

# بهینه‌سازی سقف ساختمان سه طبقه مسکونی با کمک الگوریتم ژنتیک

(مورد پژوهی: اقلیم گرم‌و‌خشک شهر شیراز)

پری‌ناز کشتکاران<sup>1</sup>، خسرو موحد<sup>2\*</sup> و زهرا برزگر مروستی<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 1400/03/02

تاریخ پذیرش: 1400/10/11

**چکیده:** دیواره‌های بنا به لحاظ تبادل حرارت و کنترل مصرف انرژی ساختمان مهم است، زیرا خارجی‌ترین پوسته بناست که در تماس مستقیم با هوا و تغییرات دما قرار دارد. بدنه سقف نسبت به سایر دیواره‌های ساختمان از اهمیت بیشتری برخوردار است، زیرا تبادل حرارتی آن، با توجه به مساحت و زمان، نسبت به سایر دیوارها، بیشتر در معرض تابش خورشید و سایر عوامل قرار دارد. هدف این مقاله کاهش مصرف انرژی در ساختمان مسکونی در شهر شیراز و دستیابی به آسایش حرارتی در فضاهای ساختمان با بهینه‌سازی سقف ساختمان است. در این راستا پرسش زیر طرح شد که: بهینه‌ترین حالت طراحی سقف ساختمان (مصلح و روش‌های غیر فعال طراحی) چگونه باشد تا مصرف انرژی ساختمان کمینه شود و فضاهای بنا در محدوده آسایش حرارتی قرار گیرد؟ میزان کاهش انرژی مصرفی ساختمان نیز مد نظر این پژوهش بوده است. روش پژوهش، کمی است و میزان مصرف انرژی ساختمان و شاخص آسایش حرارتی با نرم‌افزار انرژی پلاس و روند بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک انجام شده است. متغیرهای سقف بنا در سه دسته کلی: سیستم غیر فعال انرژی، ویژگی‌های کالبدی سقف و موقعیت قرارگیری سقف، استخراج و تعریف شد. نتایج به دست آمده از محاسبات شبیه‌سازی ساختمان و خروجی تابع هدف الگوریتم ژنتیک، نشان داد که بهترین مدل‌های سقف ارائه شده، مصرف انرژی را از سی‌ونه تا پنجاه درصد کاهش و میانگین شاخص آسایش حرارتی را نیز به میزان 0.9 و 0.68 به ترتیب در گرم‌ترین و سردترین ماه‌های تابستان و زمستان بهبود می‌دهد.

**واژگان کلیدی:** مصرف انرژی، آسایش حرارتی، بهینه‌سازی سقف ساختمان، الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی انرژی.

این مقاله برگرفته از رساله دکتری معماری نویسنده اول با عنوان "بهینه‌سازی دیواره افقی (سقف) ساختمان با کمک الگوریتم ژنتیک در اقلیم گرم‌و‌خشک شهر شیراز" به راهنمایی نویسنده دوم و مشاوره نویسنده سوم در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز است.

<sup>1</sup> دانشجوی دکتری، گروه معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

<sup>2</sup> دانشیار، معماری، گروه معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران. (نویسنده مسئول) khm@iaushiraz.ac.ir

<sup>3</sup> استادیار مدعو، معماری، گروه معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

