x_i} و σ_{x_i} به ترتیب مقدار میانگین و انحراف از معیار هر متغیر تصادفی است و $\xi_{i,j}$ مکان استاندارد نام نقطه x_i می باشد و مطابق رابطه زیر به دست می آید.

موجود را مورد بررسی قرار داد. ورودی‌های مورد نیاز این نرم‌افزار شامل فایل idf و فایل epw می‌باشند. فایل idf، فایلی حامل مشخصات کامل ساختمان و فایل epw، حاوی مشخصات کامل آب‌وهوای منطقه می‌باشند. پس از اجرای نرم‌افزار جی‌پلاس، میزان مصرف انرژی ساختمان توسط نرم‌افزار انرژی پلاس محاسبه می‌شود. سپس خروجی‌های استاندارد انرژی پلاس که تابع هدف هستند به کمک فایل rvi استخراج می‌شوند؛ که این فایل هم در فضای جی‌پلاس تعریف می‌شود. حال چون هر متغیر تصادفی با دو نقطه مدل شده‌است، پس به‌طور کلی دو برابر تعداد متغیرهای تصادفی سناریو وجود دارد. در هر سناریو یک نقطه احتمالی از یک پارامتر و میانگین دیگر پارامترها به‌عنوان ورودی آنالیز مصرفی انرژی در انرژی پلاس در نظر گرفته می‌شود. در انتها از مجموع مقدارهای هر خروجی در هر سناریو و حاصل ضربشان در فاکتور پهنای، مقدار میانگین نتایج محاسبه می‌شود. این مقادیر میانگین به‌عنوان توابع هدف مسأله بهینه‌سازی تعریف می‌شوند که شامل PPD و چگالی مصرفی انرژی ساختمان هستند. سپس این روند با تولید جمعیت جدید و اجرای مراحل الگوریتم بهینه‌سازی ادامه پیدا می‌کند تا این‌که به معیار توقف الگوریتم برسد.

NSGA-II یکی از معروف‌ترین روش‌های الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی است که مکانیسم ساده و کارآمدی دارد. تنها خاصیت افزوده‌شده به این روش نسبت به روش الگوریتم ژنتیک، مکانیسم مرتب‌سازی پاسخ‌ها هست. اساس این الگوریتم همانند ژنتیک بدین‌صورت هست که پس از انتخاب جمعیت اولیه و استفاده از سناریوی تلفیق، مرتب‌سازی و حذف به تولید جمعیت جدید پرداخته می‌شود [۲۹].

روند محاسبه یک جمعیت از الگوریتم بهینه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی در شکل ۱ نمایش داده شده‌است. مطابق این الگوریتم، ابتدا نمونه‌هایی از محدوده مقادیر پارامترهای متغیر گرفته می‌شود. آن‌گاه، بعد از انتخاب هر متغیر تصادفی، براساس روش تخمین دونقطه‌ای تابع PDF آن‌ها با دو نقطه مدل می‌شود. سپس فاکتورهای مورد نیاز روش تخمین دونقطه‌ای از جمله فاکتور پهنای، فاکتور مکان و ضریب چولگی به‌دست می‌آید. سپس با انتخاب اولین سناریو، یک لیست^{۱۷} را تولید کرده که شامل تمام مقادیر نمونه‌های گرفته‌شده می‌باشد. آن‌گاه فایل‌های ورودی مورد نیاز نرم‌افزار جی‌پلاس را تولید کرده و با استفاده از تابع متصل‌ساز^{۱۸}، متلب به جی‌پلاس متصل می‌شود. درواقع نرم‌افزار جی‌پلاس یک نرم‌افزار رابط بین متلب و انرژی پلاس می‌باشد که می‌توان به کمک آن انرژی پلاس را اجرا کرد و میزان مصرف انرژی ساختمان



شکل ۱: الگوریتم روش پیشنهادی

۴- نمونه مورد مطالعه

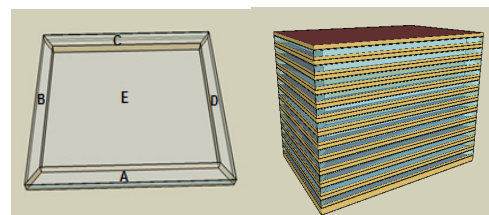
در این مطالعه به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، این روش برای ساختمان یک شرکت ۱۲ طبقه اعمال می‌شود که پارامترهای این ساختمان از مرجع [۳۰] استخراج شده‌اند.

۴-۱- مدل ساختمان

براساس [۳۰]، ساختمان این شرکت بزرگ در سان فرانسیسکو طراحی شده است. این ساختمان دارای ۱۲ طبقه می‌باشد. هم‌چنین یک طبقه زیرزمین نیز شامل می‌شود. تمام اطلاعات پایه‌ای این ساختمان شامل موقعیت جغرافیایی ساختمان و مشخصات سیستم HVAC ساختمان در جدول ۱ به‌طور خلاصه آورده شده‌است. موقعیت آب‌وهوایی ساختمان بنا بر استاندارد اشری [۳۱]، 3C می‌باشد که نشان‌دهنده آب‌وهوای گرم و دریایی است. سیستم HVAC این ساختمان از نوع سیستم حجم متغیر^{۱۹} (VAV) چندبخشی (MZ) با کویل باز گرمایش می‌باشد. این سیستم نوعی سیستم تهویه مطبوع بوده که وجه تمایز آن با دیگر سیستم‌ها وجود جعبه VAV درون کانال تهویه می‌باشد. این جعبه به‌منظور تنظیم حجم هوای داخل محیط ساختمان طراحی شده‌است. هم‌چنین وجود کویل باز گرمایش در ابتدا باعث گرم‌شدن هوا می‌شود اما اگر هوای داخل بیش‌از حد گرم شد حجم زیادی هوا وارد می‌شود تا کیفیت فضا مطبوع شود. نمای کلی ساختمان به‌علاوه نمای یک طبقه از ساختمان در شکل ۲ آمده‌است که این نما با استفاده از نرم‌افزار SketchUp رسم شده‌است.

