Journal of Sustainable Energy Systems

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Research Paper

Optimization of building energy consumption using single and multi-objective particle swarm optimization and genetics algorithms

Rahim Zahedi[1], Zahra Moradi Pour[2], Abolfazl Ahmadi[3*]

[1] PhD Candidate, Energy Systems Engineering, Faculty of New sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
[2] MSc in Computer Engineering, Department of Computer Engineering, Islamic Azad University, Lahijan, Iran
[3] Asistant Professor, Department of Energy Systems Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 10 January 2022
Revised 29 January 2022
Accepted 24 March 2022

Keywords:
Building Energy
Genetic Algorithm (NSGA-II)
Optimal
Single
Multipurpose Particle Swarm Optimization Algorithm (MOPSO)

ABSTRACT

Since significant energy consumption worldwide is related to building energy, building energy optimization is currently very important despite the limitations and due to the preservation of the earth's environment. This paper addresses the important limitations for optimizing building energy performance using single and multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) and genetics (NSGA-II) algorithms with EnergyPlus and MATLAB building energy simulation software to examine different weather data of several cities in Iran with considering the one-room model offers with the effect of building architectural parameters. Also in the optimization section, the annual electricity consumption of cooling, heating, and lighting to understand the interactions between the target functions and minimize the total annual energy demand of the building is examined, and the results obtained, the annual cooling electricity consumption is reduced by 19.8-33.3% and the annual heating and lighting Respectively increased by 1.7-4.8% and 0.5-2.6% compared to other models, which leads to an optimal reduction of 1.6-11.3% of the total annual electricity demand of the building.

Introduction

Improving the energy efficiency of buildings has become a major international challenge for designers and researchers that has great potential for building change (1) by analyzing the total energy of the building (2) instead of analyzing the building as a set of individual components (3). To evaluate the energy performance of a building, architectural parameters for reducing the energy consumption of the building are difficult to take into account due to the complexity and nonlinearity of the processes (4). Tohos-Dabro and Crarti (5) developed a genetic algorithm optimization tool in conjunction with DOE-2, which is used to optimize the shape of a building and its coverage characteristics. Kim and Park (6) integrated EnergyPlus with the MATLAB program by running EnergyPlus using the m-script file on the MATLAB platform. They used the MATLAB nonlinear finite optimization tool (FMINCON) to minimize heating, cooling and lighting energy consumption in order to achieve optimal control of blind systems in office buildings. In this paper, using the Multipurpose Particle Swarm Optimization (MOPSO) and Genetics (NSGA-II) algorithms is paired with the EnergyPlus building energy simulation program and the EnergyPlus input file creation tool, jEPlus, to increase the energy performance of a typical room. After presenting the coupling strategy, developed optimization techniques are provided to investigate the effect of building architectural parameters such as building orientation, canopy specifications, window size, and glaze and wall material properties on a test case considering three target functions of annual cooling power consumption, Heating, and lighting. Based on the results, a set of optimal architectural configurations for different climates of several Iranian cities, including cold, temperate, hot and dry, and hot and humid has been obtained.

* Corresponding Author, Email: a_ahmadi@iust.ac.ir

Materials and methods

In this paper, a multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm and NSGA-II type genetics for building energy optimization are presented (6, 7) .EnergyPlus and jEPlus simulation programs are also used to predict the thermal behavior of the building and energy consumption and to help building designers adjust the parameters with the EnergyPlus model and simulations in parallel (8). Thus, with the proposed method, the power and capabilities of EnergyPlus in building energy simulation can be combined and implemented with MATLAB power in control and optimization (9).

Results

In order to evaluate the capability and effectiveness of the proposed optimization approaches, the developed methods in a single room thermal zone test in a multi-story building are applied to investigate the effect of architectural design parameters on room energy consumption in several different climatic regions of Iran with desired physical properties. Table 1 shows the physical characteristics of the room in several regions of Iran.

Table 1. Physical properties of the desired room

Component	Property	Value
Wall	Conductivity (W/mK)	0.57
	Thickness (m)	0.2
	Specific heat (J/kg K)	790
	Density (kg/m3)	1120
Floor/roof	Conductivity (W/mK)	1.11
	Thickness (m)	0.1
	Specific heat (J/kg K)	920
	Density (kg/m3)	800

Results and Discussion

The results of optimization for different climatic conditions show that the annual consumption of cooling electricity decreases by 19.8 to 33.3%, while the annual heating and lighting increase by 1.7-4.8% and 0.5-2.6%, respectively, compared to the original room model. Also, optimal design leads to a 1.6 to 11.3 percent reduction in total annual building electricity demand for four different climatic regions of Iran. The largest change in cooling energy consumption is related to the cold climate with 33.3%, while the demand for heating energy with 1.7% has the least change. Similarly, the lowest change in cooling energy demand in hot climates is 19.8%, while the consumption of heating energy atat 4.8% is the highest. From this, it can be clearlyinferred that the purposes of cooling and heating are completelyopposite to each other. Finally, changes in total annual energy consumption from hot to cold climates are less. Accordingly, it is inferred that the use of optimization methods leads to a more favorable and efficient design than other existing methods.

Conclusion

In this paper, two powerful approaches for optimizing multivariate building energy consumption are introduced. For simulation-based optimization, the Multipurpose Particle Swarm Optimization (MOPSO) and Genetics (NSGA-II) optimization code were programmed in MATLAB environment and integrated with the Energy-Plus program through the jEPlus parametric simulation management tool as the interface for creating the EnergyPlus input file. In the proposed optimization problem, the design parameters of the room orientation were canopy specifications, window size, glaze, and wall specifications. In addition, three objective functions including annual electricity consumption, cooling, heating, and lighting, which are completely non-linear, were considered. The proposed methods were used in a one-room model by considering four climatic regions of Iran hot and humid, hot and dry, temperate and cold. The optimization results showed that the annual cooling consumption decreased by 19.8 to 33.3% compared to the base model depending on the climate region. In contrast, annual electricity consumption for heating and lighting increased by 1.7-4.8% and 0.5-2.6%, respectively. As a result, the final optimal configuration reduces the total annual electricity consumption of the building by 1.6 to 11.3 percent for the four climatic regions of Iran.

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

مقالهٔ پژوهشی

بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تک و چند هدفه و ژنتیک

رحیم زاهدی[۱]، زهرا مرادی‌پور[۲]، ابوالفضل احمدی[۳*]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

[۲] کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر، دانشکدهٔ مهندسی کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان

[۳] استادیار گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه علم و صنعت تهران

اطلاعات مقاله

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۱۱/۰۹

تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۱/۰۴

کلیدواژه:

انرژی ساختمان

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تک و چند هدفه

الگوریتم ژنتیک

بهینه‌سازی

چکیده

از آنجا که بخش قابل توجهی از انرژی مصرفی در سراسر جهان به مصرف انرژی در ساختمان مربوط می‌شود، در حال حاضر بهینه‌سازی انرژی ساختمان با وجود محدودیت‌ها و با توجه به حفظ محیط زیست زمین بسیار حایز اهمیت است. این مقاله به محدودیت‌های مهم برای بهینه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تک و چند هدفه و الگوریتم ژنتیک با نرم‌افزار شبیه‌سازی انرژی ساختمان انرژی پلاس و MATLAB به بررسی داده‌های آب‌وهوای مختلف چند شهر ایران با در نظر گرفتن مدل تک‌اتاقی و تأثیر پارامترهای معماری ساختمان از جمله جهت‌گیری ساختمان، مشخصات سایه‌بان، اندازهٔ پنجره، و لعاب و مصالح دیوار اعمال و... می‌پردازد. همچنین در بخش بهینه‌سازی، تحلیل‌های الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تک و چند هدفه و ژنتیک مصرف برق سالانهٔ سرمایش، گرمایش و روشنایی برای درک تعاملات بین توابع هدف و به حداقل رساندن کل تقاضای انرژی سالانهٔ ساختمان مورد بررسی قرار گرفته که راه‌حل‌های بهینهٔ به‌دست‌آمده به عنوان جبههٔ بهینهٔ پارتو در نظر گرفته می‌شود. نتایج برای مدل این تحقیق، مصرف برق سرمایشی سالانه حدود ۱۹/۸ تا ۳۳/۳ درصد کاهش و گرمایش و روشنایی سالانه به‌ترتیب ۱/۷ تا ۴/۸ درصد و ۰/۵ تا ۲/۶ درصد در مقایسه با مدل‌های دیگر افزایش داده شده است که منجر به کاهش بهینهٔ ۱/۶ تا ۱۱/۳ درصد از کل تقاضای برق سالانهٔ ساختمان می‌شود. علاوه بر این، استفاده از دو روش یادشده منجر به یک سیستم انرژی، بهینه، کارآمد و افزایش بهره‌وری انرژی در مراحل اولیهٔ طراحی ساختمان می‌شود.

مقدمه

انرژی یکی از منابع مهم مورد استفادهٔ جامعهٔ مدرن و هستهٔ اصلی فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی در کشورهای صنعتی است. در سال‌های اخیر، به دلیل توسعهٔ صنعتی و رشد جمعیت به‌ویژه در بخش ساختمانی، تقاضای جهانی انرژی افزایش چشمگیری داشته است [۱]. بهبود بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها به یک چالش بزرگ بین‌المللی برای طراحان و محققان تبدیل شده است که پتانسیل بالایی برای تغییرات ساختمان [۲] با تحلیل انرژی کل ساختمان [۳] به جای تجزیه‌وتحلیل ساختمان به عنوان مجموعه‌ای از اجزای مجزا دارد [۴]. رایج‌ترین برنامه‌های شبیه‌سازی انرژی کل

