

## بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

محمدجواد بردباری<sup>1</sup>، محمد رستگار<sup>2\*</sup>، علیرضا سیفی<sup>3</sup>

<sup>1</sup> کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

m.j.bordbari@shirazu.ac.ir

<sup>2</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

mohammadrastegar@shirazu.ac.ir

<sup>3</sup> استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

seifi@shirazu.ac.ir

**چکیده:** اولین گام در راستای دستیابی به ساختمان‌های هوشمند، تحلیل مصرف و بهینه‌سازی انرژی است. از آنجا که بخشی از پارامترهای مؤثر بر این تحلیل‌ها غیرقطعی هستند، در این مقاله به تحلیل مصرف و بهینه‌سازی انرژی در ساختمان به صورت احتمالی پرداخته می‌شود. بدین منظور، تابع چگالی احتمال پارامترهای غیرقطعی ساختمان با استفاده از روش **Empirical Rule** 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 حرارتی ساکنان 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 نگرفتن 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 34% می‌رسد و اختلاف نمودار پارتوی روش پیشنهادی احتمالی و روش غیراحتمالی هم ممکن است بیش از 10% شود. 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 ساکنان.

کنند که کمترین میزان مصرف انرژی را دارا باشد. همچنین، از لحاظ هزینه پرداختی انرژی و آسایش ساکنان نیز در حد مطلوبی قرار داشته باشد. به بیان دیگر، بهینه‌سازی طراحی ساختمان‌ها با توجه به هزینه و آسایش ساکنان بایستی صورت گیرد. بدین منظور، روش‌های بهینه‌سازی متعددی پیشنهاد شده است [7-14]. در این روش‌ها، مقدار بهینه برای پارامترهای طراحی ساختمان پیشنهاد داده می‌شود که به‌ازای آن‌ها کمترین میزان مصرف انرژی و بیشترین راحتی را در ساختمان داشته باشیم. در نهایت می‌توان این پارامترها را در طراحی یک ساختمان جدید یا بازسازی ساختمان موجود به کار برد.

بیشتر پارامترهای ساختمان از جمله ضریب هدایت حرارتی دیوارها، ضریب نفوذ هوا، تعداد ساکنان و میزان مصرف وسایل گرمایشی-سرمایشی، ماهیتی غیرقطعی دارند؛ زیرا به تغییرات آب‌وهوا و رفتار ساکنان وابسته‌اند [15-17]. هرچند مطالعات اندکی در زمینه تعیین میزان مصرف انرژی در ساختمان با در نظر گرفتن عدم قطعیت وجود دارد [18-22]، تاکنون مطالعه‌ای در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها 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 برای بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان با در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی 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 [23]. بخشی از پارامترهای مؤثر مقدارشان قطعی است و چندان حق انتخابی درباره 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، مقدار بهینه 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<sup>5</sup>، 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 به کار برده می‌شود. برای

رشد مصرف انرژی الکتریکی و وابستگی آن به سوخت‌های فسیلی آلاینده، به‌خصوص در مصارف خانگی و تجاری، سبب شده است محققان به فکر راه چاره‌ای باشند که بتوانند میزان مصرف انرژی را در ساختمان‌ها کنترل کنند [1]. در ابتدا ساختمان‌هایی به نام ساختمان‌های سبز<sup>1</sup> پیشنهاد شد. در طراحی ساختمان‌های سبز از منابع انرژی تجدیدپذیری همچون انرژی خورشیدی استفاده شد تا میزان وابستگی به منابع انرژی وابسته به سوخت‌های فسیلی کاهش یابد [2]. به‌تازگی به منظور بهبود کارایی ساختمان سبز، ساختمان‌هایی به نام ساختمان انرژی صفر<sup>2</sup> پیشنهاد شده است که این ساختمان‌ها علاوه بر بهره بردن از منابع انرژی تجدیدپذیر، از روش‌هایی برای بهبود بازدهی انرژی نیز استفاده می‌کنند [3]. یکی از برنامه‌های مهم کشورهای جهان، انرژی صفر شدن تمام ساختمان‌هاست [4]. ساختمان‌های انرژی صفر باید انرژی مصرفی خود را به‌صورت محلی تأمین کنند و اتکایشان به شبکه انرژی به حداقل برسد. اجرای این برنامه بلندمدت بدین معنا نیست که تمام ساختمان‌ها خراب شوند و دوباره از نو ساخته شوند، بلکه بدین معناست که ساختمان‌های موجود و ساختمان‌های در حال ساخت، به‌صورتی طراحی شوند که به‌سمت انرژی صفر شدن 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<sup>3</sup> می‌نامند [1].

همان‌طور که از تعریف تحلیل بازدهی انرژی برمی‌آید، تحلیل 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 [5]. به‌دلیل 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<sup>4</sup>، DOE-2، Blast، برای شبیه‌سازی گرافیکی یا پارامتری ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [6]. پس از تخمین میزان مصرف انرژی ساختمان به‌کمک نرم‌افزارهای مذکور، به طراحی روش‌هایی پرداخته می‌شود که ساختمان را به‌گونه‌ای طراحی یا بازسازی

1. Green Buildings
2. Zero Energy Buildings
3. Energy Efficiency Analysis
4. Energyplus

احتمالی تخمین دوقطه‌ای<sup>3</sup> است که بتواند دقیق‌تر و سریع‌تر به تحلیل مصرف انرژی در ساختمان بپردازد. نویسندگان [20] با بهره‌گیری از روش احتمالی مونت‌کارلو، میزان حساسیت پارامترهای غیرقطعی ساختمان را بر میزان مصرف انرژی گرمایی و شاخص راحتی حرارتی در ساختمان مورد تحلیل قرار داده‌اند. همچنین نویسندگان [21] ابتدا با استفاده از تحلیل حساسیت، میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای نامعین را بر میزان مصرف انرژی ساختمان محاسبه کرده، سپس پارامترهایی را که تأثیر کمتری دارند همانند بقیه پارامترها قطعی در نظر گرفته‌اند؛ سپس با تعریف تابع چگالی احتمالی (PDF) برای پارامترهای مؤثر از جمله نقطه تنظیم خنک‌کننده، دمای هوای خنک‌کننده، چگالی مصرفی وسایل، چگالی روشنایی و ضریب عملکرد خنک‌کننده کویل، به تخمین مصرف انرژی ساختمان پرداخته‌اند. نویسندگان [22] نخست با استفاده از روش متامدل<sup>4</sup> به کاهش تعداد پارامترهای نامعین پرداخته‌اند، سپس با استفاده از روش مونت‌کارلو و در نظر گرفتن 13 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 ساکنان ساختمان، چگالی مصرفی وسایل عددی ثابت در نظر گرفته شده است.

در عین حال، مطالعات بسیاری هم در راستای ارائه روش‌های مختلف بهینه‌سازی انرژی در ساختمان یا بهبود آن روش‌ها با تعیین پارامترهای دخیل در مصرف انرژی پیشنهاد شده است. روش‌هایی همچون الگوریتم ژنتیک مرتب‌ساز غیرغالب<sup>5</sup> [7]، بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه ازدحام ذرات [8]، تلفیق بهینه‌سازی ژنتیک و Simulated Annealing [9]، تلفیق روش استاتیکی دمای روزانه و الگوریتم ژنتیک [10]، بهینه‌سازی ژنتیک بهبودیافته [11]، تلفیق الگوریتم ژنتیک و هوش مصنوعی [12] برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

## 2.2. ابزارهای تحلیل مصرف انرژی در ساختمان

همان گونه که پیش‌تر ذکر شد، ابزارهای بسیاری برای تحلیل مصرف انرژی در ساختمان ارائه شده‌اند [5، 6 و 24]. به‌طور کلی می‌توان ایده مورد استفاده در این ابزارها را به دو روش مستقیم و معکوس تقسیم‌بندی کرد [25]. در روش معکوس با استفاده از میزان مصرف انرژی ساختمان، مشخصه‌های ساختمان از قبیل بار پایه‌ای<sup>6</sup> ساختمان،

ارتباط بین این دو نرم‌افزار نیز از نرم‌افزار جی‌پلاس<sup>1</sup> بهره برده می‌شود. از یک ساختمان دوازده طبقه تجاری نیز به‌عنوان نمونه مورد مطالعه استفاده می‌شود که مصرف‌کننده‌های انرژی در این ساختمان شامل سیستم HVAC<sup>2</sup>، سیستم روشنایی و وسایل مصرف‌کننده برقی هستند. اجزای سیستم HVAC شامل چیلرهای برقی، بویلرهای گازی، آب‌گرم‌کن‌های گازی، پمپ آب و موتور فن می‌باشد. وسایل مصرف‌کننده برقی نیز شامل پریترها، کامپیوترها، آسانسور و وسایل جانبی دیگر هستند. همچنین برای ارزیابی روش پیشنهادی، بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه غیراحتمالی با روش احتمالی پیشنهادی مقایسه خواهد شد. در انتها به‌منظور 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.

