



Optimization of Daylight and Energy Performance of Residential Buildings Using Genetic Algorithm in Hamedan City

Niloufar Mohammadzadeh¹ | Majid Mofidi Shemirani² | Mansoureh Tahbaz³

1. PhD student, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Art, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. nr.mohammadzadeh@gmail.com

2. Assistant Professor, Faculty Member, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Science and Technology, s.m.mofidishemirani.91@gmail.com

3. Associate Professor, Faculty Member, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. m58tahbaz@yahoo.com

Article Info:

Article type:

Research Article

history:

Received:

2024/4/2

Received:

2024/6/12

Accepted:

2024/6/27

Published:

2024/8/5

Keywords:

optimization,
sensitivity analysis,
residential buildings,
daylight and energy
performance, genetic
algorithm.

Abstract: The present study evaluates and optimizes the daylight and energy performance of residential building envelopes in the cold climate of Hamedan. For this purpose, the common pattern of residential buildings in Hamedan city—a 5-storey apartment model with neighboring buildings on the east and west sides, resulting in lighting from the north and south—was selected as the base model. Annual energy consumption and the utilization rate of natural light were considered as the objective functions for optimization. After examining various methods and metrics for evaluating daylight and energy performance, the annual energy consumption per unit area (EUI) was selected to assess energy consumption, while daylight illumination (UDI) was chosen to evaluate the utilization of natural light. These metrics were used to find optimal solutions for designing the main façade of residential buildings. Subsequently, various components of the building envelope were identified, and the sensitivity of the data was analyzed using the Morris screening method to rank the key variables affecting the objective functions. Following this, parametric studies on output variables and optimization of solutions were conducted using a genetic algorithm. By integrating simulation software with the multi-objective optimization method, several Pareto optimal solutions were generated. Through comparison of these solutions, considering both daylight and energy aspects, an optimal design was selected. The results indicate that through Pareto optimization of the selected patterns, the EUI metric can be improved by 17.44% and 23.72%, while the UDI metric can be enhanced by 17.61% and 21.1%. Consequently, designing the building envelope in this manner can significantly reduce energy consumption while simultaneously increasing the efficiency of natural light.

Cite this article: Mohammadzadeh, N. Mofidi Shemirani, M. Tahbaz, M(2024) Optimization of Daylight and Energy Performance of Residential Buildings Using Genetic Algorithm in Hamedan City , Architectural & Environmental Research 2(2), 7-47. <https://doi.org/10.30470/jaer.2020.106497.1053>

© The Author(s).

Homepage: jaer.znu.ac.ir

Publisher: University of Zanjan





بهینه سازی عملکرد انرژی و نور روز پوسته ساختمان های مسکونی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در شهر همدان

نیلوفر محمدزاده^۱ | مجید مفیدی شمیرانی^۲ | منصوره طاهباز^۳

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، معماری و هنر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. nr.mohammadzadeh@gmail.com

۲. استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه علم و صنعت ایران. s.m.mofidishemirani.91@gmail.com

۳. دانشیار، عضو هیئت علمی دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهیدبهشتی، تهران ایران. m58tahbaz@yahoo.com

چکیده: پژوهش حاضر ارزیابی و بهینه سازی عملکرد انرژی و نور روز پوسته ساختمان های مسکونی در اقلیم سرد همدان را مدنظر قرار می دهد. برای این منظور الگوی رایج ساختمان های مسکونی در شهر همدان که آپارتمان های مسکونی ۵ طبقه با همسایگی شرقی و غربی و در نتیجه نورگیری از سمت شمال و جنوب است، در قالب مدل پایه انتخاب گردید و مصرف انرژی سالانه و میزان بهره گیری از نور روز به عنوان توابع هدف بهینه سازی در نظر گرفته شدند. پس از بررسی روش های مورد استفاده و شاخص های مختلف ارزیابی عملکرد انرژی و نور روز، شاخص های مصرف انرژی سالانه در واحد سطح (EUI) به منظور ارزیابی مقدار مصرف انرژی و روشنایی مفید نور روز (UDI) به عنوان شاخص ارزیابی بهره وری از روشنایی طبیعی انتخاب گشتند تا در یافتن راه حل های بهینه به منظور طراحی پوسته جبهه اصلی ساختمان های مسکونی به کار گرفته شوند. سپس مؤلفه های مختلف پوسته ساختمان های مسکونی شناسایی شده و تحلیل حساسیت داده ها با استفاده از روش غربالگری موریس به منظور رتبه بندی متغیرهای کلیدی مؤثر بر تابع هدف انجام گرفت. در ادامه مطالعات پارامتریک بر روی متغیرهای خروجی و بهینه سازی راه حل ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک مدنظر قرار گرفت. بدین ترتیب از طریق تعامل میان نرم افزار شبیه سازی و روش بهینه سازی چندهدفه، یک سری راه حل های بهینه پارتو تولید شدند که از طریق مقایسه آنها با در نظر گرفتن هر دو جنبه انرژی و نور روز، طرح بهینه انتخاب گردید. نتایج نشان می دهد که از طریق بهینه سازی پارتو می توان در الگوهای انتخابی به میزان ۱۷.۴۴٪ و ۲۳.۷۲٪ شاخص EUI و ۱۷.۶۱٪ و ۲۱.۱٪ شاخص UDI را بهبود بخشید. بر این اساس طراحی پوسته ساختمان از این طریق می تواند به میزان زیادی مصرف انرژی را کاهش داده و در عین حال بهره وری از روشنایی طبیعی را افزایش دهد.

اطلاعات مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ ها:

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

بازنگری: ۱۴۰۳/۳/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۷

انتشار: ۱۴۰۳/۵/۱۵

واژگان کلیدی:

بهینه سازی، تحلیل حساسیت، ساختمان های مسکونی، عملکرد انرژی و نور روز، الگوریتم ژنتیک

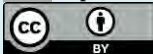
استاد: محمدزاده، نیلوفر، مفیدی شمیرانی، مجید، طاهباز، منصوره (۱۴۰۳). بهینه سازی عملکرد انرژی و نور روز پوسته ساختمان های مسکونی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در شهر همدان. پژوهش های معماری و محیط، ۲۲(۴۷): ۷-۳۷. <https://doi.org/10.30470/jaer.2020.106497.1053>

© نویسندگان .

ناشر: دانشگاه زنجان.

DOI: <https://doi.org/10.30470/jaer.2020.106497.1053>

Homepage: jaer.znu.ac.ir



مقدمه

پیشرفت‌هایی در تکنیک‌های محاسباتی و روش‌های بهینه‌سازی ریاضی بود. یکی از محققین پیش‌گام در این زمینه رایت بود که روش جستجوی مستقیم را به‌منظور بهینه‌سازی سیستم تهویه مطبوع به کار گرفت (رایت، ۱۹۸۶). پس از آن اهداف مختلف، متغیرهای طراحی، و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در این زمینه مورد بررسی قرار گرفتند و در سال‌های اخیر نیز مطالعات متعددی به‌منظور رسیدن به طراحی‌های انرژی‌کارا انجام شده است.

در شبیه‌سازی عملکرد ساختمان، اصطلاح "بهینه‌سازی" لزوماً به معنای یافتن راه‌حل بهینه جهانی برای یک مشکل نیست، زیرا ممکن است به دلیل طبیعت مسئله یا خود برنامه شبیه‌سازی این امر غیرممکن باشد (وتر و رایت، ۲۰۰۴). به‌طور کلی در میان جامعه، بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی پذیرفته شده که اصطلاح بهینه‌سازی به یک فرایند اتوماتیک اطلاق می‌گردد که کاملاً مبتنی بر شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی ریاضی

به‌منظور طراحی یک ساختمان انرژی‌کارا، می‌بایست عملکرد انرژی الگوهای مختلف آن به‌منظور یافتن راه‌حل مطلوب یا حتی بهینه مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. در این راستا شبیه‌سازی عملکرد ساختمان^۱ مطالعه بر روی تعداد زیادی از گزینه‌های طراحی را امکان‌پذیر ساخته و به طراحان اجازه می‌دهد به اهدافی مانند کاهش مصرف انرژی، کاهش تأثیرات محیط زیستی یا بهبود آسایش حرارتی داخلی دست یابند (گاربر، ۲۰۰۹). تا قبل از قرن ۱۹ پوسته‌های ساختمانی تنها در قالب جرم‌های حرارتی بزرگ و بازشوهای کوچک در جهت پاسخگویی به شرایط اقلیمی طراحی می‌شدند. اما محققین در قرن نوزدهم، مفاهیم فیزیک ساختمان و مصالح مورد استفاده در پوسته ساختمان را کشف کرده و توضیح دادند (کاور و همکاران، ۲۰۱۷). سپس در راستای رویکردهای افزایش کارایی انرژی، مطالعات بهینه‌سازی در حوزه ساختمان از سال ۱۹۸۰ آغاز شد که مبتنی بر

بهینه سازی به منظور بهبود عملکرد انرژی ساختمان مورد توجه قرار گرفته است. تفاوت عمده ای این دو پژوهش در این است که در مطالعه اوینز عملکرد انرژی بر اساس قواعد و مقررات ساختمان محاسبه شده، (اوینز، ۲۰۱۳) در حالی که در مطالعه بره و همکاران این محاسبات با استفاده از نرم افزار انرژی پلاس انجام شده است (بره و همکاران، ۲۰۱۶). بطور کلی تحلیل حساسیت در وهله اول میزان تأثیر متغیرهای طراحی بر تابع هدف را نشان می دهد و در پژوهش حاضر نیز به عنوان روشی در جهت تعیین متغیرهای تأثیرگذار طراحی مورد استفاده قرار گرفته تا با حفظ متغیرهای کلیدی، حل مسالهای بهینه سازی ساده تر گردد. در مطالعه بهینه سازی یک ساختمان معمولی، این فرایند معمولاً توسط اتصال یک برنامه شبیه سازی ساختمان و یک موتور بهینه سازی که ممکن است از یک یا چند الگوریتم یا استراتژی بهینه سازی تشکیل شده باشد، اتوماتیک می گردد (شان، ۲۰۱۶). مطالعه پیشگام در این زمینه توسط رایت ارائه شد و سپس در اجزای مختلف