## 1- مقدمه

یکی از اصلی‌ترین بخش‌های اتلاف انرژی در ساختمان مربوط به اتلاف انرژی از دیواره بنا است و بدین سبب دیواره‌های ساختمان داری اهمیت است که سطح واسط بین محیط داخل و خارج و به عنوان خارجی‌ترین پوسته بنا در معرض هوا و تغییرات دما قرار دارد. از بین دیواره‌های بنا، سقف ساختمان دارای اهمیت ویژه‌ای است، زیرا وسیع‌ترین بخش بنا برای هدایت مستقیم تابش خورشید است و مساحت و زمان بیشتری را نسبت به سایر دیوارها در معرض تابش خورشید و سایر عوامل جوی قرار دارد. همچنین مطالعات بیانگر این است که سقف به تنهایی پنجاه درصد میزان گرما، در ساختمان‌های عمومی یک تا دو طبقه در فصل تابستان را بر عهده دارد و بهینه‌سازی دیواره‌های ساختمان با کارایی بالای انرژی از مزایای اقتصادی قابل توجهی برخوردار است. با توجه به اهمیت نقش سقف در مصرف انرژی ساختمان، در اقلیم گرم و خشک شیراز، ضرورت تعدیل تبادل حرارتی سقف ساختمان مشخص شده است، که با تغییر مصالح، تغییر پارامترهای فیزیکی دیواره و عایق‌های حرارتی و همچنین استفاده و طراحی روش‌های غیر فعال جهت دیواره‌ها، می‌توان با بهینه‌سازی دیواره مصرف انرژی را کاهش داد. آنچه در پژوهش‌ها کمتر بدان پرداخته شده، تأثیر همزمان جزئیات اجرایی دیواره سقف و استفاده از روش‌های غیر فعال بام منطبق بر اقلیم است. به نظر می‌رسد بررسی تأثیر همزمان این دو پارامتر و یافتن بهینه‌ترین حالت طراحی می‌تواند در کاهش مصرف انرژی ساختمان و تأمین آسایش حرارتی تأثیر بیشتری داشته باشد. این مقاله با هدف کاهش مصرف انرژی ساختمان با محاسبه آسایش حرارتی و انتخاب بهینه‌ترین حالت ترکیب مصالح و روش غیر فعال سقف ساختمان مسکونی در شهر شیراز، به دنبال پاسخ به این پرسش است که: بهینه‌ترین حالت طراحی سقف ساختمان (مصالح و روش‌های غیر فعال طراحی) چگونه باشد؟ تا مصرف انرژی ساختمان کمینه شود و فضاهای بنا در محدوده آسایش حرارتی قرار گیرد و میزان کاهش مصرف انرژی و شاخص آسایش حرارتی در صورت بهینه

سازی سقف چقدر است؟ در این راستا از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی و الگوریتم محاسباتی استفاده شده است.

### 1-1- مرور پیشینه پژوهش

پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه صرفه‌جویی در مصرف انرژی با بهینه‌سازی دیواره‌های ساختمان و سقف انجام شده است که می‌توان آن را در پنج بخش اصلی: طراحی غیر فعال، صرفه‌جویی مصرف انرژی، مصرف انرژی، بهره‌وری اقتصادی و بهینه‌سازی بررسی کرد. جدول 1 پژوهشگران متأخر که پژوهش‌های جامعی را در این پنج بخش انجام داده‌اند، نشان می‌دهد.

رفاهی و تلخایی (Refahi and talkhabi, 2015)، گودرزی و مصطفی‌پور (Goudarzi and Mostafaeipour, 2017)، گونگ و همکاران (Gong et al., 2012)، شریفی و یاماگاتا (Sharifi and Yamagata, 2015)، فریس و رخشان (Friess and Rakhshan, 2017)، کیناکلی (Kaynakli, 2012)، رامین و همکاران (Ramin et al., 2016)، یو و همکاران (Yu et al., 2015)، محمودی و همکاران (Mahmoody et al., 2012)، و زرغامی و ادیبی (Zarghami and Adibi, 2016)، پژوهشگرانی هستند که در بخش طراحی غیر فعال سقف پژوهش‌هایی انجام داده‌اند که شامل: بام سبز، حوضچه بام، ضخامت دیواره‌ها، جهت بازشوها، ارزیابی پوسته بام است. مهمترین مقالات مروری در این زمینه توسط شریفی و یاماگاتا (Sharifi & Yamagata, 2015) در زمینه سیستم غیر فعال انرژی، نصرالهی و صالحی (Nasrollahi and Salehi, 2015)، فرحانیه و ستاری (Farhanieh and Sattari, 2006)، طاهری و شفیع (Taheri and Shafie, 1995)، در بخش مصرف انرژی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی انجام شده است. چند تن از صاحب‌نظران: یو و همکاران (Yu et al., 2011)، فرحانیه و ستاری (Farhanieh and Sattari, 2006)، طاهری و شفیع (Taheri and Shafie, 1995)، گاگلیانو و همکاران (Gagliano et al., 2013) در مقالات مروری به طور جامع به بررسی تأثیر عوامل کالبدی دیواره ساختمان بر کاهش مصرف انرژی پرداخته‌اند، که اغلب