* نویسندهٔ مسئول

Email: a_ahmadi@iust.ac.ir

ساختمان برای طراحان ساختمان اغلب انرژی پلاس[1] است که برای تجزیه‌وتحلیل رفتارهای حرارتی و انرژی ساختمان‌ها استفاده می‌شود. برای ارزیابی عملکرد انرژی یک ساختمان، پارامترهای معماری در کاهش مصرف انرژی ساختمان به دلیل پیچیدگی و غیرخطی بودن فرایندها، لحاظ کردن آن‌ها دشوار است [۵]. رویکردی به نام «مطالعهٔ پارامتریک» ممکن است برای بررسی عملکرد ساختمان استفاده شود، اما به دلیل تعداد زیاد ترکیب‌های پارامتریک بسیار زمان‌بر و عملاً غیرممکن است [۶]. طی سال‌های گذشته، کارهای تحقیقاتی قابل توجهی به سمت بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان مبتنی بر شبیه‌سازی با هدف کلی درک مناسب‌ترین پارامترهای ساختمان و پیکربندی‌های معماری برای ارتقای بهره‌وری انرژی آن انجام شده است. نگوین و همکاران [۷] روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه سازی اعمال‌شده برای تحلیل عملکرد ساختمان را بررسی کردند و زاهدی و همکاران [۸] یک ابزار بهینه سازی ساختمان آنلاین را برای به حداقل رساندن مصرف انرژی به شیوه‌ای به‌صرفه و ارزیابی جایگزین های تولید پراکندهٔ انرژی توسعه دادند. شانترل و همکاران [۹] یک ابزار چندهدفه (MultiOpt) بر اساس الگوریتم ژنتیک NSGA-II[2] همراه با استفاده از TRNSYS برای بهینه‌سازی نوسازی ساختمان‌ها ارائه کردند. در کار مشابهی، توهوس-دابرو و کرارتی [۱۰] یک ابزار بهینه سازی الگوریتم ژنتیک همراه با DOE-2 ایجاد کردند که برای بهینه‌سازی شکل ساختمان و ویژگی‌های پوشش آن استفاده می‌شود. ساپوریتو و همکاران [۱۱] در تحقیق دیگری، یک رویکرد مبتنی بر داده را برای بهینه سازی سیستم گرمایش و تهویهٔ هوا[3] در یک ساختمان اداری با استفاده از الگوریتم قدرتمند ازدحام ذرات چندهدفه ارائه کردند. علاوه بر این، گوسارد و همکاران [۱۲] یک بهینه‌سازی چندهدفه پوشش ساختمان با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکهٔ عصبی مصنوعی برای بهینه سازی خواص ترموفیزیکی معادل دیوارهای خارجی به منظور بهبود بازده حرارتی ساختمان ارائه کردند. یو و همکاران [۱۳] یک شبکهٔ جدید پس‌انتشار بهبودیافته مبتنی بر شبیه‌سازی همراه با الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSAG-II) برای بهینه‌سازی کارایی انرژی ساختمان و آسایش حرارتی و برای کمک به طراحان در طراحی ساختمان های سبز ارائه کردند. در مطالعهٔ دیگری، کیم و پارک [۱۴] انرژی پلاس و فایل m-script روی پلتفرم MATLAB ادغام کردند. آن‌ها از ابزار بهینه‌سازی محدود غیرخطی MATLAB به نام FMINCON برای به حداقل رساندن مصرف انرژی گرمایش، سرمایش و روشنایی به منظور به دست آوردن کنترل بهینهٔ blind systems در ساختمان‌های اداری استفاده کردند.

آسینو و همکاران [۱۵] یک روش بهینه‌سازی جدید برای عملکرد انرژی و آسایش حرارتی ساختمان‌ها با استفاده از یک جفت مستقیم بین متلب و انرژی پلاس توسعه داده است. آن‌ها از یک الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) استفاده کردند که در متلب برای طراحی حرارتی پوشش ساختمان اجرا شد تا تقاضای انرژی حرارتی و برودتی را در دو اقلیم مختلف مدیترانه‌ای به حداقل برساند. در یک کار تحقیقاتی دیگر، آن‌ها روش خود را برای ارزیابی راه حل بهینه هزینه در مقاوم‌سازی ساختمان برای بهینه‌سازی انرژی اولیه مورد نیاز سیستم تهویهٔ مطبوع و راحتی حرارتی داخل ساختمان اجرا کردند [۱۶]. در مطالعهٔ دیگری، یونگ و همکاران [۱۷] ادغام انرژی پلاس با برنامهٔ متلب را با اجرای انرژی پلاس با استفاده از فایل ام اسکریپت روی پلتفرم متلب ادغام کردند. آن‌ها از تابع جعبه‌ابزار متلب بهینه‌سازی محدود غیرخطی (FMINCON) برای به حداقل رساندن مصرف انرژی گرمایش، سرمایش و روشنایی به منظور به دست آوردن کنترل بهینه سیستم‌های انرژی در ساختمانهای اداری استفاده کردند. ژانگ و همکاران [۱۸] یک ابزار مبدل gbXML-IDF را از طریق پلتفرم رابط کاربری گرافیکی متلب (GUI) برای انتقال داده‌های مدل اطلاعات ساختمان (BIM[4]) به فایل ورودی انرژی پلاس به منظور حل یک مشکل طراحی بهینهٔ چندمعیاره مدل شبیه‌سازی عملکرد انرژی مبتنی بر BIM ایجاد کرد.

هدف از این مطالعه، ارائهٔ رویکردی ساده و کارآمد برای بهینه‌سازی کارایی انرژی ساختمان است. در این مقاله با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO)[5] و ژنتیک با برنامهٔ شبیه‌سازی انرژی

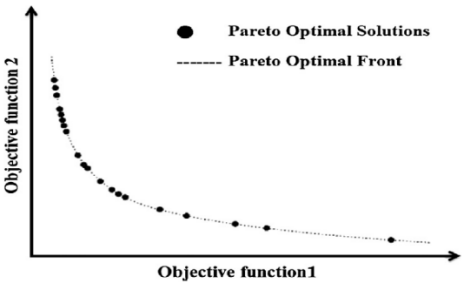
1. EnergyPlus
2. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
3. Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC)
4. Building Information Model
5. Single and Multi-Objective Particle Swarm Optimization

ساختمان انرژی پلاس و به‌کارگیری ابزار ایجاد فایل ورودی انرژی پلاس، jEPlus، جفت می‌شود تا کارایی انرژی یک اتاق معمولی را افزایش دهد. پس از ارائهٔ استراتژی کوپلینگ، تکنیک بهینه‌سازی توسعه‌یافته برای بررسی تأثیر پارامترهای معماری ساختمان مانند جهت گیری ساختمان، مشخصات سایه‌بان، اندازهٔ پنجره و ویژگی‌های لعاب و مصالح دیوار روی یک مورد آزمایشی با در نظرگرفتن سه تابع هدف مصرف برق سالانهٔ سرمایش، گرمایش و روشنایی اعمال می‌شود. بر اساس نتایج، مجموعه‌ای از پیکربندی‌های معماری بهینه برای آب‌وهوای مختلف چند شهر ایران از جمله سرد، معتدل، گرم و خشک، و گرم و مرطوب به دست آمده است. نوآوری این تحقیق استفادهٔ هم‌زمان از دو الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی در بهینه‌سازی مصرف برق ساختمان است.

مواد و روش‌ها

بهینه‌سازی چندهدفه

یکی از روش‌های محبوب برای ارائهٔ راه حل‌های چندهدفه، پارتو یا نامغلوب است. شکل ۱ منحنی پارتو را برای به حداقل رساندن دو تابع هزینه به طور هم‌زمان نشان می‌دهد. در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، تمام نقاط در جبههٔ پارتو به طور بالقوه راه‌حل بهینه هستند. از این نظر، انتخاب پیکربندی بهینهٔ نهایی از میان نقاط بهینهٔ موجود، نیازمند فرایند تصمیم‌گیری است. تکنیک‌های تصمیم‌گیری زیادی برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه عبارت‌اند از: روش بهینه‌سازی چندهدفه کلاسیک که یک مسئله هدف واحد را برای هر راه‌حل بهینهٔ پارتو حل می‌کند و دیگری به طور هم‌زمان همهٔ راه حل‌های نامغلوب را جست‌وجو می‌کند [۱۹].



شکل ۱. منحنی پارتو برای به حداقل رساندن دو تابع هزینه به طور هم‌زمان [۱۶]

در نظریهٔ تصمیم‌گیری، روش جمع وزنی (WSM) شناخته‌شده‌ترین رویکرد تصمیم‌گیری چندهدفه است [۲۰]. استراتژی جمع وزنی، یک مسئلهٔ چندهدفهٔ کمینه کردن بردار توابع هدف را با جمع کردن توابع هدف نرمال‌شده، ضرب در ضرایب وزنی آن‌ها، به یک مسئلهٔ اسکالر تبدیل می‌کند. روش جمع وزنی به صورت [۲۱] فرموله شده است:

$$Minimize\, F_{WS}(x) = \sum_{i=1}^{k} \lambda_i \frac{f_i(x) - f_i(x)min}{f_i(x)max - f_i(x)min} \qquad (1)$$

که در آن $F_{WS}(x)$ تابع هدف مرکب است، k تعداد توابع هدف $f_i(x)$ و $\lambda_i \in [0,1]$ است که در آن $\sum_{i=1}^{k} \lambda_i = 1$. علاوه بر این، $f_i(x)min$ و $f_i(x)max$ به ترتیب حداقل و حداکثر مقادیر توابع هدف هستند، زیرا به طور مستقل بهینه شده‌اند.

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک تکنیک بهینه‌سازی تصادفی مبتنی بر جمعیت است که با گروهی از ذرات تصادفی مقداردهی اولیه می‌شود و سپس، با به‌روزرسانی نسل‌ها به دنبال بهینه می‌گردد. در هر نسل، هر ذره با دو بهترین مقدار به‌روز می‌شود که به این صورت، بهترین مقدار یک بهینهٔ سراسری به دست می‌آید. هنگامی که یک ذره بخشی از جمعیت را به عنوان همسایه‌های توپولوژیکی خود می‌گیرد، بهترین مقدار همان بهترین مقدار محلی است. پس از یافتن دو بهترین مقدار، سرعت و موقعیت یک ذره می‌تواند به‌روز شود [۲۲]. موقعیت $x_i(t)$ با اضافه کردن سرعت آن، $v_i(t)$ به موقعیت فعلی محاسبه می‌شود، یعنی:

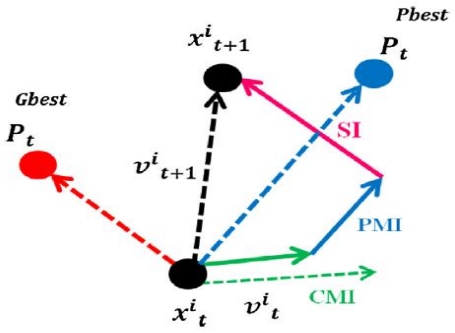
$$X_{i(t)} = X_{i(t-1)} + V_i(t) \qquad (2)$$

که در آن بردار سرعت به صورت رابطهٔ ۳ تعریف می‌شود:

$$V_i(t) = WV_i(t-1) C_1 r_1 \left[Pbest - X_i(t)\right] + C_2 r_2 \left[Gbest - X_i(t)\right] \qquad (3)$$

در اینجا w وزن اینرسی برای کنترل تأثیر سرعت ذرهٔ قبلی بر سرعت فعلی است. $C_1$1 عامل یادگیری شناختی است که نشان‌دهندهٔ جاذبه‌ای است که یک ذره به سمت موفقیت خود دارد. C_2 عامل یادگیری اجتماعی است که

نشان‌دهندهٔ جذب ذرات به سمت موفقیت همسایگان است. C_1 و C_2 معمولاً به عنوان ثابت‌های مثبت تعریف می‌شوند [۲۳]. علاوه بر این، r_1 و r_2 (که در بازهٔ [۰ و ۱] هستند) دو دنباله مستقل از اعداد تصادفی هستند که برای دور نگه داشتن از به دام افتادن در حداقل محلی و امکان واگرایی درصد کمی از ذرات در یک کاوش بزرگ‌تر در فضای جست‌وجو استفاده می‌شود [۲۴]. Pbest و Gbest بهترین موقعیت‌های محلی و سراسری هستند. شکل ۲ به‌روزرسانی سرعت و موقعیت را در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات نشان می‌دهد.



