

ارائه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای افزایش کارایی انرژی در ساختمان‌های مسکونی

محبوبه رحمانی^۱، حامد شکوری گنجوی^۲، عالیه کاظمی^۳

چکیده: امروزه با توجه به اهمیت موضوع انرژی، این مبحث یکی از موضوعات مورد توجه در محافل اقتصادی شده است. مطابق با آمار ترانزنامه انرژی، بیش از یک سوم انرژی کشور در بخش ساختمان مصرف می‌شود. با توجه به اتلاف زیاد انرژی در ساختمان‌های موجود و نیز، کارایی پایین سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی، انتخاب راهکار مناسب برای کاهش مصرف و اتلاف انرژی در این بخش حائز اهمیت بسیار است. در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی ریاضی، راهکاری برای انتخاب ترکیب مناسبی از مصالح ساختمانی و سیستم‌های تهویه مطبوع فعال و غیرفعال در ساختمان‌های مسکونی ارائه شده است تا با استفاده از آن، هزینه‌ها و همچنین میزان انرژی حرارتی مصالح ساختمان حداقل شود. مدل ارائه شده برای یک ساختمان مسکونی در شهر تهران به اجرا درآمد و ترکیب‌های بهینه مصالح، با توجه به الزامات مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان مشخص شد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی چندهدفه، ساختمان‌های مسکونی، سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی، شبیه‌سازی، کارایی انرژی.

۱. کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۰

نویسنده مسئول مقاله: عالیه کاظمی

E-mail: aliyehkazemi@ut.ac.ir

مقدمه

امروزه موضوع انرژی یکی از موضوعات مهم و بحث‌انگیز محافل اقتصادی است. افزایش جمعیت، اتمام و اتلاف منابع انرژی و آلودگی‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی، عواملی هستند که هر روز محدودیت‌های آینده بشر و مخاطرات آن را گوشزد می‌کنند. با توجه به محدودیت‌های موجود، تنها استفاده از روش‌های درست مصرف، بهینه‌سازی وسایل مصرف انرژی و به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر، می‌تواند بحران انرژی را مهار کند. انرژی و نحوه تأمین و مصرف آن، یکی از دغدغه‌های امروز کشورهای جهان است، چه آنها که تأمین‌کننده مواد خام انرژی هستند و چه آنها که با فناوری‌های خود آن را قابل مصرف می‌کنند.

در ایران، اتلاف انرژی در بخش ساختمان نیز همچون سایر بخش‌ها بسیار زیاد است؛ به‌طوری که مصرف انرژی در ساختمان‌های کشور بیش از $\frac{2}{5}$ برابر متوسط مصرف جهانی گزارش شده است. به‌دلیل طراحی و ساخت نامناسب، مصالح و تجهیزات غیراستاندارد و مواد به‌کار رفته در ساختمان‌ها، عدم بهره‌وری و کارایی بالا و انتخاب نامناسب پوشش ساختمان‌ها اعم از درها و پنجره‌ها و سیستم عایق‌کاری، انرژی زیادی در بخش ساختمان تلف می‌شود (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۳). به‌کارگیری مصالح ساختمانی و وسایل حرارتی و برودتی مناسب، نقش بسزایی در کاهش مصرف انرژی در ساختمان ایفا می‌کند.

در پژوهش حاضر با هدف ارائه راهکاری برای بهبود مصرف انرژی در ساختمان‌ها، مدلی ریاضی برای تعیین مصالح ساختمانی به‌منظور کاهش هزینه و انرژی حرارتی موردنیاز پیشنهاد می‌شود. در ادامه، پس از مرور پیشینه و بیان روش پژوهش، مدل ریاضی پیشنهادی ارائه شده است، سپس نتایج برای ساختمانی در شهر تهران اجرا و شبیه‌سازی می‌شود.

پیشینه پژوهش

ساختمان یکی از بزرگ‌ترین بخش‌های مصرف‌کننده انرژی در اغلب جوامع محسوب می‌شود. توجه به فناوری‌های ساختمان برای صرفه‌جویی و بهینه‌سازی مصرف انرژی، اهمیت بسیاری دارد. میزان انرژی مصرفی در هر ساختمان به عواملی همچون میزان نفوذ هوا، اختلاف دمای مطلوب ساختمان و محیط خارج از ساختمان در روزهای مختلف سال، ضریب انتقال حرارت جداره‌های ساختمان و جهت‌گیری ساختمان بستگی دارد. در ادامه، پیشینه تحقیق در زمینه موضوعات مربوط به آسایش حرارتی، نوع اقلیم و معماری، جداره‌ها و مصالح ساختمان و سیستم‌های تهویه مطبوع ساختمانی بررسی شده است.

طراحی سیستم‌های تهویه مطبوع ساختمان برای ایجاد وضعیت مطلوب آسایش افراد، مستلزم پیش‌بینی شرایط آسایش حرارتی است (ذوالفقاری و معرفت، ۱۳۸۹). بر مبنای استاندارد ASHRAE¹ (۲۰۰۹)، آسایش حرارتی مجموعه‌ای از شرایط ذهنی هر شخصی است که میزان رضایت‌مندی او را از دمای محیط بیان می‌کند. تا پیش از سال ۱۹۷۰، هیچ مدل آسایش حرارتی برای ارزیابی احساس حرارتی افراد وجود نداشت و طراحان به‌منظور طراحی سیستم‌های تهویه مطبوع، از محدوده مجاز دما و رطوبت نسبی هوا استفاده می‌کردند (ذوالفقاری و معرفت، ۱۳۸۹). فنر (۱۹۷۰)، برای اولین بار یک مدل تحلیلی و پایا بر اساس چهار پارامتر محیطی (دمای هوا، دمای متوسط تابش، سرعت جریان هوا و رطوبت نسبی) و سه پارامتر فردی (میزان متابولیک، میزان لباس و میزان فعالیت) ارائه داد. پس از آن، مطالعات متعددی در خصوص بررسی آسایش حرارتی انجام شد که از آن جمله می‌توان به مطالعات رضایی حریری و فیاض (۱۳۸۰)، شکوری گنجوی و نظرزاده (۱۳۸۳)، معرفت و امیدوار (۱۳۸۷ و ۱۳۸۸)، حیدری (۱۳۸۸) و هارت و دیر (۲۰۰۴)، اشاره کرد.

معماری ساختمان و ویژگی‌های اقلیمی تأثیر بسزایی در تأمین انرژی سرمایشی و گرمایشی ساختمان دارد. به‌کارگیری مصالح جدید و استفاده از سبک‌های معماری بومی در هر اقلیم، سبب صرفه‌جویی مصرف سوخت‌های فسیلی می‌شود (براتی، ۱۳۸۲). حسین‌آبادی، لشکری و سلیمانی‌مقدم (۱۳۹۱)، با استفاده از داده‌های اقلیمی ایستگاه هواشناسی سبزوار، نیازهای حرارتی ساختمان، مواقع نیاز و عدم نیاز به آفتاب در مواقع سرد و گرم را مشخص کردند و با استفاده از روش میزان انرژی تابیده شده بر سطوح قائم ساختمان، بهترین جهت‌گیری ساختمان را نشان دادند. عظمتی و حسینی (۱۳۹۲)، تأثیر جهت‌گیری ساختمان یک واحد آموزشی با شرایط هندسی و فیزیکی یکسان در اقلیم‌های آب و هوایی مختلف را بر میزان بارهای حرارتی و برودتی بررسی کردند.

برخی محققان به بررسی تأثیر جدارها و مصالح به‌کار رفته در ساختمان بر میزان مصرف انرژی پرداخته‌اند. بلاترک (۲۰۰۸)، به بررسی میزان ضخامت بهینه عایق برای ساخت دیوارهای ساختمانی در یکی از مناطق گرم ترکیه پرداخت. دائواس (۲۰۱۱)، ضخامت بهینه عایق دیوارهای خارجی در تانزانیا را بررسی کرد. مهدوی‌نژاد (۱۳۹۲)، با هدف رسیدن به فرم مطلوب بام در اقلیم گرم و خشک، انواع بام‌های تخت، گنبدی و شیب‌دار را در شهر اصفهان شبیه‌سازی کرد. در بررسی‌ای که روی سیستم‌های یکپارچه ترکیبی با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی توسط اورتیکا، کارلوس برونو، کوروناس و گروسمن (۲۰۰۷)، انجام