جدول ۱: مشخصات کلی ساختمان نمونه اول

نقشه	موقعیت جغرافیایی موقعیت آب‌وهوایی متر از ساختمان (متر)	سان فرانسیسکو 3C ۳۵۶۳
سیستم HVAC	نوع سیستم HVAC سیستم گرمایشی سیستم سرمایشی کنترل کننده فن	MZ-VAV دیگ بخار گازی دو چیلر خنک‌کننده آبی متغیر



شکل ۲: نمایی کلی از ساختمان نمونه

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، هر طبقه از ساختمان به چهار ناحیه کناری (شامل ناحیه A تا D) و یک ناحیه مرکزی (ناحیه E) تقسیم‌بندی می‌شود؛ بنابراین ساختمان به ۱۶ ناحیه حرارتی تقسیم‌بندی می‌شود. یک ناحیه زیرزمین، ۵ ناحیه طبقه اول، ۵ ناحیه طبقه آخر و ۵ ناحیه نیز مربوط به طبقات دوم تا یازدهم می‌باشد.

پارامترهای مؤثر ساختمان براساس اطلاعات ذکر شده در کارهای پیشین [۲۲، ۲۱، ۱۹، ۳۴-۳۲] در جدول ۲ آمده‌است. این داده‌ها مؤثرترین داده‌های ساختمان هستند که میزان مصرف انرژی ساختمان به مقدار آن‌ها وابستگی بیشتری دارد. هم‌چنین در این جدول تمام مقادیر پیش‌فرض این پارامترها آورده شده‌است. مقادیر پیش‌فرض، مقادیری ثابتی هستند که در اکثر مقالات و مطالعات ثابت فرض شده‌است [۲۲، ۲۱، ۱۹، ۳۴-۳۲]. در جدول ۳ پارامترهای متغیر ساختمان و در جدول ۴ پارامترهای احتمالی تعریف شده‌اند. برای پارامترهای احتمالی تابع چگالی احتمال با روش برازش منحنی^{۲۰} و برای پارامترهای متغیر نیز محدوده تغییراتی با توجه به پیشینه تحقیق تعریف شده‌است. بقیه پارامترهای ساختمان ثابت و مشخص در نظر گرفته شده‌اند [۳۰].

جدول ۲: مقادیر پیش‌فرض پارامترهای ساختمان

پارامتر [واحد]	مقدار پایه
ضریب هدایت حرارتی دیوار [W/(m-k)]	۰/۰۴۹
ضریب هدایت حرارتی سقف [W/(m-k)]	۰/۰۴۹
ضریب حرارتی ویژه شیشه [W/(m ² -k)]	۳/۲۴
ضریب بهره گرمای خورشید شیشه [N/A]	۰/۲۵۰
چگالی انسان [مرد/m ³]	۱۸/۵۸
چگالی روشنایی [W/m ²]	۱۰/۷۶
چگالی وسایل [W/m ²]	۱۰/۷۶
نقطه تنظیم سرمایشی [°C]	۲۴
نقطه تنظیم گرمایشی [°C]	۲۱
دمای هوای گرم [°C]	۴۰
دمای هوای سرد [°C]	۱۴
میزان جریان هوا [مرد/m ³]	۰/۰۱
نرخ نفوذ هوا [m ³ /(s-m ²)]	۰/۰۰۰۱

جدول ۳: مشخصات پارامترهای متغیر ساختمان

پارامتر [واحد]	مشخصات	مراجع
نقطه تنظیم گرمایشی [°C]	حداقل: ۱۷ حداکثر: ۲۲	[۱۷]
نقطه تنظیم سرمایشی [°C]	حداقل: ۲۲ حداکثر: ۲۷	[۱۷]
ضریب بهره گرمای خورشید شیشه [N/A]	حداقل: ۰/۱۰ حداکثر: ۰/۴۰	[۱۷]
ضریب حرارتی ویژه شیشه [W/(m ² -k)]	حداقل: ۲/۵۴ حداکثر: ۳/۹۵	[۱۷]
ضریب هدایت حرارتی سقف [W/(m-k)]	حداقل: ۰/۰۴۱ حداکثر: ۰/۰۵۷	[۱۹]
ضریب هدایت حرارتی دیوار [W/(m-k)]	حداقل: ۰/۰۴۱ حداکثر: ۰/۰۵۷	[۱۹]

چندهدفه نشان‌دهنده مقدار میانگین انرژی مصرفی ساختمان و درصد میزان نارضایتی ساکنین هستند. در این مقاله به منظور نشان دادن مقدار اختلاف روش احتمالی پیشنهادی نسبت به روش غیراحتمالی سعی شده است تمام مقادیر متناظر با یکدیگر مورد مقایسه قرار گیرند. به طوری که در حالت تک‌هدفه علاوه بر مقدار بهینه میزان مصرف انرژی ساختمان از نمودارهای پارتو، مقادیر بهینه پارامترهای متغیر نیز با یکدیگر مقایسه می‌شوند. همچنین در حالت چندهدفه علاوه بر مقایسه نقطه ابتدایی و انتهایی نمودارهای پارتو، مقادیر بهینه پارامترهای متغیر متناظر با هر کدام از نقاط نمودارهای پارتو نیز با یکدیگر مقایسه می‌شوند. به منظور مقایسه این مقادیر، اختلاف مقدار هر پارامتر متغیر متناظر (یعنی مقدار پارامتر متغیر از نقطه ۱ نمودار پارتو در روش غیراحتمالی با مقدار پارامتر متغیر از نقطه ۱ نمودار پارتو در روش احتمالی) به دست آورده شده است. از آنجایی که به ازای تعداد نقاط نمودار پارتو، مقادیر متفاوت از مقایسه هر پارامتر به دست می‌آید. بنابراین مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین این اختلافات گزارش می‌شود.

لازم به ذکر است که شرط همگرایی در این روش‌ها میانگین تغییرات مقادیر خروجی الگوریتم بهینه‌سازی می‌باشد که در حالت تک‌هدفه مقدار خروجی همان بهینه‌ترین مقدار انرژی است و در حالت چندهدفه منظور از تغییرات مقادیر خروجی، اختلاف فواصل نقاط نمودار پارتو می‌باشد. حال اگر در ۳۰ تکرار میانگین این تغییرات کمتر از ۰/۰۰۱ باشد، الگوریتم متوقف خواهد شد. همچنین دیگر پارامترهای مساله بهینه‌سازی بدین صورت تعریف شده‌اند؛ تعداد جمعیت اولیه الگوریتم ۵۰ و نوع آن‌ها اعشاری در نظر گرفته شده است. مقیاس برازندگی^{۲۱} براساس رتبه یا تابع Rank، انتخاب والد نیز با استفاده از تابع چگالی احتمال یک‌نواخت، تولید مجدد^{۲۲} نیز ۵ درصد از تعداد جمعیت اولیه، کسر ادغام^{۲۳} برابر ۰/۸ و از تابع وابستگی^{۲۴} محدود به عنوان تابع جهش^{۲۵} استفاده شده است.