است (آتیا، ۲۰۱۲). علاوه بر این برخی از محققین مانند ونگ و همکاران، از اصطلاح بهینه سازی استفاده کردند تا یک فرایند بهبود را با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری برای دستیابی به راه حل های بهینه معرفی نمایند (ونگ و همکاران، ۲۰۰۷). در برخی از مطالعات نیز، روش تحلیل حساسیت به عنوان جایگزینی برای بهینه سازی ریاضی در جهت بهبود عملکرد ساختمان ها به کار گرفته شده است. از جمله می توان به مطالعه رن و همکاران اشاره نمود. آنها تحلیل حساسیت را برای یافتن ابعاد بهینه شبکه سلول های فتوولتاییک در ساختمان های مسکونی با هدف به حداقل رساندن هزینه انرژی سالانه مورد استفاده قرار دادند (رن و همکاران، ۲۰۰۹). هیسلبرگ و همکاران نیز در پژوهش خود از تحلیل حساسیت به عنوان روشی کاربردی در طراحی ساختمان های اداری با هدف کاهش مصرف انرژی استفاده کردند (هیسلبرگ و همکاران، ۲۰۰۹). بر اساس مطالعات پیشین، تنها در مطالعاتی که توسط اوینز و بره انجام شده، ترکیب تحلیل حساسیت و

پژوهش خود ۹ مولفه‌ی ساختاری و ۲ مولفه‌ی فرمی از یک خانه مسکونی را بهینه ساختند تا هزینه‌ی چرخه‌ی حیات را به حداقل برسانند (دوبرو و کرارتی، ۲۰۱۵). آنها از الگوریتم ژنتیک (GA^3) استفاده نموده و این انتخاب را بر اساس مطالعات قبلی خود انجام دادند که در آن الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO^4) و روش جستجوی ترتیبی را مقایسه کرده و به این نتیجه رسیدند که در حالتی که قرار است بیش از ۱۰ مؤلفه بهینه شود بهترین گزینه است (دوبرو و کرارتی، ۲۰۰۹). همچنین با توجه به ادبیات مربوطه اثبات شده که اختاپوس نیز یک الگوریتم تکاملی چندهدفه و بهبود یافته بوده و در تحقیقات اخیر مورد تایید قرار گرفته است. گالاپاگوس نیز یک الگوریتم بهینه‌سازی تک‌هدفه است که به‌منظور بهینه‌سازی یکی از معیار عملکردی مورد استفاده قرار می‌گیرد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶).

به طور خلاصه پژوهش حاضر روشی برای بهینه‌سازی عملکرد انرژی و

ساختمان شامل فرم و هندسه (آدامسکی، ۲۰۰۷)، پوسته (باگلیوو و کنگدو، ۲۰۱۵)، و استراتژی‌های کنترل (کفی و همکاران، ۲۰۱۰) بسط پیدا کرد. این روش در سال‌های اخیر به روشی متداول در تحلیل عملکرد انرژی ساختمان تبدیل شده است (نگوین و همکاران، ۲۰۱۴). با این رویکرد لسکووار و پریمرو مصرف انرژی را از طریق تغییر مساحت شیشه با استفاده یک مدل حرارتی پویا در مجموعه برنامه‌ریزی خانه‌های با سیستم غیر فعال ($PHPP^1$) کاهش دادند. اما روش جستجوی آنها از نظر محاسباتی سنگین بوده و در نتیجه تعداد و دقت متغیرها را محدود می‌کرد (لسکووار و پریمرو، ۲۰۱۴). راه‌حلی که برای برطرف کردن چنین مشکلاتی مطرح گشت استفاده از الگوریتم‌های فرا اکتشافی بود. در این میان پژوهش‌های متعددی عملکرد الگوریتم‌های مختلف را در حل مسائل بهینه‌سازی طراحی ساختمان ($BOPs^2$) با یکدیگر مقایسه کردند که می‌توان به پژوهش توهوس - دوبرو و کرارتی اشاره نمود که در

3. Genetic algorithm

4. Particle Swarm Optimisation algorithm

1. Passive House Planning Package

2. Building Design Optimisation Problems

نور روز پوسته ساختمان های مسکونی ارائه می دهد که شامل استفاده از نرم افزار شبیه سازی به منظور ارزیابی عملکرد انرژی و نور روز پوسته، تجزیه و تحلیل حساسیت به منظور حفظ مؤلفه های کلیدی در ارتباط با معیارهای مربوطه، مدل سازی پارامتریک پوسته ساختمان و بهینه سازی متغیرهای کلیدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک است. در اینجا متغیرهای طراحی به عنوان ژن ها و اهداف به عنوان مقادیر فیتنس^۱ در نظر گرفته می شوند و منظور از بهینه سازی، یافتن نقاط کمینه در توابع تعریف شده با توجه به اهداف پژوهش است. در نهایت نشان داده می شود که کاربرد این روش برای طراحی خانه های معمول در اقلیم سرد ایران منجر به بهبود قابل ملاحظه ای در عملکرد انرژی و نور روز این خانه ها می گردد.

روش پژوهش

بر اساس هدف اصلی پژوهش حاضر که ارائه راهکارهای بهینه جهت طراحی پوسته از منظر بهبود عملکرد انرژی و نور روز است، فرایند انجام کار بدین شرح

است: مدل طرح اولیه در ابتدا شبیه سازی می گردد تا عملکرد آن از جنبه های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. این اطلاعات به عنوان معیاری برای مقایسه با راه حل های بهینه تولید شده از سیستم بهینه سازی حفظ می شوند. سپس تحلیل داده ها در دو مرحله انجام می گیرد: در مرحله اول تحلیل حساسیت با به کارگیری یکی از روش های رایج غربالگری به نام تأثیرات ابتدایی^۲ اجرا می گردد. از آنجا که ایده اصلی این روش متعلق به موریس است، به نام روش موریس شناخته می شود (موریس، ۱۹۹۱). این روش به دلیل بار محاسباتی پایین نسبت به سایر روش ها، مناسب ترین گزینه برای حل مسائلی است که تعداد زیادی متغیر ورودی دارد. مانند تمام روش های غربالگری، روش موریس امکان تحلیل حساسیت کیفی را فراهم می کنند تا مشخص شود کدامیک از متغیرهای طراحی (یا ورودی) تأثیر قابل توجهی بر تابع هدف (یا خروجی) دارند (تیان، ۲۰۱۳). تشخیص ورودی های غیر مؤثر و اولویت بندی مؤلفه های ورودی به

1. Elementary Effect

5. fitness

ترتیب اهمیت از این طریق انجام می‌گیرد، اما دقیقاً اهمیت نسبی ورودی‌ها مشخص نمی‌گردد. در پژوهش حاضر نرم‌افزار R به منظور انجام این روش و محاسبات آماری مورد استفاده قرار گرفته است. در مرحله دوم تحلیل داده‌ها به صورت پارامتریک و با استفاده از الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی انجام می‌گیرد؛ لذا با توجه به اهداف پژوهش دو سیستم شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای تهیه راه‌حل‌های طراحی بهینه پوسته ساختمان با یکدیگر ادغام می‌شوند. در هر تکرار، سیستم بهینه‌سازی مجموعه‌ای از راه‌حل‌های جدید را تولید می‌کند و آنها را برای ارزیابی عملکردشان به سیستم شبیه‌سازی می‌فرستد. اطلاعات ساختاری و مصالح از قبل توسط سیستم بهینه‌سازی تغییر خواهند کرد. وقتی این راه‌حل‌ها به برنامه شبیه‌سازی فرستاده می‌شوند، مدل‌های متناظر بر اساس کدهای سیستم بهینه‌سازی ساخته خواهند شد. سپس شبیه‌سازی انرژی و نور روز می‌تواند به طور مستقیم اجرا شده و خروجی‌ها برای مراحل بیشتر به سیستم

بهینه‌سازی برگشت داده شوند. در این پژوهش بر اساس اهداف و رسیدن به مقادیر بهینه هر مؤلفه، در سیستم بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک به منظور تولید مدل‌ها استفاده گردید. در به کارگیری الگوریتم ژنتیک استفاده از معیارهایی به نام فیتنس که با متغیر وابسته پژوهش یا همان مصرف انرژی و بهره‌گیری از روشنایی طبیعی مرتبط هستند جهت بهبود و ارتقا ضروری است. در فرایند بهینه‌سازی چندهدفه، طرح‌های مختلف به صورت خودکار و البته هدفمند تولید می‌گردند و در الگوی پلان مقادیر مختلف مؤلفه‌ها اندازه‌دهی می‌شوند. به منظور رعایت مشخصات اساسی مدل، تغییرات در محدوده‌هایی قابل قبول از نظر ضوابط و مقررات ملی ساختمان در منطقه مورد مطالعه برای هر متغیر تعریف می‌شوند.

در پژوهش حاضر متغیرهای مستقل با مؤلفه‌های مختلف طراحی پوسته مرتبط هستند که شامل مؤلفه‌هایی مانند ضریب انتقال حرارتی دیوارهای خارجی، ضریب جذب سطوح دیوارهای خارجی،

ضخامت عایق پشم شیشه، عمق سایبان، نسبت مساحت باز شو به دیوار، زاویه ساختمان نسبت به جنوب، نرخ نفوذ هوای پنجره، ضریب جذب حرارت پنجره، ضریب عبور نور مرئی و نوع شیشه هستند و تغییر در آنها منجر به ساخت گزینه های طراحی متعدد می گردد. متغیرهای وابسته نیز با عملکرد انرژی و نور روز پوسته مرتبط هستند. نور روز به عنوان یکی از راهکارهای روشنایی از جمله ساده ترین روش ها در بهره وری انرژی محسوب می شود و گرچه خود به تنهایی منجر به ذخیره انرژی نمی گردد، از طریق کنترل روشنایی طبیعی می تواند منجر به کم یا خاموش شدن روشنایی مصنوعی و صرفه جویی در هزینه و مصرف انرژی گردد (ونگ، ۲۰۱۷). در میان شاخص های سنجش انرژی، EUI یا شدت مصرف انرژی با واحد Kwh/m^2 مهم ترین معیار به عنوان متغیر وابسته پژوهش است که از تقسیم بار انرژی کل بر مساحت منطقه مورد مطالعه بدست می آید. برای عملکرد نور روز UDI می تواند پیشگویی کننده شرایط مطلوب روشنایی در فضای مسکونی باشد. زیرا بیش از هر چیز نمایانگر دریافت میزان مطلوبی از روشنایی روز در فضا است که به موجب آن نیز مصرف انرژی روشنایی به حداقل مقدار خواهد رسید. علاوه بر این UDI به دلیل تعیین هر دو حد آستانه بالا و پایین برای روشنایی، معیار نزدیک تری جهت پیشگویی شرایط مطلوب نور روز خواهد بود. از این رو الگوهای بهینه طراحی پوسته انتهایی هستند که این دو مقدار در آنها در بهینه ترین حالت ممکن قرار داشته باشد. بنابراین نوع تحلیل نهایی که می بایست در این ارتباط صورت پذیرد چند معیاره بوده و تلاش می گردد از راه حل هایی که بتوانند با در نظر گرفتن این اهداف بطور همزمان حالات بهینه را ایجاد کنند استفاده گردد. در این پژوهش برای شبیه سازی پارامتریک نمونه مورد مطالعه، از نرم افزار گرافیکی سه بعدی راینو و پلاگینی از آن به نام گرس هاپر به عنوان پلتفرمی برای کنترل مؤلفه های هندسی استفاده شده است. همچنین پلاگین های لیدی باگ و هانی بی به عنوان افزونه محاسبه نور روز و مصرف

انرژی و متصل شدن به نرم‌افزار انرژی پلاس و همچنین برنامه شبیه‌سازی دی سیم مورد استفاده قرار گرفتند. در انتها نیز الگوریتم‌های گالاپاگوس به‌منظور بهینه‌سازی تک‌هدفه و اختاپوس، جهت بهینه‌سازی چندهدفه به کار گرفته شدند.