گرفت، نشان داده شد استفاده همزمان از انرژی فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر، موجب کاهش مصرف انرژی اولیه و انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود. دیاکاکي، گریگورودیس و کلوکوتسا (۲۰۰۸)، و اسدی، سیلوا، آنتونس، دیاس و گلیکسمن (۲۰۱۲ و ۲۰۱۴)، به بررسی بهبود بهره‌وری انرژی در بخش ساختمان با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه پرداختند؛ هدف آنها، کاهش مصرف انرژی و کاهش هزینه با استفاده از ترکیب عایق و انرژی خورشیدی در ساختمان بود. نتایج این بررسی‌ها نشان داد در این حالت نمی‌توان به یک جواب بهینه منفرد دست یافت؛ بلکه یک مجموعه جواب پارتو به‌عنوان حد مطلوب مسئله وجود دارد. دیاکاکي، گریگورودیس و کلوکوتسا (۲۰۱۳)، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه را با در نظر گرفتن معیارهای مصرف انرژی اولیه، میزان انتشار دی‌اکسیدکربن و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه توسعه دادند. خروجی این مدل، اجزای جداره، نوع درها و پنجره‌ها و سیستم گرمایش، سرمایش و آب گرم را مشخص کرد. انتی‌پوا، بوئر، گیلن گاسالیبیز، کابازا و جیمنز (۲۰۱۴)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح چندهدفه برای انتخاب عایق، نوع پنجره و استفاده از پنل‌های خورشیدی توسعه دادند. معیارهای در نظر گرفته شده شامل معیارهای محیطی و اقتصادی بود. کارراس و همکاران (۲۰۱۶)، با در نظر گرفتن معیارهای محیطی و اقتصادی، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای تعیین ضخامت عایق سطح خارجی ساختمان ارائه دادند. دلگرم، سجادی، کوثری و دلگرم (۲۰۱۶)، با استفاده از بهینه‌سازی انبوه ذرات، یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای بهبود عملکرد انرژی ساختمان ارائه دادند. آنها برای آزمودن اثربخشی مدل پیشنهادی، آن را برای یک مدل تک اتاقه اجرا کردند و به بررسی پارامترهای مختلف معماری ساختمان پرداختند. ابراهیمی ابراهیمی‌سالاری، محتشمی، ضیایی و صالح‌نیا (۱۳۹۰)، با استفاده از اطلاعات مندرج در قبض‌های گاز خانگی، اطلاعات هواشناسی و ضریب انتقال حرارت دیوارهای خارجی ساختمان، به مقایسه مصرف گاز خانگی شهر مشهد در سیستم‌های گرمایشی متفاوت پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد ضریب انتقال حرارت در ساختمان‌های مورد مطالعه با میزان استاندارد مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان فاصله زیادی دارد و همین مسئله، سبب افزایش مصرف انرژی می‌شود. شاه‌محمدی، عظیمی و کاظمی‌زاده (۱۳۸۵)، پس از شبیه‌سازی مصرف انرژی یک ساختمان، پارامترهای مؤثر بر صرفه‌جویی انرژی را عایق‌کاری پوسته‌های ساختمان، درزبندی ساختمان، انتخاب ظرفیت مناسب سیستم گرمایشی و نوع کنترل سیستم معرفی کردند. همچنین پولادی و مجتهدزاده (۱۳۸۱)، علی‌پور، امدادی، جلیلی و صادق‌آزر (۱۳۸۱)، امدادی، علی‌پور، نعمتی‌چاری و دورمحمدی (۱۳۸۱)، ابراهیم‌پور، معرفت و محمدکاری (۱۳۸۳) و کاظمی (۱۳۹۲)، صرفه‌جویی در مصرف انرژی با بررسی نوع مصالح به‌کار رفته در ساختمان را بررسی کردند. استفاده از پنجره‌های اصلاح شده برای کاهش

اتلاف انرژی مصرفی نیز توسط دقیق و مشتاق (۱۳۸۲)، ارشاد لنگرودی، اکبری و یوسفی (۱۳۸۲) و سلطانی و یوسفی‌کما (۱۳۸۴)، بررسی شده است.

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از سیستم‌های تهویه غیرفعال^۱ و همچنین استفاده از سیستم‌های تهویه فعال متناسب با نوع ساختمان و اقلیم، از اهداف بهینه‌سازی مصرف انرژی محسوب می‌شود. سیستم‌های تهویه مطبوع فعال ساختمان باید به گونه‌ای که مکمل طراحی سیستم‌های تهویه غیرفعال باشند، طراحی و استفاده شوند. معماری سنتی ایران نمونه آشکار استفاده از سیستم‌های تهویه غیرفعال است (اربابیان، ۱۳۸۰). یکی از راهکارهایی که برای کاهش مصرف انرژی در شهرهای کلان پیشنهاد شده، احداث بام سبز است. با بررسی نمودار توزیع دما و ضریب انتقال حرارت برای سقف معمولی و سقف با پوشش گیاهی، مشخص شد که دمای سقف با پوشش گیاهی پایین‌تر است و در نتیجه انتقال حرارت کمتر صورت می‌گیرد (محمودی زرنیدی، پاکاری و بهرامی، ۱۳۹۱). استفاده از بام سبز برای سیستم تهویه غیرفعال، سبب کاهش بار گرمایش و سرمایش ساختمان با افزودن توده و لایه عایق حرارتی و سرمایش تبخیری و همچنین کاهش هزینه‌های انرژی می‌شود (یزدان‌داد، امامی و هاشمی، ۱۳۸۹؛ زینزی و اگنولی، ۲۰۱۲؛ بنتینگ و همکاران، ۲۰۰۵). استفاده از گلخانه خورشیدی نیز، انرژی گرمایشی در فصل سرد را تأمین می‌کند و بار حرارتی ساختمان را کاهش می‌دهد و از سوی دیگر، سبب گرمایش ساختمان در فصل گرم می‌شود. توجه به جهت‌گیری گلخانه خورشیدی با در نظر گرفتن اقلیم و نیازهای حرارتی ساختمان، اهمیت زیادی دارد (میها لاکاکو و فرانت، ۲۰۰۰). گیلانی و محمدکاری (۱۳۹۰)، با هدف بهره‌گیری از سیستم غیرفعال خورشیدی، عملکرد گلخانه خورشیدی را در شهر اردبیل به‌عنوان اقلیم سرد شبیه‌سازی کردند و مناسب‌ترین جهت را برای کاربرد این سیستم مشخص کردند. استفاده از سلول‌های حرارتی خورشیدی نیز به‌عنوان تأمین‌کننده انرژی لازم مطالعه شده است. البته بازدهی سیستم‌های خورشیدی به پارامترهای محیطی بستگی زیادی دارد و در مناطقی که دمای هوا بالاتر و میزان تابش بیشتر است، بازدهی و میزان سرمایش تولید شده توسط سیستم‌های تهویه مطبوع فعال خورشیدی بیشتر می‌شود (عربی و دهقانی، ۱۳۸۹). در پژوهش دیگری مشخص شد که میزان متوسط انرژی خورشیدی قابل بهره‌برداری در اقلیم سرد ایران، در حالت‌های مختلف و در ماه‌های سرد سال تغییر می‌کند (خلجی‌اسدی، ۱۳۸۸). ونگ، یوشیدا و اونو (۲۰۰۹)، با شبیه‌سازی انرژی مصرفی سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی در اوساکای ژاپن نشان دادند که استفاده از بهترین ترکیب سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی، می‌تواند انرژی مصرفی اولیه و هزینه‌های انرژی را کاهش دهد.

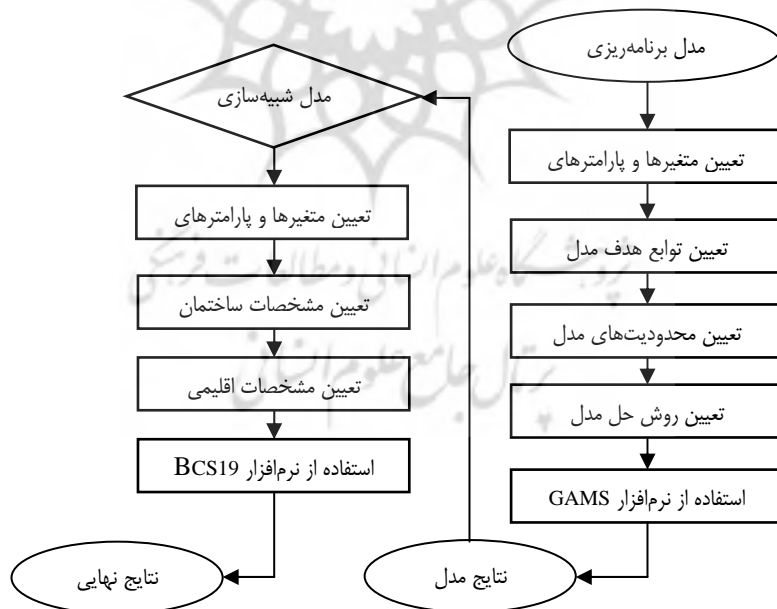
۱. ابزار کنترل غیرفعال سیستم‌هایی هستند که نیاز به منبع انرژی خارجی ندارند.

ابراهیمی‌سالاری و همکاران (۱۳۹۰)، مصرف‌گاز مشترکان شهر مشهد را که از روش‌های بهینه‌سازی در ساختمان استفاده کرده‌اند با ساختمان‌های فاقد هرگونه بهینه‌سازی مقایسه کردند. نتایج نشان داد توجه به بهینه‌سازی سیستم‌های گرمایشی بدون بهینه‌سازی و عایق‌بندی ساختمان‌ها، نمی‌تواند در مصرف‌گاز صرفه‌جویی چشمگیری به همراه داشته باشد. همچنین عابدی و خسرویان (۱۳۸۹)، با هدف مقایسه چیلر تراکمی و چیلر جذبی و شرایط ترجیح استفاده از هر نوع، نشان دادند با توجه به تعرفه‌های برق و گاز مصرفی و هزینه‌های اولیه چیلرها، استفاده از چیلرهای تراکمی تا ظرفیت ۲۰۰ تن تبرید، از لحاظ اقتصادی با صرفه‌تر است.

در پژوهش حاضر با هدف ارائه راهکارهای بهبود مصرف انرژی ساختمانی، پارامترهای تأثیرگذار از قبیل مصالح ساختمانی، سیستم‌های تهویه فعال و غیرفعال و استفاده از انرژی خورشیدی به‌صورت همزمان در نظر گرفته شده است.

روش‌شناسی پژوهش

در این تحقیق از مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی مطابق با شکل ۱ استفاده شده است.