جدول ۴: مشخصات پارامترهای احتمالی ساختمان

مرجع	مشخصات		نوع PDF	پارامتر [واحد]
	انحراف استاندارد	میانگین		
[۳۲]	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۱	نرمال	نرخ نفوذ هوا [m ³ /(s·m ²)]
[۲۰]	۳/۷۲	۱۰/۷۶	نرمال	چگالی وسایل [W/m ²]
[۳۰]	۳/۵۰۷۹	۱۸/۵۸	نرمال	چگالی انسان [مرد/m ²]
[۱۹]	۲/۴	۱۰/۷۶	نرمال	چگالی روشنایی [W/m ²]

۴-۲- تعرفه انرژی

همان‌طور که در جدول ۵ آمده است تعرفه برق در این مطالعه چند پله ای است که شامل هزینه سرویس، هزینه تقاضای انرژی و هزینه مصرف انرژی می‌باشد. همچنین در اینجا تعرفه به‌طور کلی نوشته شده است؛ به طوری که در ابتدا میزان برق مصرفی ساختمان محاسبه می‌شود. سپس بنا بر میزان تقاضای مورد نیاز ساختمان یکی از تعرفه‌ها انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که تقاضای بیش از ۵۰۰ کیلووات برای ۱۲ ماه از سال و تقاضای حداکثر ۵۰۰ کیلووات را برای یک ماه از سال در نظر گرفته شده است. تعرفه‌های گازی نیز در جدول ۶ نمایش داده شده‌اند که این تعرفه نیز به صورت ماهانه دارای مقادیر متفاوتی می‌باشد. همچنین ذکر این نکته ضروری است که مالیات همه این تعرفه‌ها ۰/۰۸ دلار در نظر گرفته شده است.

۵- نتایج

خروجی‌های مساله بهینه‌سازی شامل مجموعه نقاط نمودار پارتو و مقادیر بهینه پارامترهای متغیر هستند. نمودارهای پارتو در حالت تک‌هدفه نشان‌دهنده مقدار میانگین انرژی مصرفی ساختمان و در حالت

جدول ۵: تعرفه برق

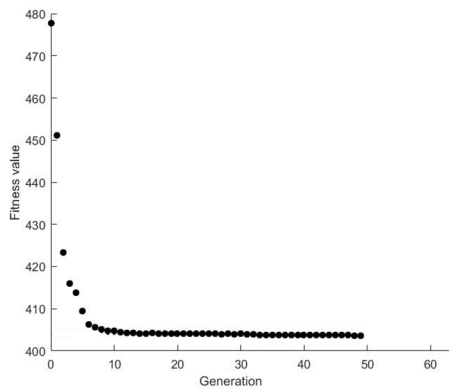
محدوده	قیمت تقاضای زمستان (\$/KW)		قیمت تقاضای تابستان (\$/KW)		قیمت مصرف انرژی تابستان (\$/KWh)	قیمت مصرف انرژی زمستان (\$/KWh)	قیمت سرویس ماهانه
	کم باری	میان باری	کم باری	میان باری			
>۵۰۰ KW	۳/۱۸	۳/۶۹	۳/۱۸	۳/۷۵	۰/۰۸۲	۰/۱۰۲	۱۷۴/۸۸
<۵۰۰ KW	-	-	۱۳/۵۱	۶/۵۶	۰/۱۵۷	-	۶۷/۶۴
<۵۰۰ KW	-	-	-	-	۰/۱۴۲	۰/۱۰۳	۷/۳۱
<۴۲۰۰ KWh	-	-	-	-	۰/۱۷۹	۰/۱۱۸	-

جدول ۶: تعرفه گاز

ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	هزینه (\$/MCF)
۹/۳۷	۸/۸۸	۸/۲۰	۷/۲۹	۷/۸۲	۸/۲۶	۸/۲۳	۸/۲۱	۷/۹۰	۸/۰۹	۷/۶۴	۸/۴۳	

۱-۵- بهینه‌سازی تک‌هدفه غیراحتمالی

در اختلاف مقادیر بهینه پارامترهای متغیر به دست آمده توسط هر دو روش در جدول ۷، مشاهده می‌شود که بیشترین اختلاف مربوط به پارامتر ضریب حرارتی ویژه شیشه هست که برابر با ۵/۳ درصد است. کمترین اختلاف نیز مربوط به نقطه تنظیم سرمایش ساختمان هست که برابر با ۰/۱۵ درصد است.

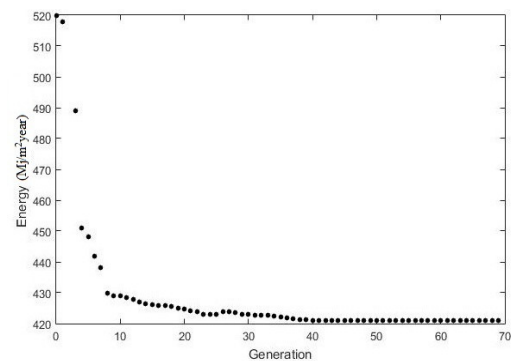


شکل ۴: بهینه‌سازی تک‌هدفه احتمالی

۳-۵- بهینه‌سازی چندهدفه غیراحتمالی

تنها هدف بهینه‌سازی انرژی ساختمان، کم کردن مصرف انرژی ساختمان به هر قیمتی نیست بلکه آسایش ساکنین نقش اساسی دارد. به همین دلیل علاوه بر انرژی، شاخص راحتی حرارتی که به صورت درصد ناراضایتی حرارتی ساکنین تعریف می‌شود، به عنوان تابع هدف در مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. در این بخش، پارامترهای احتمالی به صورت توابع احتمالی مدل نمی‌شوند بلکه از مقادیر متوسط آن پارامترها استفاده می‌شود. شکل ۵-الف منحنی پارتو حاصل از حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه غیراحتمالی را نشان می‌دهد که این منحنی ۲۵ نقطه بهینه با توابع هدف انرژی و ناراضایتی حرارتی را نشان می‌دهد. در واقع این نقاط نشان دهنده ۲۵ تا از بهینه‌ترین جمعیت جدید از الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب می‌باشد. همان‌طور که در این شکل واضح است کمترین مقدار انرژی با بهینه‌ترین درصد ناراضایتی حرارتی ساکنین، برابر $423/45 \text{ Mj/m}^2\text{year}$ هست که در این نقطه درصد ناراضایتی حرارتی نیز برابر ۱۳/۱۰۳ است. هم‌چنین کمترین درصد ناراضایتی حرارتی با بهینه‌ترین مقدار مصرف انرژی در این نمودار