ساختار این مطالعه بدین صورت است که در بخش دوم پیشینه پژوهش بیان می‌شود. سپس در بخش سوم، روش پیشنهادی به‌صورت کامل تشریح خواهد شد. آنگاه در بخش چهارم به‌منظور 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.

## 2. پیشینه پژوهش

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

### 1.2. تحلیل بازدهی انرژی در ساختمان

مروری بر روش‌های تحلیل بازدهی انرژی نشان می‌دهد که روش‌های متعددی با هدف کاهش مصرف انرژی در ساختمان ارائه شده است [7-12 و 18-22]. بیشتر محققان، تمرکز خود را بر مرحله اول تحلیل بازدهی انرژی، یعنی تخمین میزان مصرف انرژی قرار داده‌اند. مرجع [18] با در نظر گرفتن PDF پارامترهای غیرقطعی و با استفاده از روش مونت‌کارلو به تخمین انرژی مصرفی ساختمان با استفاده از روش رگرسیون خطی می‌پردازد. تلاش نویسندگان [19]، استفاده از روش

3. Two Point Estimate Method

4. Meta-model

5. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm

6. Base-Load

1. Jplus

2. Heating, Ventilation and Air Condition

Empirical Rule و برای بهینه‌سازی مصرف انرژی، از روش بسیار متداول الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب<sup>3</sup> (NSGA-II) استفاده شده است.

در این روش، همه پارامترهای مؤثر ورودی ساختمان به صورت  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$  نشان داده شده است که شامل پارامترهای متغیر و احتمالی هستند. 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<sup>4</sup> سامانه سرمایش و گرمایش، ضریب عایق حرارتی سقف و دیوارها و ضرایب حرارتی شیشه، متغیرهای مستقل مسئله بهینه‌سازی هستند که در بازه  $[x_{i \min}, x_{i \max}]$  تعریف می‌شوند.

پارامترهای احتمالی به صورت تابع چگالی احتمال تعریف می‌شوند و با نمونه‌گیری از تابع چگالی احتمال پارامترهای مذکور، سناریوهایی تولید می‌شود. نمونه‌ها به صورت  $x_{ij}, \forall i = n+1, \dots, m$  و  $\forall j = 1, \dots, k$  نمایش داده می‌شوند که نشان‌دهنده زامین نمونه از  $i$ امین پارامتر احتمالی است. همچنین احتمال هر نمونه گرفته شده از تابع چگالی احتمال پارامتر احتمالی، با  $\lambda_{ij}, \forall j = 1, \dots, k$  و  $\forall i = n+1, \dots, m$  نمایش داده می‌شود؛ بنابراین با توجه به  $(m-n)$  پارامتر احتمالی و  $k$  نمونه از هر پارامتر، تعداد  $N_s$  سناریو مطابق با فرمول زیر می‌شود:

$$N_s = (m - n)^k \quad (1)$$

که احتمال وقوع هر سناریو برابر با حاصل ضرب احتمال نمونه‌های گرفته شده از پارامترهای احتمالی است که در ایجاد آن سناریو نقش داشته‌اند.

همان طور که بیان شد، هدف از مطالعه، یافتن مقادیر بهینه پارامترهای غیراحتمالی در بازه تعیین شده، با هدف کمینه‌سازی تابع (توابع) هدف است. به بیان ریاضی تابع هدف به قرار زیر است:

$$\min F(X) \quad (2)$$

محدود به:

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}, \forall i = 1, 2, \dots, n$$

که  $F(X)$  نشان‌دهنده تابع هدف است. اگر  $N_s$  سناریو برای مدل‌سازی احتمالی مسئله تولید شود، رابطه بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$F(X) = \sum_{s=1}^{N_s} F_s(X) p_s \quad (3)$$

که در آن،  $s$  اندیس سناریو،  $p_s$  احتمال وقوع سناریو  $s$  و  $F_s(X)$  مقدار تابع هدف در سناریوی  $s$  است.

ضریب بار ساختمان، آب و هوا 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، جزئیات ابزارهای ساختمان و نوع سیستم HVAC تلاش می‌کنند میزان مصرف انرژی ساختمان را پیش‌بینی کنند. هر دوی این روش‌ها بر اساس روش ممیزی انرژی مفصل<sup>1</sup> 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 [25]. روش معکوس، روش نسبتاً پیچیده‌ای است که محدود به فرمول پارامترهای مشخصه ساختمان و دقت این پارامترهاست. در حالی که روش مستقیم، یک روش معمول است؛ زیرا اغلب نرم‌افزارهای تحلیل گر مصرف انرژی در ساختمان از قبیل انرژی پلاس، DOE-2، TRNSYS، Energy-10 و BLAST بر مبنای این روش پیاده‌سازی شده‌اند [5].

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 دقیقی است که برای تحلیل‌های گذرا و شبیه‌سازی دستگاه‌های دینامیکی از قبیل سیستم‌های مصرف انرژی و سیستم انرژی تجدیدپذیر در ساختمان طراحی شده است [6]؛ اما نرم‌افزار انرژی پلاس به عنوان یک موتور شبیه‌سازی انرژی نسبتاً ساده و با دقت است که توسط دپارتمان انرژی ایالات متحده<sup>2</sup> طراحی شده است. این نرم‌افزار که از تلفیق و تصحیح دو نرم‌افزار DOE-2 و BLAST طراحی شده، قادر است به محاسبه دقیق انرژی‌های مورد نیاز جهت گرمایش و سرمایش بپردازد. همچنین این نرم‌افزار دارای رابط‌های گرافیکی و پارامتری بسیاری است که سبب شده قابلیت اتصال به نرم‌افزارهای قدرتمندی چون متلب را پیدا کند [6] به همین دلیل در این مطالعه نیز از این نرم‌افزار برای محاسبه مصرف انرژی استفاده می‌شود.

### 3. روش پیشنهادی

در پیشینه تحقیق مشاهده شد که تفاوت روش‌های محققان در تحلیل بازدهی انرژی، در روش‌های بهینه‌سازی به کاررفته است. همچنین در بخشی از مطالعات پیشین، به غیرقطعی بودن پارامترهای ساختمان اشاره شده و روش‌هایی برای تخمین انرژی در ساختمان بر مبنای این پارامترهای غیرقطعی ارائه شده بود [18، 19، 21 و 22]. در این مطالعه نیز به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت در ساختمان، از روش آماری

اعدادی<sup>2</sup> را تولید کرده که شامل تمام مقادیر نمونه‌های گرفته شده است. آنگاه فایل‌های ورودی مورد نیاز نرم‌افزار جی‌پلاس را تولید کرده و با استفاده از تابع متصل‌ساز<sup>3</sup>، متلب را به جی‌پلاس متصل می‌شود. در واقع نرم‌افزار جی‌پلاس یک شبیه‌ساز پارامتری با موتور انرژی‌پلاس است که می‌توان به کمک آن، انرژی‌پلاس را اجرا کرد و میزان مصرف انرژی ساختمان موجود را مورد بررسی قرار داد. ورودی‌های موردنیاز این نرم‌افزار شامل فایل idf و فایل epw هستند. 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 انرژی‌پلاس محاسبه می‌شود. سپس خروجی‌های استاندارد انرژی‌پلاس که تابع هدف هستند به کمک فایل rvi استخراج می‌شوند؛ که این فایل هم در فضای جی‌پلاس تعریف می‌شود. دوباره به کمک تابع متصل‌ساز متلب، وارد فضای متلب شده و مقدار کمینه توابع هدف در هر سناریو بر اساس روش بهینه‌سازی ذکر شده محاسبه می‌شود. در انتها پس از محاسبه توابع هدف در تمام سناریوها، مقدار میانگین توابع هدف یک جمعیت و همچنین مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری محاسبه می‌شوند.