شکل ۱. فرایند اجرای پژوهش

در گام اول، مصالح ساختمانی به کار رفته در ساختمان‌های مسکونی و سیستم‌های گرمایش و سرمایش مؤثر در کاهش اتلاف انرژی ساختمان با توجه به شرایط آب و هوایی ایران و همچنین سبک زندگی ایرانی در استفاده از سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی در ساختمان‌های مسکونی بررسی و انتخاب شدند. در گام دوم، قابلیت استفاده ترکیبی از این مصالح و سیستم‌ها و نوع عملکردشان، فناوری‌های تأمین آنها (مثل انرژی خورشیدی) و تأثیری که در کاهش مصرف انرژی بخش ساختمانی می‌گذارند، تعیین شده است. سپس با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی، ترکیبی از مصالح ساختمانی و سیستم‌های تهویه مطبوع فعال و غیرفعال در ساختمان‌های مسکونی مشخص شده است. با استفاده از این ترکیب، میزان هزینه‌های مرتبط و میزان انرژی مصرفی ساختمان حداقل می‌شود. مدل پیشنهادی برای ساختمانی در شهر تهران به اجرا درآمد، سپس مدل انرژی ساختمان با استفاده از نرم‌افزار مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان شبیه‌سازی و نتایج آن ارائه شده است.

مدل پیشنهادی

در جدول‌های ۱ تا ۴، اندیس‌ها، توان‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل پیشنهادی معرفی شده‌اند. همچنین توابع هدف و محدودیت‌ها به صورت پارامتری برای ساختمان مورد مطالعه واقع در تهران، ارائه شده است. برای این مطالعه، یک ساختمان جنوبی با موقعیت احداث شمال (شمال به سمت کوچه و جنوب به سمت حیاط) انتخاب شده است. این ساختمان ۴ طبقه دارد و هر طبقه، دارای ۴ واحد با متوسط زیربنای ۸۰ مترمربع است (در هر طبقه دو واحد با زیربنای ۷۰ مترمربع و دو واحد با زیربنای ۹۰ مترمربع وجود دارد). در مجموع این ساختمان دارای ۲۴۰ مترمربع سطح بازشوی پیرامونی، ۳۶۰ مترمربع سطح بام و ۱۳۴۰ مترمربع سطح جداره پیرامونی است. ۳۵۰ مترمربع از دیوار پیرامونی به ضلع شمالی، ۳۵۰ مترمربع به ضلع جنوبی، ۳۲۰ مترمربع به ضلع شرقی و ۳۲۰ مترمربع به ضلع غربی ساختمان مربوط می‌شود. دیوارهای پیرامونی ساختمان با ۳ سانتی‌متر گچ و خاک، ۲۰ سانتی‌متر جایگزین انتخابی دیوار پیرامونی، ۲ سانتی‌متر ملات و ۳ سانتی‌متر سنگ گرانیت پوشش داده شده و برای ساخت سقف ساختمان نیز، از ۳ سانتی‌متر گچ و خاک، ۲۰ سانتی‌متر جایگزین انتخابی سقف، ۲ سانتی‌متر ملات استفاده شده است.

شایان ذکر است که به دلیل محدودیت صفحات و برای اختصار، فقط به ارائه مدل پارامتری مربوط به مورد مطالعه اکتفا شده و از بیان مدل عددی خودداری شده است. بدیهی است این مدل برای موارد مشابه تعمیم‌پذیر است.

جدول ۱. فهرست اندیس‌های تعریف شده در مدل

اندیس	توضیحات
i	نوع مصالح دیوار پیرامونی ($i = 1, 2, \dots, 21$) به ترتیب نشان‌دهنده؛ بلوک لیکا، بلوک بتن سبک گازی، بلوک بتنی پلی استایرن، پنل سه بعدی، بلوک پوکه معدنی، آجر فشاری توپر، آجر فشاری توپر و عایق حرارتی پشم شیشه، آجر فشاری توپر و عایق حرارتی پلی استایرن، آجر فشاری توپر و عایق حرارتی پلی یورتان، آجر فشاری سوراخ‌دار، آجر فشاری سوراخ‌دار و عایق حرارتی پشم شیشه، آجر فشاری سوراخ‌دار و عایق حرارتی پلی استایرن، آجر فشاری سوراخ‌دار و عایق حرارتی پلی یورتان، بلوک سفالی، بلوک سفالی و عایق حرارتی پشم شیشه، بلوک سفالی و عایق حرارتی پلی استایرن، بلوک سفالی و عایق حرارتی پلی یورتان، بلوک سیمانی، بلوک سیمانی و عایق حرارتی پشم شیشه، بلوک سیمانی و عایق حرارتی پلی استایرن، بلوک سیمانی و عایق حرارتی پلی یورتان است.
j	نوع مصالح سقف ($j = 1, 2, \dots, 18$) به ترتیب نشان‌دهنده استفاده از تیرچه بلوک پلی‌استایرن، دال بتنی عایق‌بندی شده، تیرچه بلوک سفالی، تیرچه بلوک سفالی و عایق حرارتی پشم شیشه، تیرچه بلوک سفالی و عایق حرارتی پلی استایرن، تیرچه بلوک سفالی و عایق حرارتی پلی یورتان، تیرچه بلوک سیمانی، تیرچه بلوک سیمانی و عایق حرارتی پشم شیشه، تیرچه بلوک سیمانی و عایق حرارتی پلی استایرن، تیرچه بلوک سیمانی و عایق حرارتی پلی یورتان، کامپوزیت و کرومیت، کامپوزیت و کرومیت و عایق حرارتی پشم شیشه، کامپوزیت و کرومیت و عایق حرارتی پلی استایرن، کامپوزیت و کرومیت و عایق حرارتی پلی یورتان، عرشه فولادی، عرشه فولادی و عایق حرارتی پشم شیشه، عرشه فولادی و عایق حرارتی پلی استایرن، عرشه فولادی و عایق حرارتی پلی یورتان در ساخت سقف است.
k	نوع پنجره ($k = 1, 2, \dots, 6$) به ترتیب نشان‌دهنده استفاده از پنجره تک‌جداره UPVC، تک‌جداره آلومینیومی، دو‌جداره UPVC، دو‌جداره آلومینیومی، سه‌جداره UPVC و سه‌جداره آلومینیومی است.
m	نوع سیستم سرمایشی ($m = 1, 2, \dots, 4$) به ترتیب نشان‌دهنده استفاده از چیلر تراکمی، پمپ حرارتی، چیلر جذبی و چیلر جذبی خورشیدی است.
n	نوع سیستم گرمایشی ($n = 1, 2, \dots, 5$) به ترتیب نشان‌دهنده استفاده از دیگ آب گرم، دیگ آب گرم خورشیدی، پکیج آب گرم منفرد، پکیج آب گرم منفرد خورشیدی و پمپ حرارتی است.
z	سلول حرارتی مربوط به سیستم تهویه مطبوع ($z = 1, 2, 3$) به ترتیب نشان‌دهنده استفاده از سلول خورشیدی برای چیلر جذبی، دیگ آب گرم و پکیج آب گرم منفرد است.
r	نوع سیستم غیرفعال ($r = 1, 2, \dots, 22$) به ترتیب نشان‌دهنده استفاده از گلخانه خورشیدی در ضلع شرقی ساختمان، ضلع شمالی، ضلع جنوبی و ضلع غربی برای سیستم غیرفعال، استفاده از تیرچه بلوک پلی استایرن و بام سبز، دال بتنی عایق‌بندی شده و بام سبز، تیرچه بلوک سفالی و بام سبز، تیرچه بلوک سفالی و عایق حرارتی پشم شیشه و بام سبز، تیرچه بلوک سفالی و عایق حرارتی پلی استایرن و بام سبز، تیرچه بلوک سفالی و عایق حرارتی پلی یورتان و بام سبز، تیرچه بلوک سیمانی و بام سبز، تیرچه بلوک سیمانی و عایق حرارتی پشم شیشه و بام سبز، تیرچه بلوک سیمانی و عایق حرارتی پلی استایرن و بام سبز، تیرچه بلوک سیمانی و عایق حرارتی پلی یورتان و بام سبز، کامپوزیت و کرومیت و بام سبز، کامپوزیت و کرومیت و عایق حرارتی پشم شیشه و بام سبز، کامپوزیت و کرومیت و عایق حرارتی پلی استایرن و بام سبز، کامپوزیت و کرومیت و عایق حرارتی پلی یورتان و بام سبز، عرشه فولادی و بام سبز، عرشه فولادی و عایق حرارتی پشم شیشه و بام سبز، عرشه فولادی و عایق حرارتی پلی استایرن و بام سبز، عرشه فولادی و عایق حرارتی پلی یورتان و بام سبز برای سقف است.

ادامه جدول ۱

اندیس	توضیحات
p	تجهیزات فن کوئل مربوط به سیستم تهویه مطبوع ($p = 1, 2, 3, 4$) به ترتیب نشان دهنده استفاده از فن کوئل برای چیلر تراکمی، پمپ حرارتی جهت سرمایش و گرمایش، چیلر جذبی و چیلر جذبی خورشیدی است.
q	تجهیزات شوفاژ مربوط به سیستم تهویه مطبوع ($q = 1, 2$) به ترتیب نشان دهنده استفاده از شوفاژ برای پکیج آب گرم منفرد و پکیج آب گرم منفرد خورشیدی است.
l	طول عمر تجهیزات
d	جهت جغرافیایی
y	سال
i	درصد بهره

جدول ۲. فهرست توان‌های تعریف شده در مدل

توان	توضیحات	توان	توضیحات	توان	توضیحات
$wall$	دیوار پیرامونی	air	فن کوئل	H	فصل سرد که نیاز به گرمایش دارد.
win	پنجره	$cent$	شوفاژ	C	فصل گرم که نیاز به سرمایش دارد.
$roof$	سقف	$cool$	سرمایشی	sc	سلول حرارتی
$pass$	غیرفعال	$heat$	گرمایشی		