کاهش می‌دهد (Farhanieh & Sattari, 2006). شیرزادی و نقاش‌زادگان با روش بهینه‌سازی جستجوی متوالی به بررسی صرفه‌جویی انرژی از طریق دیواره‌های ساختمان در چهار شهر ایران (تهران، تبریز، اصفهان، بندرعباس، شیراز) پرداخته است. نتایج بهینه‌سازی حاصل از این پژوهش نشان داده است که با 15 درصد ذخیره انرژی، هزینه انرژی تا 23 درصد کاهش و با ذخیره حداکثری انرژی تا 49 درصد، هزینه انرژی نسبت به ساختمان مرجع 25 درصد افزایش داشته است. همچنین در نتایج این پژوهش اشاره شده که آب و هوای تهران و شیراز پتانسیل خوبی برای کاهش مصرف انرژی با طراحی ترکیب مناسب دیواره ساختمان و پارامترهای صفحات خورشیدی را دارد (Shirzadi & Nagashzadeghan, 2015). بنی‌اسدی و همکاران به بررسی ضخامت بهینه لایه عایق حرارتی در دیواره‌های ساختمان‌های مسکونی مناطق مختلف ایران پرداخته است. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار انرژی‌پلاس بهینه‌ترین ضخامت عایق حرارتی متداول را برای مناطق جنوبی کشور صفر، مناطق سردسیر ضخامت تقریبی 6 سانتیمتر، برای شهرهای شیراز اصفهان و یزد و تهران ضخامت عایق حرارتی بهینه را کمتر از ضخامت متداول از 0.3 تا 1.5 سانتیمتر پیشنهاد داده‌اند. همچنین استفاده از عایق با ضخامت بهینه را بسیار به صرفه‌تر از کاربرد مصالح با ظرفیت حرارتی بالا دانسته‌اند (Baniassadi et al., 2016). ابراهیم‌پور و همکاران با دستیابی به نتایج تقریباً مشابه در نتیجه پژوهش خود ضخامت 5 تا 7.5 سانتیمتر عایق حرارتی برای شهر تهران به صورت دولایه و 5 تا 7.5 سانتیمتر عایق یک لایه در سطح داخلی برای شهر تبریز و 5 تا 7.5 سانتیمتر عایق یک لایه در سطح خارجی برای شهر اهواز پیشنهاد داده و عنوان کرده‌اند که با اجرای عایق کاری بهینه در دیوارها، 50 تا 70 درصد در انرژی سالانه صرفه‌جویی خواهد شد (Ebrahimpour et al., 2004). مطالعه پژوهشگران در سایر کشورها کاهش مصرف انرژی را با استفاده از عایق حرارتی نشان می‌دهد به عنوان مثال: فریس و رخشان که در مقاله مروری، ساختمان‌های غیر فعال و ارزیابی عملکرد پوسته ساختمان را در کشور

