

بهینه‌سازی عملکرد انرژی و نور روز پوسته ساختمان‌های مسکونی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در شهر همدان

نیلوفر محمدزاده^۱

مجید مفیدی شمیرانی^۲

منصوره طاهباز^۳

چکیده

پژوهش حاضر ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد انرژی و نور روز پوسته ساختمان‌های مسکونی در اقلیم سرد همدان را مد نظر قرار می‌دهد. برای این منظور الگوی رایج ساختمان‌های مسکونی در شهر همدان که آپارتمان‌های مسکونی ۵ طبقه با همسایگی شرقی و غربی و در نتیجه نورگیری از سمت شمال و جنوب می‌باشد، در قالب مدل پایه انتخاب گردید و مصرف انرژی سالانه و میزان بهره‌گیری از نور روز به عنوان توابع هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. پس از بررسی روش‌های مورد استفاده و شاخص‌های مختلف ارزیابی عملکرد انرژی و نور روز، شاخص‌های مصرف انرژی سالانه در واحد سطح (EUI) به منظور ارزیابی مقدار مصرف انرژی و روشنایی مفید نور روز (UDI) به عنوان شاخص ارزیابی بهره‌وری از روشنایی طبیعی انتخاب گشتند تا در یافتن راه‌حل‌های بهینه به منظور طراحی پوسته جبهه اصلی ساختمان‌های مسکونی به کار گرفته شوند. سپس مولفه‌های مختلف پوسته ساختمان‌های مسکونی شناسایی شده و تحلیل حساسیت داده‌ها با استفاده از روش غربالگری موریس به منظور رتبه‌بندی متغیرهای کلیدی موثر بر تابع هدف انجام گرفت. در ادامه مطالعات پارامتریک بر روی متغیرهای خروجی و بهینه‌سازی راه‌حل‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک مد نظر قرار گرفت. بدین ترتیب از طریق تعامل میان نرم‌افزار شبیه‌سازی و روش بهینه‌سازی چند هدفه، یک سری راه‌حل‌های 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 می‌دهد که از طریق بهینه‌سازی پارتو می‌توان 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 می‌تواند به میزان زیادی مصرف انرژی را کاهش داده و در عین حال بهره‌وری از روشنایی طبیعی را افزایش دهد.

واژگان کلیدی:

بهینه‌سازی، تحلیل حساسیت، ساختمان‌های مسکونی، عملکرد انرژی و نور روز، الگوریتم ژنتیک

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، (نویسنده مسئول). s.m.mofidishemirani.91@gmail.com

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

مقدمه

به منظور طراحی یک ساختمان انرژی کارا، می‌بایست عملکرد انرژی الگوهای مختلف آن به منظور 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 بازوهای 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 پیشرفت‌هایی در تکنیک‌های محاسباتی و روش‌های بهینه‌سازی ریاضی بود. یکی از محققین پیشگام در این زمینه رایت بود، که روش جستجوی مستقیم را به منظور 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 به منظور رسیدن به طراحی‌های انرژی کارا 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 مساله یا خود برنامه شبیه‌سازی این امر غیر ممکن باشد (وتر و رایت،

۲۰۰۴). به‌طور کلی در میان جامعه، بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی پذیرفته شده که اصطلاح بهینه‌سازی به یک فرآیند اتوماتیک اطلاق می‌گردد که کاملاً مبتنی بر شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی ریاضی است (آتیا، ۲۰۱۲). علاوه بر این برخی از محققین مانند ونگ و همکاران، از اصطلاح بهینه‌سازی استفاده کردند تا یک فرآیند بهبود را با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری برای دستیابی به راه‌حل‌های بهینه معرفی نمایند (ونگ و همکاران، ۲۰۰۷). در برخی از مطالعات نیز، روش تحلیل حساسیت به عنوان جایگزینی برای بهینه‌سازی ریاضی در جهت بهبود عملکرد ساختمان‌ها به کار گرفته شده است. از جمله می‌توان به مطالعه رن و همکاران اشاره نمود. آنها تحلیل حساسیت را برای یافتن ابعاد بهینه شبکه سلول‌های فتوولتائیک در ساختمان‌های 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 ساختمان‌های 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 بهینه‌سازی به منظور بهبود عملکرد انرژی ساختمان مورد توجه قرار گرفته است. تفاوت عمده‌ی 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 نرم‌افزار 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 می‌دهد و در پژوهش حاضر نیز به عنوان روشی در جهت تعیین

(GA^۳) استفاده نموده و این انتخاب را بر اساس مطالعات قبلی خود انجام دادند که در آن الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO^۴) و روش جستجوی ترتیبی را مقایسه کرده و به این نتیجه رسیدند که در حالتی که قرار است بیش از ۱۰ مولفه بهینه شود بهترین گزینه است (دوبرو و کرارتی، ۲۰۰۹). همچنین با توجه به ادبیات مربوطه اثبات شده که اختاپوس نیز یک الگوریتم تکاملی چند هدفه و بهبود یافته بوده و در تحقیقات اخیر مورد تایید قرار گرفته است. گالاپاگوس نیز یک الگوریتم بهینه‌سازی تک هدفه است که به منظور بهینه‌سازی یکی از معیار عملکردی مورد استفاده قرار می‌گیرد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶).

به طور خلاصه پژوهش حاضر روشی برای بهینه‌سازی عملکرد انرژی و نور روز پوسته ساختمان‌های مسکونی ارائه می‌دهد که شامل استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی به منظور ارزیابی عملکرد انرژی و نور روز پوسته، تجزیه و تحلیل حساسیت به منظور حفظ مولفه‌های کلیدی در ارتباط با معیارهای مربوطه، مدل‌سازی پارامتریک پوسته ساختمان و بهینه‌سازی متغیرهای کلیدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌باشد. در اینجا متغیرهای طراحی به عنوان ژن‌ها و اهداف به عنوان مقادیر فیتنس^۵ در نظر گرفته می‌شوند و منظور از بهینه‌سازی، یافتن نقاط کمینه در توابع تعریف شده با توجه به اهداف پژوهش می‌باشد. در نهایت نشان داده می‌شود که کاربرد این روش برای طراحی خانه‌های معمول در اقلیم سرد ایران منجر به بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد انرژی و نور روز این خانه‌ها می‌گردد.

متغیرهای تاثیرگذار طراحی مورد استفاده قرار گرفته تا با حفظ متغیرهای کلیدی، حل مساله‌ی بهینه‌سازی ساده‌تر گردد. در مطالعه بهینه‌سازی یک ساختمان معمولی، این فرآیند معمولاً توسط اتصال یک برنامه شبیه‌سازی ساختمان و یک موتور بهینه‌سازی که ممکن است از یک یا چند الگوریتم یا استراتژی بهینه‌سازی تشکیل شده باشد، اتوماتیک می‌گردد (شان، ۲۰۱۶). مطالعه پیشگام در این زمینه توسط رایت ارائه شد و سپس در اجزای مختلف ساختمان شامل فرم و هندسه (آدامسکی، ۲۰۰۷)، پوسته (باگلیو 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^۱) 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^۲) با یکدیگر مقایسه کردند که می‌توان به پژوهش توهوس-دوبرو و کرارتی اشاره نمود که در 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

1. Passive House Planning Package
2. Building Design Optimisation Problems
3. Genetic algorithm
4. Particle Swarm Optimisation algorithm
5. fitness

روش پژوهش

بر اساس هدف اصلی پژوهش حاضر که ارائه راهکارهای بهینه جهت طراحی پوسته از منظر بهبود عملکرد انرژی و نور روز می باشد، فرآیند 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 تاثیرات ابتدایی^۱ اجرا می گردد. از آنجا که ایده ی اصلی این روش متعلق به موریس می باشد، 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 کند تا مشخص شود کدامیک از متغیرهای طراحی (یا ورودی) تاثیر قابل توجهی بر تابع هدف (یا خروجی) دارند (تیان، ۲۰۱۳). تشخیص ورودی های غیر موثر و اولویت بندی مولفه های ورودی به ترتیب اهمیت از این طریق انجام می گیرد، اما دقیقاً اهمیت نسبی ورودی ها مشخص نمی گردد. در پژوهش حاضر نرم افزار R به منظور انجام این روش و محاسبات آماری مورد استفاده قرار گرفته است. در مرحله دوم تحلیل داده ها به صورت پارامتریک و با استفاده از الگوریتم ژنتیک و نرم افزارهای شبیه سازی و بهینه سازی انجام می گیرد. لذا با توجه به اهداف پژوهش دو سیستم شبیه سازی و بهینه سازی برای تهیه راه حل های طراحی بهینه پوسته ساختمان با یکدیگر ادغام می شوند.