جدول ۳. فهرست پارامترهای تعریف شده در مدل

پارامتر	توضیحات و واحدها
A	مساحت (m^2)
C	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه ($Rial$)
VC	هزینه متغیر تعمیرات و نگهداری سیستم‌های تهویه مطبوع ($Rial$)
C_{CAP}	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه مصالح ساختمانی به کاررفته و سیستم‌های تهویه مطبوع نصب شده در طول عمر ساختمان ($Rial$)
C_{OP}	ارزش فعلی خالص هزینه تعمیرات و نگهداری سیستم‌های تهویه مطبوع و تجهیزات مرتبط با سیستم‌های تهویه مطبوع در طول عمر ساختمان ($Rial$)
C_{EN}	ارزش فعلی خالص هزینه انرژی مصرف شده سیستم‌های تهویه مطبوع در طول عمر ساختمان ($Rial$)
T_E	تعرفه برق مصرفی خانگی ($Rial / Kwh$)
T_G	تعرفه گاز مصرفی خانگی ($Rial / m^3$)

ادامه جدول ۳

پارامتر	توضیحات و واحدها
E	انرژی برق مصرفی سیستم تهویه مطبوع (Kwh)
G	انرژی گاز مصرفی سیستم تهویه مطبوع (m^3)
U	ضریب انتقال حرارت ($W/m^2\text{ }^\circ C$)
PVF	ضریب ارزش حال هزینه
P/F	ضریب تبدیل هزینه در سال y به سال پایه
N_L	طول عمر ساختمان
N_H	تعداد روزهایی که نیاز به گرمایش دارند.
N_C	تعداد روزهایی که نیاز به سرمایش دارند.
η	ضریب بهره‌گیری انرژی خورشید در فصل سرد و گرم
λ	ضریب کارکرد سیستم‌های تهویه مطبوع فعال
$Q_{Heating}$	انرژی مورد نیاز برای گرمایش فضای ساختمان (Kwh)
$Q_{Cooling}$	انرژی مورد نیاز برای سرمایش فضای ساختمان (Kwh)
Q_{Loss}	انرژی خروجی از ساختمان (Kwh)
Q_{Gain}	انرژی ورودی به ساختمان (Kwh)
Q_{Solar}	انرژی به‌دست آمده از خورشید (Kwh)
Q_{Inter}	انرژی به‌دست آمده از وسایل داخلی ساختمان و افراد (Kwh)
BLC	ضریب بار حرارتی ساختمان ($W/^\circ C$)
HDD	روز درجه گرمایش ($^\circ C/day$)
CDD	روز درجه سرمایش ($^\circ C/day$)
θ_b	دمای مطلوب داخل ساختمان ($^\circ C$)
θ_o	دمای محیط بیرون از ساختمان ($^\circ C$)
α	ضریب جذب انرژی خورشید توسط ساختمان
I	انرژی خورشید جذب شده متناسب با جهت جغرافیایی (KWh/m^2)

جدول ۴. فهرست متغیرهای تعریف شده در مدل

متغیر	شرایط انتخاب متغیر در مدل
X_i^{wdl}	اگر در ساخت دیوار مصالح نوع i انتخاب شود، این متغیر مقدار ۱ می‌گیرد.
X_j^{roof}	اگر در ساخت سقف مصالح نوع j انتخاب شود، این متغیر مقدار ۱ می‌گیرد.
X_k^{win}	اگر پنجره نوع k انتخاب شود، این متغیر مقدار ۱ می‌گیرد.
	اگر سیستم سرمایشی نوع m انتخاب شود، این متغیر مقدار ۱ می‌گیرد.
	اگر سیستم گرمایشی نوع n انتخاب شود، این متغیر مقدار ۱ می‌گیرد.
	اگر سیستم تهویه غیرفعال نوع r انتخاب شود، این متغیر مقدار ۱ می‌گیرد.
X_z^{SC}	اگر سلول خورشیدی سیستم z انتخاب شود، این متغیر مقدار ۱ می‌گیرد.
X_p^{air}	اگر فن کوئل سیستم p انتخاب شود، این متغیر مقدار ۱ می‌گیرد.
X_q^{cent}	اگر شوفاژ سیستم q انتخاب شود، این متغیر مقدار ۱ می‌گیرد.

توابع هدف

تابع هدف هزینه

رابطه ۱ هزینه تمام شده مصالح مورد نیاز، سیستم‌های تهویه مطبوع و تجهیزات مربوط به آنها، هزینه‌های عملیاتی سیستم‌های تهویه و تجهیزات آنها و هزینه مصرف انرژی ساختمان مورد مطالعه را در طول ۵۰ سال عمر ساختمان نشان می‌دهد. عبارت اول، هزینه مصالح مورد نیاز برای ساخت دیوار پیرامونی ساختمان را با توجه به مساحت دیوار نشان می‌دهد. عبارت دوم، هزینه مصالح مورد نیاز برای ساخت سقف ساختمان با توجه به مساحت سقف است و عبارت سوم، هزینه پنجره مورد نیاز با توجه به مساحت بازشوهای ساختمان را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که با توجه به عمر مفیدی که برای ساختمان در نظر گرفته شده، نیازی به بازسازی یا مرمت بنای ساختمان در دوره ۵۰ ساله نیست. عبارت‌های چهارم و پنجم به ترتیب ارزش خالص فعلی هزینه سیستم‌های تهویه مطبوع فعال ساختمان را با توجه به طول عمر ۲۵ ساله سیستم‌ها نشان می‌دهد. عبارت‌های ششم و هفتم به ترتیب ارزش خالص فعلی هزینه دیوار حرارتی به‌عنوان سیستم تهویه غیرفعال و سقف ساخته شده از پوشش گیاهی با عنوان بام سبز را نشان می‌دهد که از انواع سیستم تهویه غیرفعال با طول عمر ۲۵ سال است. عبارت هشتم، ارزش

خالص فعلی هزینه سلول‌های حرارتی خورشیدی برای چیلر جذبی خورشیدی، دیگ آب گرم خورشیدی و پکیج آب گرم منفرد را با طول عمر ۱۳ سال بیان می‌کند. با توجه به طول عمر سلول‌های حرارتی، لازم است در دوره ۵۰ ساله‌ای که در نظر گرفته شده، ۴ بار سلول‌های حرارتی تعویض شوند. عبارت‌های نهم و دهم به ترتیب ارزش خالص فعلی هزینه تجهیزات فن کوئل و شوفاژ متناسب با نوع سیستم تهویه مطبوع فعال ساختمان را با عمر مفید ۵۰ سال نشان می‌دهند. عبارت‌های یازدهم تا شانزدهم به ترتیب ارزش خالص فعلی هزینه تعمیرات و نگهداری سیستم‌های تهویه مطبوع فعال و غیرفعال، سلول‌های حرارتی، تجهیزات فن کوئل و شوفاژ را بیان می‌کنند. عبارت‌های هفدهم و هجدهم، ارزش خالص فعلی هزینه‌های برق مصرفی سیستم‌های تهویه مطبوع فعال در فصل‌های سرد و گرم را با توجه به تعرفه فصل و اقلیم آب و هوایی نشان می‌دهند. به همین ترتیب، عبارت‌های نوزدهم و بیستم مربوط به ارزش خالص فعلی هزینه‌های گاز مصرفی سیستم‌های تهویه مطبوع فعال با شرایط مذکور هستند.

$$\begin{aligned}
 Cost = & A^{wall} \sum_{i=1}^{17} FC_i^{wall} X_i^{wall} + A^{roof} \sum_{j=1}^{14} FC_j^{roof} X_j^{roof} + A^{win} \sum_{k=1}^6 FC_k^{win} X_k^{win} \quad \text{رابطه (۱)} \\
 & + \sum_{m=1}^4 FC_m^{cool} (1 + F_{25,i\%}) X_m^{cool} + \sum_{n=1}^5 FC_n^{heat} (1 + F_{25,i\%}) X_n^{heat} \\
 & + \sum_{r=1}^4 FC_r^{pass} X_r^{pass} + \sum_{r=5}^{18} FC_r^{pass} (1 + F_{25,i\%}) X_r^{pass} \\
 & + \sum_{z=1}^3 FC_z^{sc} (1 + F_{13,i\%} + F_{26,i\%} + F_{39,i\%}) X_z^{sc} + \sum_{p=1}^7 FC_p^{air} (1 + F_{25,i\%}) X_p^{air} \\
 & + \sum_{q=1}^4 FC_q^{cent} (1 + F_{25,i\%}) X_q^{cent} + \sum_{y=1}^{50} \sum_{m=1}^4 VC_m^{cool} X_m^{cool} PVF_y + \\
 & \sum_{y=1}^{50} \sum_{n=1}^5 VC_n^{heat} X_n^{heat} PVF_y + \sum_{y=1}^{50} \sum_{r=5}^{18} VC_r^{pass} X_r^{pass} PVF_y + \\
 & \sum_{y=1}^{50} \sum_{z=1}^3 VC_z^{sc} X_z^{sc} PVF_y + \sum_{y=1}^{50} \sum_{p=1}^7 VC_p^{air} X_p^{air} PVF_y + \sum_{y=1}^{50} \sum_{q=1}^4 VC_q^{cent} X_q^{cent} PVF_y \\
 & + \sum_{y=1}^{50} \sum_{m=1}^4 \lambda^{cool} T_E^{cool} E_m^{cool} X_m^{cool} PVF_y + \sum_{y=1}^{50} \sum_{n=1}^5 \lambda^{heat} T_E^{heat} E_n^{heat} X_n^{heat} PVF_y + \\
 & \sum_{y=1}^{50} \sum_{m=1}^4 \lambda^{cool} T_G^{cool} G_m^{cool} X_m^{cool} PVF_y + \sum_{y=1}^{50} \sum_{n=1}^5 \lambda^{heat} T_G^{heat} G_n^{heat} X_n^{heat} PVF_y
 \end{aligned}$$

تابع انرژی حرارتی مصرفی

رابطه ۲، اجزای انرژی موردنیاز برای گرمایش و سرمایش فضای ساختمان را در فصل‌های سرد و گرم نشان می‌دهد. عبارت داخل کروشه اول، انرژی حرارتی از دست رفته توسط جداره‌های ساختمان به ازای مجموع اختلاف دمای محیط و دمای آسایش حرارتی مطلوب ساختمان در تمام روزهای سرد سال در منطقه آب و هوایی مشخص شده که نیاز به گرمایش دارند را محاسبه می‌کند. شایان ذکر است که دمای آسایش حرارتی ۲۲ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. عبارت داخل کروشه دوم، مجموع انرژی دریافتی ساختمان از خورشید را نشان می‌دهد که انرژی دریافتی از طریق پنجره‌های ساختمان و دیوار حرارتی در جهات مختلف ساختمان در فصل سرد را شامل می‌شود. عبارت‌های داخل کروشه سوم، انرژی دریافتی از خورشید در فصل گرم، شامل انرژی منتقل شده از جداره‌های ساختمان به داخل ساختمان با توجه به اختلاف دمای مطلوب و محیط خارج ساختمان در تمام روزهای گرم که نیاز به سرمایش دارند، انرژی دریافتی ساختمان با توجه به شدت تابش انرژی خورشیدی در فصل گرم در جهات مختلف و انتقال آن به داخل ساختمان، انرژی دریافتی از پنجره‌ها و دیوار حرارتی و انرژی دریافتی داخلی است.