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر شرایط اقلیمی همدان به‌عنوان شهری از اقلیم سرد است. در این اقلیم ساختمان‌ها به‌منظور جلوگیری از اتلاف حرارتی و محافظت در برابر باد سرد زمستانی، به‌صورت متراکم و پیوسته در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند (کسمایی، ۱۳۸۳: ۱۳۵-۱۱۲). به‌منظور مطالعه و آزمون متغیرهای مستقل، گونه ساختمانی مورد بررسی الگوی آپارتمانی است که دارای همسایگی شرقی و غربی بوده و ناگزیر نورگیری فضاها فقط از طریق جبهه‌ی شمالی و جنوبی انجام می‌گیرد. بدین ترتیب نمونه‌ای از الگوی آپارتمان‌های مسکونی ۵ طبقه رایج در شهر همدان با پلان ساده و شرایط مذکور به‌عنوان مدل پایه انتخاب گردید (جدول ۱). همچنین

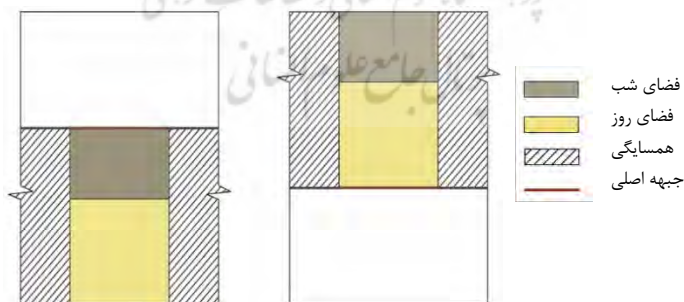
بهینه‌سازی جبهه و نمای اصلی ساختمان مدنظر قرار گرفت که با توجه به قطعات شمالی و جنوبی، نورگیری متفاوتی از سمت شمال و یا جنوب دارند. از آنجا که گزینه‌هایی که در آنها فضای روز (مانند نشیمن، پذیرایی و آشپزخانه) به‌صورت کامل در جبهه جنوبی قرار گرفته‌اند نسبت به سایر گزینه‌ها عملکرد انرژی و نور روز بهتری دارند (هاشمی و حیدری، ۱۳۹۱)، سایر حالت‌ها به دلیل عملکرد ضعیف‌تر، در بهینه‌سازی مدنظر قرار نگرفتند. بدین ترتیب دو الگوی اصلی پلان بدست آمد: الف: ساختمان‌های واقع در قطعات شمالی که جبهه اصلی آنها رو به جنوب قرار دارد و در نتیجه فضای روز در آنها در مجاورت جبهه اصلی و فضای شب در مجاورت جبهه فرعی است. ب: ساختمان‌های واقع در قطعات جنوبی که جبهه اصلی آنها رو به شمال قرار دارد.

جدول (۱): ابعاد، جزییات ساختمان

اجزا	ضریب انتقال حرارتی (w/m²k)	تأخیر در انتقال حرارت (ساعت)	لایه‌های مصالح
کف	۰.۴۷	۴.۶	فرش ۲.۵ سانتی متر
			دال بتنی ۱۰ سانتی متر
			عایق ۱ سانتی متر
			خاک ۱۵۰۰ سانتی متر
دیوارهای خارجی	۰.۸۴	۷.۷	آجرنما ۱۱ سانتی متر
			ملات سیمانی ۱.۳ سانتی متر
			سفال ۲۰ سانتی متر
			دیوار گچی پیش‌ساخته ۱ سانتی متر
سقف	۰.۵۵	۰.۷	پوشش سقف مسلح ۱ سانتی متر
			عایق ۵ سانتی متر
			دال بتنی ۵ سانتی متر
			سقف گچی پیش‌ساخته ۲ سانتی متر
پنجره جبهه فرعی	۲.۷۰ مطابق مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، ساختمان گروه یک		پنجره UPVC

جدول (۲): مشخصات کلی ساختمان

ویژگی ها	عناصر
همدان	موقعیت ساختمان
عرض جغرافیایی ۳۴.۵۲ طول جغرافیایی ۳۲.۴۸	
طول ۱۴، عرض ۱۰، ارتفاع ۱۸.۹	ابعاد ساختمان
ارتفاع طبقات ۳.۱۰ متر کف تا کف (ارتفاع کف تا زیر سقف ۲.۸)	
مستطیل	هندسه پلان
۵ طبقه با همسایگی شرقی-غربی	نوع ساختمان
سازه با وزن متوسط،	
بام مسطح و فاقد فضای شیروانی	
مسکونی	کاربری ساختمان
مطابق مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان، صرفه جویی در مصرف انرژی، ساختمان های گروه (۲۱)	ویژگی های حرارتی ساختمان



شکل (۱): الگوی مورد مطالعه و جبهه ی اصلی

در نتیجه فضای روز آنها در مجاورت جبهه فرعی و فضای شب در مجاورت جبهه اصلی است (شکل ۱). لازم به ذکر است که به منظور بررسی دقیق تأثیر مؤلفه‌ها، سیستم ایدئال به منظور سرمایش و گرمایش در نظر گرفته شده است که توانایی جبران بارهای سرمایش و گرمایش را در تمام ساختمان و کل سال داراست. نقاط تنظیم گرمایش ۱۹ درجه سانتیگراد و سرمایش ۲۵ درجه سانتیگراد است. بنابراین در این پژوهش اقدامات مربوط به سیستم تاسیسات و تهویه مطبوع مدنظر قرار نگرفته است (جدول ۳)

جدول (۳): مؤلفه‌های استفاده شده در محاسبات^۱

مقدار	نوع مصالح		اشغال شده	نقاط تنظیم گرمایش ۱۹ درجه سانتیگراد	دمای تعیین شده برای سیستم تهویه مطبوع
			اشغال شده	نقاط تنظیم سرمایش ۲۵ درجه سانتیگراد	
بازتاب ۰.۸	مصالح کدر	سایبان	فضای خالی	نقاط تنظیم گرمایش ۱۶ درجه سانتیگراد	
بازتاب ۰.۵	مصالح کدر	دیوار داخلی	۱ (clo)	ضریب لباس	مؤلفه‌های تعیین کننده شرایط آسایش
بازتاب ۰.۸	مصالح کدر	سقف داخلی	۶۰٪	رطوبت	
بازتاب ۰.۲	مصالح کدر	کف داخلی	m/s ۰.۵	سرعت حرکت هوا	سیستم HVAC
			تأمین گرمایش و سرمایش	فضای اشغال شده	
			گرمایش	فضای خالی	

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

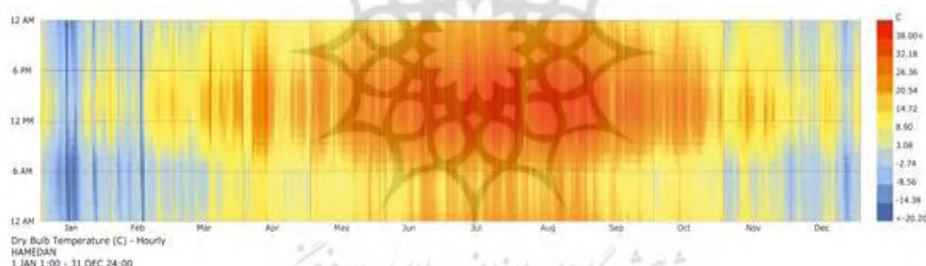
۱. پیش فرض‌های تاسیساتی موجود در ابزار شبیه‌سازی تحقیق از استانداردهای معتبر ASHRAE بهره گرفته است.

اطلاعات آب و هوایی

شهر همدان با مساحتی بالغ بر ۴۱۱۸ کیلومتر مربع از خط الراس رشته کوه الوند تا مرزهای شرقی استان همدان کشیده شده و بر طبق پهنه بندی تنظیمی طاهباز و جلیلیان در اقلیم کوهپایه ای مرتفع قرار گرفته است (طاهباز و جلیلیان، ۱۳۷۷). این شهر ۱۷۴۱.۵ متر از سطح دریا ارتفاع داشته و دارای عرض جغرافیایی ۳۴.۵۲ شمالی و طول

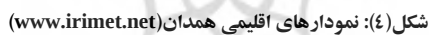
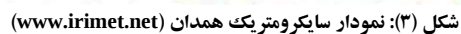
جغرافیایی ۳۲.۴۸ شرقی است. اقلیم همدان بر اساس دسته بندی اقلیمی کوپن-گایگر در محدوده سرد و نیمه خشک (Dsa) قرار گرفته است (پیل و همکاران، ۲۰۰۷). با استناد به داده های آماری ایستگاه سینوپتیک فرودگاه همدان، معدل سالانه دما در این شهرستان ۱۲ و نوسان سالیانه دما ۴۱.۱ درجه است. متوسط نوسان دما در یک ماه غالباً بیش از ۱۰ درجه بوده و حتی به ۲۲ درجه نیز رسیده است (شکل ۲).

شکل (۲): نمودار آب و هوایی همدان (www.irimet.net)



مصرف بالای انرژی برای گرمایش تنها مسئله اصلی نیست، بلکه آسایش حرارتی در تابستان نیز عامل مهمی محسوب می گردد. (شکل ۳)

به طور کلی همدان شرایط اقلیمی زیر را داراست: سرمای شدید در زمستان و هوای معتدل در تابستان، تابش شدید آفتاب، اختلاف بسیار زیاد درجه حرارت بین شب و روز و بین زمستان و تابستان، رطوبت در حد معمول، وزش بادهای سرد غربی در زمستان و بارش برف و یخبندان های طولانی مدت. براین اساس



درجات گرمایش و سرمایش روز (نسبت به دمای ۱۸ و ۲۱ درجه) و مقایسه نسبت آن‌ها در شهر همدان نشان‌دهنده نیاز ۹۲ درصدی گرمایش در مقابل نیاز ۸ درصدی سرمایش است. این مسئله بیانگر اهمیت مسئله گرمایش در این شهر است. تقویم نیاز اقلیمی نمایش دهنده پراکندگی نقاط گرمایی همسان در عرض سال و تشخیص مواقعی است که احساس مشابه گرمایی در انسان ایجاد می‌شود. شکل ۴ تقویم نیاز اقلیمی همدان نشان می‌دهد در زمان بیشتری از سال، سرمای زمستان مسئله اصلی در این شهر است. عملکرد نور روز نیز به شدت تحت تأثیر عرض جغرافیایی محل قرارگیری ساختمان قرار دارد. یخبندان به مدت ۳.۵ تا ۴.۵ ماه در طول سال وجود دارد و به همین نسبت تعداد روزهای یخبندان در طول سال ۱۲۵ روز است.