شکل ۲. به‌روزرسانی سرعت و موقعیت در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، رهبری که هر ذره برای به‌روزرسانی موقعیت خود استفاده می‌کند، پس از ایجاد توپولوژی همسایگی، کاملاً تعیین می‌شود. با این‌حال، در یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تک و چند هدفه، هر ذره دارای مجموعه‌ای از رهبران مختلف است. فقط یکی از آن‌ها می‌تواند برای به‌روزرسانی موقعیت ذرات استفاده شود. چنین مجموعه‌ای از رهبران در یک آرشیو خارجی ذخیره می‌شود. در نهایت، محتویات بایگانی خارجی به عنوان خروجی نهایی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تک و چند هدفه در قالب منحنی بهینهٔ پارتو گزارش می‌شود [۲۵].

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش فراابتکاری محبوب مبتنی بر جمعیت توانایی مقابله با مجموعه‌ای مجزا از متغیرهای طراحی، عدم نیاز به مشتقات توابع هدف و هم‌گرایی جهانی است که با ارزیابی ویژگی‌های خاص (ژنتیک میراث) فنوتیپ[1] آن را تشکیل می‌دهند. میراث ژنتیکی مجموعه‌ای از تمام پیشرفت‌های فناوری ممکن است که پوشش ساختمان و سیستم‌های ساختمان می‌توانند به آن دست یابند. فرد با محیطی که در آن «زندگی می‌کند»، یعنی شرایط اقلیمی و هزینه‌های انرژی شهری که ساختمان در آن قرار دارد، سازگار می‌شود. معیارهای مؤثر بر انتخاب و تنوع ژن‌ها، جمعیت را به تکامل، نسل‌به‌نسل، به ویژگی‌های بهینهٔ ژنومی مورد نیاز سوق می‌دهد. برای این منظور، الگوریتم ژنتیک بر اساس چهار عملگر ارزیابی، انتخاب، تلاقی ژنتیکی و جهش اجرا می‌شود و با توجه به نتایج ارائه‌شده توسط ارزیابی ممکن است اپراتور زیرمجموعه‌ای از والدین را انتخاب کند که تولید کنند و میراث ژنتیکی فرزندانشان از طریق متقاطع و جهش فنوتیپ‌ها بر اساس دو مکانیسم مختلف اجرا می‌شوند: یک فرایند ترکیبی از ژن‌ها، به لطف مشارکت کمک‌های والدین و جهش‌های ژنتیکی تصادفی. جهش‌ها ژن‌های جدیدی تولید می‌کنند: برخی از آن‌ها به نسل‌های آینده منتقل می‌شوند و برخی دیگر ناپدید می‌شوند. توجه به این نکته ضروری است که تغییراتی که از نسلی به نسل دیگر رخ می‌دهد، اندک است. با این‌وجود، تغییرات مثبت نسل‌به‌نسل انباشته می‌شوند (انتخاب تجمعی) و فنوتیپ‌های جدیدی که در مقایسه با نسل اولیه بسیار تغییر یافته‌اند، ظاهر می‌شوند. الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در این مطالعه را می‌توان به عنوان MOGA[2] طبقه‌بندی کرد و به طور خاص بر اساس نوع NSGA-II است [۲۶]. این الگوریتم رویکرد خاصی برای انتخاب فنوتیپ‌ها دارد: با تفکیک بهترین راه حل‌ها بر اساس چهار هدف تحمیلی پیش می‌رود. این فنوتیپ‌ها بخشی از نسل بعدی خواهند بود. این انتخاب فرایند بر اساس تسلط افراد انتخاب شده است. بنابراین، ژن‌هایی که عملکرد بدتری دارند حذف و جایگزین می‌شوند. هم انتشار راه حل‌ها و هم همگرایی به سمت راه حل‌های بهینه دنبال می‌شود.

نرم‌افزار شبیه‌سازی انرژی ساختمان

در این تحقیق از برنامهٔ شبیه‌سازی انرژی پلاس برای پیش‌بینی رفتار حرارتی ساختمان و مصرف انرژی استفاده شده است. انرژی پلاس یک برنامهٔ شبیه‌سازی مستقل و

1. Phenotype
2. Multi-Objective Genetic Algorithm

بـدون رابـط گرافیکـی کاربرپسـند اسـت کـه ورودی را می‌خواند و خروجی را به صورت فایـل متنـی مـی‌نویسـد. انرژی پلاس بارهـای سرمایشـی و گرمایشـی لازم را بـرای حفظ نقاط تنظـیم کنتـرل حرارتـی، سیسـتم گرمـایش و تهویهٔ هوای ثانویه و بارهای کویل و مصرف انرژی تجهیزات اولیه محاسبه می‌کند [۲۷]. همچنین، jEPlus به طراحـان ساختمان کمک می‌کند تـا مطالعـهٔ پـارامتری را بـا مـدل انرژی پلاس تنظـیم کننـد و شـبیه‌سـازی‌هـا را در حالـت موازی انجام دهند [۲۸].

ترکیب الگوریتم انرژی پـلاس و الگـوریتم بهینـه‌سـازی ازدحام ذرات تک و چند هدفه با ژنیک

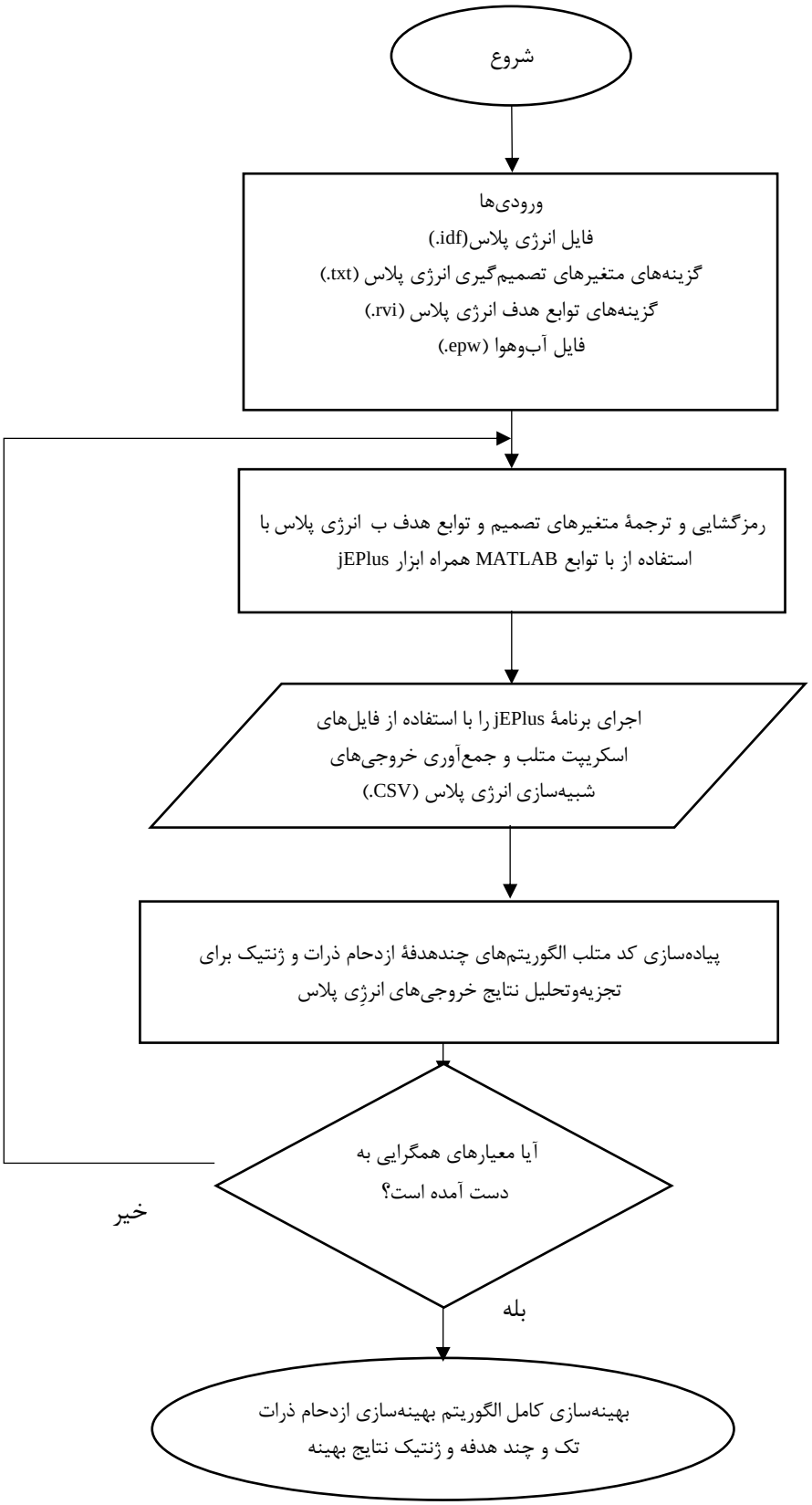
بـه منظـور پیـاده‌سـازی مسـئلهٔ بهینـه‌سـازی مبتنـی بـر شبیه‌سازی، کد الگوریتم‌هـای بهینـه‌سـازی ازدحـام ذرات چندهدفـه و ژنتیـک نـوع NSGA-II در محـیط متلـب برنامه‌نویسی شده است. درخور یادآوری است کـه ارزیـابی توابع هدف مستقیم از فایـل‌هـای خروجـی انـرژی پـلاس بازیابی می‌شود. به بیان دیگر، متلـب بـا انـرژی پـلاس بـه عنوان یک تابع جعبه‌سیاه سروکار دارد. بنابراین، لازم است بین برنامه‌های انرژی پلاس و متلب ارتباط برقـرار شـود. از طریـق یـک نـوآوری، توابـع کوپلینـگ در محـیط متلـب برنامه‌ریزی شده‌اند تا ابزار jEPlus را به عنوان رابطی با نرم افزار شبیه‌سازی انـرژی پـلاس راه‌انـدازی کننـد. در توابـع دسـتور اسـکریپت، مقـادیر تصـمیم در نـرم‌افـزار jEPlus جـایگزین مـی‌شـوند. پـس از آن، انـرژی پـلاس بـرای شـبیه‌سـازی مصـرف انـرژی سـالانهٔ سـاختمان اسـتفاده می‌شود. به این ترتیب، انرژی پـلاس را مـی‌تـوان بـه طـور کامل توسط محیط متلب کنترل کرد و به ابزاری قدرتمند برای بهینه‌سازی چندهدفهٔ عملکرد ساختمان دست یافـت. اتصال متلب با انرژی پلاس با استفاده از jEPlus بسیاری از معایب سایر ابزارهای بهینه‌سازی ساختمان‌هـای موجـود را برطـرف مـی‌کنـد. بـا روش پیشـنهادی مـی‌تـوان تـوان و قابلیت‌های انرژی پلاس در شبیه‌سازی انرژی سـاختمان را با توان متلب در کنتـرل و بهینـه‌سـازی ترکیـب کـرد. بـه این‌ترتیب، بهینه‌سازی مسائل ساختمان با استفاده از همـهٔ الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری را می‌توان پیاده‌سـازی کرد. شکل ۳ چارچوب بهینه‌سـازی ایـن تحقیـق را نشـان می‌دهد. علاوه بر این، در شکل ۴، طرح الگوریتم کوپلینگ متلب و انرژی پلاس نشان داده شده است.