رابطه ۲)

$$\begin{aligned}
 TE = & [(A_{wall}^{wall} \sum_{i=1}^{17} U_i^{wall} X_i^{wall} + A_{roof}^{roof} \sum_{j=1}^{14} U_j^{roof} X_j^{roof} + A_{win}^{win} \sum_{k=1}^6 U_k^{win} X_k^{win} + \\
 & A_{pass}^{pass} \sum_{r=5}^{18} U_r^{pass} X_r^{pass}) \cdot \sum_{o=1}^{N_H} (\theta_b - \theta_o)^+] - N_H [\sum_{d=1}^4 \sum_{k=1}^6 A_d^{win} I_d^h \alpha_k^{win} X_k^{win} + \\
 & \sum_{d=1}^4 \sum_{r=1}^4 A_d^{pass} I_d^h \alpha_r^{pass} X_r^{pass} + Q_{inter}] + (1 - \eta) \cdot [A_{wall}^{wall} \sum_{i=1}^{17} U_i^{wall} X_i^{wall} + \\
 & A_{roof}^{roof} \sum_{j=1}^{14} U_j^{roof} X_j^{roof} + A_{win}^{win} \sum_{k=1}^6 U_k^{win} X_k^{win} + A_{pass}^{pass} \sum_{r=5}^{18} U_r^{pass} X_r^{pass}) \cdot \sum_{o=1}^{N_C} (\theta_o - \theta_b)^+ \\
 & + N_C (\sum_{d=1}^4 \sum_{i=1}^{17} \frac{I_d^c A_d^{wall} \alpha_i^{wall} U_i^{wall} X_i^{wall}}{\theta_b} + \sum_{d=1}^4 \sum_{k=1}^6 \frac{I_d^c A_d^{win} \alpha_k^{win} U_k^{win} X_k^{win}}{\theta_b} \\
 & + \sum_{j=1}^{14} \frac{I_j^c A_j^{roof} \alpha_j^{roof} U_j^{roof} X_j^{roof}}{\theta_b} + \sum_{r=5}^{18} \frac{I_r^c A_r^{pass} \alpha_r^{pass} U_r^{pass} X_r^{pass}}{\theta_b} \\
 & + \sum_{d=1}^4 \sum_{k=1}^6 A_d^{win} I_d^c \alpha_k^{win} X_k^{win} + \sum_{d=1}^4 \sum_{r=1}^4 A_d^{pass} I_d^c \alpha_r^{pass} X_r^{pass} + Q_{inter})]
 \end{aligned}$$

محدودیت‌ها

محدودیت‌های متغیرهای صفر و یک

رابطه ۳ محدودیت‌های صفر و یک متغیرها و دامنه آنها را نمایش می‌دهد.

$$\begin{aligned}
 X_i^{wall} &\in \{0,1\}; \forall i \in \{1,2,\dots,21\} && \text{رابطه ۳} \\
 X_j^{roof} &\in \{0,1\}; \forall j \in \{1,2,\dots,18\} \\
 X_k^{win} &\in \{0,1\}; \forall k \in \{1,2,\dots,6\} \\
 X_m^{cool} &\in \{0,1\}; \forall m \in \{1,2,\dots,4\} \\
 X_n^{heat} &\in \{0,1\}; \forall n \in \{1,2,\dots,5\} \\
 X_r^{pass} &\in \{0,1\}; \forall r \in \{1,2,\dots,22\} \\
 X_z^{sc} &\in \{0,1\}; \forall z \in \{1,2,3\} \\
 X_p^{air} &\in \{0,1\}; \forall p \in \{1,2,3,4\} \\
 X_q^{cent} &\in \{0,1\}; \forall q \in \{1,2\}
 \end{aligned}$$

محدودیت‌های مصالح و سیستم تهویه غیرفعال

رابطه ۴ لزوم انتخاب یکی از جایگزین‌های موجود برای مصالح دیوار پیرامونی ساختمان را نشان می‌دهد. رابطه ۵ بیان‌کننده لزوم انتخاب یکی از جایگزین‌های موجود برای مصالح سقف ساختمان و پوشش گیاهی به کار رفته روی سقف، به‌عنوان سیستم تهویه غیرفعال است. رابطه ۶ لزوم انتخاب یکی از جایگزین‌های موجود برای پنجره ساختمان را نشان می‌دهد و در نهایت رابطه ۷ بیان‌کننده انتخاب یا عدم انتخاب دیوار حرارتی در جهات مختلف ساختمان است.

$$\sum_{i=1}^{21} X_i^{wall} = 1 \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\sum_{j=1}^{18} X_j^{roof} + \sum_{r=5}^{22} X_r^{pass} = 1 \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\sum_{k=1}^6 X_k^{win} = 1 \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\sum_{r=1}^4 X_r^{pass} \leq 1 \quad \text{رابطه ۷}$$

محدودیت‌های سیستم‌های تهویه فعال

رابطه‌های ۸ تا ۱۰ نشان می‌دهد که حضور یکی از جایگزین‌های موجود متغیرهای تعریف شده برای سیستم تهویه فعال با توجه به اشتراک سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی در مدل الزامی است.

$$\sum_{m=1}^4 X_m^{cool} = 1 \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\sum_{n=1}^5 X_n^{heat} = 1 \quad \text{رابطه ۹}$$

$$X_2^{cool} - X_5^{heat} = 0 \quad \text{رابطه ۱۰}$$

رابطه ۱۰ به طور خاص نشان می‌دهد که جایگزین دوم از سیستم سرمایشی (پمپ حرارتی در فصل گرم به منظور تأمین سرمایش مورد نیاز) با جایگزین پنجم از سیستم گرمایشی (پمپ حرارتی در فصل سرد به منظور تأمین گرمایش مورد نیاز) یکسان است و انتخاب پمپ حرارتی به عنوان سیستم سرمایشی در مدل، به معنای لزوم انتخاب جایگزین پنجم سیستم گرمایشی یا همان پمپ حرارتی برای فصل سرد و عدم انتخاب سایر جایگزین‌های سیستم گرمایشی در مدل است.

محدودیت‌های تجهیزات سلول حرارتی، فن کوئل و شوفاژ

رابطه‌های ۱۱ تا ۱۳ لزوم انتخاب سلول‌های حرارتی متناسب با هر یک از سیستم‌های تهویه مطبوع فعال را نشان می‌دهد. رابطه‌های ۱۴ تا ۱۹ نیز، نشان‌دهنده لزوم انتخاب تجهیزات فن کوئل متناسب با هر یک از سیستم‌های تهویه مطبوع فعال است و محدودیت‌های ۲۰ تا ۲۲ بیان‌کننده این موضوع هستند که پکیج آب گرم منفرد در صورت انتخاب در مدل فقط با استفاده از تجهیزات شوفاژ کار می‌کند.

$$X_4^{cool} - X_1^{sc} = 0 \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$X_2^{heat} - X_2^{sc} = 0 \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$X_4^{heat} - X_3^{sc} = 0 \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$\sum_{p=1}^4 X_p^{air} = 1 \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$X_1^{cool} - X_1^{air} = 0 \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$X_2^{cool} - X_2^{air} = 0 \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$X_3^{cool} - X_3^{air} = 0 \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$X_4^{cool} - X_4^{air} = 0 \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$X_5^{heat} - X_2^{air} = 0 \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$X_3^{heat} - X_1^{cent} = 0 \quad \text{رابطه ۲۰}$$

$$X_4^{heat} - X_2^{cent} = 0 \quad \text{رابطه ۲۱}$$

$$\sum_{q=1}^2 X_q^{cent} \leq 1 \quad \text{رابطه ۲۲}$$

نتایج اجرای مدل

برای حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی دو هدفه مطالعه موردی، از روش محدودیت اپسیلون بر پایه رابطه‌های ۲۳ و ۲۴ و نرم‌افزار GAMS استفاده شده است.