براین اساس حفاظت بنا در برابر باد سرد جنوب غربی ضروری است و نیاز به وسایل گرماساز در بنا در حدود ۷ تا ۹.۵ ماه از سال احساس می‌شود و به حداقل

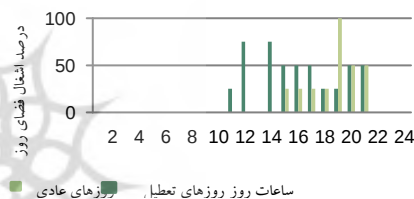
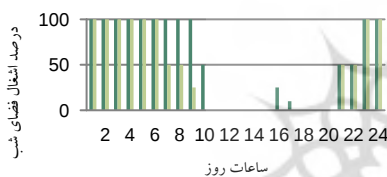
رساندن مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه حداکثر بهره‌گیری از انرژی گرمایی خورشید در نه ماه از سال ضروری است. بطور کلی اصول زیر بر اساس بررسی اقلیمی همدان پیشنهاد می‌شوند: ۱. حداکثر دریافت تابش، ۲. حداقل دفع حرارت، ۳. پرهیز از سرمای زمستان (در اکثر مواقع سال)، ۴. مقاومت در برابر یخبندان طولانی مدت، ۵. ضرورت حفاظت بنا در برابر باد سرد (جنوب غرب). به عبارت دیگر می‌بایست تبادل حرارت از طریق جداره، سقف و منافذ ساختمان به حداقل ممکن برسد و از هدر رفتن گرما ممانعت شود. از تابش آفتاب در گرمایش حداکثر استفاده شده و سایه‌ها کنترل شود همچنین از نفوذ باد سرد به ساختمان در فصول سرد جلوگیری گردد (اعتماد شیخ الاسلامی، ۱۳۹۰).

بارهای حرارتی داخلی

در پژوهش حاضر اشغال کنندگان فضا، تجهیزات و روشنایی به‌عنوان منابع حرارتی داخلی در نظر گرفته شده‌اند. فرض بر این است که هر یک از فضاها

است که هر یک از پنجره‌ها در جدار جنوبی بر اساس WWR ارتفاع ثابت و عرض متغیر خواهند داشت. در فصول سرد سال سیستم تهویه مطبوع نیاز گرمایشی را تامین می‌کند و هنگامی که دمای اتاق کمتر یا برابر ۱۹ درجه سانتیگراد باشد شروع به کار می‌کند. در فصول گرم سال نیز در هر یک از فضاها که تهویه طبیعی کافی نباشد و دمای اتاق

بر اساس برنامه پیشنهادی اشغال می‌گردد. (شکل ۵) بر اساس استاندارد اشری فرض می‌گردد که هر فرد در بخش روز (اتاق نشیمن) ۱۰۸ وات و در بخش شب (اتاق خواب) ۸۱ وات حرارتی تولید می‌کند و سیستم روشنایی مطابق با محاسبات مربوط به ارزیابی عملکرد نور روز روشن و خاموش خواهد شد. علاوه بر این تجهیزات



شکل (۵): برنامه زمانی اشغال فضای روز و شب

بالاتر یا برابر ۲۵ درجه باشد، سیستم تهویه مطبوع روشن شده و تهویه طبیعی قطع می‌گردد. به منظور کسب اطمینان از درستی نتایج شبیه‌سازی، ابتدا نتایج شبیه‌سازی در روزهای مشخصی از سال با داده‌های حاصل از مطالعات میدانی مدل پایه مقایسه شدند. اندازه‌گیری‌های میدانی در اول دی‌ماه (انقلاب زمستانی) و اول تیرماه با استفاده از دیتالاگر و نورسنج ST-1301 در سه منطقه جلو، میانه و دور از پنجره و در فاصله ۰.۷۵

الکتریکی اتاق نشیمن در طول روز ۱.۵ وات بر متر مربع حرارت تولید خواهند کرد (اشری، ۲۰۰۹).

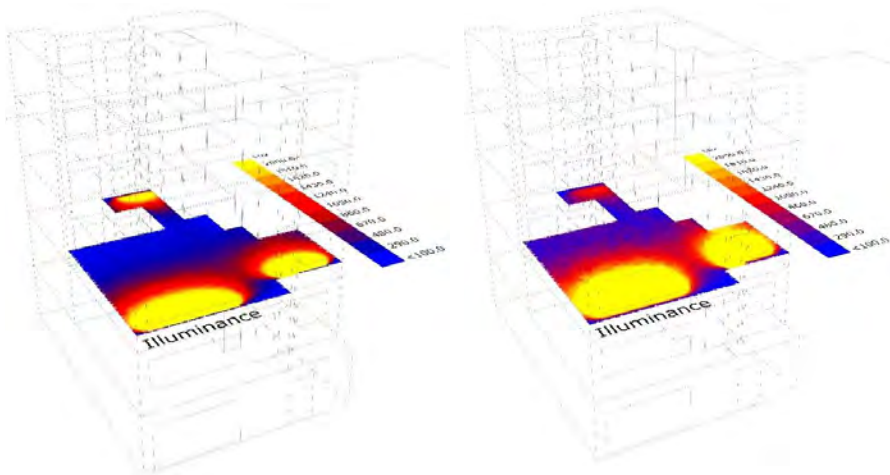
ملاحظات شبیه‌سازی

به منظور تحلیل مدل شبیه‌سازی، هر اتاق و دستگاه پله به عنوان یک منطقه حرارتی در نظر گرفته شد و ۲۲ منطقه حرارتی بدست آمد که با توجه به محدوده پژوهش، بار منطقه حرارتی مجاور پوسته جنوبی محاسبه گردید. فرض بر این

متر از کف انجام گرفت. این اندازه‌گیری‌ها از ساعت ۸:۰۰ تا ۱۶:۰۰ بعد از ظهر مورد سنجش قرار گرفت. مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در این روزها متوسط خطای (MBE^1) ۰.۱۸ را نشان داد که در دامنه قابل‌قبولی قرار داشت زیرا خطای ۰.۲۰) برای اکثر اهداف طراحی کافی است (رینهارت و برتون، ۲۰۰۹). بدین ترتیب نرم‌افزار شبیه‌سازی و مدل ساخته شده اعتبارسنجی شده و برای فرایند پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. (شکل ۷و۶)



1. Mean Bias Error



شکل (۶): نمونه نتایج شبیه‌سازی پویای نور روز منطقه مورد مطالعه در ۱ دی ماه (انقلاب زمستانی) و ۱ تیر (انقلاب تابستانی) ساعت ۱۲:۰۰ در نرم‌افزار دی سیم



شکل (۷): نتایج بار حرارتی سالانه منطقه مورد مطالعه

تابع هدف

به منظور بهبود عملکرد نمونه مورد مطالعه می‌بایست تابع EUI_{total} حداقل و تابع UDI حداکثر شود. این دو تابع توابع هدف نامیده می‌شوند که به منظور در نظر گرفتن هم‌زمان این دو، تابع هدف کلی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$f(x) = EUI_{total}(X)/EUI_{total}(X_{EUI_{max}}) + UDI(X)/UDI(X_{UDI_{max}})$$

تحلیل حساسیت

در روش موریس یک مدل ریاضی با k

عامل ورودی در نظر گرفته می‌شود و Y خروجی مدنظر است. در اینجا $k=11$ متغیر ورودی تعریف گردید که هر کدام مطابق جدول ۳ در چهار سطح امکان تغییر داشتند و متغیر طراحی ۱۰ام که نوع شیشه را تعریف می‌کند، می‌تواند یکی از ۴ نوع تعریف شده در جدول ۴ باشد. موریس استفاده از $K+1$ نقطه در فضای متغیرهای ورودی در Γ مسیر مختلف را پیشنهاد می‌کند. در پژوهش حاضر با

توجه به نوع داده ها $r=30$ در نظر گرفته شد، بنابراین ۳۰ مسیر یا تکرار تأثیرات برای هر متغیر ورودی محاسبه گردید.

بدین ترتیب، $r(k+1) = 360$ نمونه ایجاد شد.

جدول (۴): متغیرهای طراحی پوسته و سطوح تغییرات در شبیه سازی

متغیرهای طراحی	مشخصه	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
۱	ضریب انتقال حرارتی دیوارهای خارجی	$U_{ExtWall}$	۰.۶۵	۱.۶۵	۲.۶۵	۳.۶۵
۲	ضریب جذب سطوح دیوارهای خارجی	$\alpha_{ExtWall}$	۰.۲	۰.۴	۰.۶	۰.۸
۳	ضخامت عایق پشم شیشه	$Thick_{ins}$	۰.۲۵	۰.۵	۰.۷۵	۱
۴	عمق سایبان	$Sh_{Windows}$	۰.۳	۰.۶	۰.۹	۱.۲
۵	نسبت مساحت باز شو به دیوار	WWR	۱۵٪	۲۵٪	۳۵٪	۴۵٪
۶	زاویه ساختمان نسبت به جنوب	β	۰	۹۰	۱۸۰	۲۷۰
۷	نرخ نفوذ هوای پنجره	$IR_{Windows}$	۰.۳	۰.۴	۰.۵	۰.۶
۸	ضریب جذب حرارت پنجره	$SHGC_{win}$	۰.۳۶	۰.۵۳	۰.۷	۰.۸۷
۹	ضریب عبور نور مرئی	VT	۰.۴	۰.۵۵	۰.۷	۰.۸۵
۱۰	نوع شیشه	$WinType$	-	۱	۲	۳
۱۱	ضریب بازتاب سطوح خارجی	Ref	۰.۲	۰.۴	۰.۶	۰.۸

جدول (۵): مشخصات مختلف انواع پنجره

نوع	لایه خارجی	لایه ۲	لایه ۳
پنجره ۱	شفاف ۲.۵ میلیمتر	-	-
پنجره ۲	شفاف ۶ میلیمتر	-	-
پنجره ۳	شفاف ۲.۵ میلیمتر	۱۰ میلیمتر هوا	شفاف ۲.۵ میلیمتر
پنجره ۴	شفاف ۶ میلیمتر	۳۰ میلیمتر هوا	شفاف ۶ میلیمتر

روش موریس دو شاخص حساسیت برای هر متغیر ارائه می دهد: که تأثیر هر متغیر ورودی بر متغیر خروجی را نشان می دهد؛ و شاخص انحراف استاندارد که تأثیرات غیرخطی هر ورودی بر خروجی و شدت تعامل هر ورودی با سایر ورودی ها را ارزیابی می نماید (تیان، ۲۰۱۳). بدین ترتیب مقادیر کم و مربوط به یک ورودی غیر نافذ می باشند.