یافته‌ها

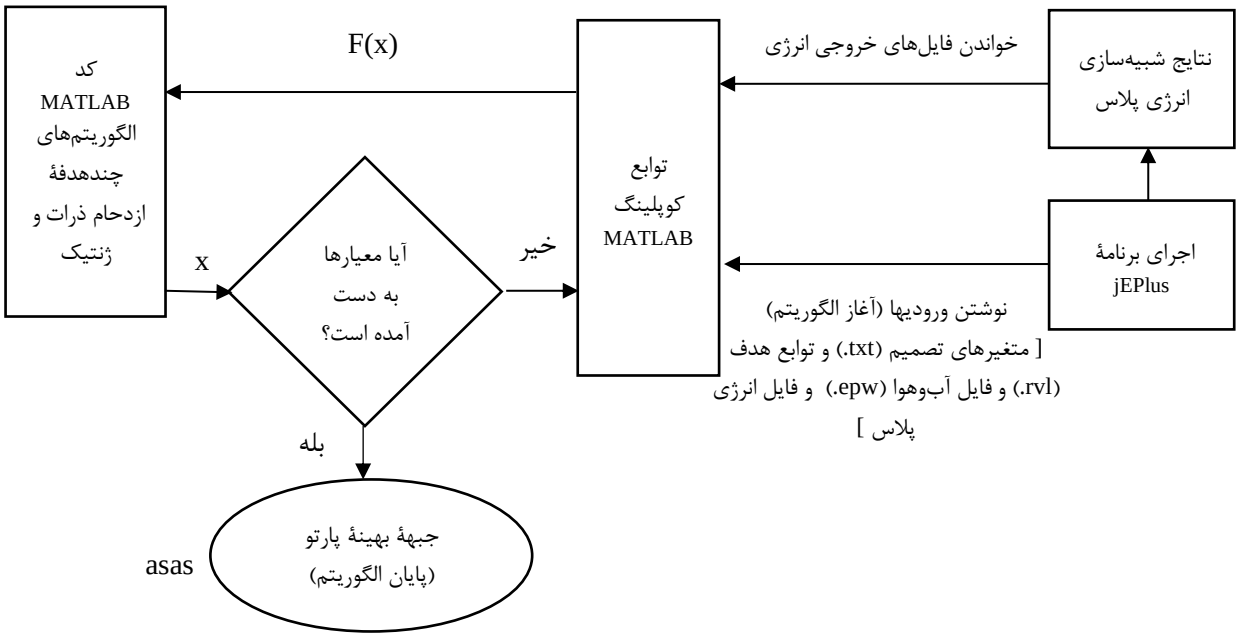
توصیف مدل ساختمان

بـه منظـور ارزیـابی قابلیـت و اثربخشـی رویکردهـای بهینه‌سازی پیشنهادی، روش‌های توسعه‌یافته در یک اتـاق آزمایشی منطقهٔ حرارتی منفرد در یک ساختمان چندطبقه برای بررسی تأثیر پارامترهای طراحی معماری بـر مصـرف انرژی اتاق در چند منطقهٔ مختلف آب‌وهوایی ایران اعمـال می‌شود. شکل ۵ نمای شماتیک معمـاری اتـاق پایـه را بـر اساس مدل‌سازی سه‌بعدی و تعریـف هندسـه سـاختمان و ناحیـهٔ حرارتـی را نشـان مـی‌دهـد کـه در ایـن مـدل از ساختمان، تنها دیوار جنوبی اتاق در معرض نور خورشید و هوای بیرون قرار دارد. جهت‌گیری مدل بر حسب درجه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت است. برنامـهٔ شـبیه‌سـازی انـرژی سـاختمان انـرژی پـلاس کـه بـرای مـدل‌سـازی ویژگـی‌هـای ترمـوفیزیکی پوشـش سـاختمان، سیسـتم سایه‌بان، نور مصنوعی و سنسور کنترل‌کنندهٔ نور روز اتاق، و سیستم گرمایش و تهویه و ترموستات ناحیهٔ آن اسـتفاده می‌شود. طول، عرض و ارتفاع اتاق ۳ متر است. دارای یـک پنجرهٔ دولایهٔ شفاف با فضای هوای ۱۳ میلی‌متـری مجهـز به سایه‌بان است. هیچ پرده‌ای برای پنجره در نظـر گرفتـه نشده است. فرض بر ایـن اسـت کـه سـاختمان مجهـز بـه سیستم تهویهٔ مطبوع پمپ حرارتی پایانهٔ بسته‌بنـدی‌شـده PTHP[1] با COP= ۳ در حالت گرمایش و COP= ۲,۷۵ در حالـت سـرمایش اسـت. دمـای نقطـهٔ تنظـیم گرمـایش و سـرمایش ترموسـتات منطقـه بـه‌ترتیـب ۲۰ و ۲۷ درجـهٔ سانتی‌گراد است. اتاق مجهز بـه سیسـتم روشـنایی لامـپ فلورسنت فشرده ۹۰ CFL واتی است. علاوه بر ایـن، مـدل دارای یک سنسور کنترل‌کنندهٔ روشنایی روز اسـت؛ یعنـی هنگامی که روشنایی بالاتر از ۵۰۰ لوکس باشد، نیـازی بـه نور مصـنوعی نباشـد و سیسـتم روشـنایی خـاموش شـود. جدول ۱ خصوصیات فیزیکی اتاق مورد نظر را که در چنـد منطقهٔ ایران نشان می‌دهد.

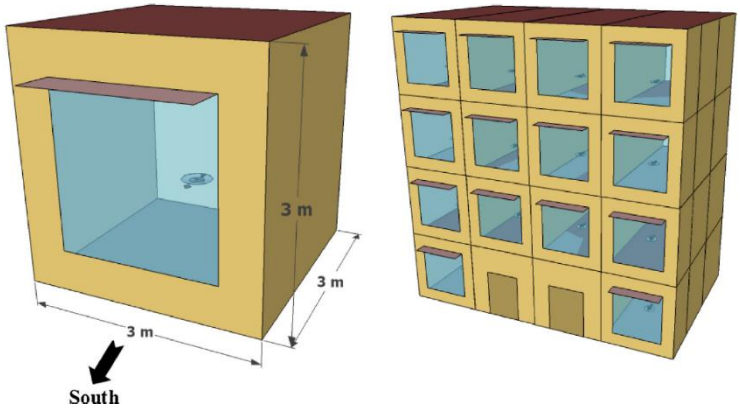
1. packaged terminal heat pump



شکل ۳. فلوچارت روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی



شکل ۴. روش کوپلینگ MATLAB و انرژی پلاس با استفاده از jEPlus



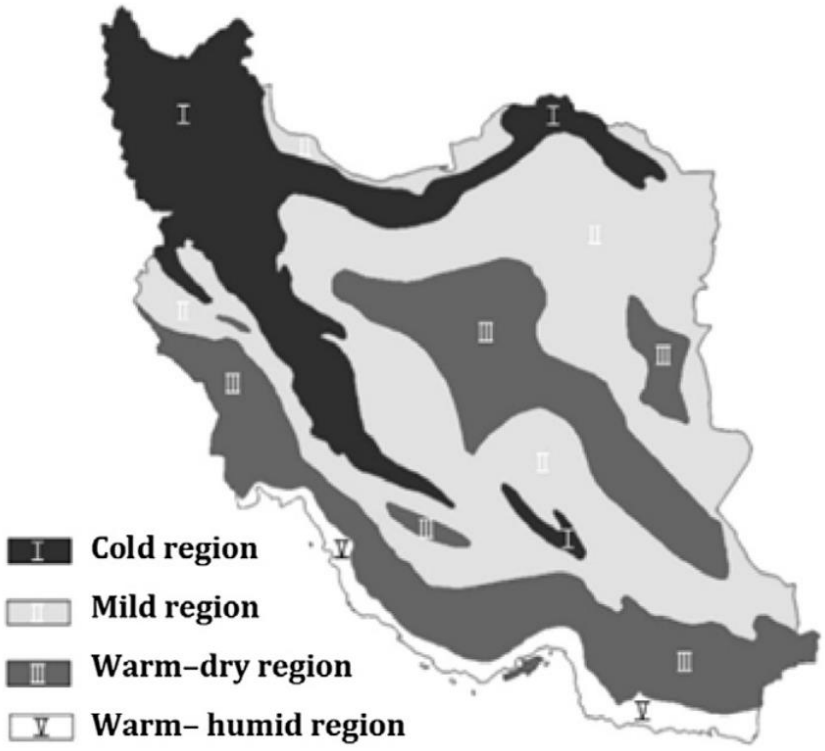
شکل ۵. نمای شماتیک مدل اولیه ساختمان

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی اتاق مورد نظر

جزء	ویژگی	مقدار
دیوار	رسانایی	۰/۵۷
	ضخامت	۰/۲
	گرمای ویژه	۷۹۰
	تراکم	۱۱۲۰
کف / سقف	رسانایی	۱/۱۱
	ضخامت	۰/۱
	گرمای ویژه	۹۲۰
	تراکم	۸۰۰

مناطق اقلیمی ایران

ایران دارای آب‌وهوای متنوعی از سرد تا گرم و از خشک تا مرطوب است. در مقالهٔ حاضر، شهرهای اردبیل، تهران، یزد و بوشهر به‌ترتیب به عنوان شهرهای نماینده برای آب‌وهوای سرد، معتدل، گرم- خشک و گرم- مرطوب این مناطق اقلیمی انتخاب شده‌اند که در جدول ۲ خلاصه شده است. شکل ۶ چهار اقلیم کشور ایران را نشان می‌دهد.