در هر تکرار، سیستم بهینه سازی مجموعه ای از راه حل های جدید را تولید می کند و آنها را برای ارزیابی عملکردشان به سیستم شبیه سازی می فرستد. اطلاعات ساختاری و مصالح از قبل توسط سیستم بهینه سازی تغییر خواهند کرد. وقتی این راه حل ها به برنامه شبیه سازی فرستاده می شوند، مدل های متناظر بر اساس کدهای سیستم بهینه سازی ساخته خواهند شد. سپس شبیه سازی انرژی و نور روز می تواند به طور مستقیم اجرا شده و خروجی ها برای مراحل بیشتر به سیستم بهینه سازی برگشت داده شوند. در این پژوهش بر اساس اهداف و رسیدن به مقادیر بهینه هر مولفه، در سیستم بهینه سازی از الگوریتم ژنتیک به منظور تولید مدل ها استفاده گردید. در به کارگیری الگوریتم ژنتیک استفاده از معیارهایی به نام فیتنس که با متغیر وابسته پژوهش یا همان مصرف انرژی و بهره گیری از روشنایی طبیعی مرتبط هستند جهت بهبود و ارتقا ضروری است. در فرآیند بهینه سازی چند هدفه، طرح های مختلف به صورت خودکار و البته هدفمند تولید می گردند و در الگوی پلان مقادیر مختلف مولفه ها اندازه دهی می شوند. به منظور رعایت مشخصات اساسی مدل، تغییرات در محدوده هایی قابل قبول از نظر ضوابط و مقررات ملی ساختمان در منطقه مورد مطالعه برای هر متغیر تعریف می شوند.

در پژوهش حاضر متغیرهای مستقل با مولفه های مختلف طراحی پوسته مرتبط هستند که شامل مولفه هایی 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 می باشند و تغییر در آنها منجر به ساخت گزینه های طراحی



قرار گرفتند. در انتها نیز الگوریتم‌های گالاباگوس به منظور بهینه‌سازی تک هدفه و اختاپوس، جهت بهینه‌سازی چند هدفه به کار گرفته شدند.

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر شرایط اقلیمی همدان به عنوان شهری از اقلیم سرد می‌باشد. در این اقلیم ساختمان‌ها به منظور جلوگیری از اتلاف حرارتی و محافظت در برابر باد سرد زمستانی، به صورت متراکم و پیوسته در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند (کسمایی، ۱۳۸۳: ۱۱۲-۱۳۵). به منظور مطالعه و آزمون متغیرهای مستقل، گونه ساختمانی مورد بررسی الگوی آپارتمانی می‌باشد 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 به عنوان مدل پایه انتخاب گردید (جدول ۱). همچنین بهینه‌سازی جبهه و نمای اصلی ساختمان مد نظر 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) به صورت 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 مد نظر 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.

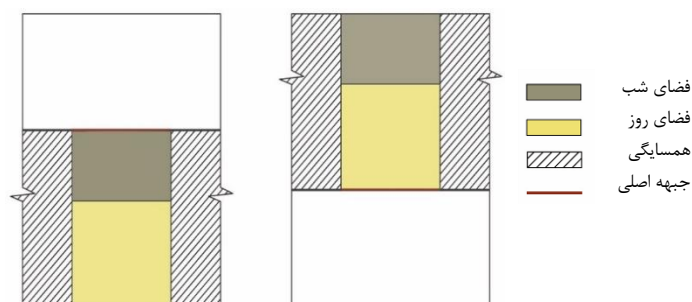
متعدد می‌گردد. متغیرهای وابسته نیز با عملکرد انرژی و نور روز پوسته مرتبط می‌باشند. نور روز به عنوان یکی از راهکارهای روشنایی از جمله ساده‌ترین روش‌ها در بهره‌وری انرژی محسوب می‌شود و گرچه خود به تنهایی منجر به ذخیره انرژی نمی‌گردد، از طریق کنترل روشنایی طبیعی می‌تواند منجر به کم یا خاموش شدن روشنایی مصنوعی و صرفه‌جویی در هزینه و مصرف انرژی گردد (ونگ، ۲۰۱۷). در میان شاخص‌های سنجش انرژی، EUI یا شدت مصرف انرژی با واحد Kwh/m^2 مهمترین معیار به عنوان متغیر وابسته پژوهش می‌باشد که از تقسیم بار انرژی کل بر مساحت منطقه مورد مطالعه بدست می‌آید. برای عملکرد نور روز UDI می‌تواند پیشگویی کننده شرایط مطلوب روشنایی در فضای مسکونی باشد. زیرا بیش از هر چیز نمایانگر دریافت میزان مطلوبی از روشنایی روز در فضا می‌باشد 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 نزدیک‌تری جهت پیشگویی شرایط مطلوب نور روز خواهد بود. از این رو الگوهای بهینه طراحی پوسته آنها هستند که این دو مقدار در آنها در بهینه‌ترین حالت ممکن قرار داشته باشد. بنابراین نوع تحلیل نهایی که می‌بایست در این ارتباط صورت پذیرد چند معیار بوده و تلاش می‌گردد از راه‌حل‌هایی که بتوانند با در نظر گرفتن این اهداف بطور همزمان حالات بهینه را ایجاد کنند استفاده گردد. در این پژوهش برای شبیه‌سازی پارامتریک نمونه مورد مطالعه، از نرم‌افزار گرافیکی سه بعدی راینو و پلاگینی از آن به نام گرس‌هاپر به عنوان پلتفرمی برای کنترل مولفه‌های هندسی استفاده شده است. همچنین پلاگین‌های لیدی‌باگ و هانی‌بی به عنوان افزونه محاسبه نور روز و مصرف انرژی و متصل شدن به نرم‌افزار انرژی پلاس و همچنین برنامه شبیه‌سازی دی سیم مورد استفاده

جدول (۱): ابعاد، جزئیات ساختمان

اجزا	ضریب انتقال حرارتی (w/m²k)	تاخیر 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	آجر نما ۱۱ سانتی متر
			ملات سیمانی ۱,۳ سانتی متر
			سفال ۲۰ سانتی متر
			دیوار گچی پیش ساخته 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 پیش ساخته ۲ سانتی متر
پنجره جبهه فرعی	۲,۷۰ مطابق مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، ساختمان گروه یک		پنجره UPVC

جدول (۲): مشخصات کلی ساختمان

عناصر	ویژگی‌ها
موقعیت ساختمان	همدان
	عرض جغرافیایی ۳۴,۵۲ طول جغرافیایی ۳۲,۴۸
ابعاد ساختمان	طول ۱۴، عرض ۱۰، ارتفاع ۱۸,۹
	ارتفاع طبقات ۳,۱۰ متر کف تا کف (ارتفاع کف تا زیر سقف ۲,۸)
هندسه پلان	مستطیل
نوع ساختمان	۵ طبقه با همسایگی شرقی-غربی
	سازه با وزن متوسط،
	بام مسطح و فاقد فضای شیروانی
کاربری ساختمان	مسکونی
ویژگی‌های حرارتی ساختمان	مطابق مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان، صرفه جویی در مصرف انرژی، ساختمان‌های گروه (۲۱)



شکل (۱): الگوی مورد مطالعه و جبهه اصلی

را در تمام ساختمان و کل سال داراست. نقاط تنظیم گرمایش ۱۹ درجه سانتیگراد و سرمایش ۲۵ درجه سانتیگراد می‌باشد. بنابراین در این پژوهش اقدامات مربوط به سیستم تاسیسات و تهویه مطبوع مد نظر قرار نگرفته است (جدول ۳).