بهبود این روش توسط کامپولونگو صورت گرفت و شاخص اصلاح شده μ^* پیشنهاد گردید که خود به تنهایی برای ارائه یک رتبه بندی قابل اعتماد از عوامل ورودی کافی است. این شاخص میانگین

$\mu^*=22.365$ ، جهت‌گیری با شاخص
 $\mu^*=20.248$ و WWR با شاخص
 $\mu^*=20.171$ ، به ترتیب تأثیر قابل
 توجهی بر تابع هدف در فضای مورد

توزیع مقدار مطلق تأثیر ابتدایی
 فاکتورهای ورودی است. استفاده از μ^*
 مشکل تأثیرات علامت‌های مخالف را که
 می‌توانند در مواقعی که مدل غیر
 یکنواخت است، یکدیگر را از بین ببرند
 و مقدار (را کاهش دهند، حل می‌کند
 (کامپولونگو و همکاران، ۲۰۰۷).

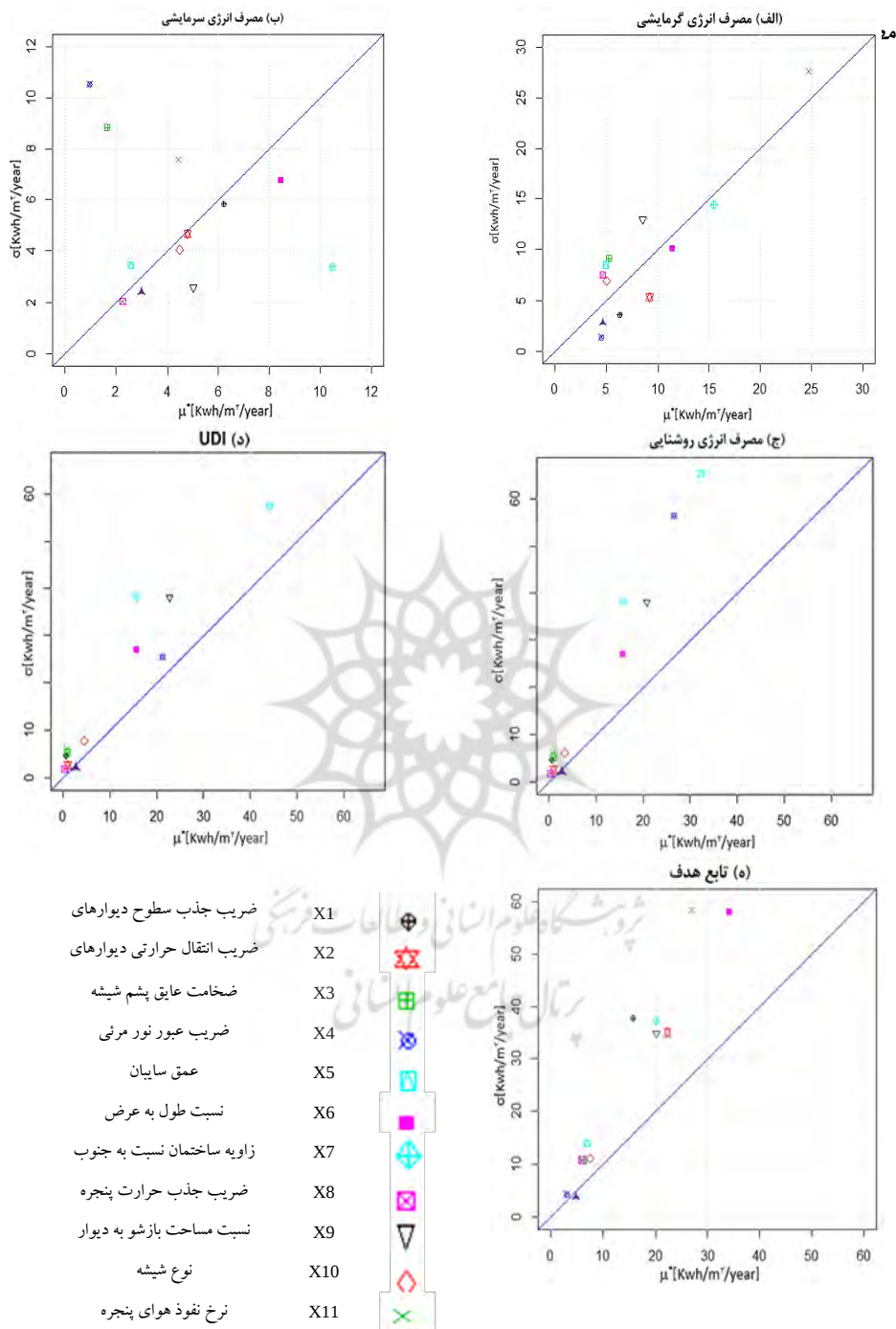
$$\mu_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r d_i \left(X^{(j)} \right),$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{(r-1)} \sum_{j=1}^r \left(d_i \left(X^{(j)} \right) - \mu_i \right)^2},$$

$$\mu_i^* = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r \left| d_i \left(X^{(j)} \right) \right|.$$

یافته‌ها (نتایج حاصل از تحلیل حساسیت)

به منظور تحلیل میزان ارتباط متغیرهای
 وابسته (UDI_{total} و EUI_{total}) نسبت به
 متغیرهای مستقل (مؤلفه‌های
 پوستانه $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{11}$)، پس از
 شبیه‌سازی نتایج حاصله با توجه به اهداف
 مورد ارزیابی قرار گرفت و در هر مرحله
 برای هر متغیر سه شاخص μ ، μ^* و σ
 بدست آمد و متغیرها بر اساس شاخص
 μ^* رتبه‌بندی شدند. بدین ترتیب نتایج
 زیر حاصل شد: نرخ نفوذ هوای پنجره با
 شاخص $\mu^*=26.949$ ، ضریب انتقال
 حرارتی دیوارهای خارجی با شاخص



شکل (۸): متوسط (μ^*) و انحراف استاندارد (σ) تاثیر متغیرهای طراحی بر توابع هدف

همبستگی بالایی با سایر متغیرها داشته و این مسئله پیش‌بینی دقیق تأثیر آن بر تابع هدف را دشوار می‌سازد (شکل ۸).

به‌صورت همزمان نیز به‌عنوان اهداف بهینه‌سازی مدنظر قرار گرفتند: به حداقل رساندن EUI و به حداکثر رساندن UDI. همچنین با توجه به اینکه نرم‌افزار گرس‌هاپر به‌صورت پیش فرض به حداقل ساختن توابع می‌پردازد می‌بایست تابع UDI را در ۱- ضرب نمود.

فرایند بهینه‌سازی

در این مرحله به‌منظور یافتن عملکرد بهینه، متغیرهای کلیدی انتخابی در محدوده‌های تعریف شده تغییر کرده و سایر متغیرهای کنترل نیز ثابت در نظر گرفته شدند. به‌منظور تحلیل عملکرد نور روز نیز یک شبکه ۱ متر در ۱ متر با فاصله ۷۵ سانتی متر از کف در محدوده مورد مطالعه قرار داده شد و بدین ترتیب ۵۰۳ نقطه آزمایش بدست آمد. شاخص‌های عملکرد نور روز و انرژی مدل پایه در دو الگوی الف و ب در جدول ۷ لیست شده‌اند.

همچنین متغیر جهت‌گیری با شاخص $60.31 (=)$ بیشترین تأثیر غیر خطی را بر تابع هدف دارد. این بدان معنی است که

بهینه‌سازی

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل حساسیت، شش متغیر مستقل به‌دست آمده که از اولویت بیشتری برخوردارند در بهینه‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند که تغییر در هر یک از آنها منجر به ایجاد گزینه‌های متعدد طراحی می‌گردد. (جدول ۵) لازم به ذکر است با توجه به جهت‌گیری عمومی بافت در همدان تحت زاویه بهینه ۳۰ درجه (محدوده ۲۰ تا ۴۵ درجه) به سمت شرق که در تمام دوره‌ها استمرار داشته، (ملک حسینی و درگاهی، ۱۳۸۹) این متغیر از میان متغیرهای مستقل حذف گردید و چرخش ۳۰ درجه به سمت شرق به‌عنوان زاویه بهینه در محاسبات در نظر گرفته شد. همچنین متغیرهایی که از اولویت کمتری برخوردارند مانند V_t ، SHGC و ضریب انعکاس ثابت فرض می‌شوند. اطلاعات مربوط به تنظیمات این متغیرها در جدول ۶ آورده شده است. دو هدف

جدول (۶): مشخصات متغیرهای طراحی پوسته و مقدار تنظیمات برای مدل پایه

متغیرهای طراحی	مشخصه	واحد	مقدار تنظیم شده برای مدل پایه	محدوده تغییرات
۱	ضریب انتقال حرارتی دیوارهای خارجی	W/m^2k	۰.۸۴	[۰.۱, ۰.۵]
۲	ضریب جذب سطوح دیوارهای خارجی	بدون واحد	رنگ متوسط ۰.۶	[۰.۱, ۰.۹]
۳	عمق سایبان	متر	۰	[۰, ۲]
۴	نسبت مساحت باز شو به دیوار	بدون واحد	۱۵٪	[۱۰, ۷۰]
۵	نرخ نفوذ هوای پنجره	ACH	۰.۲۵	[۰.۲, ۰.۸]
۶	نوع شیشه	-	نوع ۲	[WT ₁ , WT ₂ , WT ₃ , WT ₄]

جدول (۷): مقادیر ثابت متغیرهای با اولویت کمتر

نوع مصالح	مقدار
دیوار خارجی	بازتاب ۰.۲
پنجره	SHGC ۰.۳۶
پنجره	ضریب عبور نور مرئی ۰.۶۵

جدول (۸): عملکرد انرژی و نور روز مدل پایه

شاخص عملکرد انرژی	شاخص عملکرد نور روز	الگوی الف	الگوی ب
UDI	UDI < 100	۳۲.۴۵	۳۹.۳
	UDI 100-2000	۲۸.۹۵	۳۰.۹
	UDI > 2000	۳۸.۶	۲۹.۸
شاخص عملکرد انرژی EUI	(Kwh/m ²)	۳۲۸.۰۵	۳۹۲.۳۹

بهینه سازی تک هدفه نور روز

به منظور انجام بهینه سازی تک هدفه در این مرحله الگوریتم گالاپاگوس مورد استفاده قرار گرفت. اندازه جمعیت نسل ها ۵۰ در نظر گرفته شده و در مجموع

۱۰ نسل وجود دارد. هدف بهینه سازی در مرحله اول حداکثر ساختن UDI 100-2000lux است. مقادیر متغیرهای بهینه و شاخص های مصرف انرژی و نور روز متناظر با آنها در جداول ۸ و ۹ نشان داده

شده است. لازم به ذکر است در این مرحله تنها مقادیر متغیرهای مؤثر بر عملکرد نور روز شامل نسبت مساحت بازشو به دیوار، ضریب عبور نور مرئی و عمق سایبان مدنظر قرار گرفتند و با توجه به عدم نیاز به سایبان در الگوی ب این

متغیر در نظر گرفته نشده است. محدوده ضریب عبور نور مرئی نیز [۰.۱، ۰.۹] است. UDI 2000-100 در دو الگوی الف و ب به ترتیب ۲۸.۴۲٪ و ۲۳.۳۶٪ افزایش نسبت به مدل پایه را نشان می‌دهد.