شکل ۶. مناطق آب‌وهوایی ایران

جدول ۲. ویژگی‌های شهرهای منتخب

شهر	آب‌وهوا	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع
اردبیل	سرد	۳۷,۸۰	۴۶,۲۵	۱۳۶۱
تهران	ملایم	۳۵,۶۸	۵۱,۳۰	۱۱۹۱
یزد	گرم خشک	۳۰,۲۵	۵۶,۹۷	۱۷۵۴
بوشهر	گرم مرطوب	۲۷,۲۰	۵۶,۱۵	۱۰,۰۰

توابع هدف و متغیرهای تصمیم‌گیری

در این تحقیق سه هدف بهینه‌سازی شامل تقاضای برق سالانهٔ سرمایشی، گرمایشی و روشنایی مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی مصرف انرژی اتاق مطالعهٔ موردی در نظر گرفته شده است. هدف شناسایی تعاملات بین توابع هزینه و به حداقل رساندن کل تقاضای انرژی سالانهٔ ساختمان است. مسئلهٔ بهینه‌سازی شامل هفت پارامتر پیوسته است، از جمله جهت قرارگیری ساختمان، اندازهٔ پنجره، مشخصات سایه‌بان، و لعاب و رسانایی دیوار. همچنین، شامل پنج متغیر تصمیم گسسته مربوط به خواص جذب حرارتی، خورشیدی و مرئی دیوار و ویژگی‌های عبوری خورشیدی و قابل رؤیت است. در کار فعلی، مقادیر پارامترهای گسسته برای مشخصات دیوار و شیشه بر اساس پایگاه‌های داده ارائه‌شده توسط [۲۹] انرژی پلاس (یعنی پایگاه‌های اطلاعاتی مواد ASHRAE) تعریف می‌شوند. دورنلس و همکاران [۳۰] داده‌های

میانگین جذب خورشیدی سطوح رنگ‌شده با زبری‌های مختلف را برای محدودهٔ طیف خورشیدی به منظور درک رفتار طیفی سطوح در طول‌موج‌های مختلف ارائه کردند. بنابراین، در این مطالعه، پارامترهای گسسته مربوط به ویژگی‌های جذب دیوار بر اساس کار پژوهشی دورنلس و همکاران تجزیه‌وتحلیل می‌شود. جدول ۳ فهرستی از متغیرهای تصمیم مورد استفاده در این مطالعه و همچنین، مقدار اولیه و دامنه تغییرات آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳. فهرستی از متغیرهای تصمیم

نام متغیر	واحد	دامنه	مقدار	مقدار اولیه
جهت‌گیری ساختمان	۰	پیوسته	[۰,۳۶۰)	۰
طول پنجره	m	پیوسته	(۰,۳)	۲
ارتفاع پنجره	m	پیوسته	(۰,۳)	۲
گذرگاه خورشیدی لعاب	-	گسسته	۵۶,۱۵	۰/۷۷۵
ضریب عبور قابل مشاهده لعاب	-	گسسته		۰/۸۸۱
رسانایی لعاب	W/m K	پیوسته	[۰,۱و۱]	۰/۹
جذب حرارتی دیوار	-	گسسته		۰/۹
جذب خورشیدی دیوار	-	گسسته		۰/۷
جذب قابل مشاهدهٔ دیوار	-	گسسته		۰/۷
رسانایی دیوار	W/m K	پیوسته	[۰,۱و۱]	۰/۵۷
زاویه عنوان برآمدگی	۰	پیوسته	[۰,۱و۱۸۰]	۹۰
عمق برآمدگی	m	پیوسته	[۰و۰/۵]	۰/۳

تنظیم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

در این تحقیق از اندازه جمعیت و حداکثر تعداد نسل به‌ترتیب ۴۰ و ۲۵ استفاده شده و تلورانس آن ۰/۰۰۱ است. علاوه بر این، C1 و C2 برابر ۲ هستند و وزن اینرسی ۰/۵ با نرخ میرایی وزن اینرسی ۰/۹۹ انتخاب شده است. این پارامترهای کنترلی الگوریتم PSO با توجه به تخصص کارهای تحقیقاتی قبلی [۲۳ـ ۳۰] و همچنین، بر اساس برخی از پیش‌آزمون‌های انجام‌شده توسط نویسندگان برای به دست آوردن بهترین مبادله بین زمان محاسباتی و قابلیت اطمینان جبههٔ بهینهٔ پارتو انتخاب شده‌اند. علاوه بر این، تکامل جمعیت تا زمانی ادامه می‌یابد که حداقل یکی از معیارهای توقف برآورده شود، یعنی به حداکثر تعداد تکرار رسیده یا میانگین تغییر در گسترش جبههٔ بهینهٔ پارتو کمتر از تلورانس شود. درخور یادآوری است که با توجه به دامنهٔ تغییرات متغیرهای تصمیم، تعداد تنظیمات احتمالی پوشش ساختمان متعدد است، در حالی که حداکثر تعداد سناریوهای جست‌وجوشده توسط الگوریتم PSO برابر است با تعداد اندازهٔ جمعیت ضرب در تعداد حداکثر تکرار، که برابر با ۱۰۰۰ = ۲۵*۴۰ است. بنابراین، رویکرد بهینه‌سازی پیشنهادی منجر به کاهش قابل توجه زمان محاسباتی مورد نیاز در مقایسه با جست‌وجوی بی‌شمار می‌شود و بنابراین، صرفه‌جویی در زمان محاسباتی را تضمین می‌کند.

بحث و نتیجه‌گیری

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تک و چند هدفه

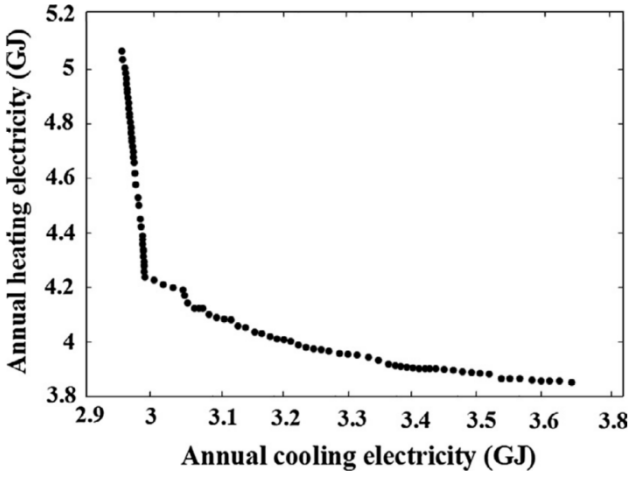
در این بخش، نتایج روش مورد نظر برای بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان ارائه شده است. در بخش اول نتایج، دو رویکرد برای مقابله با مسئلهٔ بهینه‌سازی در شهر تهران واقع در منطقهٔ آب‌وهوای معتدل ایران انجام شده است. هدف اصلی این قسمت درک تأثیر سرمایش، گرمایش و روشنایی بر کل مصرف برق و دیدن اینکه چگونه توابع هدف مختلف می‌توانند بر راه حل بهینه تأثیر بگذارند، است. اولین رویکرد مربوط به به حداقل رساندن مصرف برق سالانهٔ سرمایش، گرمایش و روشنایی به عنوان توابع هدف جداگانه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات تک‌هدفه است. در رویکرد دوم، بهینه‌سازی دوهدفه و سه‌هدفه توابع هزینه برای تحقق تعاملات آن‌ها و به دست آوردن همهٔ راه‌حل‌های بهینه و غیر غالب ممکن،

به طور هم‌زمان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این راستا، برای رویکرد بعدی، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تک و چند هدفه برای استخراج جبهه‌های بهینهٔ پارتو استفاده می‌شود. در بخش دوم نتایج، از روش جمع وزنی (WSM) برای انتخاب یک راه حل بهینه به منظور پیکربندی بهینهٔ نهایی در مناطق مختلف آب‌وهوایی ایران استفاده شده است. در نهایت، بر اساس نتایج، تأثیر ویژگی‌های اتاق بر عملکرد انرژی ساختمان در شرایط مختلف آب‌وهوایی به طور کامل مورد بحث قرار می‌گیرد.

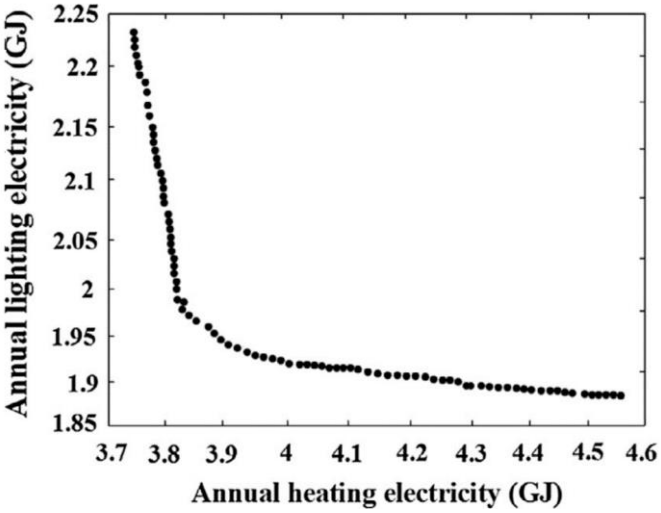
جدول ۴. نتایج بهینه‌سازی تک‌هدفه

تابع هدف	ارزش پایه(CJ)	انتخاب مبتنی بر خنک‌کننده		انتخاب مبتنی بر گرمایش		انتخاب مبتنی بر روشنایی	
		ارزش (GJ)	اختلاف (٪)	ارزش (GJ)	اختلاف (٪)	ارزش (GJ)	اختلاف (٪)
برق خنک‌کنندهٔ سالانه	۳,۹۹	۲,۸۲	-۲۹,۳	۴,۷	+۱۷,۸	۵,۹۴	+۴۸,۹
برق گرمایش سالانه	۴,۰۲	۵,۳۸	+۳۳,۶	۳,۷۲	-۷,۷	۴,۷۶	+۱۸,۴
برق روشنایی سالانه	۱,۸۹	۱,۸۹	۲,۳۷	+۲۵,۴	۱,۹۲	۱,۸۶	-۱,۶
کل برق سالانه	۹,۹	۱۰,۵۶	+۶,۷	۱۰,۳۴	+۴,۵	۱۲,۵۶	+۲۶,۹