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 تاثیر مولفه‌ها، سیستم ایده آل به منظور سرمایش و گرمایش در نظر گرفته شده است که توانایی جبران بارهای سرمایش و گرمایش

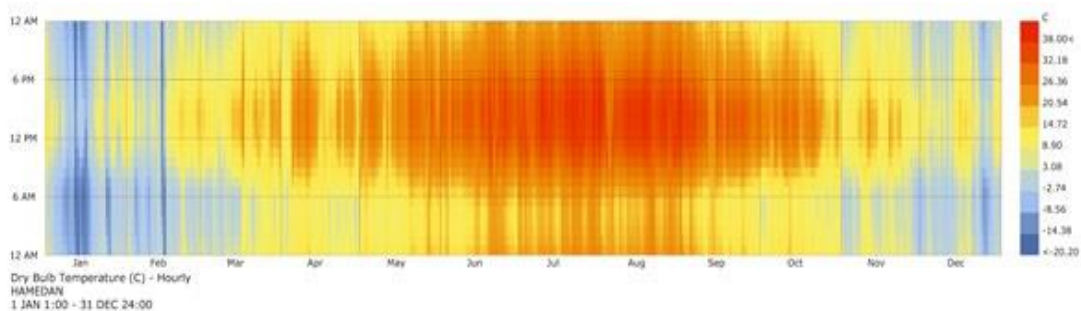
جدول (۳): مولفه‌های استفاده شده در محاسبات^۱

مقدار	نوع مصالح		اشغال شده	نقاط تنظیم گرمایش ۱۹ درجه سانتی گراد	دمای تعیین شده
۰٫۸	بازتاب کدر	سایبان	اشغال شده	نقاط تنظیم سرمایش ۲۵ درجه سانتی گراد	برای سیستم تهویه
۰٫۵	بازتاب کدر	دیوار داخلی	فضای خالی	نقاط تنظیم گرمایش ۱۶ درجه سانتی گراد	مطبوع
۰٫۸	بازتاب کدر	سقف داخلی	۱ (cl o)	ضریب لباس	مولفه‌های تعیین
۰٫۲	بازتاب کدر	کف داخلی	۶۰٪	رطوبت	کننده شرایط
			۰٫۵ ms	سرعت حرکت هوا	آسایش
			تامین گرمایش و سرمایش	فضای اشغال شده	سیستم HVAC
			گرمایش	فضای خالی	

دسته بندی اقلیمی کوپن-گایگر در محدوده سرد و نیمه خشک (Dsa) قرار گرفته است (پیل و همکاران، ۲۰۰۷). با استناد به داده‌های آماری ایستگاه سینوپتیک فرودگاه همدان، معدل سالانه دما در این شهرستان ۱۲ و نوسان سالانه دما ۴۱٫۱ درجه می‌باشد. متوسط نوسان دما در یک ماه غالباً بیش از ۱۰ درجه بوده و حتی به ۲۲ درجه نیز رسیده است (شکل ۲).

اطلاعات آب و هوایی

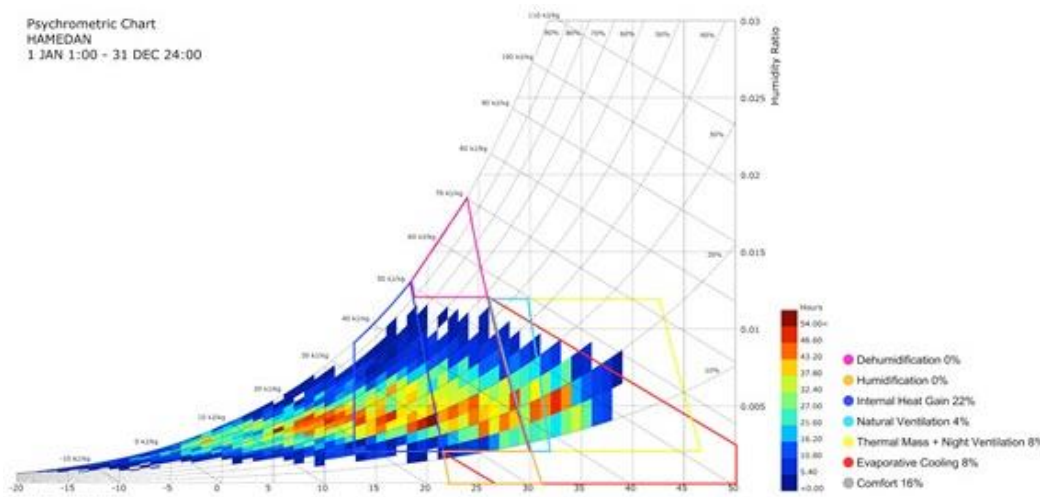
شهر همدان با مساحتی بالغ بر ۴۱۱۸ کیلومتر مربع از خط الراس رشته کوه الوند تا مرزهای شرقی استان همدان کشیده شده و بر طبق پهنه‌بندی تنظیمی طاهباز و جلیلیان در اقلیم کوهپایه‌ای مرتفع قرار گرفته است (طاهباز و جلیلیان، ۱۳۷۷). این شهر ۱۷۴۱٫۵ متر از سطح دریا ارتفاع داشته و دارای عرض جغرافیایی ۳۴٫۵۲ شمالی و طول جغرافیایی ۳۲٫۴۸ شرقی می‌باشد. اقلیم همدان بر اساس



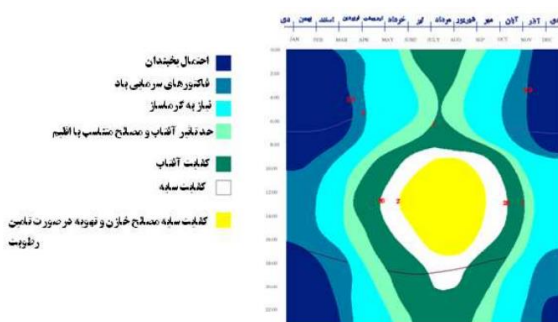
شکل (۲): نمودار آب و هوایی همدان (www.irimet.net)

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

بطور 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



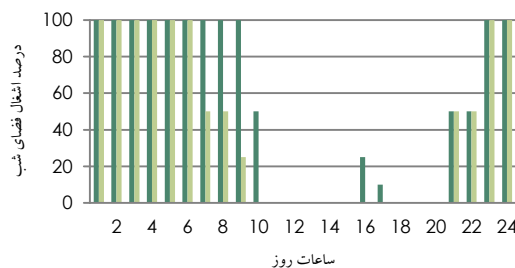
تا ۹,۵ ماه از سال احساس می‌شود و به حداقل رساندن مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه حداکثر بهره‌گیری از انرژی گرما به خوردن در نه ماه از سال ضروری است.