جدول (۹): مقادیر متغیرها در راه‌حل بهینه نور روز

متغیرهای طراحی	مشخصه	واحد	مقدار بهینه در الگوی الف	مقدار بهینه در الگوی ب
۱ نسبت مساحت بازشو به دیوار	WWR	بدون واحد	۶۵٪	۵۸٪
۲ ضریب عبور نور مرئی	VT	بدون واحد	۰.۶۷	۰.۷۵
۳ عمق سایبان	ShWindows	متر	۰.۷۵	-

جدول (۱۰): شاخص‌های عملکرد انرژی و نور روز با بهینه‌سازی تک‌هدفه نور روز

شاخص‌ها	محدوده	الگوی الف	الگوی ب
شاخص عملکرد نور روز UDI	UDI<100	۲۷.۵	۳۰.۷۳
	UDI 100-2000	۳۷.۱۸	۳۸.۱۲
	UDI>2000	۳۵.۳۲	۳۱.۱۵
شاخص عملکرد انرژی (EUI(Kwh/m2)	انرژی کل	۳۲۵.۱۵	۳۷۰.۶۵

بهینه‌سازی تک‌هدفه انرژی

در این مرحله مانند تنظیمات بهینه‌سازی نور روز اندازه جمعیت نسل‌ها ۵۰ و بطور کلی ۱۰ نسل در نظر گرفته شده است و هدف بهینه‌سازی حداقل ساختن بار انرژی است. مقادیر متغیرهای بهینه و شاخص‌های مصرف انرژی و نور روز

متناظر با آنها در جداول ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. در این مرحله تنها مقادیر متغیرهای مؤثر بر عملکرد انرژی موردتوجه قرار گرفته‌اند که شامل نسبت مساحت بازشو به دیوار، نرخ نفوذ هوای پنجره، ضریب انتقال حرارتی دیوارهای خارجی، ضریب جذب سطوح دیوارهای

خارجی، نوع پنجره، ضخامت عایق و ۲۹.۷۴٪ کاهش نسبت به مدل پایه را نشان می دهد.

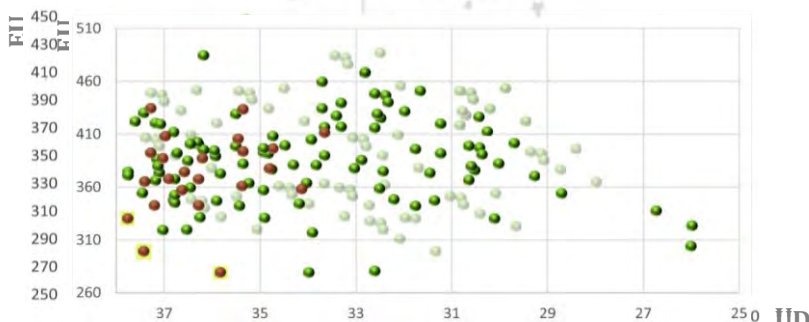
عمق سایبان می باشند. شدت مصرف انرژی در مدل بهینه به ترتیب ۲۰.۴۹٪ و

جدول (۱۱): مقادیر متغیرها در راه حل بهینه انرژی

متغیرهای طراحی	مشخصه	واحد	مقدار بهینه الگوی الف	مقدار بهینه الگوی ب
۱	ضریب انتقال حرارتی دیوارهای خارجی	$U_{ExtWall}$	۱.۹۵	۱.۸
۲	ضریب جذب سطوح دیوارهای خارجی	$\alpha_{ExtWall}$	۰.۴	۰.۶
۳	عمق سایبان	ShWindows	۰.۵	-
۴	نسبت مساحت باز شو به دیوار	WWR	۰.۳۳	۰.۲۸
۵	نرخ نفوذ هوای پنجره	IRWindows	۰.۲	۰.۳
۶	نوع شیشه	WinType	۳	۳

جدول (۱۲): شاخص های عملکرد انرژی و نور روز با بهینه سازی تک هدفه انرژی

شاخص ها	محدوده	الگوی الف	الگوی ب
شاخص عملکرد نور روز UDI	UDI<100	۳۱.۱۸	۳۲.۲۵
	UDI 100-2000	۳۰.۱۲	۳۳.۴۵
	UDI>2000	۳۸.۷	۳۴.۳
شاخص عملکرد انرژی (EUI)(Kwh/m ²)	انرژی حرارتی	۲۶۰.۸۰	۲۷۵.۶۸



شکل (۱۰): جبهه پارتو برای جبهه اصلی الگوی ب

بهینه‌سازی چندهدفه

در فرایند بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم اختاپوس به منظور یافتن راه‌حل‌های تعادلی میان دو هدف از طریق جبهه پارتو مورد استفاده قرار گرفته است. خروجی بهینه‌سازی نموداری از راه‌حل‌ها و نقاط جبهه پارتو را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل ۹ و ۱۰ مشاهده می‌گردد،

نقاط قرمز تیره رنگ نماینده راه‌حل‌های غیر غالب پارتو می‌باشند که در فرایند بهینه‌سازی تولید شده‌اند. گزینه ۱ راه‌حل با بهترین عملکرد نور روز، گزینه ۳ راه‌حل با بهترین عملکرد انرژی و گزینه ۲ نیز عملکرد متعادل هر دو هدف EUI و UDI را نشان می‌دهند. مقادیر بهینه متغیرها و شاخص‌های این مرحله در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

جدول (۱۳): مقادیر مختلف متغیرها و شاخص‌های متناظر در بهینه‌سازی چندهدفه برای دو الگوی الف و ب

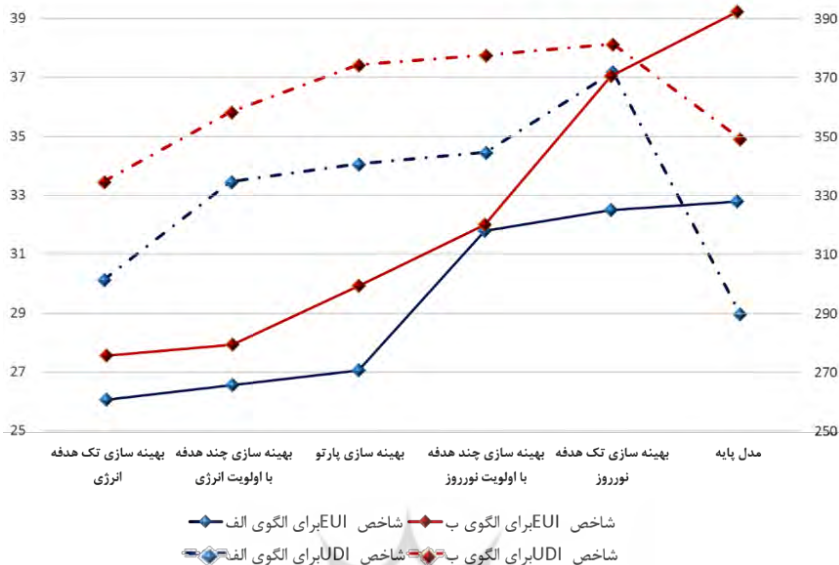
گزینه ۱: بهینه‌سازی با اولویت عملکرد نور روز		گزینه ۲: بهینه‌سازی با تعادل عملکرد انرژی و نور روز		گزینه ۳: بهینه‌سازی با اولویت عملکرد انرژی			
الگوی الف	الگوی ب	الگوی الف	الگوی ب	الگوی الف	الگوی ب		
۱۰۶	۲۰۱	۱۰۱	۱۰۵	۰۹۴	۱۰۳	U value	متغیرها
۲۱٪	۳۵٪	۲۶٪	۲۱٪	۱۶٪	۱۸٪	WWR	
۴	۲	۳	۳	۲	۴	WT	
۰.۱	۰.۴	۰.۷	۰.۵	۰.۶	۰.۷	α	
۰	-	۰.۷۵	-	۰.۳۵	-	SH	
۰.۵	۰.۴	۰.۳	۰.۳	۰.۲	۰.۳	IR	شاخص‌ها
۳۱۶.۰۱	۳۶۷.۰۶	۲۷۰.۸۳	۲۹۹.۲۹	۲۶۵.۷۵	۲۷۹.۴۳	EUI	
۳۴.۴۵	۳۷.۷۵	۳۴.۰۵	۳۷.۴۲	۳۲.۴۴	۳۳.۸۲	UDI	
۳.۶۷٪	۶.۴۵٪	۱۷.۴۴٪	۲۳.۷۲٪	۱۸.۹٪	۲۸.۷۸٪	EUI	درصد تغییر نسبت به مدل پایه
افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	UDI	

تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور مقایسه نتایج دو الگوی الف و ب

مقادیر بهینه شاخص ها در بهینه سازی های مختلف هر دو الگو مشخص شده اند. (شکل ۱۱) مشاهده می گردد که شاخص EUI در بهینه سازی تک هدفه انرژی با مقادیر 260.80 Kwh/m^2 در الگوی الف و 275.68 Kwh/m^2 در الگوی ب در بهینه ترین حالت قرار داد. این در حالی است که در بهینه سازی تک هدفه نور روز، شاخص مصرف انرژی EUI با 325.15 Kwh/m^2 در الگوی الف و 370.65 Kwh/m^2 در الگوی ب، بیشترین مقادیر را در میان حالت های مختلف بهینه سازی نشان می دهد که علت آن نیز مورد هدف نبودن عملکرد انرژی در این بهینه سازی است. شاخص UDI نیز در بهینه سازی تک هدفه نور روز با مقادیر 37.18 برای الگوی الف و 38.12 برای الگوی ب در بهینه ترین حالت قرار دارد. این در حالی است که در بهینه سازی تک هدفه انرژی، UDI با مقادیر 30.12 برای الگوی الف و 33.45 برای الگوی ب کمترین مقادیر را در میان حالت های مختلف بهینه سازی نشان می دهد که علت آن نیز مورد هدف نبودن عملکرد نور

روز در این بهینه سازی است.