در این ارزیابی، پارامترهای احتمالی ساختمان از قبیل نرخ نفوذ هوا، چگالی وسایل و چگالی ساکنین را به صورت عددی ثابت برابر با مقدار متوسط آن پارامتر در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین انرژی مصرفی به عنوان تابع هدف قرار می‌گیرد آن‌گاه با استفاده از روش بهینه‌سازی تک‌هدفه بر مبنای الگوریتم ژنتیک به تعیین پارامترهای متغیر و کمینه‌سازی مصرف انرژی پرداخته می‌شود. شکل ۳ نمایان‌گر روند کمینه‌سازی انرژی مصرفی ساختمان با استفاده از روش مذکور می‌باشد که بهینه‌ترین مقدار چگالی انرژی حاصل از این روش برابر با $421 \text{ Mj/m}^2\text{year}$ است. هم‌چنین در جدول ۷ بهینه‌ترین مقدار هر پارامتر متغیر ساختمان نشان داده شده است.



شکل ۳: بهینه‌سازی تک‌هدفه غیراحتمالی

۲-۵- بهینه‌سازی تک‌هدفه احتمالی

پارامترهای احتمالی ساختمان که در جدول ۴ با توابع احتمالی تعریف شده‌اند در نظر گرفته می‌شود. با فرآیند سناریوسازی که پیش‌تر توضیح داده شد، مصرف انرژی به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی تک‌هدفه ژنتیک کمینه می‌شود. شکل ۴ و جدول ۷ به ترتیب چگالی مصرف انرژی در ساختمان و مقادیر بهینه پارامترهای متغیر حاصل از حل مسئله بهینه‌سازی را نمایش می‌دهند. همان‌طور که از شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود بهینه‌ترین مقدار انرژی در روش احتمالی برابر $403/66 \text{ Mj/m}^2\text{year}$ و در روش غیر احتمالی برابر $421 \text{ Mj/m}^2\text{year}$ می‌باشد که این بیان‌گر اختلاف ۴/۱۲ درصدی روش پیشنهادی با روش مرسوم غیر احتمالی هست که عددی قابل ملاحظه می‌باشد. هم‌چنین طبق مقایسه انجام‌شده

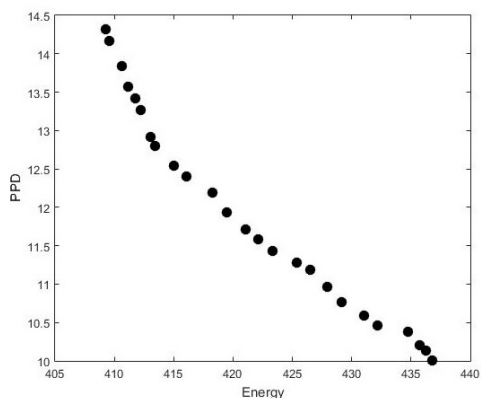
جدول ۷: مقایسه مقادیر بهینه پارامترهای متغیر حاصل از بهینه‌سازی تک‌هدفه احتمالی و غیراحتمالی

پارامتر	نقطه تنظیم گرمایشی [°C]	نقطه تنظیم سرمایشی [°C]	ضریب بهره گرمای خورشید شیشه [N/A]	ضریب حرارتی ویژه شیشه $[W/(m^2-k)]$	ضریب هدایت حرارتی دیوار $[W/(m-k)]$	ضریب هدایت گرمایشی [°C]
روش احتمالی	۱۸	۲۷	۰/۱۰۲	۲/۵۴۳	۰/۰۴۱	۰/۰۴۱
روش غیر احتمالی	۱۸/۱۶۸	۲۶/۹۶۸	۰/۱۰۱	۲/۶۸۴	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳
درصد اختلاف	-۰/۹۳	-۰/۱۵	۰/۹۹	-۵/۳	-۴/۷	-۴/۷

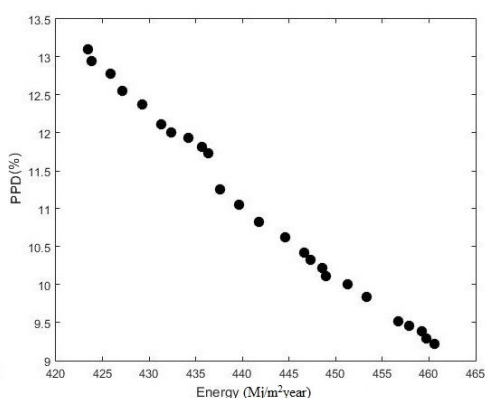
برابر ۹/۲۲ است که چگالی مصرف انرژی در این نقطه برابر $Mj/m^2 \cdot year$ پارامترهای متغیر ساختمان برای هر ۲۵ نقطه از نمودار پارتو حاصل از ۴۶۰/۶۳ شده است. علاوه بر این، در جدول ۸ تمام مقادیر بهینه بهینه‌سازی غیراحتمالی آورده شده است.

جدول ۸: مقادیر بهینه پارامترهای متغیر حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه غیراحتمالی