#### 4. نمونه مورد مطالعه

در این مطالعه، به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، این روش برای ساختمان یک شرکت دوازده طبقه اعمال می‌شود که پارامترهای ساختمان نمونه مطابق مرجع [30] آورده شده است.

##### 1.4. مدل ساختمان

بر اساس [30]، ساختمان این شرکت بزرگ در سان‌فرانسیسکو طراحی شده است. این ساختمان دوازده طبقه دارد. همچنین یک طبقه زیرزمین را نیز شامل می‌شود. تمام اطلاعات پایه‌ای این ساختمان شامل موقعیت جغرافیایی ساختمان و مشخصات سیستم HVAC ساختمان در جدول (1) به طور خلاصه آورده شده است. موقعیت آب‌وهوایی ساختمان بنا بر استاندارد اشری [31]، 3C می‌باشد که نشان‌دهنده آب‌وهوای گرم و دریایی است. سیستم HVAC این ساختمان از نوع سیستم حجم متغیر<sup>4</sup> (VAV) چندبخشی (MZ) با کوئل باز گرمایش می‌باشد. این سیستم نوعی سیستم تهویه مطبوع بوده که وجه تمایز آن با دیگر سیستم‌ها وجود جعبه VAV درون کانال تهویه است. این جعبه به منظور تنظیم حجم هوای داخل محیط ساختمان طراحی شده است. همچنین وجود

تابع هدف مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه، میانگین چگالی انرژی مصرفی ساختمان است و قید مسئله به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$5 \leq PPD \leq 15 \quad (4)$$

که  $PPD^1$  بیانگر درصد نارضایتی حرارتی ساکنان است. همچنین توابع هدف در مسئله چندهدفه، میانگین چگالی انرژی مصرفی ساختمان و  $PPD$  در نظر گرفته شده است. توابع هدف با استفاده از روش شبیه‌سازی در نرم‌افزار انرژی‌پلاس حاصل می‌شوند.

شاخص  $PPD$  یک عامل مهم برای سلامتی انسان و نشان‌دهنده میزان نارضایتی بدن از دمای محیط است [26]. مدل‌های مختلفی برای نشان دادن شاخص نارضایتی حرارتی محیط ارائه شده‌اند. یکی از مدل‌های متداول روش  $PMV-PPD$  است. این روش مدل استاندارد است که با مطالعات آزمایشگاهی توسط فنگر توسعه پیدا کرده است [27]. این مدل از دو شاخص استفاده می‌کند؛ اولین شاخص  $PMV$  است. خروجی این شاخص عددی بین 3- تا 3+ می‌باشد که در حقیقت این اعداد، درجه‌هایی هستند که احساس گرم و سرد شدن ساکنان را در یک چرخه به ما می‌دهند و بدین صورت تعریف می‌شوند: 3- سرد، 2- خنک، 1- کمی خنک، 0 معمولی، 1+ کمی گرم، 2+ گرم، 3+ داغ [27]. علاوه بر این، درصد نارضایتی پیش‌بینی شده ( $PPD$ )، شاخص دیگری است که به تازگی توسط فنگر پیشنهاد شده است. این شاخص می‌تواند میزان نارضایتی ساکنان نسبت به دمای محیط اطراف را پیش‌بینی کند [28]. در اینجا نیز از شاخص  $PPD$  استفاده می‌شود؛ زیرا شاخص جامع و پرکاربردی است. از آنجا که مسئله پیش رو یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه است، باید از یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه به منظور دستیابی به مقادیر بهینه استفاده کرد. در این مقاله، از روش بسیار متداول  $NSGA-II$  استفاده شده است.

$NSGA-II$  یکی از معروف‌ترین روش‌های الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی است که سازوکار ساده و کارآمدی دارد. تنها خاصیت افزوده شده به این روش نسبت به روش الگوریتم ژنتیک، سازوکار مرتب‌سازی پاسخ‌هاست. اساس این الگوریتم همانند ژنتیک بدین صورت است که پس از انتخاب جمعیت اولیه و استفاده از سناریوی تلفیق، مرتب‌سازی و حذف به تولید جمعیت جدید پرداخته می‌شود [29].

روند محاسبه یک جمعیت از الگوریتم بهینه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی در شکل (1) نمایش داده شده است. طبق این روند، ابتدا نمونه‌هایی از محدوده مقادیر پارامترهای متغیر و  $PDF$  پارامترهای احتمالی گرفته می‌شود. همچنین احتمال هر نمونه گرفته شده از پارامتر احتمالی نیز محاسبه می‌شود. سپس با انتخاب اولین سناریو، یک لیست

2. Joblist

3. MATLAB Coupling Function

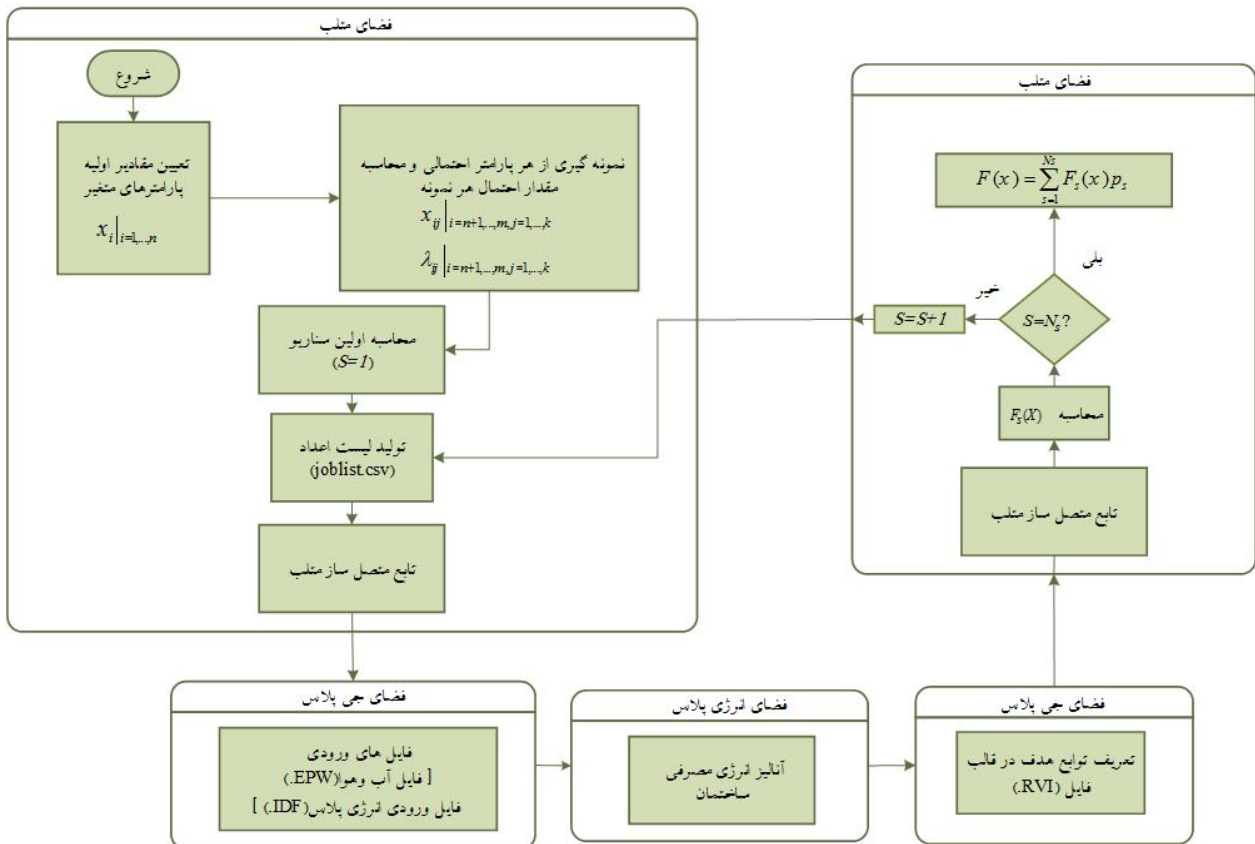
4. Variable Air Volume

1. Predicted Percentage Dissatisfied

### 31 بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

شکل (2) آمده است که این نما با استفاده از نرم‌افزار SketchUp رسم شده است.