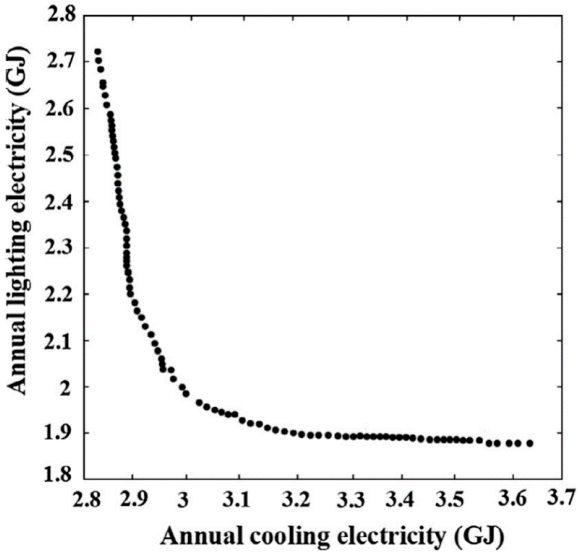
با توجه به نتایج، با حداقل‌سازی بار سرمایشی، مصرف برق سرمایشی سالانه حدود ۲۹/۳ درصد کاهش می‌یابد، در حالی که تقاضای برق گرمایشی و روشنایی سالانه به‌ترتیب ۳۳/۶ و ۲۵/۴ درصد در مقایسه با مدل پایه افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، در تحلیل کمینه‌سازی بر اساس مصرف سالانهٔ برق گرمایشی، نتایج نشان می‌دهد مصرف برق گرمایشی سالانه ۷/۷ درصد کاهش می‌یابد. در مقابل، مصرف برق سالانهٔ سرمایشی و روشنایی به‌ترتیب ۱۷/۸ و ۱/۶ درصد در مقایسه با مدل پایه افزایش یافته است. همان‌طور که در جدول ۴ آمده است، اگر کمینه‌سازی بر اساس مصرف برق روشنایی سالانه باشد، در مقایسه با مدل پایه ۱/۶ درصد کاهش می‌یابد که به‌ترتیب منجر به افزایش ۴۸/۹ و ۱۸/۴ درصدی مصرف برق سالانهٔ سرمایشی و گرمایشی می‌شود. در نتیجه، در این رویکرد، دو آیتم بسیار افزایش می‌یابند، در مقابل آیتم سوم که کمی کاهش می‌یابد. علاوه بر نکات یادشده، بر اساس نتایج، مصرف کل انرژی سالانه ۴/۵ـ ۲۶/۹ درصد نسبت به مدل اولیه افزایش می‌یابد. از این نظر، می‌توان به‌وضوح استنباط کرد که در بهینه‌سازی تک‌هدفه مدل اتاق معمولی ما، نه تنها امکان کاهش هر سه تابع هدف به طور هم‌زمان وجود ندارد، بلکه منجر به افزایش چشمگیر مصرف کل انرژی سالانه می‌شود. به طور کلی، نتایج تجزیه‌وتحلیل بهینه‌سازی تک‌هدفه ایده‌ای در مورد تعاملات بین سه تابع هدف به دست می‌دهد. رویکرد چندهدفه در این قسمت به منظور بررسی تعاملات توابع هدف، هر بار دو هدف از توابع هدف یعنی مصرف برق سالانهٔ سرمایش، گرمایش و روشنایی انتخاب می‌شود. در این حالت، فرایند بهینه سازی یک آرشیو از پیکربندی های آزمایش‌شده ایجاد می‌کند و یک سری نقاط بهینه را برمی‌گرداند که راه‌حل‌های پارتو هستند. شکل‌های ۷ــ ۹ نتایج بهینه‌سازی دوهدفهٔ الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تک و چند هدفه را در قالب منحنی‌های بهینهٔ پارتو ادغام می‌کند، که به‌وضوح تضاد بین جفت توابع هدف را نشان می‌دهد. این نقاط بهینه، نقاط ایده‌آلی هستند که در آن هر دو تابع هدف، مستقل از تابع سوم، مقادیر بهینه خود را دارند. علاوه بر این، شکل ۱۰ نتایج بهینه را با هدف سه‌گانه در قالب سه‌بعدی پارتو نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، با کاهش یکی از اهداف، اهداف دیگر افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، کمینه کردن همهٔ توابع هدف به طور هم‌زمان غیرممکن است - نه در بهینه‌سازی دوهدفه و نه در یک هدف سه‌گانه.



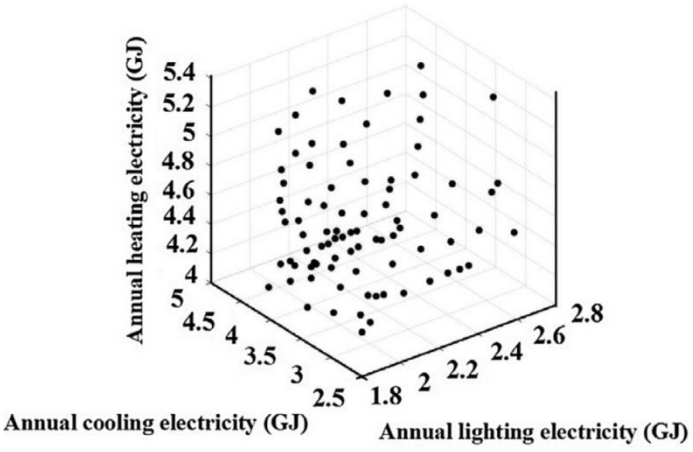
شکل ۷. بهینه‌سازی دوهدفهٔ سرمایش- گرمایش در تهران



شکل ۸. بهینه‌سازی دوهدفهٔ گرمایش- روشنایی در تهران



شکل ۹. بهینه‌سازی دوهدفهٔ سرمایش- روشنایی در تهران



شکل ۱۰. جبههٔ پارتو در بهینه‌سازی سه‌هدفه در تهران

هنگامی که بهینه‌سازی کامل شد و مجموعه راه حل بهینهٔ پارتو به دست آمد، فرایند تصمیم‌گیری باید برای تعیین یک راه حل ترجیحی واحد انجام پذیرد. تصمیم‌گیری به پارامترهای زیادی بستگی دارد از جمله تجارب مهندسی، ویژگی‌ها و عملکرد سیستم، اهمیت نسبی توابع هدف، و حساسیت راه حل‌های بهینه به پارامترهای ورودی. در نتیجه، طراحان و مهندسان ممکن است پارامترهای طراحی بهینه را بر اساس نیازها و علایق واقعی خود انتخاب کنند. این مقاله بر استفاده از روش جمع وزنی برای تعیین یک راه حل بهینهٔ واحد برای مسئلهٔ بهینه‌سازی سه‌هدفه متمرکز شده است، یعنی انتقال سه هدف به یک هدف واحد با استفاده از معادلهٔ ۴.

$$F_{WS}(x)=\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\lambda_i \frac{f_i(x)-f_i(x)min}{f_i(x)max-f_i(x)min} \qquad (۴)$$

از آنجا که تمام انرژی مصرفی به صورت الکتریسیته است، می‌توان فرض کرد که تمام توابع هدف به طور مساوی وزن دارند. جدول‌های ۵ و ۶ پارامترهای طراحی بهینه و نتایج توابع هدف متناظر مسئله بهینه‌سازی سه‌هدفه را در چهار منطقهٔ عمده آب‌وهوایی ایران نشان می‌دهد. پارامترهای بهینهٔ ساختمان در جدول‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد در تمام اقلیم ها، جهت پنجرهٔ اتاق به سمت شرق- یعنی دریافت بیشترین انرژی روشنایی از بیرون به منظور کاهش مصرف انرژی الکتریکی روشنایی- مناسب‌ترین جهت است.

جدول ۵. پارامترهای طراحی بهینه برای چهار منطقهٔ آب‌وهوایی ایران

نام متغیر	واحد	بوشهر	یزد	تهران	اردبیل
جهت‌گیری ساختمان	۰	۲۷۸	۲۶۶	۲۶۷	۲۷۰
طول پنجره	m	۱/۴۸	۱/۵	۱/۶	۲
ارتفاع پنجره	m	۰/۶۸	۰/۸۷	۰/۹۳	۱
گذرگاه خورشیدی لعاب	۰/۴۳	۰/۶	۰/۶۵۳	۰/۸۹۹	۰/۹۴۶
ضریب عبور قابل مشاهده لعاب	-	۰/۷۷	۰/۸۴	۰/۸۴۱	۰/۹۱۳
رسانایی لعاب	W/m K	۰/۱۳	۰/۱	۰/۱۱	۰/۱۱
جذب حرارتی دیوار	-	۰/۱۸۲	۰/۵۲۶	۰/۲۶۹	۰/۲۲۲
جذب خورشیدی دیوار	-	۰/۱۹۴	۰/۵۱۳	۰/۲۸۸	۰/۲۶۷
جذب قابل مشاهدهٔ دیوار	-	۰/۱	۰/۳۷۴	۰/۲۴۴	۰/۳۲۴
رسانایی دیوار	W/m K	۰/۱	۰/۱۱	۰/۱	۰/۱۲
زاویه عنوان برآمدگی	۰	۶۹	۶۰	۶۳	۶۱
عمق برآمدگی	m	۰/۴۱	۰/۴	۰/۴۳	۰/۳۹

جدول ۶. مقدار بهینهٔ توابع هدف برای چهار منطقهٔ آب‌وهوایی ایران

شهر	تابع هدف	ارزش پایه (GJ)	ارزش انتخابی (GJ)	اختلاف(٪)
بوشهر	برق خنک‌کنندهٔ سالانه	۶/۷۷	۵/۴۳	-۱۹/۸
	برق گرمایش سالانه	۲/۱	۲/۲	+۴/۸
	برق روشنایی سالانه	۱/۸۹	۱/۹۲	+۱/۶
	کل برق سالانه	۱۰/۷۶	۹/۵۵	-۱۱/۳
یزد	برق خنک‌کنندهٔ سالانه	۲/۲۸	۱/۶۶	-۲۷/۲
	برق گرمایش سالانه	۵/۲۸	۵/۴	+۲/۳
	برق روشنایی سالانه	۱/۹۱	۱/۹۲	+۰/۵
	کل برق سالانه	۹/۴۷	۸/۸۹	-۵/۲
تهران	برق خنک‌کنندهٔ سالانه	۳/۹۹	۳/۱	+۲۲/۳
	برق گرمایش سالانه	۴/۰۲	۴/۴	+۹/۵
	برق روشنایی سالانه	۱/۸۹	۱/۹۳	+۲/۱
	کل برق سالانه	۹/۹	۹/۴۳	-۴/۸
اردبیل	برق خنک‌کنندهٔ سالانه	۱/۵	۱	-۳۳/۳
	برق گرمایش سالانه	۱۱/۸	۱۲	+۱/۷
	برق روشنایی سالانه	۱/۹	۱/۹۵	+۲/۶
	کل برق سالانه	۱۵/۲	۱۴/۹۵	-۱/۶