ردیف	نقطه تنظیم گرمایشی [°C]	نقطه تنظیم سرمایشی [°C]	ضریب بهره گرمای خورشید شیشه [N/A]	ضریب حرارتی ویژه شیشه [W/(m ² -k)]	ضریب هدایت حرارتی سقف [W/(m-k)]	ضریب هدایت حرارتی دیوار [W/(m-k)]
۱	۱۸/۵۴۸	۲۶/۹۷۷	۰/۱۴۶	۲/۵۹۲	۰/۰۴۲	۰/۰۴۵
۲	۱۸/۵۴۸	۲۶/۹۷۷	۰/۱۴۶	۲/۵۷۷	۰/۰۴۲	۰/۰۵۱
۳	۱۸/۹۳۵	۲۶/۸۶۱	۰/۱۲۴	۲/۵۹۳	۰/۰۴۲	۰/۰۴۴
۴	۱۹/۴۳۹	۲۶/۹۳۸	۰/۱۱۸	۲/۵۹۲	۰/۰۴۲	۰/۰۴۴
۵	۱۹/۶۰۳	۲۶/۹۳۱	۰/۱۰۷	۲/۵۹۰	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳
۶	۱۹/۶۵۹	۲۶/۹۸۴	۰/۱۷۴	۲/۵۸۳	۰/۰۴۳	۰/۰۴۹
۷	۱۹/۵۹۷	۲۶/۹۴۱	۰/۱۹۶	۲/۵۹۳	۰/۰۴۵	۰/۰۴۷
۸	۱۹/۵۹۴	۲۶/۹۷۶	۰/۲۱۸	۲/۵۹۵	۰/۰۴۳	۰/۰۵۰
۹	۱۹/۶۹۷	۲۶/۸۶۰	۰/۲۰۸	۲/۶۵۱	۰/۰۴۴	۰/۰۴۷
۱۰	۱۹/۸۹۸	۲۶/۹۷۱	۰/۱۹۶	۲/۵۹۲	۰/۰۴۲	۰/۰۵۰
۱۱	۱۸/۵۷۹	۲۶/۸۳۰	۰/۱۸۲	۲/۶۰۵	۰/۰۴۵	۰/۰۴۵
۱۲	۱۹/۹۲۹	۲۶/۹۷۲	۰/۲۳۶	۲/۶۰۲	۰/۰۴۴	۰/۰۴۹
۱۳	۱۹/۹۳۱	۲۶/۷۴۸	۰/۲۳۰	۲/۶۹۲	۰/۰۴۶	۰/۰۴۷
۱۴	۲۰/۲۶۹	۲۶/۹۷۵	۰/۲۳۹	۲/۶۱۵	۰/۰۴۳	۰/۰۵۰
۱۵	۲۰/۵۱۰	۲۶/۹۶۷	۰/۱۶۹	۲/۶۱۷	۰/۰۴۷	۰/۰۵۴
۱۶	۲۰/۴۲۶	۲۶/۹۸۷	۰/۲۴۳	۲/۵۹۲	۰/۰۴۳	۰/۰۴۹
۱۷	۲۰/۳۸۰	۲۶/۹۳۵	۰/۲۶۱	۲/۶۳۵	۰/۰۴۵	۰/۰۴۷
۱۸	۲۰/۷۸۳	۲۶/۹۹۵	۰/۱۵۳	۲/۵۸۲	۰/۰۴۲	۰/۰۴۸
۱۹	۲۰/۶۳۱	۲۶/۹۸۷	۰/۲۴۱	۲/۵۸۳	۰/۰۴۲	۰/۰۵۱
۲۰	۲۰/۶۵۸	۲۶/۹۸۴	۰/۲۴۳	۲/۶۱۶	۰/۰۴۳	۰/۰۵۰
۲۱	۲۰/۷۹۱	۲۶/۹۹۷	۰/۲۴۸	۲/۵۹۳	۰/۰۴۲	۰/۰۵۰
۲۲	۲۰/۸۵۸	۲۶/۹۳۲	۰/۱۹۵	۲/۷۹۴	۰/۰۵۰	۰/۰۴۷
۲۳	۲۰/۷۸۰	۲۶/۹۸۸	۰/۲۷۰	۲/۷۰۸	۰/۰۴۴	۰/۰۴۸
۲۴	۲۰/۹۴۴	۲۶/۹۸۳	۰/۱۵۲	۲/۸۸۰	۰/۰۴۹	۰/۰۴۷
۲۵	۲۰/۸۰۸	۲۶/۴۷۹	۰/۱۷۱	۲/۷۱۴	۰/۰۵۵	۰/۰۴۷



(الف)



(ب)

شکل ۵: منحنی پارتوی حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه (الف) غیراحتمالی (ب) احتمالی

جدول ۱۰: اختلاف مقادیر بهینه حاصل از مطالعه احتمالی و غیراحتمالی

اختلاف (%)	نقطه تنظیم گرمایشی [°C]	نقطه تنظیم سرمایشی [°C]	ضریب بهره گرمای خورشید شیشه [N/A]	ضریب حرارتی ویژه شیشه [W/(m ² -k)]	ضریب هدایت حرارتی سقف [W/(m-k)]	ضریب هدایت حرارتی دیوار [W/(m-k)]
کمترین	-۰/۰۴۶	-۰/۰۱۷	-۱/۹۱۳	-۰/۰۹۴	۰/۰۳۹	-۲/۱۸۶
بیشترین	۳/۹۷۷	-۲/۶۱۷	۸۷/۶۸۵	۱۷/۹۹۲	۱۴/۶۳۷	-۱۸/۲۵۶
میانگین	۱/۹۸	۰/۹۱	۲۷/۲۰	۵/۷۹	۵/۹۵	۶/۶۶

۴-۵- بهینه‌سازی چندهدفه احتمالی

در این بخش، علاوه بر اینکه انرژی و شاخص راحتی حرارتی به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته می‌شود، پارامترهای احتمالی نیز با توجه به توابع چگالی احتمالشان مدل‌سازی می‌شوند. در شکل ۵-ب، منحنی پارتوی مقادیر انرژی و شاخص راحتی حرارتی نمایش داده شده است که شامل ۲۵ نقطه بهینه است. این نقاط میزان مصرف انرژی و ناراضیاتی حرارتی ساختمان را به‌ازای مقادیر بهینه جدول ۹ نشان می‌دهند که در این جدول تمام مقادیر بهینه پارامترهای متغیر مربوط به هر کدام از نقاط نمایش داده شده در نمودار پارتو آورده شده است.

حال به‌منظور مقایسه نمودارهای شکل ۵ نقاط ابتدا و انتهای این نمودارها مد نظر قرار می‌گیرد. نقطه اول در نمودارهای نمایش داده شده در شکل ۵ نشان‌دهنده کمترین میزان مصرف انرژی با مقدار $Mj/m^2/year$

۴۰۹/۲۵ در روش احتمالی و مقدار $Mj/m^2/year$ ۴۲۳/۴۵ در روش غیراحتمالی و بهینه‌ترین درصد ناراضیاتی با مقدار $Mj/m^2/year$ ۱۴/۳۱۶ در روش احتمالی و مقدار $Mj/m^2/year$ ۱۳/۱۰۳ در روش غیراحتمالی است. آخرین نقطه در نمودارهای پارتو نشان‌گر بهینه‌ترین میزان مصرف انرژی با مقدار $Mj/m^2/year$ ۴۳۶/۸۱۴ در مطالعه احتمالی و مقدار $Mj/m^2/year$ ۴۶۰/۶۳۳ در مطالعه غیراحتمالی به‌ازای کمترین درصد ناراضیاتی ساکنین با مقدار $Mj/m^2/year$ ۱۰/۰۰۸ در مطالعه احتمالی و مقدار $Mj/m^2/year$ ۹/۲۲ در مطالعه غیراحتمالی است. در جدول ۱۰ تمام مقادیر بهینه پارامترهای متغیر حاصل از دو روش با یکدیگر مقایسه شده‌اند. سپس کمترین، بیشترین و میانگین درصد اختلاف هر پارامتر را به‌دست آورده که طبق این جدول بیشترین میانگین درصد اختلاف متعلق به ضریب بهره گرمای خورشید شیشه با مقدار $Mj/m^2/year$ ۲۷/۲۰ است و کمترین میانگین اختلاف برابر با ۰/۹۱ است که مربوط به ضریب حرارتی ویژه شیشه می‌باشد.