کویل باز گرمایش در ابتدا باعث گرم شدن هوا می‌شود اما اگر هوای داخل بیش از حد گرم شد، حجم زیادی هوا وارد می‌شود تا کیفیت فضا مطبوع شود. نمای کلی ساختمان به علاوه نمای یک طبقه از ساختمان در



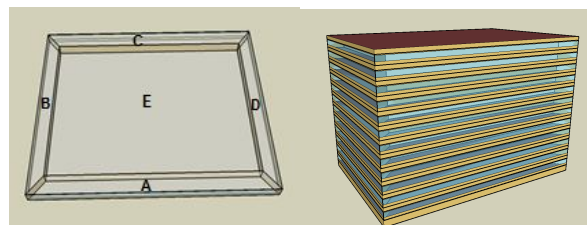
شکل (1): الگوریتم روش پیشنهادی

همان‌طور که در شکل (2) 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 را به 16 ناحیه حرارتی تقسیم‌بندی می‌کنیم. یک ناحیه زیرزمین، 5 ناحیه طبقه اول، 5 ناحیه طبقه آخر و در مجموع، 5 ناحیه نیز به طبقات دوم تا یازدهم اختصاص داده شده است.

پارامترهای مؤثر ساختمان بر اساس اطلاعات ذکر شده در کارهای پیشین [19، 21، 22 و 34-32] در جدول (2) آمده است. 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 شده است. مقادیر پیش‌فرض، مقادیری ثابتی هستند که در اکثر مقالات و مطالعات ثابت فرض شده است [19، 21، 22 و 34-32].

جدول (1): مشخصات کلی ساختمان نمونه اول

نقشه	موقعیت جغرافیایی	سان‌فرانسیسکو
3C	موقعیت آب‌وهوایی	3563
	متراژ ساختمان (متر)	
سیستم HVAC	نوع سیستم HVAC	MZ-VAV
	سیستم گرمایشی	دیگ بخار گازی
	سیستم سرمایشی	چیلر آبی
	کنترل‌کننده فن	متغیر



شکل (2): نمای کلی از ساختمان نمونه



جدول (2): مقادیر پیش فرض پارامترهای ساختمان

پارامتر [واحد]	مقدار پایه
ضریب هدایت حرارتی دیوار [W/(m-K)]	0/049
ضریب هدایت حرارتی سقف [W/(m-K)]	0/049
ضریب حرارتی ویژه شیشه [W/(m <sup>2</sup> -K)]	3/24
ضریب بهره گرمای خورشید شیشه [N/A]	0/250
چگالی تردد ساکنان [فرد/m <sup>2</sup> ]	18/58
چگالی روشنایی [W/m <sup>2</sup> ]	10/76
چگالی انرژی مصرفی وسایل [W/m <sup>2</sup> ]	10/76
نقطه تنظیم سرمایشی [°C]	24
نقطه تنظیم گرمایشی [°C]	21
دمای هوای گرم [°C]	40
دمای هوای سرد [°C]	14
میزان جریان هوا [فرد/m <sup>3</sup> ]	0/01
نرخ نفوذ هوا [m <sup>3</sup> /(s-m <sup>2</sup> )]	0/0001

در جدول (3)، پارامترهای متغیر ساختمان و در جدول (4) پارامترهای احتمالی تعریف شده‌اند. پارامترهای احتمالی شامل نرخ نفوذ هوا، چگالی تردد ساکنان و چگالی انرژی مصرفی وسایل است. نرخ نفوذ هوا، میزان هوای وارد شده به داخل ساختمان از طریق درزهای درب و پنجره و همچنین از طریق باز و بسته شدن درب و پنجره است. چگالی تردد ساکنان نیز بیانگر تعداد افراد حاضر در ساختمان می‌باشد که در این مطالعه واحد این پارامتر به صورت تعداد افراد در یک متر مربع در نظر گرفته شده است. چگالی انرژی مصرفی وسایل ساختمان نشان‌دهنده میزان مصرف وسایل برقی در ساختمان از جمله پرینتر، کامپیوتر و... می‌باشد که به رفتار و حضور ساکنان وابسته است.

جدول (3): مشخصات پارامترهای متغیر ساختمان

پارامتر [واحد]	مشخصات	مراجع
نقطه تنظیم گرمایشی [°C]	حداقل: 17 حداکثر: 22	[17]
نقطه تنظیم سرمایشی [°C]	حداقل: 22 حداکثر: 27	[17]
ضریب بهره گرمای خورشید شیشه [N/A]	حداقل: 0/10 حداکثر: 0/40	[17]
ضریب حرارتی ویژه شیشه [W/(m <sup>2</sup> -K)]	حداقل: 2/54 حداکثر: 3/95	[17]
ضریب هدایت حرارتی سقف [W/(m-K)]	حداقل: 0/041 حداکثر: 0/057	[19]
ضریب هدایت حرارتی دیوار [W/(m-K)]	حداقل: 0/041 حداکثر: 0/057	[19]

جدول (4): مشخصات پارامترهای احتمالی ساختمان

پارامتر [واحد]	نوع PDF	مشخصات		مرجع
		میانگین	انحراف استاندارد	
نرخ نفوذ هوا [m <sup>3</sup> /(s-m <sup>2</sup> )]	نرمال	0/001	0/00005	[32]
چگالی انرژی مصرفی وسایل [W/m <sup>2</sup> ]	نرمال	10/76	3/72	[20]
چگالی تردد ساکنان [فرد/m <sup>2</sup> ]	نرمال	18/58	3/5079	[30]

بنابراین با توجه به تعاریف پارامترهای مذکور کاملاً واضح است که این پارامترها ماهیتی غیرقطعی دارند که در این مطالعه نیز به عنوان پارامتر احتمالی در نظر گرفته شده‌اند. برای پارامترهای احتمالی تابع چگالی احتمال با روش برازش منحنی<sup>1</sup> و برای پارامترهای متغیر نیز محدوده تغییراتی با توجه به پیشینه تحقیق تعریف شده است. بقیه پارامترهای ساختمان نیز ثابت و مشخص در نظر گرفته شده‌اند [30].

## 2.4. تعرفه انرژی

همان طور که در جدول (5) آمده، تعرفه برق در این مطالعه چندپله‌ای است که شامل هزینه سرویس، هزینه تقاضای انرژی و هزینه مصرف انرژی می‌باشد.

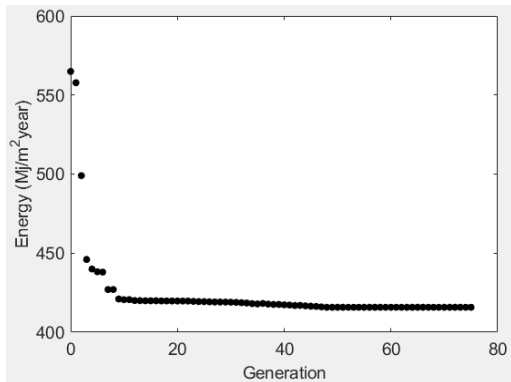
در اینجا تعرفه به طور کلی نوشته شده است؛ به طوری که در ابتدا میزان برق مصرفی ساختمان محاسبه می‌شود. سپس بنا بر میزان تقاضای مورد نیاز ساختمان یکی از تعرفه‌ها انتخاب می‌شود. لازم است متذکر شویم که تقاضای بیش از 500 کیلووات برای 12 ماه از سال و تقاضای حداکثر 500 کیلووات را برای یک ماه از سال در نظر گرفته شده است. تعرفه‌های گازی نیز در جدول (6) نمایش داده شده‌اند که این تعرفه نیز به صورت ماهانه دارای مقادیر متفاوتی است. همچنین ذکر این نکته ضروری است که مالیات همه این تعرفه‌ها 0/08 دلار در نظر گرفته شده است [30].