این پژوهش‌ها در مورد عایق‌های حرارتی و کاربرد آن در سقف ساختمان بوده است. در بخش طراحی سیستم غیر فعال انرژی، رفاهی و تلخابی در مقاله پژوهشی خود به تأثیر بام سبز در میزان مصرف انرژی ساختمان و زمان بازگشت هزینه در شهرهای بندرعباس، اصفهان و تبریز در کشور ایران پرداخته‌اند و مشخصاً میزان کاهش مصرف انرژی به دلیل استفاده از بام سبز را به ترتیب 8.5 و 9.5 و 6.5 درصد نشان می‌دهد (Refahi & talkhabi, 2015). ضرغامی و ادیبی نیز در پژوهش خود به ارزیابی رفتار حرارتی بام سبز در مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی شهر سمنان واقع در اقلیم گرم‌وخشک ایران، پرداخته است. در این پژوهش عواملی از جمله ارتفاع گیاه، شاخص مساحت برگ و ارتفاع بستر گیاه برای محاسبه مصرف انرژی سالیانه در یک ساختمان مسکونی متداول مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان داده که با ارزیابی راهبردهای پیشنهادی، تا حدود 50% در مصرف انرژی سالیانه ساختمان مسکونی مورد مطالعه صرفه‌جویی شده است (Zarghami & Adibi, 2016). همچنین گودرزی و مصطفی‌پور روش‌های غیر فعال ساختمان در کاهش مصرف انرژی در شهر کرمان را به روش تحلیل عددی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد که بادگیرها نیاز سرمایشی ساختمان را از ماه اردیبهشت تا مهر کاهش می‌دهد. در حالی که استفاده از سایر روش‌های غیر فعال شامل بام سبز و حوضچه بام و خانه‌های زمین پناه مصرف انرژی سالانه هدر رفته از دیوارها را کاهش می‌دهد (Goudarzi & Mostafaeipour, 2017). رامین و همکاران ضخامت بهینه عایق را برای شهر تهران در راستای کاهش مصرف انرژی ساختمان با روش تحلیل عددی پیشنهاد داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از عایق در دیوارهای بتنی و آجر مجوف به ترتیب 82 و 58 درصد انتقال بار حرارتی سالانه را کاهش می‌دهد (Ramin et al., 2016). این در حالی است که فرحانیه و ستاری در مقاله خود با استفاده از مدل انتگرالی نشان داده‌اند که استفاده از عایق حرارتی جهت دیوارهای خارجی ساختمان در شهر تهران مصرف انرژی را تا میزان 35 درصد در هر متر مربع

امارات بررسی و یکی از عوامل مهم بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها را استفاده از عایق حرارتی با کاهش 20 درصد مصرف انرژی بیان کرده‌اند (Friess & Rakhshan, 2017). در همین راستا کیناکلی در مقاله مروری به بررسی پیشینه پژوهش در مورد تعیین ضخامت بهینه عایق حرارتی دیواره ساختمان در کشورهای ترکیه و مالزی و مالدیو و تأثیر آن بر مصرف انرژی پرداخته است و کاهش انتقال حرارت را با افزایش ضخامت عایق حرارتی نشان می‌دهد. همچنین انتخاب ضخامت بهینه عایق حرارتی در شهرهای مورد مطالعه هنگام روز درجه گرمایش و سرمایش را افزایش می‌دهد (Kaynakli, 2012). پژوهش گونگ و همکاران نیز در کشور چین کاهش 70 درصدی مصرف انرژی ساختمان را با استفاده از عایق حرارتی و افزایش ضخامت آن نشان می‌دهد (Gong et al., 2012). طاهباز و جلیلیان در پژوهش خود به مشخص نمودن دیواره مناسب پهنه‌های اقلیمی ایران پرداخته‌اند. بر این اساس جهت اقلیم شهر شیراز و بام ساختمان، جدار با ظرفیت حرارتی زیاد، ضریب انتقال حرارت 1.20-1.22، زمان تأخیر 8-14 ساعت، عایق حرارتی و عایق رطوبتی در سطح خارجی جدار، رنگ روشن و بافت ناهموار پیشنهاد شده است (Tahbaz & Jaliliyan, 2005). برزگر و حیدری تأثیر انرژی خورشیدی را بر میزان مصرف انرژی اولیه، سرمایش و گرمایش، در بخش مسکونی شهر شیراز را بررسی نموده‌اند. تابش دریافتی خورشید در سه بخش اصلی، دیواره افقی (سقف) دیواره‌های عمودی اصلی (دیواره جنوبی) و سایر دیواره‌ها بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، بیشترین تابش دریافتی سطوح متعلق به سطوح افقی حدود 75 درصد و بهترین بدنه ساختمان در راستای جذب انرژی خورشیدی اقلیمی بدنه‌های عمودی است (Barzegar & Heidari, 2013). مهران و همکاران در پژوهش خود به بررسی فرم سقف (مورب، گنبدی و تخت) و تأثیر آن بر مصرف انرژی ساختمان در شهر تهران پرداخته است. در این پژوهش به دلیل جذب تابش خورشید در فصل تابستان سقف مورب با جهت شرق- غرب پیشنهاد شده، که در این صورت مصرف انرژی به مقدار 1.3-1.141 برابر سقف