جدول ۹: مقادیر بهینه پارامترهای متغیر حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه احتمالی

ردیف	نقطه تنظیم گرمایشی [°C]	نقطه تنظیم سرمایشی [°C]	ضریب بهره گرمای خورشید شیشه [N/A]	ضریب حرارتی ویژه شیشه [W/(m ² -k)]	ضریب هدایت حرارتی سقف [W/(m-k)]	ضریب هدایت حرارتی دیوار [W/(m-k)]
۱	۱۸/۰۷	۲۶/۹۰	۰/۱۰	۲/۵۹	۰/۰۴۲	۰/۰۴۲
۲	۱۸/۰۴۰	۲۶/۸۹۱	۰/۱۱۹	۲/۶۱۳	۰/۰۴۲	۰/۰۴۲
۳	۱۸/۰۵۳	۲۶/۸۵۷	۰/۱۱۸	۲/۷۱۱	۰/۰۴۷	۰/۰۴۳
۴	۱۸/۱۴۲	۲۶/۸۴۲	۰/۱۴۳	۲/۸۷۵	۰/۰۴۲	۰/۰۴۳
۵	۱۸/۲۷۱	۲۶/۷۸۳	۰/۱۲۲	۳/۰۵۳	۰/۰۴۷	۰/۰۴۳
۶	۱۸/۴۶۴	۲۶/۸۳۰	۰/۱۶۳	۲/۷۰۲	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳
۷	۱۸/۶۱۰	۲۶/۸۳۸	۰/۱۵۲	۲/۷۲۸	۰/۰۴۶	۰/۰۴۵
۸	۱۸/۹۷۷	۲۶/۷۷۰	۰/۲۱۲	۲/۶۰۴	۰/۰۴۲	۰/۰۴۵
۹	۱۸/۹۴۴	۲۶/۷۷۹	۰/۲۵۰	۲/۷۲۱	۰/۰۴۲	۰/۰۴۵
۱۰	۱۹/۱۸۰	۲۶/۸۳۰	۰/۲۶۳	۲/۶۸۱	۰/۰۴۴	۰/۰۴۳
۱۱	۱۹/۲۰۸	۲۶/۸۵۵	۰/۳۴۱	۲/۶۷۵	۰/۰۴۲	۰/۰۴۴
۱۲	۱۹/۴۹۵	۲۶/۸۲۸	۰/۳۲۶	۲/۶۰۵	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴
۱۳	۱۹/۴۸۰	۲۶/۷۷۳	۰/۱۷۵	۲/۸۳۶	۰/۰۵۰	۰/۰۴۹
۱۴	۱۹/۲۴۵	۲۶/۸۴۹	۰/۲۹۶	۲/۶۹۹	۰/۰۴۴	۰/۰۵۱
۱۵	۱۹/۶۰۴	۲۶/۶۶۸	۰/۲۹۹	۲/۶۳۶	۰/۰۴۷	۰/۰۴۹
۱۶	۱۹/۶۶۰	۲۶/۵۸۹	۰/۲۱۶	۲/۸۲۸	۰/۰۴۸	۰/۰۴۶
۱۷	۲۰/۰۰۹	۲۶/۶۴۳	۰/۱۲۰	۲/۸۴۹	۰/۰۴۷	۰/۰۴۹
۱۸	۲۰/۰۴۷	۲۶/۷۸۲	۰/۲۰۲	۲/۸۴۸	۰/۰۴۹	۰/۰۵۱
۱۹	۲۰/۱۶۳	۲۶/۶۲۹	۰/۲۴۷	۳/۰۴۸	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸
۲۰	۲۰/۱۹۹	۲۶/۴۵۳	۰/۲۲۰	۲/۸۰۴	۰/۰۴۹	۰/۰۴۴
۲۱	۲۰/۱۶۹	۲۶/۴۸۷	۰/۲۴۳	۲/۶۲۱	۰/۰۴۸	۰/۰۴۷
۲۲	۲۰/۲۹۸	۲۶/۲۳۳	۰/۲۴۸	۲/۷۹۰	۰/۰۵۱	۰/۰۴۹
۲۳	۲۰/۱۰۵	۲۶/۵۰۶	۰/۲۵۳	۲/۹۸۵	۰/۰۴۸	۰/۰۵۱
۲۴	۲۰/۲۸۹	۲۶/۲۷۷	۰/۲۴۸	۳/۰۲۷	۰/۰۴۸	۰/۰۴۹
۲۵	۲۰/۲۸۹	۲۶/۲۸۷	۰/۲۴۸	۳/۰۲۷	۰/۰۴۸	۰/۰۴۹