شکل (۱۱): مقایسه مقادیر EUI و UDI بدست آمده در بهینه‌سازی‌های مختلف

(تعادلی) که هر دو اهداف به‌صورت هم‌وزن در نظر گرفته می‌شوند، بهبود عملکرد انرژی به ترتیب با ۱۷.۴۴٪ و ۲۳.۷۲٪ کاهش در الگوی الف و ب، و افزایش UDI به ترتیب با ۱۷.۶۱٪ و ۲۱.۱٪ افزایش در الگوی الف و ب، در حالت تعادل قرار دارد. از این رو اگرچه هیچ کدام از عملکردها به‌اندازه بهینه‌سازی تک‌هدفه بهینه نمی‌گردند لیکن هر دو به میزان قابل قبولی بهبود می‌یابند و این خود نشان دهنده اهمیت بهینه‌سازی چندهدفه نسبت به تک‌هدفه است که با توجه به الزامات و اولویت‌های مختلف

بر اساس نتایج حاصل از بهینه‌سازی‌های مختلف می‌توان اذعان نمود با وجود اینکه از طریق بهینه‌سازی تک‌هدفه نور روز می‌توان به میزان زیادی UDI را در هر دو الگو بهبود بخشید، لیکن بهبود عملکرد انرژی و شاخص EUI بسیار پایین خواهد بود. به همین ترتیب نیز در بهینه‌سازی تک‌هدفه انرژی با وجود کاهش قابل توجه EUI و بهبود عملکرد انرژی، مقدار افزایش UDI بسیار ناچیز است که تأثیر بسیار اندک این بهینه‌سازی بر عملکرد نور روز را نشان می‌دهد. بدین ترتیب تنها در بهینه‌سازی چندهدفه پارتو

تصمیم گیرندگان پروژه، انواع مختلف بهینه سازی می توانند مورد استفاده قرار گیرند. لیکن در پژوهش حاضر بر اساس هدف بهینه سازی انرژی و نور روز با اولویت یکسان، مقادیر بهینه سازی چندهدفه پارتو جهت طراحی پوسته پیشنهاد می گردند.

علاوه بر این از ارزیابی نتایج حاصل می توان چنین ارزیابی نمود که در رابطه با عملکرد انرژی اگرچه الگوی الف در بهینه سازی تک هدفه انرژی با شاخص $EUI = 260.80$ نسبت به الگوی ب با شاخص $EUI = 275.68$ عملکرد انرژی بهتری را نشان می دهد لیکن درصد بهبود شاخص EUI در الگوی ب بالاتر است که نشان دهنده پتانسیل بیشتر آن در کاهش مصرف انرژی است و می توان از طریق بهینه سازی عملکرد انرژی آن را به میزان زیادی بهبود بخشید. همچنین در رابطه با عملکرد نور روز اگرچه الگوی ب در بهینه سازی تک هدفه نور روز با شاخص $UDI = 38.12$ نسبت به الگوی الف با شاخص $UDI = 37.18$ عملکرد نور روز بهتری را نشان می دهد لیکن درصد

بهبود شاخص UDI در الگوی الف بالاتر بوده و نشان دهنده پتانسیل بیشتر آن در بهبود عملکرد نور روز است و می توان از طریق بهینه سازی عملکرد آن را به میزان زیادی بهبود بخشید.

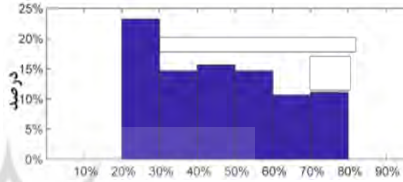
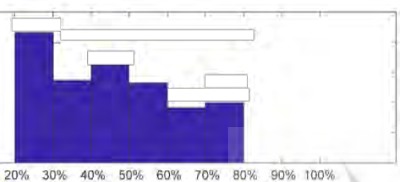
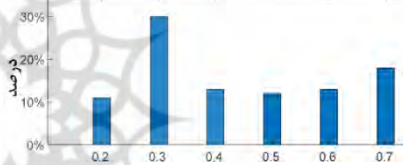
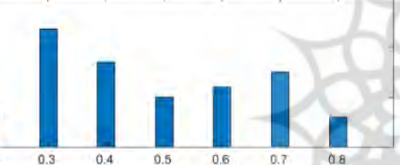
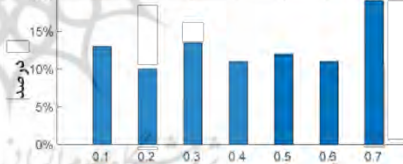
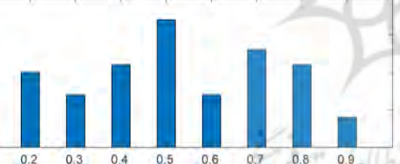
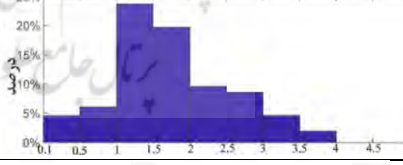
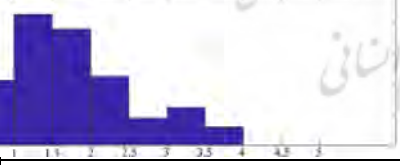
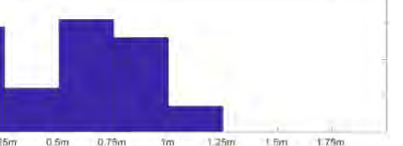
باتوجه به جدول ۱۳ از مقایسه مقادیر مختلف توزیع متغیرها در راه حل بهینه پارتو می توان نتایج زیر را بیان نمود: با توجه به درصدهای توزیع نسبت مساحت باز شو به دیوار WWR می توان مشاهده نمود نسبت ۲۰ تا ۳۰ درصد با ۲۴ درصد فراوانی در الگوی الف و ۲۲ درصد فراوانی در الگوی ب بیشتر از سایر نسبت ها در راه حل های پارتو تکرار شده است. همچنین در گزینه پیشنهادی پارتو تعادلی در الگوی الف نسبت ۲۶٪ و در الگوی ب نسبت ۲۱٪ به عنوان راه حل بهینه انتخاب شده است؛ بنابراین چنین به نظر می رسد که درصدهای ۲۰ تا ۳۰ درصد نسبت باز شو به دیوار دارای پتانسیل بیشتری در بهبود عملکرد پوسته با توجه به اهداف پژوهش می باشند. بر اساس درصد توزیع میزان نفوذ هوا می توان مشاهده نمود که نرخ نفوذ هوای

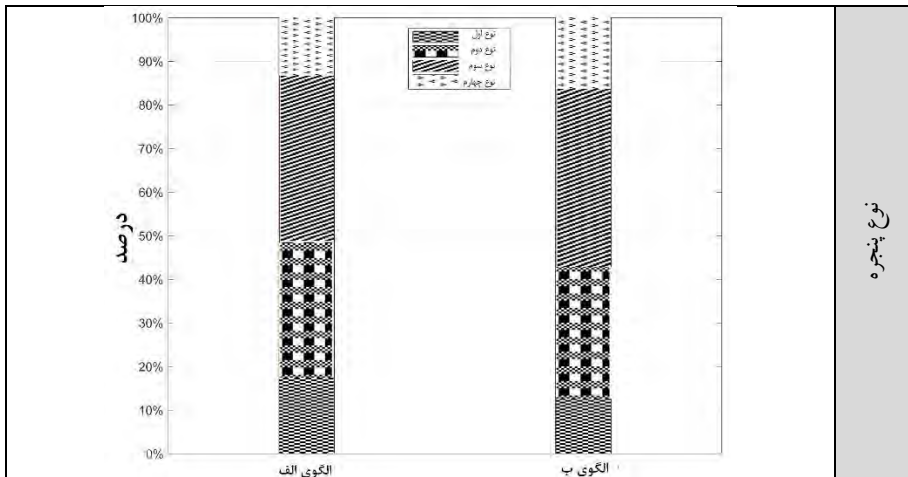
بیشتر از سایر مقادیر در راه‌حل‌های پارتو تکرار شده است. همچنین در گزینه پیشنهادی پارتو تعادلی در الگوی الف مقدار ۱.۱ و در الگوی ب مقدار ۱.۵ به عنوان راه‌حل بهینه انتخاب شده است. از این رو چنین به نظر می‌رسد که ضریب انتقال حرارتی با مقادیر بین ۱ تا ۱.۵ Kwh/m^2 دارای پتانسیل بیشتری در بهبود عملکرد پوسته است. همچنین بر اساس درصدهای مختلف توزیع مقادیر عمق سایبان در راه‌حل‌های پارتو می‌توان مشاهده نمود که سایبان با عمق ۰.۵ تا ۰.۷۵ متر با ۳۱ درصد فراوانی در راه‌حل‌های پارتو الگوی الف تکرار شده است و همچنین در گزینه پیشنهادی پارتو تعادلی نیز سایبان با عمق ۰.۷۵ متر به عنوان راه‌حل بهینه انتخاب شده است؛ لذا به نظر می‌رسد کاربرد آن در منطقه مورد مطالعه مناسب‌تر بوده و پتانسیل بالایی در بهبود عملکرد پوسته دارد. با توجه به درصدهای مختلف توزیع نوع پنجره در راه‌حل‌های پارتو می‌توان مشاهده نمود که پنجره نوع سوم که شیشه شفاف دو جداره ۲.۵ میلیمتر با ۱۰ سانتی متر جدار هوا است، با

ACH ۰.۳ با ۳۰٪ فراوانی در الگوی الف و ۲۵٪ فراوانی در الگوی ب بیشتر از سایر مقادیر در راه‌حل‌های پارتو تکرار شده است. همچنین در گزینه پیشنهادی پارتو تعادلی هم در الگوی الف و هم در الگوی ب مقدار ACH ۰.۳ به عنوان راه‌حل بهینه انتخاب شده است. از این رو چنین به نظر می‌رسد که نرخ نفوذ هوای ACH ۰.۳ دارای پتانسیل بیشتری در بهبود عملکرد پوسته است و کارایی بیشتر این مقدار در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس درصد توزیع، ضریب جذب سطوح ۰.۷ با ۱۹ درصد فراوانی در الگوی الف و ضریب جذب ۰.۵ با ۱۷ درصد فراوانی در الگوی ب بیشترین میزان توزیع را دارند؛ لذا به نظر می‌رسد که این دو مقدار در هر کدام از الگوهای مربوطه دارای پتانسیل بیشتری در بهبود عملکرد پوسته با توجه به اهداف پژوهش می‌باشند. با توجه به درصد توزیع میزان ضریب انتقال حرارتی می‌توان مشاهده نمود که مقادیر ضریب انتقال حرارتی ما بین ۱ تا ۱.۵ Kwh/m^2 با ۲۴٪ فراوانی در الگوی الف و ۲۲٪ فراوانی در الگوی ب

۳۲ درصد فراوانی در الگوی الف و
 ۳۵ درصد فراوانی در الگوی ب، پتانسیل
 بیشتری در بهبود عملکرد انرژی و نور
 روز پوسته ساختمان دارد. همچنین در
 گزینه پیشنهادی پارتو نیز در هر دو الگو،
 پنجره از نوع ۳ به عنوان راه حل بهینه
 انتخاب شده است. از این رو به نظر
 می رسد کاربرد آن در منطقه مورد مطالعه
 مناسب تر است.