## 5. نتایج

در این بخش به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه احتمالی پیشنهادی را با روش مرسوم غیراحتمالی مورد مقایسه قرار می‌دهیم. شرط همگرایی در این روش‌ها میانگین تغییرات مقادیر خروجی الگوریتم بهینه‌سازی می‌باشد که در حالت تک‌هدفه مقدار خروجی همان مقدار بهینه انرژی است و در حالت چندهدفه منظور از تغییرات مقادیر خروجی، اختلاف فواصل نقاط نمودار پارتو

### 33 بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

پارامترهای احتمالی ساختمان که در جدول (4) با توابع احتمالی تعریف شده‌اند، در نظر گرفته می‌شود. با فرایند سناریوسازی که پیش‌تر توضیح داده شد، مصرف انرژی به‌عنوان تابع هدف بهینه‌سازی تک‌هدفه ژنتیک به کمترین مقدار رسانده می‌شود. شکل (4) و جدول (7) به ترتیب چگالی مصرف انرژی در ساختمان و مقادیر بهینه پارامترهای متغیر حاصل از حل مسئله بهینه‌سازی را نمایش می‌دهند. همان‌طور که از شکل‌های (3) و (4) مشاهده می‌شود، مقدار بهینه انرژی در روش احتمالی برابر  $Mj/m^2/year$  415/77 و در روش غیراحتمالی برابر  $Mj/m^2/year$  421 می‌باشد که این بیانگر اختلاف 1/3 درصدی روش پیشنهادی با روش مرسوم غیراحتمالی است که عددی قابل ملاحظه می‌باشد. همچنین طبق مقایسه انجام شده در اختلاف مقادیر بهینه پارامترهای متغیر به دست آمده توسط هر دو روش در جدول (7)، مشاهده می‌کنیم که بیشترین اختلاف مربوط به پارامتر راندمان فن هست که برابر با 9/8% است. کمترین اختلاف نیز مربوط به نقطه تنظیم سرمایش ساختمان است که برابر با 12/0% می‌باشد.

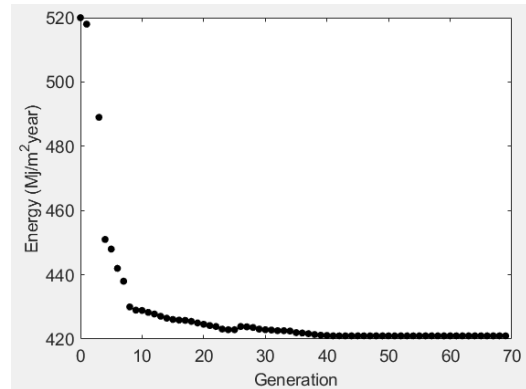


شکل (4): بهینه‌سازی تک‌هدفه احتمالی

است. حال اگر در 30 تکرار میانگین این تغییرات کمتر از 0/0001 باشد، الگوریتم متوقف خواهد شد.

### 1.5. بهینه‌سازی تک‌هدفه غیراحتمالی

در این ارزیابی، پارامترهای احتمالی ساختمان از قبیل نرخ نفوذ هوا، چگالی انرژی مصرفی وسایل و چگالی تردد ساکنان، به صورت عددی ثابت برابر با مقدار متوسط آن پارامتر در نظر گرفته می‌شود. همچنین انرژی مصرفی به‌عنوان تابع هدف قرار داده می‌شود. آنگاه با استفاده از روش بهینه‌سازی تک‌هدفه بر مبنای الگوریتم ژنتیک به تعیین پارامترهای متغیر و کمینه‌سازی مصرف انرژی پرداخته می‌شود. شکل (3) نمایانگر روند کمینه‌سازی انرژی مصرفی ساختمان با استفاده از روش مذکور می‌باشد که مقدار بهینه چگالی انرژی حاصل از این روش برابر با  $Mj/m^2/year$  421 است. همچنین در جدول (7) مقدار بهینه هر پارامتر متغیر ساختمان نشان داده شده است.



شکل (3): بهینه‌سازی تک‌هدفه غیراحتمالی

### 2.5. بهینه‌سازی تک‌هدفه احتمالی

جدول (7): مقایسه مقادیر بهینه پارامترهای متغیر حاصل از بهینه‌سازی تک‌هدفه احتمالی و غیراحتمالی

پارامتر	راندمان فن [N/A]	نقطه تنظیم گرمایش [°C]	نقطه تنظیم سرمایش [°C]	ضریب بهره گرمای خورشید شیشه [N/A]	ضریب حرارتی ویژه شیشه [W/(m²-K)]	ضریب هدایت حرارتی سقف [W/(m-K)]	ضریب هدایت حرارتی دیوار [W/(m-K)]
روش احتمالی	0/895	18	27	0/103	2/548	0/042	0/041
روش غیراحتمالی	0/815	18/168	26/968	0/101	2/684	0/043	0/043
درصد اختلاف	9/8	-0/92	0/12	1/98	-5/07	-2/33	-4/65

این فرایند دارد. به همین دلیل علاوه بر انرژی، شاخص راحتی حرارتی که به صورت درصد ناراضیاتی حرارتی ساکنان تعریف می‌شود، به‌عنوان تابع هدف در مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده

### 3.5. بهینه‌سازی چندهدفه غیراحتمالی

تنها هدف از بهینه‌سازی انرژی ساختمان، کم کردن مصرف انرژی ساختمان به هر قیمتی نیست بلکه آسایش ساکنان نیز نقش اساسی در



حرارتی ساکنان، برابر  $423/45 \text{ Mj/m}^2\text{year}$  است که در این نقطه درصد ناراضایتی حرارتی نیز برابر  $13/103$  می‌باشد. همچنین کمترین درصد ناراضایتی حرارتی با مقدار بهینه مصرف انرژی در این نمودار برابر  $9/22$  است که چگالی مصرف انرژی در این نقطه برابر  $460/63 \text{ Mj/m}^2\text{year}$  هست. علاوه بر این، در جدول (8) تمام مقادیر بهینه پارامترهای متغیر ساختمان برای هر 25 نقطه از نمودار پارتو حاصل از بهینه‌سازی غیراحتمالی آورده شده است.

است. در این بخش، پارامترهای احتمالی به صورت توابع احتمالی مدل نمی‌شوند بلکه از مقادیر متوسط آن پارامترها استفاده می‌شود. شکل (5-الف) منحنی پارتو حاصل از حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه غیراحتمالی را نشان می‌دهد که این منحنی 25 نقطه بهینه با توابع هدف انرژی و ناراضایتی حرارتی را نشان می‌دهد. در واقع این نقاط نشان‌دهنده 25 تا از مقادیر بهینه جمعیت جدید از الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب است. همان‌طور که در این شکل واضح است، کمترین مقدار انرژی با مقدار بهینه درصد ناراضایتی

جدول (8): مقادیر بهینه پارامترهای متغیر حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه غیراحتمالی