۶- تحلیل حساسیت

جدول ۱۱: مشخصات اقلیمی و جغرافیایی شهرهای مورد مطالعه

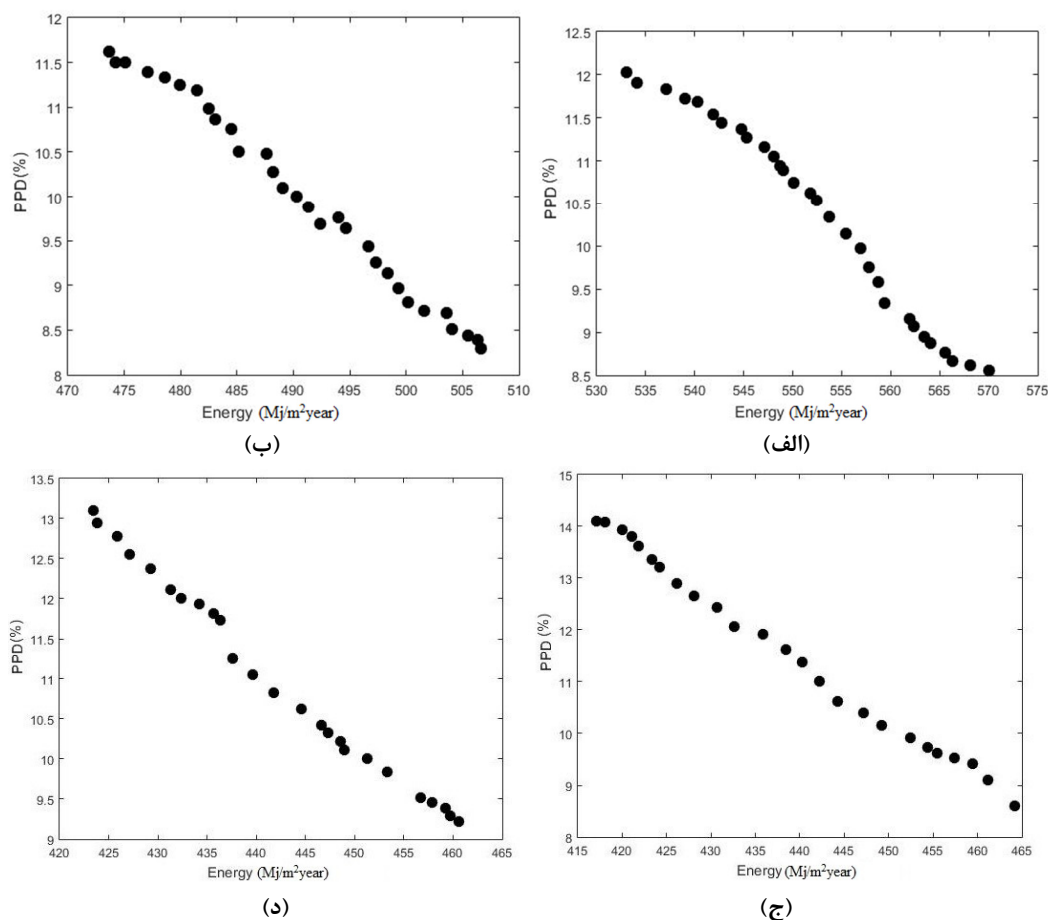
شهر	نوع اقلیم	عرض جغرافیایی (درجه شمالی)	طول جغرافیایی (درجه غربی)	ارتفاع (متر)
فینیکس	2B	۳۳/۴۲	۱۱۲/۰۲	۳۳۹
لس آنجلس	3B	۳۳/۹۲	۱۱۸/۱۴	۳۲
میامی	1A	۲۵/۷۸	۸۰/۲۷	۲
سانفرانسیسکو	3A	۳۳/۶۵	۸۴/۴۲	۳۱۵

۷- نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی، مشاهده شد که در بهینه‌سازی تک‌هدفه که در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده‌اند، اختلاف ۴/۱۲ درصدی بین مقادیر بهینه انرژی مصرفی حاصل از دو روش وجود دارد. همچنین در جدول ۷ مشاهده شد که ۵/۳ درصد حداکثر اختلاف بین مقادیر بهینه حاصل از مطالعه احتمالی و غیراحتمالی است. همچنین در جدول ۱۰ تمام مقادیر بهینه حاصل از روش پیشنهادی با روش غیراحتمالی مقایسه شدند که نتایج حاصل از این مقایسه نیز نشان از تفاوت چشم‌گیری برابر ۲۷/۲۰ درصد حداکثر

در این مقاله، نتایج بهینه‌سازی با تغییر موقعیت مکانی و آب‌وهوایی ساختمان تحلیل می‌شود. چهار منطقه جغرافیایی سانفرانسیسکو، میامی، لس‌آنجلس و فینیکس در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که در جدول ۱۱ مشاهده می‌شود این مناطق دارای شرایط آب‌وهوایی متفاوتی می‌باشند که بنا بر [۳۴]، شهر سانفرانسیسکو دارای اقلیم گرم و دریایی، شهر میامی اقلیم خیلی داغ و مرطوب، فینیکس اقلیم داغ و خشک و شهر لس‌آنجلس اقلیم گرم و خشک دارند. شکل ۶ نمودار پارتو در شهرهای مختلف را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل، هر چه شهر دمای بالاتری داشته‌باشد میزان مصرف انرژی بیشتری دارد.

اما این سؤال ممکن است مطرح شود چرا در شهر میامی که انرژی بیشتری مصرف می‌کند اما ناراضی‌تری ساکنین بیشتر است. دلیل این امر رطوبت دمایی این شهر است که با سیستم HVAC موجود موجب ناراضی‌تری بیشتر می‌شود. از سوی دیگر، شهر لس‌آنجلس کم‌ترین میزان ناراضی‌تری دارد چراکه دارای آب‌وهوای خشک است.



شکل ۶: نتایج حاصل در شهرهای (الف) لس‌آنجلس، (ب) فینیکس، (ج) میامی و (د) سانفرانسیسکو

[۱۴] مجید محمدپور، حمید پروین، «الگوریتم ژنتیک آشوبگونه مبتنی بر حافظه و خوشه‌بندی برای حل مسائل بهینه‌سازی پویا»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵.