درجات گرمایش و سرمایش روز(نسبت به دمای ۱۸ و ۲۱ درجه) و مقایسه نسبت آن ها در شهر همدان نشان دهنده نیاز ۹۲ درصدی گرمایش در مقابل نیاز ۸ درصدی سرمایش می باشد. این مساله بیانگر اهمیت مساله 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 می شود. شکل ۴ تقویم نیاز اقلیمی همدان نشان می دهد در زمان بیشتری از سال، سرمای زمستان مساله اصلی در این شهر است. عملکرد نور روز نیز به شدت تحت تاثیر عرض جغرافیایی محل قرار گیری 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 می باشد.

بر این اساس حفاظت بنا در برابر باد سرد جنوب غربی ضروری است و نیاز به وسایل گرم‌ساز در بنا در حدود ۷

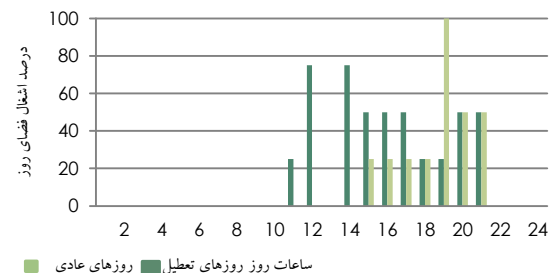
شده‌اند. فرض بر این است که هر یک از فضاها بر اساس برنامه پیشنهادی اشغال می‌گردد. (شکل ۵) بر اساس استاندارد اشری فرض می‌گردد که هر فرد در بخش روز (اتاق نشیمن) ۱۰۸ وات و در بخش شب (اتاق خواب) ۸۱ وات حرارتی تولید می‌کند و سیستم روشنایی مطابق با محاسبات مربوط به ارزیابی عملکرد نور روز روشن و خاموش خواهد شد. علاوه بر این تجهیزات الکتریکی اتاق نشیمن در طول روز ۱٫۵ وات بر متر مربع حرارت تولید خواهند کرد (اشری، ۲۰۰۹).



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 اشغال‌کنندگان فضا، تجهیزات و روشنایی به عنوان منابع حرارتی داخلی در نظر گرفته



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

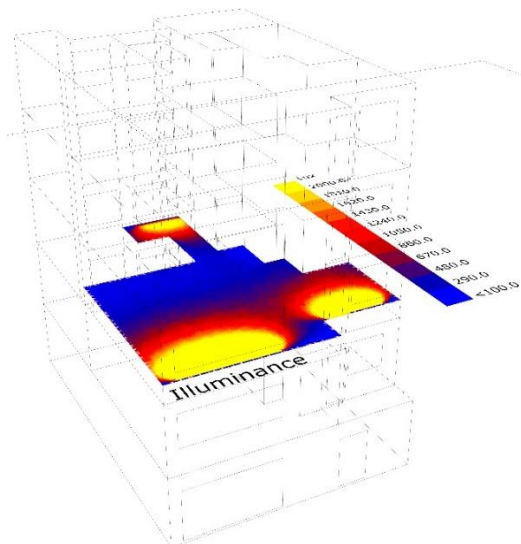
باشد، سیستم تهویه مطبوع روشن شده و تهویه طبیعی قطع می‌گردد. به منظور کسب اطمینان از درستی نتایج شبیه‌سازی، ابتدا نتایج شبیه‌سازی در روزهای مشخصی از سال با داده‌های حاصل از مطالعات میدانی مدل پایه مقایسه شدند. اندازه‌گیری‌های میدانی در اول دی‌ماه (انقلاب زمستانی) و اول تیرماه با استفاده از دیتالاگر و نورسنج ST-۱۳۰۱ در سه منطقه جلو، میانه و دور از پنجره و در فاصله ۰٫۷۵ 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) ۰٫۱۸ را نشان داد که در دامنه قابل قبولی قرار داشت زیرا

ملاحظات شبیه‌سازی

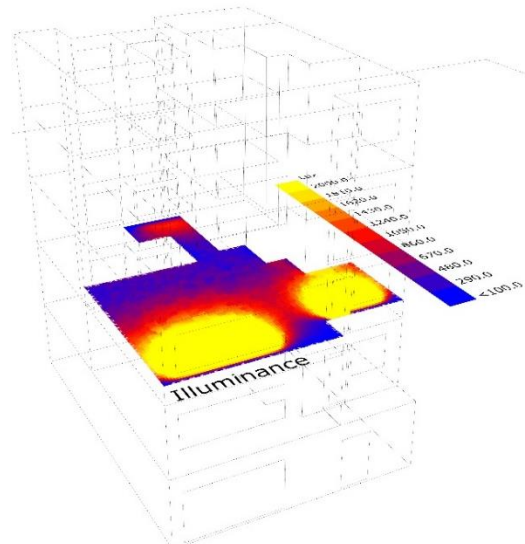
به منظور تحلیل مدل شبیه‌سازی، هر اتاق و دستگاه پله به عنوان یک منطقه حرارتی در نظر گرفته شد و ۲۲ منطقه حرارتی بدست آمد که با توجه به محدوده پژوهش، بار منطقه حرارتی مجاور پوسته جنوبی محاسبه گردید. فرض بر این است که هر یک از پنجره‌ها در جدار جنوبی بر اساس WWR ارتفاع ثابت و عرض متغیر خواهند داشت. در فصول 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 بالاتر یا برابر ۲۵ درجه

شبیه‌سازی و مدل ساخته شده اعتبارسنجی شده و برای فرآیند پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. (شکل ۷و۶)

خطای ± 0.20 برای اکثر اهداف طراحی کافی است (رینهارت و برتون، ۲۰۰۹). بدین ترتیب نرم‌افزار

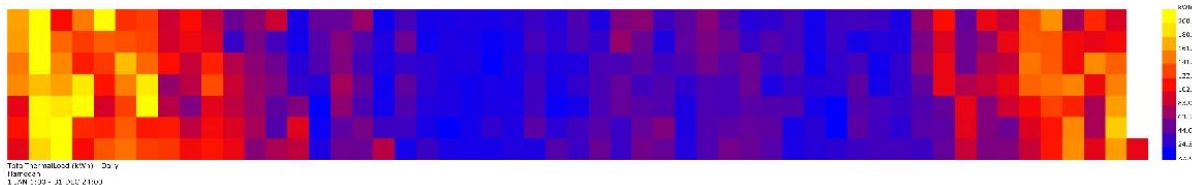


۱۲:۰۰am (انقلاب تابستانی)



۱۲:۰۰am (انقلاب زمستانی)

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



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

اینجا $k=11$ متغیر ورودی تعریف گردید که هر کدام مطابق جدول ۳ در چهار سطح امکان تغییر داشتند و متغیر طراحی ۱۱م که نوع شیشه را تعریف می‌کند، می‌تواند یکی از ۴ نوع تعریف شده در جدول ۴ باشد. موريس استفاده از $K+1$ نقطه در فضای متغیرهای ورودی در I مسیر مختلف را پیشنهاد می‌کند. در پژوهش حاضر با توجه به نوع داده‌ها $I=30$ در نظر گرفته شد، بنابراین ۳۰ مسیر یا تکرار تاثیرات برای هر متغیر ورودی محاسبه گردید. بدین ترتیب، $I(k+1) = 360$ نمونه ایجاد شد.