جدول (۱۴): درصد توزیع مقادیر متغیرها در راه حل های پارتو

متغی رها	الگوی الف	الگوی ب
WWR		
میزان نفوذ هوا		
ضرب جذب سطح		
ضرب انتقال حرارتی		
عمق سایان		



نتیجه‌گیری

شاخص‌های EUI و UDI، به‌عنوان متغیرهای وابسته پژوهش، سه بهینه‌سازی مختلف مدنظر قرار گرفت: بهینه‌سازی نور روز، بهینه‌سازی انرژی و بهینه‌سازی چندهدفه (ترکیب نور روز و انرژی). با استفاده از تجزیه و تحلیل نتایج مشخص گردید که تنها در بهینه‌سازی چندهدفه پارتو (تعادلی) که هر دو اهداف به‌صورت هم‌وزن در نظر گرفته می‌شوند، بهبود عملکرد انرژی و نور روز در حالت تعادل قرار دارد و اگرچه هیچ‌کدام از عملکردها به‌اندازه بهینه‌سازی تک‌هدفه بهینه نمی‌گردند لیکن هر دو به میزان قابل‌قبولی بهبود می‌یابند؛ لذا از طریق بهینه‌سازی چندهدفه، راه‌حل‌های بهینه پارتو با بهبود

در پژوهش حاضر ارزیابی و بهینه‌سازی هم‌زمان عملکردهای انرژی و نور روز پوسته ساختمان‌های مسکونی، از طریق ترکیب شبیه‌سازی پویای انرژی و نور روز مطرح گردید. براین‌اساس در گام اول اولویت‌بندی مؤلفه‌های مؤثر بر عملکرد انرژی و نور روز در الگوهای پلان مورد مطالعه انجام گرفت. بدین ترتیب از طریق تحلیل حساسیت نرخ نفوذ هوای پنجره، ضریب انتقال حرارتی دیوارهای خارجی، جهت‌گیری و WWR، به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای مستقل مؤثر بر تابع هدف شناسایی شدند. سپس در گام دوم با در نظر گرفتن

قابل توجه عملکردهای موردنظر تولید گردید. در ادامه با استفاده از تجزیه و تحلیل راه حل های پارتو، پیشنهاد های طراحی پوسته برای جبهه اصلی آپارتمان های مسکونی در همدان ارائه شد. بر طبق بهینه سازی چند هدفه انجام گرفته در الگوهای مورد مطالعه، مصرف انرژی به میزان ۱۷.۴۴ و ۲۳.۷۲ درصد کاهش و بهره گیری از نور روز به میزان ۱۷.۶۱ و ۲۱.۱ درصد افزایش خواهد داشت. بدین ترتیب، خودکار ساختن شبیه سازی

به صورت پارامتریک و ترکیب آن با بهینه سازی می تواند تعداد شبیه سازی های انجام گرفته و زمان بهینه سازی را کاهش دهد. این نتایج موید این مطلب است که با بهره گیری از اصول ساده و تقریباً بدون هزینه در مراحل تصمیم گیری طراحی پوسته خارجی ساختمان می توان به میزان قابل توجهی انرژی مصرفی سالیانه را کاهش و بهره گیری از نور روز را افزایش داد.

ملاحظات اخلاقی:

حامی مالی: این پژوهش هیچ کمک مالی از سازمان های تأمین مالی دریافت نکرده است.

تعارض منافع: طبق اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

برگرفته از پایان نامه / رساله: این مقاله برگرفته از رساله دکتری نیلوفر محمدزاده است که با راهنمایی دکتر مجید مفیدی شمیرانی با عنوان «تبیین اصول طراحی پوسته بناهای مسکونی در جهت کاهش مصرف انرژی در مناطق سرد» در دانشکده عمران، معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات انجام شده است.

منابع

- Building and Environment, p. 1632–1643.
- Attia, S., (2012). “Computational Optimization Zero Energy Building Design: Interviews with 28 International Experts”, International Energy Agency(IEA) Task 40: Towards net Zero Energy Buildings Subtask B, Louvain la Neuve, Université Catholique de Louvain.
 - Baglivo C., and Congedo P.M., (2015). “Design Method of High Performance Precast External Walls for Warm Climate by Multi-Objective Optimization Analysis”, Energy, p. 1645–1661.
 - Bre, F., Silva, A., Ghisi, E. & Fachinotti, V., (2016). Residential building design optimisation using sensitivity analysis and genetic algorithm. Energy and Buildings, 133, 853–866.
 - Campolongo, F., Cariboni, J., Saltelli, A., (2007). An effective screening design for sensitivity analysis of large models. Environmental Modelling and Software, vol.22, pp.1509–1518.
 - اعتماد شیخ‌الاسلامی، سیده فائزه (۱۳۹۰). بررسی اقلیمی مسکن همدان. نشریه صفا، دوره ۲۱، شماره ۵۳.
 - طاهباز، منصوره و جلیلیان، شهربانو (۱۳۷۷). مقررات و معیارهای طراحی و اجرایی جزئیات تیپ ساختمانی. ج ۱: اقلیم و ویژگی‌های ساختمانی، سازمان برنامه و بودجه، تهران.
 - کسمایی، مرتضی (۱۳۸۳). اقلیم و معماری. نشر خاک، اصفهان، ص ۱۱۲–۱۳۵.
 - حسینی، ملک و درگاهی، عباس و محمد مهدی (۱۳۸۹). تحلیل ویژگی‌ها و اصول معماری همساز با اقلیم سرد. فصلنامه جغرافیایی چشم انداز زاگرس. سال دوم، شماره ۴.
 - هاشمی، فاطمه و حیدری، شاهین (۱۳۹۱). تأثیر طراحی معماری بر مصرف انرژی منازل مسکونی اقلیم سرد، با تأکید بر چرخه خورشیدی. دو فصلنامه دانشگاه هنر. شماره ۹.
 - Adamski M., (2007). “Optimization of the Form of a Building on an Oval Base”,

- (2014). "An Approach in Architectural Design of Energy Efficient Timber Buildings with a Focus on the Optimal Glazing Size in the South-Oriented Façade", *Energy and Buildings*, p. 3410–3418.
- Morris, M.D. (1991). Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*, 33(2), 161–174.
- Nguyen A.T, Reiter S., and Rigo P., (2014) "A Review on Simulation-based Optimization Methods Applied to Building Performance Analysis", *Appl. Energ.*, p. 1043–1058.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., & McMahon, T.A. (2007). Updated World map of the Köppen-Geiger Climate Classification, *Hydrol Earth Syst. Sci*, 11, 1633–1644.
- Ren H., Gao W., and Ruan Y., (2009). "Economic Optimization and Sensitivity Analysis of Photovoltaic System in Residential Buildings", *Renew Energy*, p. 883–889.
- Reinhart C.F., and Breton(2009). P.F., - Evins, R., (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy, Reviews*. 22, 230–245
- Garber, R., (2009). Optimisation stories: the impact of building information modelling on contemporary design practice. *Architect*, 79(2), 6–13.
- Handbook – Fundamentals., (2009). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers(ASHRAE), Atlanta, Georgia, USA.
- Heiselberg, P., Brohus, H., Hesselholt, A., Rasmussen, H., Seinre E., and Thomas, S., (2009). "Application of Sensitivity Analysis in Design of Sustainable Buildings", *Renew Energy*, p. 2030–2036.
- 10. Kaur J., Kaur P., and Aggarwal S.K., (2017). "Thermal Performance of a Building Envelope - An Evaluative Approach", *International Journal of Research and Analytical Reviews*.
- Leskovar V., and Premrov M.,

- Energy Build, p. 954–961.
- Wetter M., and Wright J.A., (2004). “A Comparison of Deterministic and Probabilistic Optimization Algorithms for Nonsmooth Simulation-based Optimization”, Build Environ, p. 989–999.
 - Wong L., (2017). “A Review of Daylighting Design and Implementation in Buildings”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, p. 959-968.
 - Wright, J.A. (1986). The optimised design of HVAC systems. Ph.D thesis. Loughborough: University of Technology, Leicestershire, UK.
 - Zhang L., Zhang L., and Wang Y., (2016) “Shape Optimization of Free-form Buildings Based on Solar Radiation Gain and Space Efficiency Using a Multi-objective Genetic Algorithm in the Severe Cold Zones of China”, Sol. Energy, p. 38–50.
 - www.irimet.net. Accessed on 14.08.2018, at 13:26.
 - “Experimental Validation of Autodesk 3ds Max Design 2009 and DAYSIM 3.0 Leukos, No1, Vol 6, p. 7-35.
 - Shan R., (2016). “Climate Responsive Fa_cade Optimization Strategy”, Ph.D. Dissertation, University of Michigan, USA.
 - Tian, W. (2013). A Review of Sensitivity Analysis Methods in Building Energy Analysis. Renewable and Sustainable Energy, Reviews. 20, 411–419.
 - Tuhus-Dubrow D., and Krarti M., (2015). “Genetic-Algorithm Based Approach to Optimize Building Envelope Design for Residential Buildings”, Building and Environment, p. 1574–1581.
 - Tuhus-Dubrow T., and Krarti M., (2009). “Comparative Analysis of Optimization Approaches to Design Building Envelope for Residential Buildings”, ASHRAE Transactions, 115(2):554.
 - Wang L., Wong N.K., and Li S., (2007). “Facade Design Optimization for Naturally Ventilated Residential Buildings in Singapore”,