- [15] D. Celarec and M. Dolšek, "The impact of modelling uncertainties on the seismic performance assessment of reinforced concrete frame buildings," *Engineering Structures*, vol. 52, pp. 340-354, 2013.
- [16] A. B. Liel, C. B. Haselton, G. G. Deierlein, and J. W. Baker, "Incorporating modeling uncertainties in the assessment of seismic collapse risk of buildings," *Structural Safety*, vol. 31, no. 2, 2009.
- [17] M. Manfren, N. Aste, and R. Moshksar, "Calibration and uncertainty analysis for computer models—a meta-model based approach for integrated building energy simulation," *Applied energy*, vol. 103, pp. 627-641, 2013.
- [18] S. S. Amiri, M. Mottahedi, and S. Asadi, "Using multiple regression analysis to develop energy consumption indicators for commercial buildings in the US," *Energy and Buildings*, vol. 109, pp. 209-216, 2015.
- [19] M. J. Bordbari, A. R. Seifi, and M. Rastegar, "Probabilistic energy consumption analysis in buildings using point estimate method," *Energy*, vol. 142, pp. 716-722, 2018.
- [20] A. Ioannou and L. Itard, "Energy performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy," *Energy and Buildings*, vol. 92, pp. 216-233, 2015.
- [21] S. Sun, K. Kensek, D. Noble, and M. Schiler, "A method of probabilistic risk assessment for energy performance and cost using building energy simulation," *Energy and Buildings*, vol. 110, pp. 1-12, 2016.
- [22] L. Van Gelder, H. Janssen, and S. Roels, "Probabilistic design and analysis of building performances: methodology and application example," *Energy and Buildings*, vol. 79, pp. 202-211, 2014.
- [23] Z. Yang and B. Becerik-Gerber, "A model calibration framework for simultaneous multi-level building energy simulation," *Applied Energy*, vol. 149, pp. 415-431, 2015.
- [24] A. H. Neto and F. A. S. Fiorelli, "Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption," *Energy and buildings*, vol. 40, no. 12, 2008.
- [25] M. Krarti, *Energy audit of building systems: an engineering approach*, CRC press, 2016.
- [26] M. Taleghani, M. Tenpierik, S. Kurvers, and A. Van Den Dobbelen, "A review into thermal comfort in buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26, pp. 201-215, 2013.
- [27] P. O. Fanger and J. Toftum, "Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates," *Energy and buildings*, vol. 34, no. 6, 2002.
- [28] P. Fanger, "moderate thermal environments determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort," *ISO 7730*, 1984.
- [29] K. Deb, S. Agrawal, A. Pratap, and T. Meyarivan, "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II," in *International Conference on Parallel Problem Solving From Nature*, Springer, pp. 849-858, 2000.
- [30] Department of Energy (DOE). *Commercial Reference Buildings*. december 2017, (<https://energy.gov/eere/buildings/commercial-reference-buildings>).
- [31] ASHRAE Standard, "Standard 55-2013: Thermal environmental conditions for human occupancy," American Society of Heating, Refrigerating, and air-conditioning Engineers, Atlanta, 2013.
- [32] F. R. Ceconi, M. Manfren, L. C. Tagliabue, A. L. C. Ciribini, and E. De Angelis, "Probabilistic behavioral modeling in building performance simulation: A Monte Carlo approach," *Energy and Buildings*, vol. 148, pp. 128-141, 2017.
- [33] Q. Cheng, S. Wang, C. Yan, and F. Xiao, "Probabilistic approach for uncertainty-based optimal design of chiller plants in buildings," *Applied Energy*, vol. 185, pp. 1613-1624, 2017.
- [34] L. C. Tagliabue, M. Manfren, A. L. C. Ciribini, and E. De Angelis, "Probabilistic behavioural modeling in building performance simulation—The Brescia eLUX lab," *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 119-131, 2016.

میانگین اختلاف در مقادیر بهینه مطالعات احتمالی و غیراحتمالی دارد. بنابراین می‌توان دلیل این اختلافات چشم‌گیر را بدین‌گونه بیان کرد که مطالعات احتمالی موجب واقعی‌تر شدن نتایج می‌شوند و مطالعات غیراحتمالی می‌تواند موجب انتخاب ناصحیح پارامترهای ساختمان شود. همچنین لازم به ذکر است که انتخاب بهترین نقطه از نمودار پارتوی شکل ۵-ب به سلیقه طراح و صاحب ساختمان بستگی دارد که باتوجه به میزان اهمیت انرژی و درصد نارضایتی از دمای محیط کدام نقطه از شکل ۵-ب یا کدام مقدار از مقادیر جدول ۹ را انتخاب کند. در انتها نیز به‌منظور تحلیل حساسیت روش پیشنهادی نسبت به تغییرات آب و هوا و منطقه جغرافیایی، ساختمان نمونه در چهار شهر مختلف با شرایط آب و هوایی متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مراجع

- [1] A. Allouhi, Y. El Fouih, T. Kousksou, A. Jamil, Y. Zeraoui, and Y. Mourad, "Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends," *Journal of Cleaner production*, vol. 109, pp. 118-130, 2015.
- [2] C. J. Kibert, *Sustainable construction: green building design and delivery*, John Wiley & Sons, 2016.
- [3] A. J. Marszal et al., "Zero Energy Building—A review of definitions and calculation methodologies," *Energy and buildings*, vol. 43, no. 4, 2011.
- [4] S. Pless and P. Paul Torcellini PhD, "Getting to net zero," *ASHRAE Journal*, vol. 51, no. 9, 2009.
- [5] D. B. Crawley, J. W. Hand, M. Kummert, and B. T. Griffith, "Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs," *Building and environment*, vol. 43, no. 4, 2008.
- [6] A.-T. Nguyen, S. Reiter, and P. Rigo, "A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis," *Applied Energy*, vol. 113, 2014.
- [7] N. Delgarm, B. Sajadi, S. Delgarm, and F. Kowsary, "A novel approach for the simulation-based optimization of the buildings energy consumption using NSGA-II: Case study in Iran," *Energy and Buildings*, vol. 127, 2016.
- [8] N. Delgarm, B. Sajadi, F. Kowsary, and S. Delgarm, "Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO)," *Applied Energy*, vol. 170, 2016.
- [9] L. Junghans and N. Darde, "Hybrid single objective genetic algorithm coupled with the simulated annealing optimization method for building optimization," *Energy and Buildings*, vol. 86, 2015.
- [10] S. N. Murray, B. P. Walsh, D. Kelliher, and D. O'Sullivan, "Multi-variable optimization of thermal energy efficiency retrofitting of buildings using static modelling and genetic algorithms—A case study," *Building and Environment*, vol. 75, 2014.
- [11] J. Wright and A. Alajmi, "Efficient Genetic Algorithm sets for optimizing constrained building design problem," *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 5, no. 1, 2016.
- [12] W. Yu, B. Li, H. Jia, M. Zhang, and D. Wang, "Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design," *Energy and Buildings*, vol. 88, pp. 135-143, 2015.

[۱۳] عباس محمدوسی، علیرضا حاتمی، «ارائه چارچوبی برای مدیریت انرژی خانه هوشمند: برنامه‌ریزی بهینه تجهیزات خانگی و برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۱، بهار ۱۳۹۴.

زیر نویس‌ها

² Zero energy buildings

¹ Green buildings

-
- ³ Energy efficiency Analysis
 - ⁴ EnergyPlus
 - ⁵ Two-point estimate
 - ⁶ Pareto
 - ⁷ JePlus
 - ⁸ Two point estimate method
 - ⁹ Meta-model
 - ¹⁰ Non-dominated sorting genetic algorithm
 - ¹¹ Base-load
 - ¹² Load coefficient
 - ¹³ Heating, ventilation and air condition
 - ¹⁴ Detailed energy audit
 - ¹⁵ US department of energy
 - ¹⁶ Non-dominated sorting genetic algorithm
 - ¹⁷ Joblist
 - ¹⁸ MATLAB coupling function
 - ¹⁹ Variable air volume
 - ²⁰ Curve fitting
 - ²¹ Fitness Scaling
 - ²² Reproduction
 - ²³ Crossover Fraction
 - ²⁴ Constraint dependent
 - ²⁵ Mutation Function