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 موريس یک مدل ریاضی با k عامل ورودی در نظر گرفته می‌شود و Y خروجی مد نظر می‌باشد. در

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

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	ShWindows	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	IRWindows	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

مقدار μ 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)

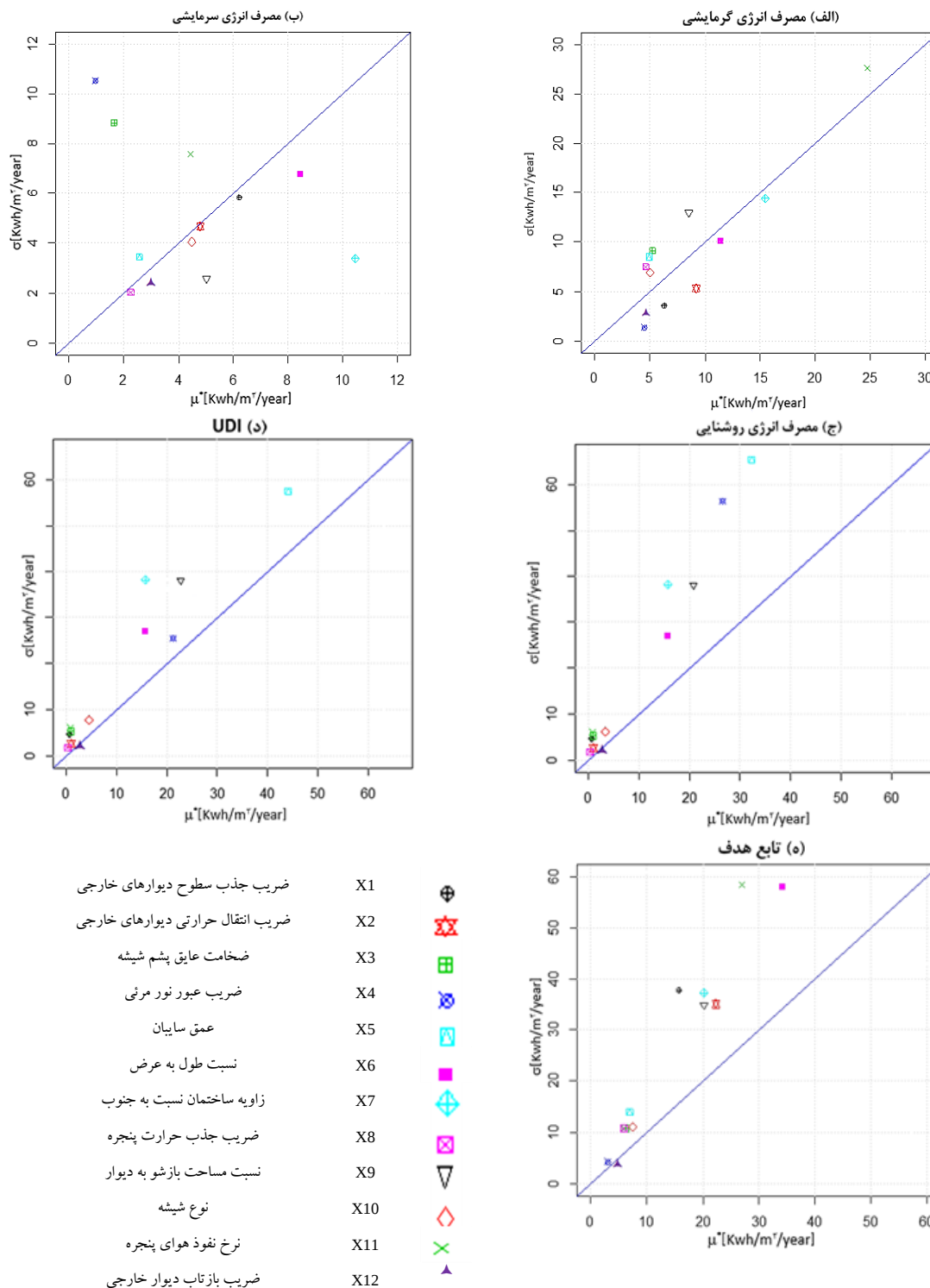
به منظور تحلیل میزان ارتباط متغیرهای وابسته (UDI_{total} و EU_I_{total}) نسبت به متغیرهای مستقل (مولفه‌های پوسته $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{11}$)، پس از شبیه‌سازی نتایج حاصله با توجه به اهداف مورد ارزیابی قرار گرفت و در هر مرحله برای هر متغیر سه شاخص μ ، μ^* و σ بدست آمد و متغیرها بر اساس شاخص μ^* رتبه‌بندی شدند. بدین ترتیب

روش موريس دو شاخص حساسیت برای هر متغیر ارائه می‌دهد: μ که تاثیر هر متغیر ورودی بر متغیر خروجی را نشان می‌دهد؛ و شاخص انحراف استاندارد σ که تاثیرات غیر خطی هر ورودی بر خروجی و شدت تعامل هر ورودی با سایر ورودی‌ها را ارزیابی می‌نماید (تیان، ۲۰۱۳). بدین ترتیب مقادیر کم μ و σ مربوط به یک ورودی غیر نافذ می‌باشند.

بهبود این روش توسط کامپولونگو صورت گرفت و شاخص اصلاح شده μ^* پیشنهاد گردید که خود به تنهایی برای ارائه یک رتبه‌بندی قابل اعتماد از عوامل ورودی کافی است. این شاخص میانگین توزیع مقدار مطلق تاثیر ابتدایی فاکتورهای ورودی است. استفاده از μ^* مشکل تاثیرات علامت‌های مخالف را که می‌توانند در مواقعی که مدل غیر یکنواخت است، یکدیگر را از بین ببرند و

نتایج زیر حاصل شد: نرخ نفوذ هوای پنجره با شاخص $\mu^*=20.248$ و WWR با شاخص $\mu^*=20.171$ به ترتیب تاثیر قابل توجهی بر تابع هدف در فضای مورد مطالعه دارند.

ضریب انتقال حرارتی دیوارهای خارجی با شاخص $\mu^*=26.949$ ، جهت گیری با شاخص $\mu^*=22.365$



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

همچنین متغیر جهت‌گیری با شاخص $\sigma = 60.31$ بیشترین تاثیر غیر خطی را بر تابع هدف دارد. این بدان معنی است که همبستگی بالایی با سایر متغیرها داشته و این مساله پیش‌بینی دقیق تاثیر آن بر تابع هدف را دشوار می‌سازد (شکل ۸).

بهینه‌سازی

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل حساسیت، شش متغیر مستقل بدست 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 به عنوان 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 به صورت همزمان نیز به عنوان اهداف بهینه‌سازی مد نظر قرار گرفتند: به حداقل رساندن EUI و به حداکثر رساندن UDI. همچنین با توجه به اینکه نرم‌افزار گرس‌هاپر به صورت پیش فرض به حداقل ساختن توابع می‌پردازد می‌بایست تابع UDI را در ۱- ضرب نمود.

فرآیند بهینه‌سازی

در این مرحله به منظور یافتن عملکرد بهینه، متغیرهای کلیدی انتخابی در محدوده‌های تعریف شده تغییر کرده

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	$U_{ExtWall}$	۰٫۸۴	[۰٫۱، ۵]
۲	ضریب جذب سطوح دیوارهای خارجی	$\alpha_{ExtWall}$	رنگ متوسط ۰٫۶	[۰٫۱، ۰٫۹]
۳	عمق سایبان	ShWindows	۰	[۰، ۲]
۴	نسبت مساحت باز شو به دیوار	WWR	٪۱۵	[۱۰، ۷۰]
۵	نرخ نفوذ هوای پنجره	IRWindows	۰٫۲۵	[۰٫۲، ۰٫۸]
۶	نوع شیشه	WinType	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

و سایر متغیرهای کنترل نیز ثابت در نظر گرفته شدند. به منظور 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 شده اند.