تخت کاهش می‌یابد (Mehran et al., 2008). مهدوی‌نژاد فرم مطلوب بام از نظر عملکرد حرارتی در شهر اصفهان را با توجه به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، بام شیب-دار 30-60 به طوری که عمده مساحت آن به سمت جنوب باشد، را معرفی می‌کند و بیان می‌دارد که بام گنبدی نامناسب‌ترین عملکرد حرارتی را در این شهر دارد (Mahdavinejad, 2013). شرقی و عظیمی، فرم و زاویه بهینه سقف شیب‌دار را در اقلیم سرد و کوهستانی شهر کرج بر اساس انرژی دریافتی از طریق تابش خورشید مورد پژوهش قرار داده و پس از ارزیابی تحلیل‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که سقف دو سوپه 45 درجه باحجمی به میزان 1500.7 متر مکعب بهترین کارکرد را با توجه به دریافت انرژی در زمستان در مساحت کف ثابت نسبت به سایر سقف‌ها، برای آسایش حرارتی افراد داراست (Sharghi & Azimi, 2017). رزمگاه در پژوهشی پیرامون بام خنک به بررسی نقش رنگ در کاهش مصرف انرژی می‌پردازد و با آزمایش‌های انجام شده نشان داده است که تغییر رنگ بام (سقف) حدود 17٪ سبب خنک شدن داخل ساختمان‌ها و در نتیجه کاهش مصرف انرژی می‌شود (Razmgah, 2014). اهمیت دیوار افقی بنا (سقف) در دریافت انرژی تابشی، انتقال حرارت و نهایتاً مصرف انرژی ساختمان در مطالعات پیشین مشخص است. شواهد مطالعات گذشته تأثیر روش‌های طراحی غیر فعال از جمله استفاده از عایق حرارتی، استفاده از بام سبز، در شهرهای مختلف جهان و ایران بر کاهش مصرف انرژی را نشان می‌دهد، اما اینکه کدامیک از این روش‌ها بیشترین تأثیر را مشخصاً در اقلیم شیراز داشته و یا بهینه‌ترین حالت استفاده همزمان از این روش‌ها در حالی که کاهش حداکثری مصرف انرژی را داشته باشد، مشخص نیست. همچنین تأثیر استفاده از مصالح لایه-های مختلف سقف و بهینه‌ترین آنها به لحاظ جنس و ضخامت و تأثیر همزمان ویژگی‌های کالبدی سقف و استفاده از روش‌های طراحی غیر فعال سقف در میزان کاهش مصرف انرژی و آسایش حرارتی مشخصاً در اقلیم شیراز انجام نشده است. مرور سابقه پژوهش نشان داد که بحث بهینه‌سازی دیواره‌های ساختمان از مباحث روز پژوهش‌های دنیاست که بیشترین تأثیر را در کاهش

توجه به این نکته مهم است که در پژوهش‌های پیشین تأثیر عوامل کالبدی سقف ساختمان و سیستم‌های طراحی غیر فعال به صورت مجزا در هر پژوهش بررسی شده و پژوهشی که تأثیر همزمان تمام عوامل مذکور را بررسی نماید انجام نشده است. بدین لحاظ پژوهش پیش رو دارای نوآوری است.

مصرف انرژی ساختمان نشان می‌دهد. این پژوهش‌ها در ایران محدود به پژوهش‌های عایق‌های حرارتی، بام سبز، جهت‌گیری بنا، حوضچه‌های بام بوده که در منابع لاتین رایج شده است. این مهم در کنار تعداد اندک منابع فارسی مرتبط با موضوع نشان داد که برخلاف اهمیت جهانی موضوع هنوز پژوهش جامعی در خصوص بهینه‌سازی دیواره‌های ساختمان در کشور ایران انجام نشده است.