Min Thermal Energy

$$s.t. \quad Cost \leq \varepsilon_1 \quad \text{رابطه ۲۳}$$

$$Min Cost \leq \varepsilon_1 \leq Max Cost$$

$$g(x) \leq 0, \quad h(x) = 0$$

Min Cost

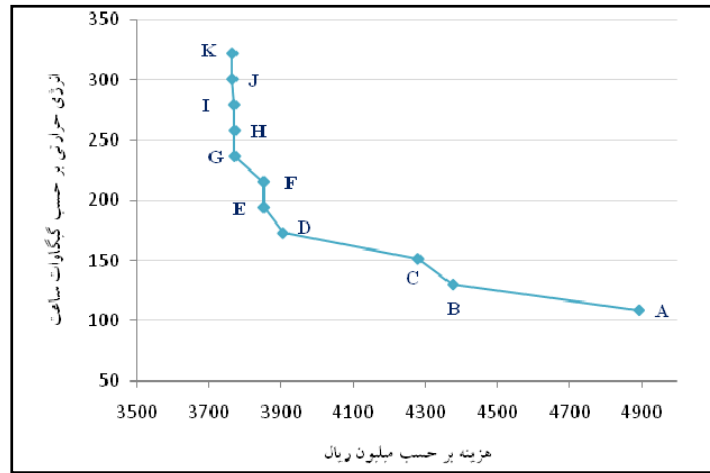
$$s.t. \quad Thermal Energy \leq \varepsilon_2 \quad \text{رابطه ۲۴}$$

$$Min Thermal Energy \leq \varepsilon_2 \leq Max Thermal Energy$$

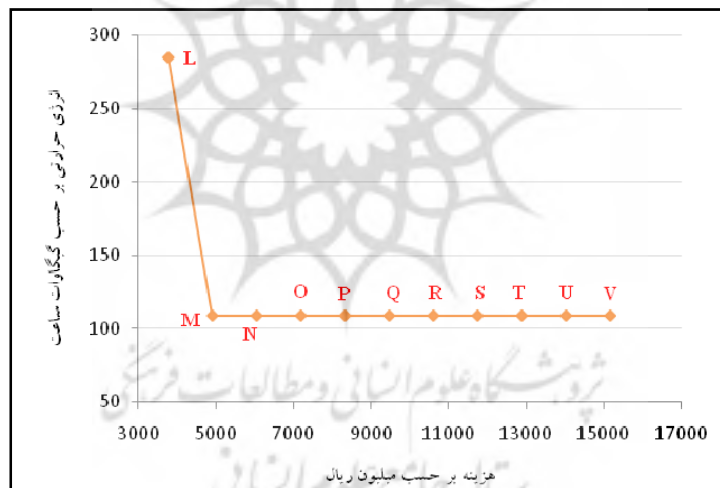
$$g(x) \leq 0, \quad h(x) = 0$$

شایان ذکر است که روش محدودیت اپسیلون، یکی از روش‌های شناخته شده برای مواجهه با مسائل چندهدفه است که در هر مرحله، تمام توابع هدف به جز یکی از آنها به محدودیت‌ها منتقل شده و به حل مسئله پرداخته می‌شود. این روش می‌تواند مرز پارتو را مشخص کند. گام‌های روش محدودیت اپسیلون به شرح زیر است (توکلی‌مقدم، علینقیان، نوروزی و سلامت بخش، ۱۳۹۰):

۱. یکی از توابع هدف را به‌عنوان تابع هدف اصلی انتخاب کنید.
 ۲. هر بار با توجه به یکی از توابع هدف، مسئله را حل کنید و مقادیر بهینه هر تابع هدف را به‌دست آورید.
 ۳. بازه بین دو مقدار بهینه توابع هدف فرعی را به تعدادی که از قبل مشخص کرده‌اید، تقسیم‌بندی کنید و یک جدول مقادیر برای اپسیلون‌ها به‌دست آورید.
 ۴. هر بار مسئله را با تابع هدف اصلی و با هر یک از مقادیر اپسیلون حل کنید.
 ۵. جواب‌های پارتوی یافت شده را گزارش کنید.
- شکل ۲ مجموعه جواب‌های بهینه بر اساس دامنه تغییرات تابع هدف انرژی حرارتی و شکل ۳ مجموعه جواب‌های بهینه بر اساس دامنه تغییرات تابع هدف هزینه را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مجموعه جواب‌ها بر اساس دامنه تغییرات تابع هدف انرژی حرارتی



شکل ۳. مجموعه جواب‌ها بر اساس دامنه تغییرات تابع هدف هزینه

با توجه به مجموعه جواب‌های بهینه در دامنه تغییرات تابع هدف انرژی حرارتی، سیستم تهویه مطبوع چیلر جذبی برای سرمایش و دیگ آب گرم برای گرمایش فضای ساختمان مناسب است و با توجه به مجموعه جواب‌های بهینه در دامنه تغییرات تابع هدف هزینه، سیستم تهویه مطبوع چیلر جذبی و همچنین چیلر جذبی خورشیدی برای سرمایش و دیگ آب گرم برای گرمایش فضای ساختمان انتخاب می‌شود.

پس از حل مدل، نتایج به کمک نرم‌افزار BCS19 بررسی شد. نرم‌افزار شبیه‌ساز مبحث ۱۹، بر اساس محاسبه ضرایب انتقال حرارت و توان حرارتی جدارها، عملکرد حرارتی ساختمان را بررسی می‌کند. هدف این نرم‌افزار آن است که کاربر بتواند از طریق وارد کردن ویژگی‌های عناصر ساختمان از قبیل دیوارها و سقف‌ها تحت کاربری‌های انتخاب شده، میزان برآزش ساختمان بر مقررات ملی را بسنجد (مهدوی‌نژاد و هادیان‌پور، ۱۳۹۴). جدول ۵ نتایج شبیه‌سازی ضریب انتقال حرارت مرجع^۱، جدار و ضریب انتقال حرارت مرجع ساختمان در شهر تهران را نشان می‌دهد. در صورتی که ضریب انتقال حرارت ساختمان با استفاده از ترکیب‌های مصالح بهینه کمتر از ضریب انتقال حرارت مرجع باشد، ساختمان از نظر مبحث نوزده مقررات ملی ساختمان مجاز است و در غیر این صورت غیرمجاز شناخته می‌شود.

جدول ۵. نتایج شبیه‌سازی ضریب انتقال حرارت مرجع جدار و ساختمان در شهر تهران

شهر	مشخصات جدار		ضریب انتقال حرارت مرجع ($w/^\circ C$)
	سقف	دیوار	ساختمان
تهران	سقف	۲۲۶/۸	۲۳۹۶
	دیوار پیرامونی	۱۳۵۳/۲	
	پنجره	۸۱۶	

جدول ۶ نتایج شبیه‌سازی ترکیب‌های مصالح ساختمانی حاصل از اجرای مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ترکیب‌های بهینه مجاز مصالح به کار رفته در این تحقیق عبارت‌اند از:

ترکیب اول: دال بتنی عایق‌بندی شده و بام سبز برای سقف، آجر فشاری توپر و عایق حرارتی پلی‌یورتان با ضخامت ۵۰ میلی‌متر برای دیوار پیرامونی و پنجره سه‌جداره UPVC برای بازشوهای ساختمان.

ترکیب دوم: دال بتنی عایق‌بندی شده و بام سبز برای سقف، آجر فشاری توپر و عایق حرارتی پلی‌استایرن با ضخامت ۵۰ میلی‌متر برای دیوار پیرامونی و پنجره دوجداره UPVC برای بازشوهای ساختمان.

ترکیب سوم: بلوک سفالی و عایق حرارتی پشم شیشه با ضخامت ۵۰ میلی‌متر و بام سبز برای سقف، بلوک بتنی پلی‌استایرن برای دیوار پیرامونی و پنجره دوجداره UPVC برای بازشوهای ساختمان.

۱. ضریب انتقال حرارت مرجع یا توان حرارتی مرجع ساختمان، ضریب انتقال حرارت حداکثر مجاز ساختمان یا بخشی از آن است که با واحد $w/^\circ C$ اندازه‌گیری می‌شود.

ترکیب چهارم: دال بتنی عایق‌بندی شده و بام سبز برای سقف، آجر فشاری توپر و عایق حرارتی پشم شیشه با ضخامت ۵۰ میلی‌متر برای دیوار پیرامونی و پنجره تک‌جداره UPVC برای بازشوهای ساختمان.

ترکیب پنجم: بلوک سفالی و عایق حرارتی پشم شیشه با ضخامت ۵۰ میلی‌متر و بام سبز برای سقف، بلوک بتنی پلی‌استایرن برای دیوار پیرامونی و پنجره تک‌جداره UPVC برای بازشوهای ساختمان.

جدول ۶. نتایج شبیه‌سازی ترکیب‌های بهینه مصالح ساختمانی

نتیجه	ضریب انتقال حرارت (W/C°)		مشخصات جدار		نقطه بهینه متناظر
	ساختمان	جدار	جایگزین	جدار	
مجاز	۱۳۷۸/۲	۱۶۳/۴	X_6^{pass}	سقف	A, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V
		۶۴۰/۶	X_9^{wall}	دیوار پیرامونی	
		۵۷۴/۲	X_5^{win}	پنجره	
مجاز	۱۴۷۶/۱	۱۶۳/۴	X_6^{pass}	سقف	B
		۷۲۲/۷	X_8^{wall}	دیوار پیرامونی	
		۵۹۰	X_3^{win}	پنجره	
مجاز	۱۹۳۲/۱	۱۷۹/۷	X_8^{pass}	سقف	C
		۱۱۶۲/۴	X_3^{wall}	دیوار پیرامونی	
		۵۹۰	X_3^{win}	پنجره	
مجاز	۱۹۶۴/۸	۱۶۳/۴	X_6^{pass}	سقف	D
		۹۱۳/۴	X_7^{wall}	دیوار پیرامونی	
		۸۸۸	X_1^{win}	پنجره	
مجاز	۲۲۳۰/۱	۱۷۹/۷	X_8^{pass}	سقف	E, F
		۱۱۶۲/۴	X_3^{wall}	دیوار پیرامونی	
		۸۸۸	X_1^{win}	پنجره	
غیرمجاز	۲۹۲۹/۳	۱۷۹/۷	X_8^{pass}	سقف	G, H
		۱۸۶۱/۶	X_{14}^{wall}	دیوار پیرامونی	
		۸۸۸	X_1^{win}	پنجره	
غیرمجاز	۴۳۰۵/۵	۱۷۹/۷	X_8^{pass}	سقف	I, J, K, L
		۳۲۳۷/۸	X_{18}^{wall}	دیوار پیرامونی	
		۸۸۸	X_1^{win}	پنجره	