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

الگوی ب	الگوی الف		
۳۹,۳	۳۲,۴۵	UDI<100	شاخص عملکرد نور روز UDI
۳۰,۹	۲۸,۹۵	UDI 100-2000	
۲۹,۸	۳۸,۶	UDI>2000	
۳۹۲,۳۹	۳۲۸,۰۵	(Kwh/m ²)	شاخص عملکرد انرژی EUI

بهینه‌سازی تک هدفه نور روز

به منظور انجام بهینه‌سازی تک هدفه در این مرحله الگوریتم گالایاگوس مورد استفاده قرار گرفت. اندازه جمعیت نسل‌ها ۵۰ در نظر گرفته شده و در مجموع ۱۰ نسل وجود دارد. هدف بهینه‌سازی در مرحله اول حداکثر ساختن UDI 100-2000lux می‌باشد. مقادیر متغیرهای بهینه و شاخص‌های 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 موثر بر عملکرد نور روز شامل نسبت مساحت باز شو به دیوار، ضریب عبور نور مرئی و عمق سایبان مد نظر 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] می‌باشد. 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 راه حل بهینه نور روز

متغیرهای طراحی	مشخصه	واحد	مقدار بهینه در الگوی الف	مقدار بهینه در الگوی ب
۱ نسبت مساحت باز شو 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 تک هدفه نور روز

شاخص‌ها	محدوده	الگوی الف	الگوی ب
شاخص عملکرد نور روز UDI	UDI<100	۲۷,۵	۳۰,۳۳
	UDI 100-2000	۳۷,۱۸	۳۸,۱۲
	UDI>2000	۳۵,۳۲	۳۱,۱۵
شاخص عملکرد انرژی (EUI(Kwh/m ²))	انرژی کل	۳۲۵,۱۵	۳۷۰,۶۵

بهینه‌سازی تک هدفه 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 می‌باشد. 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 موثر بر عملکرد انرژی مورد توجه قرار گرفته‌اند که شامل نسبت مساحت باز شو به دیوار، نرخ نفوذ هوای پنجره، ضریب انتقال حرارتی دیوارهای خارجی، ضریب جذب سطوح دیوارهای خارجی، نوع پنجره، ضخامت عایق و عمق سایبان می‌باشند. شدت مصرف انرژی در مدل بهینه

به ترتیب ۲۰,۴۹٪ و ۲۹,۷۴٪ کاهش نسبت به مدل پایه را نشان می‌دهد.

جدول (۱۱): مقادیر متغیرها در راه‌حل بهینه انرژی

متغیرهای طراحی	مشخصه	واحد	مقدار بهینه الگوی الف	مقدار بهینه الگوی ب
۱ ضریب انتقال حرارتی دیوارهای خارجی	$U_{ExtWall}$	W/m^2K	۱,۹۵	۱,۸
۲ ضریب جذب سطوح دیوارهای خارجی	$\alpha_{ExtWall}$	بدون واحد	۰,۴	۰,۶
۳ عمق سایبان	$Sh_{Windows}$	متر	۰,۵	-
۴ نسبت مساحت باز شو به دیوار	WWR	بدون واحد	۰,۳۳	۰,۲۸
۵ نرخ نفوذ هوای پنجره	$IR_{Windows}$	ACH	۰,۲	۰,۳
۶ نوع شیشه	$WinType$	-	۳	۳

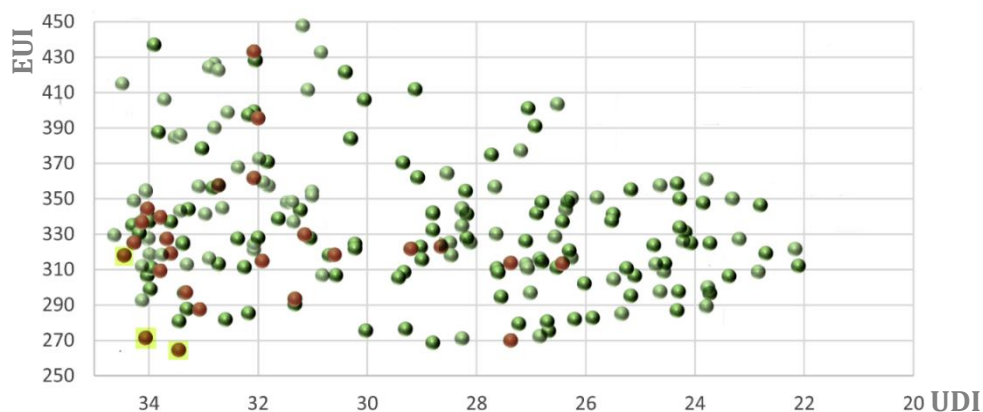
جدول (۱۲): شاخص‌های عملکرد انرژی و نور روز با بهینه‌سازی تک هدفه انرژی

شاخص‌ها	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

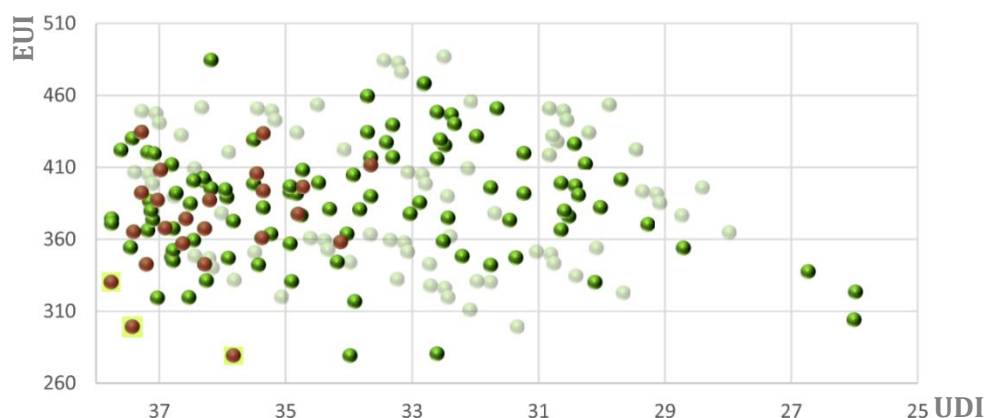
بهینه‌سازی چند هدفه

در فرآیند بهینه‌سازی چند هدفه 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 فرآیند 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 شده‌است.