جدول 1- سوابق پژوهشی ادبیات موضوع

Tab. 1- Research background

مکان	مقالات فارسی	مکان	مقالات لاتین	موضوع پژوهش
ایران	محمودی و همکاران (Mahmoody et al., 2012)	ایران	رفاهی و همکار (Refahi & Talkhabi, 2015)	طراحی سیستم غیر فعال انرژی
ایران	ضرغامی و همکار (Zarghami & Adibi, 2016)	چین	گودرزی و همکار (Goudarzi & Mostafaiepour, 2017)	
ایران	آکوجیان و همکار (Akoochakian & Khalatbari, 2018)	مقاله مروری	گونگ و همکاران (Gong et al., 2012)	
		امارات	شریفی و همکار (Sharifi & Yamagata, 2015)	
		مقاله مروری	فریس و همکار (Friess & Rakhshan, 2017)	
		ایران	کیناکلی (Kaynakli, 2012)	
		چین	رامین و همکاران (Ramin et al., 2016)	مصرف انرژی
ایران	مهران و همکاران (Mehran et al., 2008)	ایران	یو و همکاران (Yu, et al., 2011)	
ایران	رزمگاہ (Razmgah, 2014)	ایران	مردانی و همکاران (Mardani et al., 2017)	
		ایتالیا	نصرالهی و همکار (Nasrollahi & Salehi, 2015)	
		مقاله مروری	فرحانیه و همکار (Farhanieh & Sattari, 2006)	
		ایران	طاهری و همکار (Taheri & Shafie, 1995)	
			گآلیانو و همکاران (Gagliano et al., 2013)	ارزایی انرژی و شبیه‌سازی انرژی
ایران	امیدوار و همکار (Omidvar & Rosti, 2013)	ایران	آدیتیا و همکاران (Aditya et al., 2017)	
ایران	برزگر و همکار (Barzegar & heidari, 2013)	ایتالیا	محمدنژاد و همکاران (Mohammadnejad et al., 2011)	
ایران	طاهباز و همکار (Tahbaz & jaliliyan, 2005)	مدیترانه	میرزایی و همکار (Mirzaei & Bekri, 2017)	
ایران	میرهاشمی و همکار (Mirhashemi & Shapoorian, 2010)	سوئد	لولینی و همکاران (Lollini et al., 2006)	
ایران	مهدوی‌نژاد (Mahdavinejad, 2013)	یونان	زنودا و همکاران (Znouda et al., 2007)	
	شرقی و همکار (Sharghi & azimi, 2017)	تایوان	گوستاوسون و همکار (Gustavsson & Joelsson, 2010)	بهینه‌سازی و الگوریتم ژنتیک
	مداحی و همکار (Madahi & abassi, 2020)	ایران	آناستازلوس و همکاران (Anastaselos et al., 2011)	
ایران	ابراهیم‌پور و همکاران (Ebrahimipour et al., 2004)	ایران	لای و همکار (Lai & Wang, 2011)	
			شیرزادی و همکار (Shirzadi & Nagashzadeghan, 2015)	
		فنلاند	حسن و همکاران (Hasan et al., 2008)	
		مدیترانه	زنودا و همکاران (Znouda et al., 2007)	
		لبنان و فرانسه	هارکوس و همکاران (Harkouss et al., 2017)	بهینه‌سازی و الگوریتم ژنتیک
		مقاله مروری	شی و همکاران (Shi et al., 2016)	
		مقاله مروری	خیری (Kheiri, 2018)	
		پرتغال	اسدی و همکاران (Asadi et al., 2012)	
		ایران	دلگرم و همکاران (Delgarm et al., 2016)	
		آمریکا	فسنقری و همکاران (Fesanghary et al., 2012)	