راندمان	نقطه تنظیم	نقطه تنظیم	ضریب بهره گرمای	ضریب حرارتی	ضریب هدایت	ضریب هدایت	ردیف
فن	گرمایشی	سرمایشی	خورشید شیشه	ویژه شیشه	حرارتی سقف	حرارتی دیوار	
[N/A]	[°C]	[°C]	[N/A]	[W/(m <sup>2</sup> -K)]	[W/(m-K)]	[W/(m-K)]	
0/882	18/548	26/977	0/146	2/592	0/042	0/045	1
0/882	18/548	26/977	0/146	2/577	0/042	0/051	2
0/875	18/935	26/861	0/124	2/593	0/042	0/044	3
0/903	19/439	26/938	0/118	2/592	0/042	0/044	4
0/913	19/603	26/931	0/107	2/590	0/043	0/043	5
0/884	19/659	26/984	0/174	2/583	0/043	0/049	6
0/890	19/597	26/941	0/196	2/593	0/045	0/047	7
0/881	19/594	26/976	0/218	2/595	0/043	0/050	8
0/908	19/697	26/860	0/208	2/651	0/044	0/047	9
0/889	19/898	26/971	0/196	2/592	0/042	0/050	10
0/879	18/579	26/830	0/182	2/605	0/045	0/045	11
0/854	19/929	26/972	0/236	2/602	0/044	0/049	12
0/822	19/931	26/748	0/230	2/692	0/046	0/047	13
0/853	20/269	26/975	0/239	2/615	0/043	0/050	14
0/862	20/510	26/967	0/169	2/617	0/047	0/054	15
0/861	20/426	26/987	0/243	2/592	0/043	0/049	16
0/853	20/380	26/935	0/261	2/635	0/045	0/047	17
0/886	20/783	26/995	0/153	2/582	0/042	0/048	18
0/862	20/631	26/987	0/241	2/583	0/042	0/051	19
0/853	20/658	26/984	0/243	2/616	0/043	0/050	20
0/907	20/791	26/997	0/248	2/593	0/042	0/050	21
0/821	20/858	26/932	0/195	2/794	0/050	0/047	22
0/832	20/780	26/988	0/270	2/708	0/044	0/048	23
0/821	20/944	26/983	0/152	2/880	0/049	0/047	24
0/802	20/808	26/479	0/171	2/714	0/055	0/047	25

توابع چگالی احتمالشان مدل‌سازی می‌شوند. در شکل (5-ب)، منحنی پارتوی مقادیر انرژی و شاخص راحتی حرارتی نمایش داده شده است که شامل 25 نقطه بهینه می‌باشد. این نقاط میزان مصرف انرژی و ناراضایتی حرارتی ساختمان را به‌ازای مقادیر بهینه جدول (9) نشان

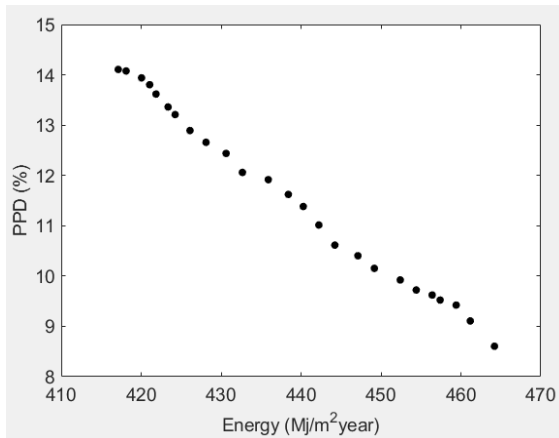
#### 4.5. بهینه‌سازی چندهدفه احتمالی

در این بخش، علاوه بر اینکه انرژی و شاخص راحتی حرارتی به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته می‌شود، پارامترهای احتمالی نیز با توجه به

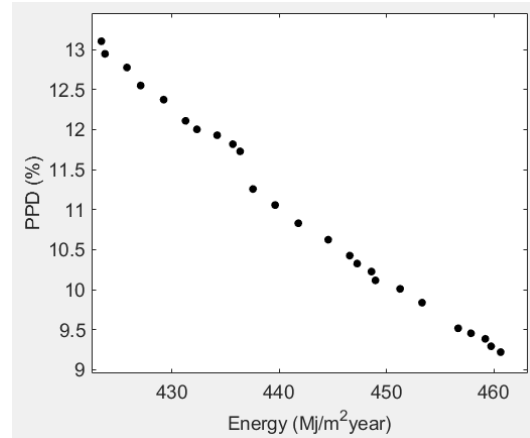
### 35 بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

می‌دهند. در این جدول، تمام مقادیر بهینه پارامترهای متغیر مربوط به هر کدام از نقاط نمایش داده شده در نمودار پارتو آورده شده است. در شکل (6)، تمام نقاط نمودار پارتو در هر دو روش با یکدیگر مقایسه و درصد اختلافشان به دست آورده شده است. همان طور که در شکل واضح است، میانگین اختلاف بین این دو نمودار برابر 5/06 می‌باشد. حال اگر تنها دو نقطه ابتدایی و انتهایی از نمودارهای پارتو در شکل (6) در نظر گرفته شود، مشاهده خواهد شد که روش پیشنهادی نسبت به روش مرسوم غیراحتمالی در اولین نقطه 7/79% و در آخرین نقطه 4/8% اختلاف دارند. نقطه اول در نمودارهای نمایش داده شده در شکل (6) نشان‌دهنده کمترین میزان مصرف انرژی و مقدار  $417/135 \text{ Mj/m}^2\text{year}$  در روش احتمالی و مقدار  $423/45 \text{ Mj/m}^2\text{year}$  در روش غیراحتمالی و مقدار بهینه درصد نارضایتی با مقدار

می‌باشد. در روش احتمالی و مقدار  $14/107$  در روش غیراحتمالی است. آخرین نقطه در نمودارهای پارتو نشانگر میزان بهینه مصرف انرژی با مقدار  $464/194 \text{ Mj/m}^2\text{year}$  در مطالعه احتمالی و مقدار  $460/63 \text{ Mj/m}^2\text{year}$  در مطالعه غیراحتمالی به‌ازای کمترین درصد نارضایتی ساکنان با مقدار 8/61 در مطالعه احتمالی و مقدار 9/22 در مطالعه غیراحتمالی است. در جدول (10)، تمام مقادیر بهینه پارامترهای متغیر حاصل از دو روش با یکدیگر مقایسه شده‌اند. سپس کمترین، بیشترین و میانگین درصد اختلاف هر پارامتر را بدست آورده که طبق این جدول بیشترین میانگین درصد اختلاف متعلق به ضریب بهره گرمای خورشید شیشه با مقدار 33/67 است و کمترین میانگین اختلاف برابر با 2/16 است که مربوط به ضریب حرارتی ویژه شیشه می‌باشد.

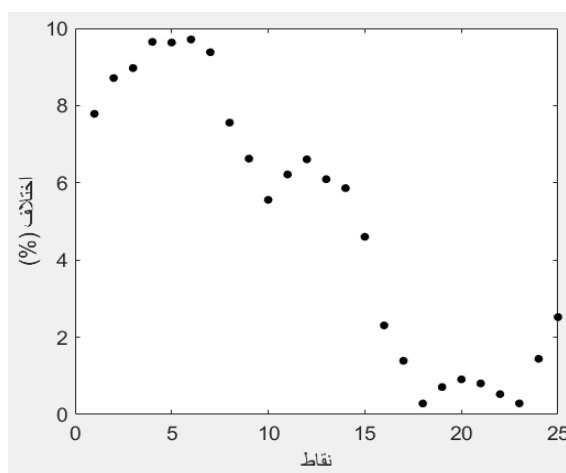


(الف)



(ب)

شکل (5): منحنی پارتوی حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه (الف) غیراحتمالی (ب) احتمالی



شکل (6): اختلاف روش پیشنهادی نسبت به روش مرسوم

جدول (9): مقادیر بهینه پارامترهای متغیر حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه احتمالی