شکل (۹): جبهه پارتو برای پوسته جنوبی ساختمان



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

جدول (۱۳): مقادیر مختلف متغیرها و شاخص‌های متناظر در بهینه‌سازی چند هدفه 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
متغیرها	U value	۱,۰۶	۲,۱	۱,۱	۱,۵	۰,۹۴	۱,۳
	WWR	٪۲۱	٪۳۵	٪۲۶	٪۲۱	٪۱۶	٪۱۸
	WT	۴	۲	۳	۳	۲	۴
	α	۰,۱	۰,۴	۰,۷	۰,۵	۰,۶	۰,۷
	SH	۰	-	۰,۷۵	-	۰,۳۵	-
	IR	۰,۵	۰,۴	۰,۳	۰,۳	۰,۲	۰,۳
شاخص‌ها	EUI	۳۱۶,۰۱	۳۶۷,۰۶	۲۷۰,۸۳	۲۹۹,۲۹	۲۶۵,۷۵	۲۷۹,۴۳
	UDI	۳۴,۴۵	۳۷,۷۵	۳۴,۰۵	۳۷,۴۲	۳۲,۴۴	۳۳,۸۲
درصد تغییر نسبت به مدل پایه	EUI	٪۳,۶۷	۶,۴۵٪	٪۱۷,۴۴	٪۲۳,۷۲	٪۱۸,۹	٪۲۸,۷۸
	UDI	٪۱۸,۹	٪۲۲,۱۶	٪۱۷,۶۱	٪۲۱,۱	٪۱۲,۰۵	٪۹,۴۴
		افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش

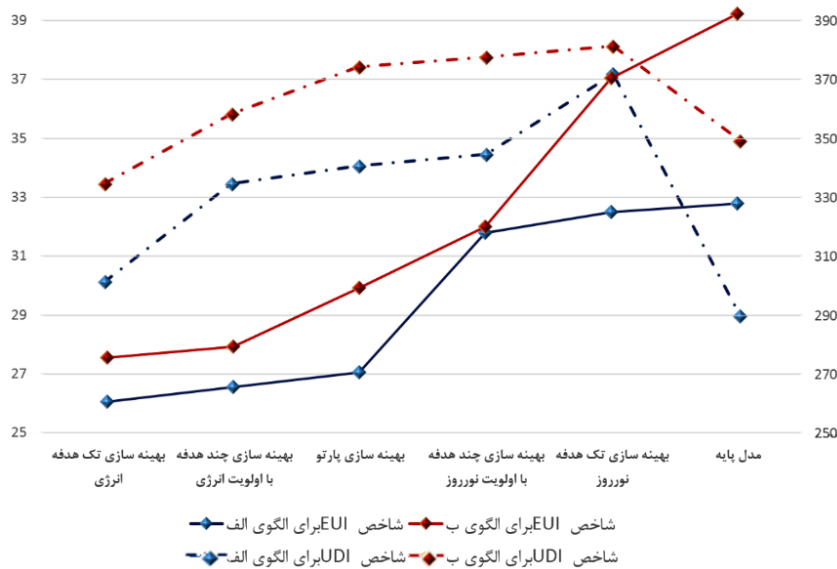
تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور مقایسه نتایج دو الگوی الف و ب مقادیر بهینه شاخص‌ها در بهینه‌سازی‌های مختلف هر دو الگو مشخص شده‌اند. (شکل ۱۱) مشاهده می‌گردد که شاخص EUI در بهینه‌سازی تک هدفه انرژی با مقادیر $260,80 \text{ Kwh/m}^2$ در الگوی الف و $275,68 \text{ Kwh/m}^2$ در الگوی ب در بهینه‌ترین حالت قرار داد. این در حالی است که در

بهینه‌سازی تک هدفه نور روز، شاخص مصرف انرژی EUI با $325,15 \text{ Kwh/m}^2$ در الگوی الف و $370,65 \text{ Kwh/m}^2$ در الگوی ب، بیشترین مقادیر را در میان حالت‌های مختلف بهینه‌سازی نشان می‌دهد که علت آن نیز مورد هدف نبودن عملکرد انرژی در این بهینه‌سازی می‌باشد. شاخص UDI نیز در بهینه‌سازی تک هدفه نور روز با مقادیر $37,18$ برای الگوی الف و $38,12$

کمترین مقادیر را در میان حالت‌های مختلف بهینه‌سازی نشان می‌دهد که علت آن نیز مورد هدف نبودن عملکرد نور روز در این بهینه‌سازی می‌باشد.

برای الگوی ب در بهینه‌ترین حالت قرار دارد. این در حالی است که در بهینه‌سازی تک هدفه انرژی، UDI با مقادیر ۳۰,۱۲ برای الگوی الف و ۳۳,۴۵ برای الگوی ب



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

و این خود نشان دهنده اهمیت بهینه‌سازی چند هدفه نسبت به تک هدفه می‌باشد که با توجه به الزامات و اولویت‌های مختلف تصمیم گیرندگان پروژه، انواع مختلف بهینه‌سازی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. لیکن در پژوهش حاضر بر اساس هدف بهینه‌سازی انرژی و نور روز با اولویت یکسان، مقادیر بهینه‌سازی چند هدفه پارتو جهت طراحی پوسته پیشنهاد می‌گردند.

علاوه بر این از ارزیابی نتایج حاصل می‌توان چنین ارزیابی نمود که در رابطه با عملکرد انرژی اگرچه الگوی الف در بهینه‌سازی تک هدفه انرژی با شاخص EUI ۲۶۰,۸۰ نسبت به الگوی ب با شاخص EUI ۲۷۵,۶۸ عملکرد انرژی بهتری را نشان می‌دهد لیکن درصد بهبود شاخص EUI در الگوی ب بالاتر است که نشان دهنده پتانسیل بیشتر آن در کاهش مصرف انرژی می‌باشد و می‌توان از طریق بهینه‌سازی عملکرد انرژی آن را به میزان زیادی بهبود بخشید. همچنین در رابطه با عملکرد نور روز اگرچه

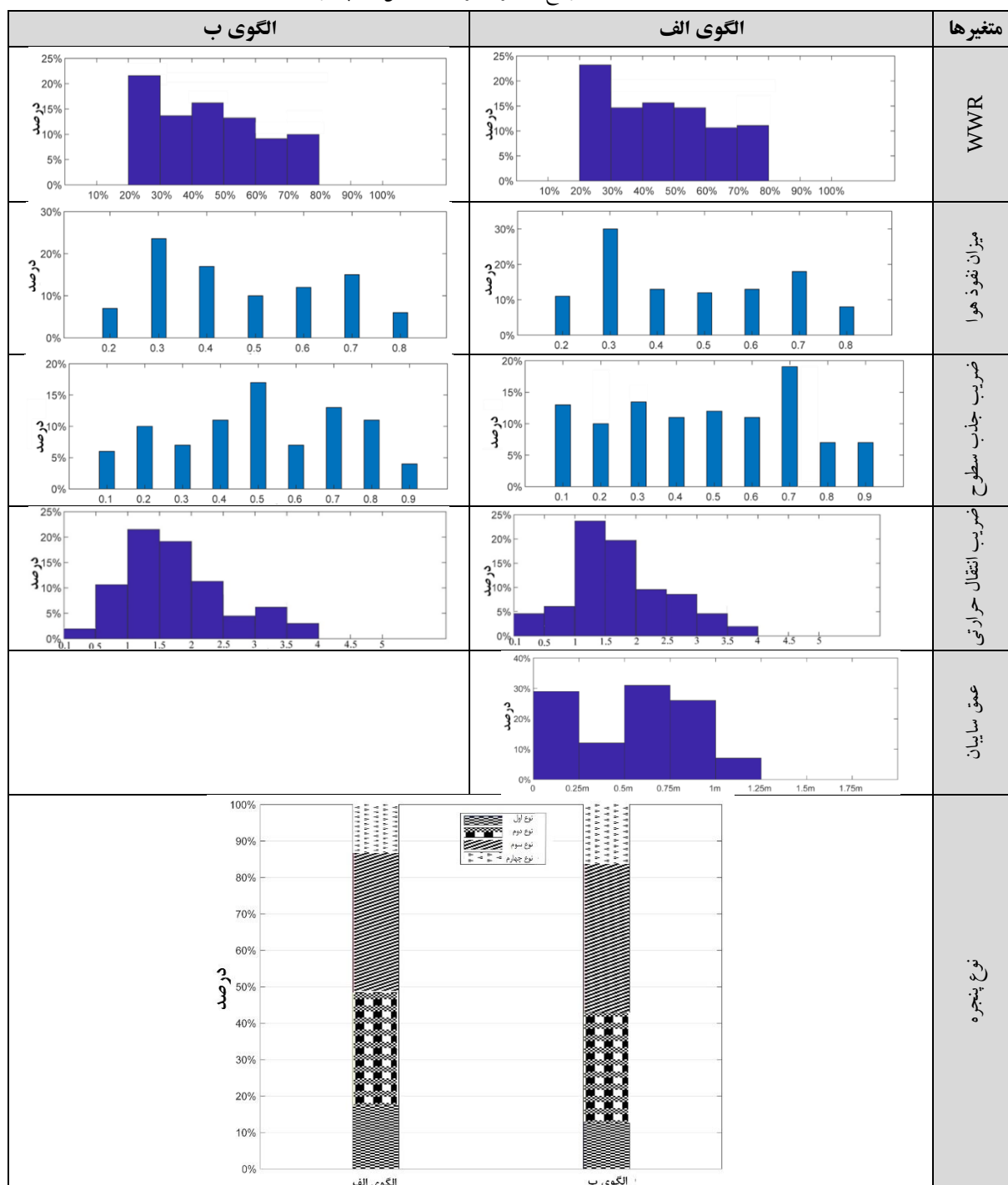
بر اساس نتایج حاصل از بهینه‌سازی‌های مختلف می‌توان اذعان نمود با وجود اینکه از طریق بهینه‌سازی تک هدفه نور روز می‌توان به میزان زیادی UDI را در هر دو الگو بهبود بخشید، لیکن بهبود عملکرد انرژی و شاخص EUI بسیار پایین خواهد بود. به همین ترتیب نیز در بهینه‌سازی تک هدفه انرژی با وجود کاهش قابل توجه EUI و بهبود عملکرد انرژی، مقدار افزایش UDI بسیار ناچیز می‌باشد که تاثیر بسیار اندک این بهینه‌سازی بر عملکرد نور روز را نشان می‌دهد. بدین ترتیب تنها در بهینه‌سازی چند هدفه پارتو (تعادلی) که هر دو اهداف به صورت 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 هیچکدام از عملکردها به اندازه بهینه‌سازی تک هدفه بهینه نمی‌گردند لیکن هر دو به میزان قابل قبولی بهبود می‌یابند