علاوه بر این، اندازهٔ پنجرهٔ بهینه از آب‌وهوای گرم به سرد بزرگ‌تر می‌شود تا در فصل سرد انرژی بیشتری از خورشید دریافت کند. به علاوه، ضریب عبور خورشیدی و مرئی بهینه از آب‌وهوای گرم به سرد افزایش می‌یابد تا انرژی گرمایشی و نور روز بیشتری از بیرون به دست آید. علاوه بر این، در تمام اقلیم‌ها، لعاب و رسانایی دیوار نزدیک به حداقل مقادیر ممکن است. در تجزیه‌وتحلیل خواص جذب بهینهٔ مواد دیوار، رنگ‌های پیشنهادی برای پوشش دیوارها برای آب‌وهوای گرم و مرطوب، گرم و خشک، معتدل و سرد، به‌ترتیب عبارت‌اند از: سفید برفی، پوشالی، صدفی و زرد قناری. به بیان دیگر، رنگ آن از اقلیم گرم به سرد تیره‌تر می‌شود تا انرژی حرارتی بیشتری از خورشید دریافت شود تا مصرف انرژی سالانه تا حد امکان کاهش یابد. نتایج مشخصات بهینهٔ سایه‌بان تا حدودی در همهٔ مناطق آب‌وهوایی مشابه است، با عمق ۰/۳۹ـ ۰/۴۳ متر و زاویهٔ شیب ۶۰-۶۹. شرایط مختلف آب‌وهوایی تأثیر قابل توجهی بر تقاضای انرژی ساختمان نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، از آب‌وهوای سرد به گرم مصرف بهینه انرژی سرمایشی از ۱ تا ۵/۴۳ GJ افزایش می‌یابد و مصرف بهینهٔ انرژی گرمایشی از ۱۲ به ۲/۲ GJ کاهش می‌یابد. بنابراین، ساختمانی در اردبیل که در اقلیم سرد قرار دارد، بیشتر به دلیل تقاضای بیش از حد انرژی گرمایشی، بیشتر از یک ساختمان در سایر شهرها برق مصرف می‌کند. با این‌حال، نیاز بهینهٔ انرژی روشنایی کمی بین ۱/۹۲ تا ۱/۹۵ GJ در اقلیم‌های مختلف متفاوت است، به این معنا که کمتر از دو مورد دیگر تحت تأثیر شرایط آب‌وهوایی قرار می‌گیرد. نتایج بهینه‌سازی سه‌هدفه برای شرایط مختلف آب‌وهوایی نشان می‌دهد، مصرف برق سرمایشی سالانه ۱۹/۸ تا ۳۳/۳ درصد کاهش می‌یابد، در حالی که گرمایش و روشنایی سالانه به‌ترتیب ۱/۷ـ ۴/۸ درصد و ۰/۵ـ ۲/۶ درصد نسبت به مدل اتاق اولیه افزایش می‌یابد. در نتیجه، طراحی بهینه منجر به کاهش ۱/۶ تا ۱۱/۳ درصدی کل تقاضای برق سالانهٔ ساختمان برای چهار منطقهٔ مختلف آب‌وهوایی ایران می‌شود. همچنین، بیشترین تغییر در مصرف انرژی سرمایشی مربوط به اقلیم سرد با مقدار ۳۳/۳ درصد است، در حالی که تقاضای انرژی گرمایشی با ۱/۷ درصد کمترین تغییر را داشته است. به طور مشابه، کمترین تغییر تقاضای انرژی سرمایشی در شرایط آب‌وهوایی گرم با مقدار ۱۹/۸ درصد است، در حالی که مصرف انرژی گرمایشی با ۴/۸ درصد بیشترین مقدار را دارد. از این نظر می‌توان به‌وضوح استنباط کرد که اهداف سرمایش و گرمایش کاملاً با

یکدیگر مخالف هستند. در نهایت، تغییرات کل مصرف انرژی سالانه از اقلیم گرم به سرد کمتر می‌شود. علاوه بر این، در بهینه‌سازی تک‌هدفه مدل معمولی این تحقیق در تهران، کل تقاضای برق سالانهٔ ساختمان از ۴/۵ به ۲۶/۹ درصد برای توابع هزینه‌های مختلف به‌شدت افزایش یافت، در حالی که در مسئلهٔ حداقل‌سازی با هدف سه‌گانه، ۴/۸ درصد نسبت به مدل پایه کاهش یافت. بر این اساس، استنباط می‌شود که استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه ممکن است منجر به طراحی مطلوب‌تر و کارآمدتر نسبت به روش‌های تک‌هدفه شود. از بحث بالا در مورد رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه، می‌توان نتیجه گرفت که مشابه با حالت تک‌هدفه، برای مدل معمولی اتاق این تحقیق، تغییرات مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی سالانه بسیار بیشتر از روشنایی است و نمی‌توان هر سه تابع هزینه را به طور هم‌زمان به حداقل رسانید.

الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

در مرحلهٔ طراحی، مراقبت ویژه‌ای در شناسایی مداخلات مقاوم‌سازی احتمالی انجام شد تا بتوان به صورت عددی وزن هر مداخله را تا سطح بهینه به‌دست‌آمده تعیین کرد که اطلاعات مربوط به عملکرد اتاق مورد نظر و آب‌وهوای شهرهای منتخب با استفاده از الگوریتم ژنتیک توسعه‌یافته پیاده‌سازی شده است. هر مداخلهٔ مقاوم‌سازی درنظرگرفته‌شده توسط الگوریتم، ویژگی‌های «ژنتیکی» ساختمان را تغییر می‌دهد. ویژگی‌های هر ژن بر عملکرد انرژی پوشش ساختمان و سیستم‌ها تأثیر می‌گذارد. با تغییر ژن‌ها ساختمان جدیدی ایجاد می‌شود. این ساختمان که متعلق به نسل بعدی است، انرژی کمتری مصرف خواهد کرد. این تغییرات برای هر ژن مشخص‌کنندهٔ ساختمان ارزیابی می‌شود. مداخلات احتمالی روی پوشش ساختمان و سیستم‌ها به این صورت است که: ژن ۱: سطوح پنجره‌ها با پنجره‌های کم‌مصرف‌تر جایگزین خواهند شد و ژن ۲: اعمال پوشش عایق حرارتی روی ساختمان، صرفه‌جویی در انرژی متناسب با ضخامت بهبود می‌یابد و ... مناطق جغرافیایی، داده‌های آب‌وهوایی، مصرف منابع انرژی ساختمان برای اقلیم‌های مختلف نمایندهٔ مناطق مختلف ایران ارزیابی شده است. مکان‌ها به منظور برآوردن شرایط آب‌وهوایی مختلف انتخاب شده‌اند. بر این اساس، داده‌ها طی یک اجرای ژنتیک در هر مکان با توجه به پارامترهای ذیل تولید شدند: ۵۵ نسل؛ ۴۰ ساختمان در هر نسل؛ احتمال تغییر حداقل یک ژن برای ایجاد a فرد جدید ۴۰ درصد بود. این پارامترها پس از چندین تلاش برای به دست آوردن a انتخاب شدند، مرز پارتو که تا حد امکان گسترده و همگن بود. جدول ۸ مقادیری را که هر ژن بهینه‌شده برای مکان مورد تجزیه‌وتحلیل ارائه می‌دهد. همچنین، نتایج هم به راه‌حل بهینه‌سازی‌شده (جدول ۷)، و هم به راه‌حلی که حداقل مقدار مطلق نیاز انرژی ویژهٔ سالانه را برای هر مکان (بدون در نظر گرفتن سایر معیارها) ارائه می‌کند، اشاره دارد.

جدول ۷. مقادیر ژن‌ها برای راه حل‌های بهینهٔ انتخاب‌شده برای هر چهار منطقهٔ آب‌وهوایی ایران

شهر	ژن ۱	ژن ۲	ژن ۳	ژن ۴	ژن ۵	ژن ۶	ژن ۷	ژن ۸	ژن ۹	ژن ۱۰	ژن ۱۱
	[–]	[cm]	[cm]	[%]	[Boolean]	[Boolean]	[Boolean]	[Boolean]	[n°]	[m2]	[°]
بوشهر	A	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳۰	خیر	خیر	خیر	خیر	۰	۰	-
یزد	A	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۲۰	خیر	بله	خیر	خیر	۲۵	۳۳/۰۰	۴۵
تهران	D	۰/۱۲	۰/۱۰	۰/۱۰	خیر	خیر	خیر	خیر	۲۵	۵/۰۰	۳۵
اردبیل	A	۰/۱۳	۰/۱۰	۰/۱۵	خیر	بله	خیر	خیر	۲۵	۷/۰۰	۳۵

شناسایی راه‌حل‌های بهینه از طریق الگوریتم‌های ژنتیک ارائه‌شده برای هر شهر (که با داده‌های اقلیمی خاص، مصارف انرژی مشخص می‌شود) پیکربندی‌های مختلف ساختمان. این تغییرات ژنتیکی مجموعه‌ای از نقاط را در فضای ۴ بعدی (R4) مشخص می‌کند که معیارهای مورد استفاده برای انتخاب را نشان می‌دهد. در جدول ۷ می‌توان فهمید که چه ترکیبی از راه حل‌های فنی باید طی بهسازی انرژی ساختمان اتخاذ شود. مقادیر بهینه برای هر ژن این امکان را می‌دهد که چگونه برخی از مداخلات ممکن است بر اساس آب‌وهوا و هزینه‌های آن‌ها سودمندتر باشند. به عنوان مثال، ژن ۱ آب‌وهوای سرد منجر به راه حل‌هایی با پنجره‌های بسیار کارآمد می‌شود. ژن ۲ نشان