ردیف	راندمان فن [N/A]	نقطه تنظیم گرمایشی [°C]	نقطه تنظیم سرمایشی [°C]	ضریب بهره گرمای خورشید شیشه [N/A]	ضریب حرارتی ویژه شیشه [W/(m <sup>2</sup> -K)]	ضریب هدایت حرارتی سقف [W/(m-K)]	ضریب هدایت حرارتی دیوار [W/(m-K)]
1	0/899	18/005	26/999	0/101	2/591	0/042	0/042
2	0/886	18/201	26/967	0/105	2/588	0/042	0/042
3	0/879	18/302	26/947	0/115	2/587	0/043	0/042
4	0/872	18/419	26/931	0/133	2/585	0/043	0/042
5	0/871	18/517	26/929	0/143	2/584	0/043	0/042
6	0/869	18/617	26/919	0/164	2/582	0/043	0/042
7	0/882	18/169	26/843	0/116	2/581	0/042	0/043
8	0/869	19/233	26/618	0/171	2/579	0/044	0/042
9	0/898	19/242	26/551	0/199	2/599	0/048	0/044
10	0/870	19/261	26/647	0/225	2/584	0/048	0/043
11	0/860	19/268	26/804	0/279	2/572	0/049	0/043
12	0/771	19/476	26/803	0/285	2/569	0/044	0/043
13	0/769	19/517	26/674	0/289	2/561	0/043	0/043
14	0/771	19/525	26/655	0/278	2/548	0/047	0/044
15	0/759	19/917	26/628	0/285	2/572	0/048	0/043
16	0/726	19/916	26/580	0/292	2/570	0/044	0/043
17	0/722	20/168	26/511	0/118	2/579	0/042	0/042
18	0/773	20/388	26/505	0/283	2/557	0/044	0/045
19	0/728	20/532	26/500	0/286	2/557	0/044	0/043
20	0/878	20/694	26/492	0/295	2/560	0/044	0/043
21	0/733	20/739	26/478	0/187	2/557	0/043	0/045
22	0/873	20/703	26/426	0/274	2/571	0/044	0/044
23	0/764	20/989	26/390	0/249	2/557	0/044	0/044
24	0/760	21	26/344	0/299	2/557	0/044	0/045
25	0/701	21/001	26/347	0/312	2/556	0/044	0/045

جدول (10): اختلاف مقادیر بهینه حاصل از مطالعه احتمالی و غیراحتمالی

اختلاف (%)	راندمان فن	نقطه تنظیم گرمایشی [°C]	نقطه تنظیم سرمایشی [°C]	ضریب بهره گرمای خورشید شیشه [N/A]	ضریب حرارتی ویژه شیشه [W/(m <sup>2</sup> -K)]	ضریب هدایت حرارتی سقف [W/(m-K)]	ضریب هدایت حرارتی دیوار [W/(m-K)]
کمترین	0/44	0/18	-0/007	-4/51	-0/042	0/59	-1/63
بیشترین	-19/15	-5/54	-2/37	97/53	-11/49	19/46	-17/64
میانگین	6/96	2/29	1/02	33/67	2/16	5/23	10/15

## 6. تحلیل حساسیت

در این مقاله، نتایج بهینه‌سازی با تغییر موقعیت مکانی و آب‌وهوایی ساختمان بررسی می‌شود. چهار منطقه جغرافیایی سانفرانسیسکو، میامی، لس‌آنجلس و فینیکس در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که در جدول (11) مشاهده می‌شود، این مناطق دارای اقلیم آب‌وهوایی

متفاوتی می‌باشند که بنا بر استاندارد آورده‌شده در مرجع [35]، شهر سانفرانسیسکو اقلیم گرم و دریایی، شهر میامی اقلیم خیلی داغ و مرطوب، فینیکس اقلیم داغ و خشک و شهر لس‌آنجلس اقلیم گرم و خشک دارد. شکل (7) نمودار پارتو در شهرهای مختلف را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که هرچه شهر دمای

### 37 بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

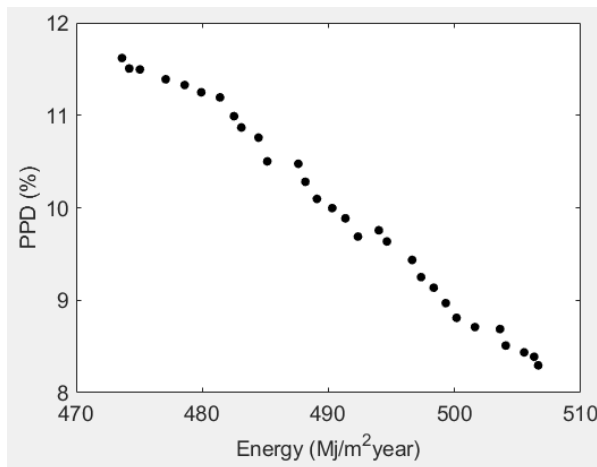
با توجه به نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی، مشاهده شد که در بهینه‌سازی تک‌هدفه، اختلاف 1/3 درصدی بین مقادیر بهینه انرژی مصرفی حاصل از دو روش وجود دارد. همچنین به این نتیجه رسیدیم که 5% حداکثر اختلاف بین مقادیر بهینه حاصل از مطالعه احتمالی و غیراحتمالی است. علاوه بر این، به منظور ارزیابی کامل روش پیشنهادی با روش غیراحتمالی در حالت دوهدفه، میانگین اختلاف تمام نقاط پارتوی برابر با 5% می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از مقایسه تمام مقادیر بهینه حاصل از روش پیشنهادی با روش غیراحتمالی نیز نشان از تفاوت چشمگیر 33/67 درصدی میانگین اختلاف در مقادیر بهینه مطالعات احتمالی و غیراحتمالی دارد. بنابراین می‌توان دلیل این اختلافات چشمگیر را بدین گونه بیان کرد که مطالعات احتمالی موجب واقعی‌تر شدن نتایج می‌شوند و مطالعات غیراحتمالی می‌تواند موجب انتخاب ناصحیح پارامترهای ساختمان شود.

بالتری داشته باشد، میزان مصرف انرژی بیشتری دارد؛ اما این سؤال ممکن است مطرح شود که چرا در شهر میامی که انرژی بیشتری مصرف می‌کند، نارضایتی ساکنان بیشتر است؟ دلیل این امر رطوبت دمایی این شهر است که با سیستم HVAC موجود موجب نارضایتی بیشتر می‌شود. از سوی دیگر، شهر لس‌آنجلس کمترین میزان نارضایتی دارد زیرا دارای آب‌وهوای خشک است.

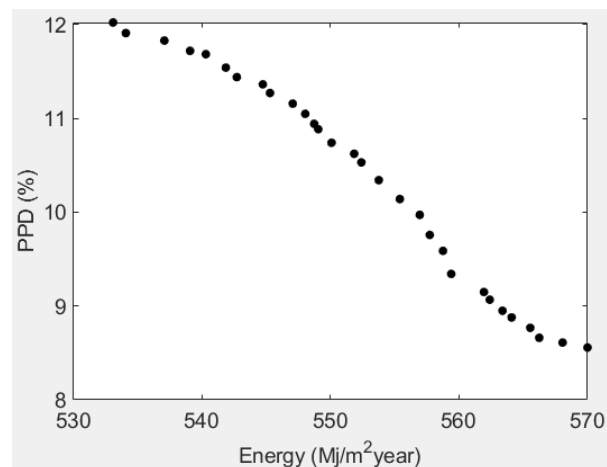
جدول (11): مشخصات اقلیمی و جغرافیایی شهرهای مورد مطالعه

شهر	نوع اقلیم	عرض جغرافیایی (درجه شمالی)	طول جغرافیایی (درجه غربی)	ارتفاع (متر)
فینیکس	2B	33/42	112/02	339
لس‌آنجلس	3B	33/92	118/14	32
میامی	1A	25/78	80/27	2
سان‌فرانسیسکو	3A	33/65	84/42	315