نتیجه‌گیری

با توجه به اتلاف بیش از حد انرژی در بخش ساختمان در ایران که بخش عمده‌ای از آن به دلیل مصالح و تجهیزات غیراستاندارد به کار رفته در ساختمان‌ها و انتخاب نامناسب پوشش ساختمان‌هاست، در این تحقیق ابتدا با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی، ترکیبی بهینه از مصالح و سیستم‌های تهویه مطبوع فعال و غیرفعال متناسب با فرهنگ زندگی ایرانی و کمترین میزان هزینه، برای کاهش میزان مصرف انرژی ساختمانی پیشنهاد شد. مدل ارائه شده برای ساختمانی در شهر تهران اجرا گردید و از خروجی مدل بهینه‌سازی ریاضی برای شبیه‌سازی و سنجش اعتبار مصالح ساختمانی با در نظر گرفتن مقررات ملی ساختمانی، استفاده شد. به کمک نرم‌افزار BCS19، ترکیب‌های بهینه مجاز با توجه به ضریب انتقال حرارت مرجع ساختمان بر اساس مبحث نوزده مقررات ملی ساختمان تعیین شد.

در این تحقیق انرژی مصرفی ساختمان برای گرمایش و سرمایش ساختمان در نظر گرفته شده است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات بعدی سایر مصارف انرژی نیز در نظر گرفته شود. همچنین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات بعدی به پارامترهای رطوبت و سرعت باد نیز توجه شود.

فهرست منابع

- ابراهیم‌پور، ع.، معرفت، م. و محمدکاری، ب. (۱۳۸۳). بهینه‌سازی عایق کاری در ساختمان‌های با استفاده مداوم در شرایط اقلیمی ایران از لحاظ بارهای حرارتی سالیانه. مجله علمی پژوهشی مدرس، ۱۷، ۵۲-۳۳.
- ابراهیمی‌سالاری، ت.، محتشمی، م.، ضیایی، ع. و صالح‌نیا، ن. (۱۳۹۰). ممیزی انرژی در ساختمان‌های مسکونی شهر مشهد و مقایسه کارایی مصرف گاز در سیستم‌های گرمایشی متفاوت. *اولین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین نگهداشت انرژی*، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- اربابیان، ه. (۱۳۸۰). بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان. *سومین همایش ملی انرژی*، تهران.
- ارشاد لنگرودی، س.، اکبری، م.، ارشاد لنگرودی، ا.، یوسفی، ع. (۱۳۸۲). فناوری‌های نوین در ساخت پنجره‌های با اتلاف انرژی پایین. *سومین همایش بین‌المللی بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان*، تهران.
- امدادی، آ.، علی‌پور، ن.، نعمتی‌چاری، م.، دورمحمدی، ح. (۱۳۸۱). اثرات عایق‌سازی حرارتی دیوارهای ساختمانی ساخته شده با بتن سبک در کاهش مصرف سوخت و هزینه تمام شده. *دومین همایش بین‌المللی بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان*، تهران.
- براتی، ب. (۱۳۸۲). نقش ویژگی‌های اقلیمی ساختمان‌های مسکونی در تأمین بهینه گرمایش و سرمایش. *سومین همایش بین‌المللی بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان*، تهران.

پولادی، ع.، مجتهدزاده، ف. (۱۳۸۱). کاهش تلفات حرارتی و برودتی و صرفه‌جویی انرژی در دو ساختمان نمونه و همجوار با عایقکاری حرارتی (نمونه طراحی شده و در حال اجرا). دومین همایش بین‌المللی بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران.

ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۳. (۱۳۹۵). وزارت نیرو، معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی.

توکلی‌مقدم، ر.، علینقیان، م.، نوروزی، ن.، سلامت‌بخش، ع. (۱۳۹۰). حل یک مدل جدید برای مسئله مسیریابی وسائط نقلیه با در نظر گرفتن ایمنی در حمل و نقل مواد خطرناک. مهندسی حمل و نقل، ۲ (۳)، ۲۳۷-۲۲۳.

حسین‌آبادی، س.، لشکری، ح.، سلیمانی‌مقدم، م. (۱۳۹۱). طراحی اقلیمی ساختمان‌های مسکونی شهر سبزوار با تأکید بر جهت‌گیری ساختمان و عمق سایبان. جغرافیا و توسعه، ۲۷، ۱۱۶-۱۰۳.

حیدری، ش. (۱۳۸۸). دمای آسایش حرارتی مردم شهر تهران. نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی، (۳۸)، ۴۴-۵.

خلجی‌اسدی، م.، عابدی، ز.، شرعی، ن. (۱۳۸۸). سیستم‌های ترکیبی خورشیدی راه‌حلی نوین برای گرمایش در ساختمان‌ها. علوم و تکنولوژی محیط زیست، (۳)، ۲۸-۱۵.

دقیق، ر.، مشتاق، ج. (۱۳۸۲). انتخاب بهینه سیستم‌های شیشه و پنجره به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی. سومین همایش بین‌المللی بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران.

ذوالفقاری، ع.، معرفت، م. (۱۳۸۹). معیارهای نوین طراحی سیستم‌های سرمایش و گرمایش در ساختمان‌ها بر مبنای ایجاد شرایط آسایش حرارتی. دومین همایش فناوری‌های نوین ساختمانی و صنعتی سازی، تهران.

رضایی حریری، م.ت.، فیاض، ر. (۱۳۸۰). محدوده آسایش حرارتی در تهران. محیط‌شناسی، ۲۷ (۲۸)، ۱۷-۱۳.

سلطانی، م.، یوسفی‌کما، ح. (۱۳۸۴). بررسی اثر پنجره‌های با کارایی حرارتی بالاتر تغییر هزینه‌ها و انرژی مصرفی ساختمان. چهارمین همایش بین‌المللی بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران.

شاه‌محمدی، ف.، عظیمی، ع.، کاظم‌زاده‌حنانی، س. (۱۳۸۵). شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی گرمایشی ساختمان. پنجمین همایش بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران.

شکوری‌گنجوی، ح.، نظرزاده، ج. (۱۳۸۳). مطالعه اثر تغییرات دمای هوا بر میانگین زمان مصرف روزانه انرژی الکتریکی در کشور. نشریه انرژی ایران، (۲۰)، ۴۰-۲۷.

عابدی، ا.، خسرویان، ک. (۱۳۹۱). ارزیابی فنی و اقتصادی انواع چیلر باتوجه به قانون هدفمندشدن یارانه‌ها، نهمین کنفرانس بین‌المللی انرژی، تهران.

عربی، م.، دهقانی، م. (۱۳۸۹). بررسی فنی و اقتصادی سیستم‌های چیلر جذبی خورشیدی در ایران. مجله مهندسی شیمی ایران، (۴۶)، ۷۲-۶۰.

عظمتی، ع.، حسینی، ح. (۱۳۹۲). بررسی تأثیر جهت‌گیری ساختمان‌های آموزشی بر بارهای حرارتی و برودتی در اقلیم‌های مختلف. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، (۵۷)، ۱۵۷-۱۴۷.

علیپور، ن.، امدادی، آ.، جلیلی، م.، صادق‌آزر، م. (۱۳۸۱). بررسی روش‌های مختلف عایق‌سازی ساختمان‌های بتنی دیوار باربر و مقایسه فنی و اقتصادی آن‌ها. *دومین همایش بین‌المللی بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران*.

کاظمی، م. (۱۳۹۲). *ارزیابی انرژی چرخه عمر ساختمان‌ها با در نظر گرفتن مصارف انرژی ساخت مصالح ساختمانی مختلف در ایران و انتخاب ساختمان با الگوی مناسب*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

گیلانی، س.، محمدکاری، ب. (۱۳۹۰). بررسی عملکرد گرمایشی گلخانه‌های خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی اقلیم سرد (نمونه موردی: شهر اردبیل). *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، (۲)، ۱۵۷-۱۴۷.

محمودی‌زندی، م.، پاکاری، ن.، بهرامی، ح. (۱۳۹۱). ارزیابی چگونگی تأثیرگذاری بام سبز در کاهش دمای محیط. *فصلنامه علمی پژوهشی باغ نظر*، (۲۰)، ۸۲-۷۳.

معرفت، م.، امیدوار، ا. (۱۳۸۷). رابطه‌ای برای پیش‌بینی ساعت به ساعت دمای پانل‌های فلزی با دمای متغیر تطبیقی در سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی. *مجله فنی و مهندسی مدرس*، (۳۲)، ۳۱-۱۳.

معرفت، م.، امیدوار، ا. (۱۳۸۸). پدیده نامطلوب سرمایش موضعی و تأثیر آن بر مصرف انرژی در سامانه‌های گرمایش از کف. *مجله فنی و مهندسی مدرس - مکانیک*، (۳۷)، ۳۹-۵۰.

مهدوی‌نژاد، م. (۱۳۹۲). الگوی انرژی دوستی در ساختمان براساس رفتار حرارتی بام. *نقش جهان*، (۳)، ۴۲-۳۵.

مهدوی‌نژاد، م.، هادیان‌پور، م. (۱۳۹۴). مقایسه تحلیلی عملکرد نرم‌افزارهای شبیه‌ساز مبحث نوزده مقررات ملی. *نامه معماری و شهرسازی*، (۱۵)، ۵۶-۴۳.