می‌دهد با عرض‌های جغرافیایی بالا، پوشش عایق برای پوشش ساختمان دارای نسبت سودمندی هزینه / مزایا است. ژن ۳ پوشش عایق بالاتری را نشان می‌دهد و ... شرایط آب‌وهوایی مختلف، مصارف انرژی در نظر گرفته شد. پارامترهای فوق به‌شدت به کشور مورد بررسی وابسته هستند و بنابراین، مقایسهٔ مقادیر به‌دست‌آمده در کشورهای مختلف نشانه‌های مفیدی را ارائه می‌دهد. علاوه بر این، ضرورت انجام تجزیه‌وتحلیل‌های عمیق با استفاده از قابلیت‌های ارائه‌شده توسط استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک به عنوان راهی برای به دست آوردن ساختمان‌های پایدار تحت دیدگاه‌های مختلف (انرژی، زیست‌محیطی، اقتصادی) در زمینهٔ واقعی واضح است. در مطالعهٔ حاضر فنوتیپ ساختمان‌هایی که برای هر شهر قادر به بهبود هستند و همچنین کمینه‌سازی (در فضای ۴ بعدی) بردار فاصلهٔ نرمال‌شده و در نظر گرفتن تمامی معیارهای بهینه‌سازی پیکربندی ژنتیکی تعادل خوبی بین نیازهای انرژی، هزینه‌ها و مصارف را تضمین می‌کند. به عنوان یک نتیجهٔ کلی، پارامترهای طراحی معماری و همچنین، ارتفاع شرایط آب‌وهوایی مهم است و تأثیر محسوسی بر بازده انرژی ساختمان دارد، به طوری که با انتخاب پارامترهای معماری مناسب ساختمان بر اساس اقلیم، می‌توان مصرف انرژی را به‌شدت کاهش داد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک رویکرد قدرتمند برای بهینه‌سازی چندمتغیرهٔ مصرف انرژی ساختمان معرفی شد. برای اجرای بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، کد بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه در محیط متلب برنامه‌ریزی شد و با برنامهٔ انرژی پلاس از طریق ابزار مدیریت شبیه‌سازی پارامتریک jEPlus به عنوان رابط ایجاد فایل ورودی انرژی پلاس همراه شد. در مسئلهٔ بهینه‌سازی ارائه‌شده، پارامترهای طراحی جهت‌گیری اتاق، مشخصات سایه‌بان، اندازهٔ پنجره، لعاب و مشخصات دیوار بودند. علاوه بر این، سه تابع هدف شامل مصرف برق سالانهٔ سرمایشی، گرمایشی و روشنایی که کاملاً غیرخطی‌اند، در نظر گرفته شد. روش پیشنهادی با در نظر گرفتن چهار منطقهٔ اقلیمی ایران شامل گرم و مرطوب، گرم و خشک، معتدل و سرد در مدل یک اتاقی به کار گرفته شد. در بخش بهینه‌سازی، هر دو تحلیل بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه با هدف تحقق تعاملات تابع هزینه مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه با مدل پایه مقایسه شد. علاوه بر این، راه‌حل‌های بهینهٔ به‌دست‌آمده از مسئلهٔ بهینه‌سازی چندهدفه به عنوان جبهه‌های بهینه پارتو گزارش شد. نتایج بهینه‌سازی سه‌هدفه نشان داد با استفاده از روش مجموع وزنی، مصرف سرمایش سالانه ۱۹/۸ تا ۳۳/۳ درصد در مقایسه با مدل پایه بسته به منطقهٔ آب‌وهوایی کاهش یافت. در مقابل، مصرف برق سالانهٔ گرمایش و روشنایی به‌ترتیب ۱/۷ تا ۴/۸ درصد و ۰/۵ تا ۲/۶ درصد افزایش یافته است. در نتیجه، پیکربندی بهینهٔ نهایی منجر به کاهش ۱/۶ تا ۱۱/۳ درصدی کل مصرف برق سالانهٔ ساختمان برای چهار منطقهٔ آب‌وهوایی ایران می شود. علاوه بر این، بر اساس نتایج، اقلیم تأثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی سالانهٔ سرمایشی و گرمایشی ساختمان دارد، در حالی که تأثیر آن بر تقاضای برق سالانهٔ روشنایی ناچیز است. بنابراین، بدیهی است که پارامترهای طراحی معماری ساختمان و همچنین، شرایط اقلیمی در تعیین عملکرد انرژی ساختمان مهم و حیاتی است، به طوری که می‌توان با انتخاب پارامترهای طراحی معماری مناسب در مراحل اولیه، مصرف انرژی ساختمان را به‌شدت کاهش داد. روش پیشنهادی برای بهینه‌سازی یک مدل تک‌اتاقی، با در نظر گرفتن پارامترهای پوشش ساختمان به عنوان متغیرهای تصمیم و تقاضای انرژی ساختمان به عنوان توابع هزینهٔ هدف مورد استفاده قرار گرفت. با این‌حال، انتظار می‌رود که بتوان این روش را برای یک سیستم ساختمانی پیچیده‌تر، و با هدف نه‌تنها کاهش مصرف کل انرژی ساختمان، بلکه برای بهینه‌سازی سایر شرایط مهم عملکردی ساختمان (مانند آسایش حرارتی، اثرات زیست‌محیطی، و هزینه‌های سرمایه‌گذاری) به کار گرفت. بنابراین، اگر اهداف در مطالعات آتی گسترش یابد، ممکن است پارامترهای طراحی بیشتری در نظر گرفته شود. علاوه بر این، روش‌های تصمیم‌گیری چندجانبهٔ قوی مانند رویکردهای LINMAP، تکنیک برای ترتیب اولویت بر اساس شباهت به راه حل ایده‌آل[1]، و فازی ممکن است برای بررسی عملکرد روش‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

1. TOPSIS

منابع

[1]. Ferrara M, Fabrizio E, Virgone J, Filippi M. A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly Zero Energy Buildings. Energy and Buildings. 2014;84:442-57.

[2]. CHANGE OC. Intergovernmental panel on climate change. World Meteorological Organization. 2007;52.

[3]. Al-Homoud MS. Optimum thermal design of air-conditioned residential buildings. Building and Environment. 1997;32(3):203-10.

[4]. Pisello AL, Goretti M, Cotana F. A method for assessing buildings' energy efficiency by dynamic simulation and experimental activity. Applied Energy. 2012;97:419-29.

[5]. Bandara R, Attalage R, editors. Optimization methodologies for building performance modelling and optimization. 18th ERU symposium, Sri Lanka; 2012.

[6]. Zhang Y, Korolija I, editors. Performing complex parametric simulations with jEPlus. SET2010-9th International Conference on Sustainable Energy Technologies; 2010.

[7]. Nguyen A-T, Reiter S, Rigo P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. Applied energy. 2014;113:1043-58.

[8]. Ghodrati A, Zahedi R, Ahmadi A. Analysis of cold thermal energy storage using phase change materials in freezers. Journal of Energy Storage. 2022;51:104433.

[9]. Chantrelle FP, Lahmidi H, Keilholz W, El Mankibi M, Michel P. Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings. Applied Energy. 2011;88(4):1386-94.

[10]. Tuhus-Dubrow D, Krarti M. Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. Building and environment. 2010;45(7):1574-81.

[11]. Saporito A, Day A, Karayiannis T, Parand F. Multi-parameter building thermal analysis using the lattice method for global optimisation. Energy and buildings. 2001;33(3):267-74.

[12]. Gossard D, Lartigue B, Thellier F. Multi-objective optimization of a building envelope for thermal performance using genetic algorithms and artificial neural network. Energy and Buildings. 2013;67:253-60.

[13]. Yu W, Li B, Jia H, Zhang M, Wang D. Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design. Energy and Buildings. 2015;88:135-43.

[14]. Kim D-W, Park C-S, editors. Manual vs. optimal control of exterior and interior blind systems. Proceedings 11th International IBPSA Conference; 2009.

[15]. Ascione F, Bianco N, De Masi RF, Mauro GM, Vanoli GP. Design of the building envelope: A novel multi-objective approach for the optimization of energy performance and thermal comfort. Sustainability. 2015;7(8):10809-36.

[16]. Ascione F, Bianco N, De Stasio C, Mauro GM, Vanoli GP. A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance. Energy and Buildings. 2015;88:78-90.

[17]. Yong Z, Li-Juan Y, Qian Z, Xiao-Yan S. Multi-objective optimization of building energy performance using a particle swarm optimizer with less control parameters. Journal of Building Engineering. 2020;32:101505.

[18]. Zhang Y, Yuan L-j, Cheng S, editors. Building energy performance optimization: a new multi-objective particle swarm method. International Conference on Swarm Intelligence; 2019: Springer.

[19]. Sanaye S, Dehghandokht M. Modeling and multi-objective optimization of parallel flow condenser using evolutionary algorithm. Applied Energy. 2011;88(5):1568-77.

[20]. Ryu J-h, Kim S, Wan H, editors. Pareto front approximation with adaptive weighted sum method in multiobjective simulation optimization. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC); 2009: IEEE.

[21]. Marler RT, Arora JS. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. Structural and multidisciplinary optimization. 2004;26(6):369-95.

[22]. Stoppato A, Cavazzini G, Ardizzon G, Rossetti A. A PSO (particle swarm optimization)-based model for the optimal management of a small PV (Photovoltaic)-pump hydro energy storage in a rural dry area. Energy. 2014;76:168-74.

[23]. Reyes-Sierra M, Coello CC. Multi-objective particle swarm optimizers: A survey of the state-of-the-art. International journal of computational intelligence research. 2006;2(3):287-308.

[24]. Eberhart RC, Shi Y, editors. Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms. Proceedings of the 2001 congress on

evolutionary computation (IEEE Cat No 01TH8546); 2001: IEEE.

[25]. Chaudhary DK, Dua RL. Application of multi objective particle swarm optimization to maximize coverage and lifetime of wireless sensor network. Int J Comput Eng Res. 2012;2:1628-33.

[26]. Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE transactions on evolutionary computation. 2002;6(2):182-97.

[27]. Djedjig R, Bozonnet E, Belarbi R. Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. Energy and buildings. 2015;86:93-103.

[28]. Delgarm N, Sajadi B, Kowsary F, Delgarm S. Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO). Applied energy. 2016;170:293-303.

[29]. Calafiore G, Tommolillo C, Novara C, Fabrizio E, editors. APSEplus: A MATLAB toolbox for parametric energy simulation of reference buildings. Proceedings of the 6th International Conference on Software and Computer Applications; 2017.

[30]. Dornelles K, Roriz V, Roriz M, editors. Determination of the solar absorptance of opaque surfaces. 24th International Conference on Passive and Low Energy Architecture; 2007.