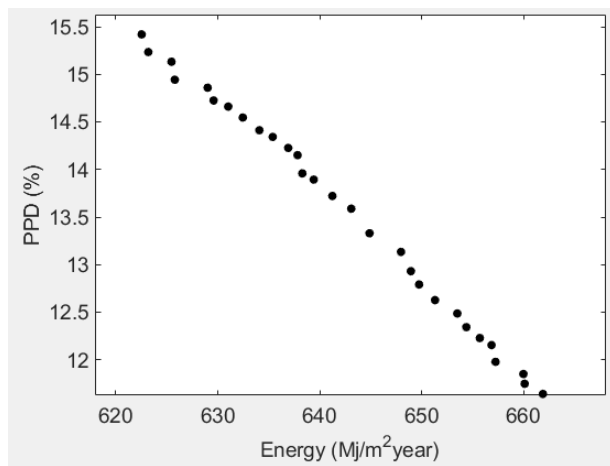
### 7. نتیجه‌گیری



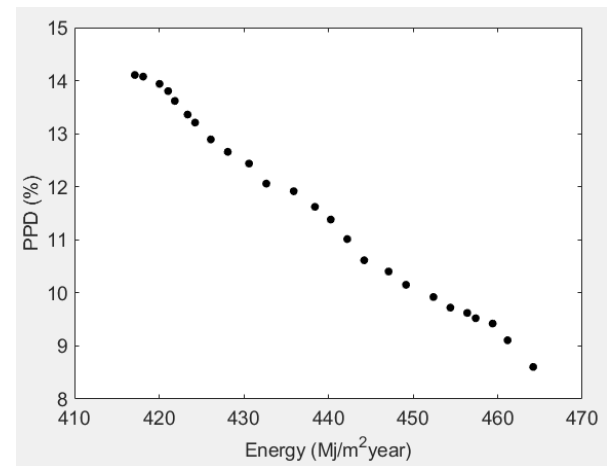
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (7): مصرف انرژی در شهرهای (الف) فینیکس، (ب) لس‌آنجلس، (ج) سان‌فرانسیسکو و (د) میامی

## مراجع

- [1] Allouhi, A., El Fouih, Y., Kousksou, T., Jamil, A., Zeraouli, Y. and Mourad, Y., "Energy Consumption and Efficiency in Buildings: Current Status and Future Trends", Journal of Cleaner production, Vol. 109, pp. 118-130, 2015.
- [2] Kibert, C.J., "Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery", John Wiley & Sons, 2016.
- [3] Marszal, A.J. and et al., "Zero Energy Building—a Review of Definitions and Calculation Methodologies", Energy and buildings, Vol. 43, No. 4, pp. 971-979, 2011.
- [4] Pless, S. and Paul Torcellini PhD, P., "Getting to Net Zero", ASHRAE Journal, Vol. 51, No. 9, pp. 18, 2009.
- [5] Crawley, D.B., Hand, J.W., Kummert, M. and Griffith, B.T., "Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs", Building and environment, Vol. 43, No. 4, pp. 661-673, 2008.
- [6] Nguyen, A.-T., Reiter, S. and Rigo, P., "A Review on Simulation-Based Optimization Methods Applied to Building Performance Analysis", Applied Energy, Vol. 113, pp. 1043-1058, 2014.
- [7] Delgarm, N., Sajadi, B., Delgarm, S. and Kowsary, F., "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, pp. 552-560, 2016.
- [8] Delgarm, N., Sajadi, B., Kowsary, F., and Delgarm, S., "Multi-Objective Optimization of the Building Energy Performance: A Simulation-Based Approach by Means of Particle Swarm Optimization (Pso)," Applied Energy, Vol. 170, pp. 293-303, 2016.
- [9] Junghans, L. and Darde, N., "Hybrid Single Objective Genetic Algorithm Coupled with the Simulated Annealing Optimization Method for Building Optimization", Energy and Buildings, Vol. 86, pp. 651-662, 2015.
- [10] Murray, S.N., Walsh, B.P., Kelliher, D. and O'Sullivan, D., "Multi-Variable Optimization of Thermal Energy Efficiency Retrofitting of Buildings Using Static Modelling and Genetic Algorithms—a Case Study", Building and Environment, Vol. 75, pp. 98-107, 2014.
- [11] Wright, J. and Alajmi, A., "Efficient Genetic Algorithm Sets for Optimizing Constrained Building Design Problem", International Journal of Sustainable Built Environment, Vol. 5, No. 1, pp. 123-131, 2016.
- [12] Yu, W., Li, B., Jia, H., Zhang, M. and Wang, D., "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.
- [13] خداکریمی، جمال و قبادی، پریسا، «بهبود سازی مصرف انرژی در یک ساختمان اداری مجهز به سیستم مدیریت هوشمند»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال ششم، شماره دوم، صفحه 12\_23، تابستان 1395.
- [14] احمدی، روح الله و سعیدی، محمدحسن، «بهبود سازی عددی یک رادیاتور خانگی و بررسی تجربی ظرفیت حرارتی آن»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال پنجم، شماره سوم، صفحه 50\_59، پاییز 1394.
- [15] Celarec, D. and Dol'ek, M., "The Impact of Modelling Uncertainties on the Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Frame Buildings", Engineering Structures, Vol. 52, pp. 340-354, 2013.
- [16] Liel, A.B., Haselton, C.B., Deierlein, G.G. and Baker, J. W., "Incorporating Modeling Uncertainties in the Assessment of Seismic Collapse Risk of Buildings", Structural Safety, Vol. 31, No. 2, pp. 197-211, 2009.
- [17] Manfren, M., Aste, N. and Moshksar, R., "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] Amiri, S.S., Mottahedi, M. and Asadi, S., "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] Bordbari, M.J., Seifi, A.R. and Rastegar, M., "Probabilistic Energy Consumption Analysis in Buildings Using Point Estimate Method", Energy, Vol. 142, pp. 716-722, 2018.
- [20] Ioannou, A. and Itard, L., "Energy Performance and Comfort in Residential Buildings: Sensitivity for Building Parameters and Occupancy", Energy and Buildings, Vol. 92, pp. 216-233, 2015.
- [21] Sun, S., Kensek, K., Noble, D. and Schiler, M., "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] Van Gelder, L., Janssen, H. and Roels, S., "Probabilistic Design and Analysis of Building Performances: Methodology and Application Example", Energy and Buildings, Vol. 79, pp. 202-211, 2014.
- [23] Yang, Z. and Becerik-Gerber, B., "A Model Calibration Framework for Simultaneous Multi-Level Building Energy Simulation", Applied Energy, Vol. 149, pp. 415-431, 2015.
- [24] Neto, A.H. and Fiorelli, F.A.S., "Comparison between Detailed Model Simulation and Artificial Neural Network for Forecasting Building Energy Consumption", Energy and buildings, Vol. 40, No. 12, pp. 2169-2176, 2008.
- [25] Krarti, M., "Energy Audit of Building Systems: An Engineering Approach", CRC press, 2016.
- [26] Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S. and Van Den Dobbelen, A., "A Review into Thermal Comfort in Buildings", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 26, pp. 201-215, 2013.
- [27] Fanger, P.O. and Toftum, J., "Extension of the Pmv Model to Non-Air-Conditioned Buildings in Warm Climates", Energy and buildings, Vol. 34, No. 6, pp. 533-536, 2002.
- [28] Fanger, P., "Moderate Thermal Environments Determination of the Pmv and Ppd Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort", ISO 7730, 1984.
- [29] Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. and Meyarivan, T., "A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: Nsga-Ii", in International Conference on Parallel Problem Solving From Nature, 2000, pp. 849-858: Springer.
- [30] Department of Energy (DOE). (2017, december). "Commercial Reference Buildings". Available: <https://energy.gov/eere/buildings/commercial-reference>

### 39 بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

buildings

- [31] ASHRAE Standard "Standard 55-2013: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy", American Society of Heating, Refrigerating, and air-conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA 2013.
- [32] Cecconi, F.R., Manfren, M., Tagliabue, L.C., Ciribini, A. L.C. and De Angelis, E., "Probabilistic Behavioral Modeling in Building Performance Simulation: A Monte Carlo Approach", Energy and Buildings, Vol. 148, pp. 128-141, 2017.
- [33] Cheng, Q., Wang, S., Yan, C. and Xiao, F., "Probabilistic Approach for Uncertainty-Based Optimal Design of Chiller Plants in Buildings", Applied Energy, Vol. 185, pp. 1613-1624, 2017.
- [34] Tagliabue, L.C., Manfren, M., Ciribini, A.L.C. and De Angelis, E., "Probabilistic Behavioural Modeling in Building Performance Simulation—the Brescia Elux Lab", Energy and Buildings, Vol. 128, pp. 119-131, 2016.
- [35] ASHRAE Standard "Standard 169-2006: Weather Data for Building Design Standards", American Society of Heating, Refrigerating, and air-conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, 2006.