الگوی ب در بهینه‌سازی تک هدفه نور روز با شاخص UDI ۳۸,۱۲ نسبت به الگوی الف با شاخص UDI ۳۷,۱۸ عملکرد نور روز بهتری را نشان می‌دهد لیکن درصد بهبود شاخص UDI در الگوی الف بالاتر بوده و نشان دهنده پتانسیل بیشتر آن در بهبود عملکرد نور روز می‌باشد و می‌توان از طریق بهینه‌سازی عملکرد آن را به میزان زیادی بهبود بخشید.

با توجه به جدول ۱۳ از مقایسه مقادیر مختلف توزیع متغیرها در راه‌حل بهینه پارتو می‌توان نتایج زیر را بیان نمود: با توجه به درصد‌های توزیع نسبت مساحت بازشو به دیوار WWR می‌توان مشاهده نمود نسبت ۲۰ تا ۳۰ درصد با ۲۴ درصد فراوانی در الگوی الف و ۲۲ درصد فراوانی در الگوی ب بیشتر از سایر نسبت‌ها در راه‌حل‌های پارتو تکرار شده است. همچنین در گزینه پیشنهادی پارتو تعادلی در الگوی الف نسبت ۲۶٪ و در الگوی ب نسبت ۲۱٪ به عنوان راه‌حل بهینه انتخاب شده است. بنابراین چنین به نظر می‌رسد که درصد‌های ۲۰ تا ۳۰ در نسبت بازشو به دیوار دارای پتانسیل بیشتری در بهبود عملکرد پوسته با توجه به اهداف پژوهش می‌باشند. بر اساس درصد توزیع میزان نفوذ هوا می‌توان مشاهده نمود که نرخ نفوذ هوای ۰,۳ ACH 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 ۰,۳ ACH به عنوان راه‌حل بهینه انتخاب شده است. از این رو چنین به نظر می‌رسد که نرخ نفوذ هوای ۰,۳ ACH دارای پتانسیل بیشتری در بهبود عملکرد پوسته می‌باشد 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 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 می‌باشد. 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 می‌باشد، با 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 راه‌حل بهینه انتخاب شده است. از این رو به نظر می‌رسد کاربرد آن در منطقه مورد مطالعه مناسب‌تر می‌باشد.

جدول (۱۴): درصد توزیع مقادیر متغیرها در راه‌حل‌های پارتو



نتیجه‌گیری

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. بر این اساس در گام اول اولویت‌بندی

مولفه‌های موثر 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، به عنوان مهمترین متغیرهای مستقل موثر بر تابع هدف

منابع

اعتماد شیخ الاسلامی، 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). تاثیر طراحی معماری بر مصرف انرژی منازل مسکونی اقلیم سرد، با تاکید بر چرخه خورشیدی. دو فصلنامه دانشگاه هنر. شماره ۹.

Adamski M.,(2007). "Optimization of the Form of a Building on an Oval Base", 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.

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.

شناسایی شدند. سپس در گام دوم با در نظر گرفتن شاخص‌های EUI و UDI، به عنوان متغیرهای وابسته پژوهش، سه بهینه‌سازی مختلف مد نظر قرار گرفت: بهینه‌سازی نور روز، بهینه‌سازی انرژی و بهینه‌سازی چند هدفه (ترکیب نور روز و انرژی). با استفاده از تجزیه و تحلیل نتایج مشخص گردید که تنها در بهینه‌سازی چند هدفه پارتو (تعدلی) که هر دو اهداف به صورت هم‌وزن در نظر گرفته می‌شوند، بهبود عملکرد انرژی و نور روز در حالت تعادل قرار دارد و اگرچه هیچکدام از عملکردها به اندازه بهینه‌سازی تک‌هدفه بهینه نمی‌گردند لیکن هر دو به میزان قابل قبولی بهبود می‌یابند. لذا از طریق بهینه‌سازی چند هدفه، راه‌حل‌های بهینه پارتو با بهبود قابل توجه عملکردهای مورد نظر تولید گردید. در ادامه با استفاده از تجزیه و تحلیل راه‌حل‌های پارتو، پیشنهادات طراحی پوسته برای جبهه اصلی آپارتمان‌های مسکونی در همدان ارائه شد. بر طبق بهینه‌سازی چند هدفه انجام گرفته در الگوهای مورد مطالعه، مصرف انرژی به میزان ۱۷,۴۴ و ۲۳,۷۲ درصد کاهش و بهره‌گیری از نور روز به میزان ۱۷,۶۱ و ۲۱,۱ درصد افزایش خواهد داشت. بدین ترتیب، خودکار ساختن شبیه‌سازی به صورت پارامتریک و ترکیب آن با بهینه‌سازی می‌تواند تعداد شبیه‌سازی‌های انجام گرفته و زمان بهینه‌سازی را کاهش دهد. این نتایج موید این مطلب است که با بهره‌گیری از اصول ساده و تقریباً بدون هزینه در مراحل تصمیم‌گیری طراحی پوسته خارجی ساختمان می‌توان به میزان قابل توجهی انرژی مصرفی سالیانه را کاهش و بهره‌گیری از نور روز را افزایش داد.

- 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", *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.
- 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.,(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., "Experimental Validation of Autodesk 3ds Max Design 2009 and DAYSIM 3.0 Leukos, No1, Vol 6, p. 7-35.