یزدان‌داد، ح.، امامی، س.، هاشمی، ن. (۱۳۸۹). ارزش‌ها و کارکردهای محیط زیستی بام‌های سبز در توسعه پایدار شهری. *نخستین همایش ملی توسعه پایدار شهری، دانشگاه گیلان*.

Abedi, H. & Khosravian, K. (2010). Technical and economical comparison of compression and absorption chillers. *The first national conference on chiller and cooling tower, Iran. (in Persian)*

Alipour, N., Emdadi, A, Jalili, M. & Sadegh-Azar, M.S. (2002). Technical and economic analysis of different methods for insulation of load-bearing wall concrete buildings, *The second international conference on fuel conservation in building, Iran. Tehran. (in Persian)*

Antipova, E., Boer, D, Guillen-Gosalbez, G., Cabeza, L.F. & Jimenez, L. (2014). Multi-objective optimization coupled with life cycle assessment for retrofitting building. *Energy and Buildings*, 82, 92-99.

- Arabi, M. & Dehghani, M.R. (2000). Technical and economical study on application of absorption solar chiller in Iran. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 9(46), 60-72. (in Persian)
- Arbabian, H. (2001). Optimization of energy efficiency in buildings. *The 3rd National Energy Congress*, Iran, Tehran. (in Persian)
- Asadi, E., Da Silva, M.G., Antunes, C.H. & Dias, L. (2012). Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application. *Energy and Buildings*, 44, 81-87.
- Asadi, E., Da Silva, M.G., Antunes, C.H., Dias, L. & Glicksman, L. (2014). Multi-objective optimization for building retrofit: A model using genetic algorithm and artificial neural network and an application. *Energy and Buildings*, 81, 444-356.
- Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2009). *ASHRAE Handbook*, Fundamentals.
- Azemati, A.A. & Hosseini, H. (2014). Effect of Educational Building's Direction on Cooling and Heating Loads in Different Regions. *Journal of Environmental Science and Technology*, 15(2), 147-157. (in Persian)
- Banting, D., Li, J., Missios, P., Au, A, N. Currie, B.A. & Verrati, M. (2005). *Report on the Environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the city of Toronto*. Ryerson University.
- Barati, Gh. (2003). The role of climatic characteristics of residential buildings to provide optimal heating and cooling. *The third international conference on fuel conservation in building*. Iran, Tehran. (in Persian)
- Bolattürk, A. (2008). Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey. *Building and Environment*, 43(6), 1055-1064.
- Carreras, J., Pozo, C., Boer, D., Guillen-Gosalbez, G., Caballero, J.A., Ruiz-Femenia, R. & Jimenez, L. (2016). Systematic approach for the life cycle multi-objective optimization of buildings combining objective reduction and surrogate modeling. *Energy and Buildings*, 130, 506-518.
- Daghigh, R. & Moshtagh, J. (2003). The optimal choice of glass and window systems for energy conservation. *The third international conference on fuel conservation in building*, Iran, Tehran. (in Persian)
- Daouas, N. (2011). A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads. *Applied Energy*, 88(1), 156-164.

- Delgarm, N., Sajadi, B., Kowsary, F. & Delgarm, S. (2016). Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO). *Applied Energy*, 170, 293-303.
- Diakaki, C., Grigoroudis, E. & Kolokotsa, D. (2008). Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. *Energy and Buildings*, 40(9), 1747-1754.
- Diakaki, C., Grigoroudis, E. & Kolokotsa, D. (2013). Performance study of a multi-objective mathematical programming modelling approach for energy decision-making in buildings. *Energy*, 59, 534-542.
- Ebrahimi, S. T., Mohtashami, M., Ziaee, A. & Salehnia, N. (2011). Energy auditing of residential buildings in Mashhad and comparison of the gas consumption efficiency for different heating systems. *The first international conference on new approaches towards energy conservation*, Tehran, Amir Kabir University. (in Persian)
- Ebrahimpour, A., Marefat, M. & Mohammadkari, B. (2004). Insulation in buildings used regularly in Iran climatic conditions in terms of annual thermal loads. *Modares Technical and Engineering*, 17, 33-52. (in Persian)
- Emdadi, A., Alipour, N., Namatichari, M. & Dourmohammadi, H. (2002). The effects of thermal insulation of building walls made of lightweight concrete in reducing fuel consumption and cost. *The second international conference on fuel conservation in building*, Iran, Tehran. (in Persian)
- Energy Balance. Ministry of Energy. Available at: <http://pep.moe.org.ir>, Accessed 17 June 2016. (in Persian)
- Ershad, L. S., Akbari, M. & Yousefi, A.A. (2003). New technologies in the construction of windows with low energy loss. *The third international conference on fuel conservation in building*, Iran, Tehran. (in Persian)
- Fanger, P.O. (1970). Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering. New York.
- Gilani, S. & Mohammadkari, B. (2011). Investigation of Greenhouse's Thermal Performance in Residential Buildings of Cold Climate Case Study: City of Ardebil. *Modares Mechanical Engineering*, 11(2), 147-157. (in Persian)
- Hart, M. & De Dear, R. (2004). Weather sensitivity in household appliance energy end-use, *Energy and Buildings*, 1, 161-174.
- Heidari, S.H. (2009). Comfort Temperature of Iranian People in City of Tehran. *Honar-Ha-Ye-Ziba (Memari-Va-Shahrsazi)*, 17, 5-14. (in Persian)

- Hosseinabadi, S., Lashkari, H. & Salmanimoqadam, M. (2012). Climatic Design of Residential Building of Sabzevar with Emphasis on Building Orientation and Depth of Canopy. *Geographiy and Development Iraninan Journal*, 10(27), 103-116. (in Persian)
- Kazemi, M. (2014). Life cycle energy assessment of buildings with consideration energy consumption materials production in Iran to choose with appropriate pattern. Msc Thesis, University of Tehran. (in Persian)
- Khalaji, A., Abedi, Z. & Sharee-Heidari, N. (2009). Solar combi-systems: a new solution for heating buildings. *Journal of Environmental Science and Technology*, 11(3), 15-28. (in Persian)
- Mahdavinejad, M.J. & Fakhari, M. (2013). Stablishment of Optimum Designing Pattern in Buildings Roof Shape Based on Energy Loss. *Naqshejahan*, 3(2), 35-42. (in Persian)
- Mahdavinejad, M.J. & Hadiyanpour, M. (2015). Analytical Comparison of the Performance of Simulation Software Programs for Iranian Building Code 19. *Journal of Architecture and Urban Planning*, 8(15), 43-56. (in Persian)
- Mahmoody, Z., Pakari, N. & Bahrami, H. (2012). The effect of green roof on reducing environment temperature. *Bagh-I-Nazar*, 9(20), 73-82. (in Persian)
- Marefat, M. & Omidvar, A. (2011). Undesired Local Cooling Phenomenon and Its Effect on Energy Consumption in Floor Heating Systems. *Modares Mechanical Engineering*, 9(1), 39-50. (in Persian)
- Marefat, M. & Omidvar, A. (2014). Effects of Adaptive Temperature Metal Panels on Thermal Comfort and Energy Consumption of Radiant Ceiling Cooling Systems. *Modares Mechanical Engineering*, 8(1), 13-32. (in Persian)
- Mihalakakou, G. & Ferrante, A. (2000). Energy conservation and potential of a sunspace: sensitivity analysis. *Energy Conversion and Management*, 41, 1264-1247.
- Ortiga, J., Carles Bruno, J., Coronas, A. & Grossman, I.E. (2007). Review of optimization models for the design of polygeneration systems in district heating and cooling networks. *The 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*.
- Pouladi, A. & Mojtahedzadeh, F. (2002). Heating and cooling loss reduction and energy savings in two adjacent sample buildings by using thermal insulation. *The second international conference on fuel conservation in building*, Iran, Tehran. (in Persian)
- Rezayi, H., M.T. & Fayyaz, R. (2001). Thermal comfort Condition in Tehran. *Journal of Environmanetal Studies*, 27(28), 13-17. (in Persian)

- Shahmohammadi, F., Azimi, A. & Kazemizadeh, H. S. (2006). Simulation and optimization of heating energy consumption of buildings. *The 5th international conference on fuel conservation in building*, Iran, Tehran. (in Persian)
- Shakouri, G. H. & Nazarzadeh, J. (2004). Analysis of temperature changes effect on the average of daily electrical energy consumption in Iran. *Iranian Journal of Energy*, 9(1), 27-40. (in Persian)
- Soltani, M. & Yousofikoma, H. (2005). Investigating the effect of high thermal efficiency windows on changing cost and energy consumption of buildings. *The 4th international conference on fuel conservation in building*, Iran, Tehran. (in Persian)
- Tavakolimoghdam, R., Alinaghian, M., Norouzi, N. & Salamatbakhsh, AR. (2011). Solving a New Vehicle Routing Problem Considering Safety in Hazardous Materials Transportation. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 2(3), 223-237. (in Persian)
- Wang, F., Yoshida, H. & Ono, E. (2009). Methodology for optimizing the operation of heating/cooling plants with multi-heat-source equipments. *Energy and Buildings*, 41(4), 416-425.
- Yazdandad, H., Emami, S. & Hashemi, N. (2010). Environmental values and functions of green roofs on urban sustainable development. *The first national conference on sustainable urban development*, Iran, Gilan. (in Persian)
- Zinzi, M. & Agnoli, S. (2012). Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region, *Energy and Buildings*, 55, 66-76.
- Zolfaghari, A. & Marefat, M. (2010). New criteria for designing of heating and cooling systems in buildings based on thermal comfort conditions. *The Second Conference on New Building Technologies and Industrialization*, Iran, Tehran. (in Persian)