**1-2- چارچوب نظری**

مطالعه در مورد ویژگی‌های فیزیکی، کالبدی، و یا شیمیایی مصالح هر عنصر بنا که در ارتباط با هوای خارج ساختمان است، می‌تواند در انتقال حرارت نقش مؤثر داشته باشد. در این بخش، مبانی نظری پژوهش با تعریف کلید واژه‌ها استخراج شده است. تأثیر ویژگی‌های بام بر کاهش مصرف انرژی ساختمان، سیستم‌های طراحی غیر فعال بام ساختمان به عنوان فنون کاهش مصرف انرژی در ساختمان بررسی شد و سپس استفاده از شبیه‌سازی‌های انرژی جهت محاسبه و ارزیابی انرژی مصرفی ساختمان بیان شده است. جهت‌گیری بنا، ویژگی بازشوها، عایق نما و دیواره بنا، سیستم تهویه هوا، نوع مصالح دیواره‌های بنا و سیستم‌های غیر فعال طراحی باعث کاهش بار سرمایشی ساختمان می‌شود. ویژگی‌های عایق حرارتی از جمله انتخاب نوع مناسب با ضخامت بهینه می‌تواند بیشترین تأثیر را بر کاهش بار سرمایشی ساختمان داشته باشد. مقررات محلی منطقه اولویت اول را در انتخاب سایر سیستم‌های غیر فعال طراحی دارد و سیستم‌های طراحی غیر فعال باید با توجه به اقلیم گرم‌وخشک منطقه مورد مطالعه و منابع آبی موجود، پیشنهاد شود. ایجاد سایه‌بان در سقف، افزایش ضخامت بام، بهبود ضریب انعکاس حرارتی سقف، عایق بام و ایجاد سقف کاذب، کاشت پوشش گیاهی در بام، اسپری و پاشیدن آب روی بام و ایجاد استخرهای بامی یا سقفی، چندین روش غیر فعال برای تنظیم رفتار حرارتی بام است. جهت برآورد و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان و تعیین آسایش حرارتی از ابزارهای دقیق شبیه‌سازی انرژی استفاده می‌شود. ترکیب این برنامه شبیه‌سازی انرژی با الگوریتم بهینه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB امکان ارزیابی دقیق گزینه‌های طراحی دیواره ساختمان و دستیابی به کمینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان را مهیا می‌کند. جداول 2 و 3 و 4 به ترتیب مؤلفه‌های ویژگی‌های کالبدی سقف، مؤلفه‌های طراحی غیر فعال سقف و موقعیت قرارگیری سقف را نشان می‌دهد که در استخراج متغیرهای پژوهش، مورد استفاده قرار گرفت.

**جدول 2- مؤلفه‌های ویژگی‌های کالبدی سقف از منظر پژوهشگران**

مؤلفه	رنگ		
	شیب	پوشش خارجی	مصالح
پژوهشگر			
طاهباز و همکار		●	
ابراهیم پور و رزمگانه		●	
آکوچیان و همکار		●	
مهران و همکار	●		
شرقی و همکار	●		
مهدوی نژاد	●		
مداحی و همکاران	●	●	
Sharifi et al.,	●		
Shirzadi et al.,	●		
Ramin et al.,	●		
Gagliano et	●		
Citherlet et al.,	●		
Hamdi et al.,	●		
Dubrow et al.,	●		
Fesenghari et	●		
Ihm et al.,	●		
Gong et al.,	●		
Znouda et al.,	●		
Smeds et al.,		●	
Yu et al.,		●	
Asadi et al.,		●	
Lai et al.,	●		
Capeluto	●	●	
Idayu et al.,	●	●	●

**جدول 3- مؤلفه‌های طراحی غیر فعال سقف از منظر پژوهشگران**

مؤلفه	بام		
	بام سبز	عایق حرارتی	بام دوپوسته
پژوهشگر			
طاهباز و همکار		●	
ابراهیم پورو		●	
امیدوار و همکار		●	
ضرغامی و همکاران	●		
Sharifi et al.,	●		
Ramin et al.,		●	
Gagliano et al.,		●	
Citherlet et al.,		●	
Hamdy et al.,		●	
Refahi et al.,	●		
Nasrollahi et al.,			●



دفع حرارت و تابش خورشید با فضای خارج تعامل حرارتی دارد (Mahdavinejad, 2013). شدت تابش خورشید بستگی به زاویه برخورد اشعه با سطح مورد نظر دارد. بنابراین غیر از مناطق قطبی، در سایر نقاط سطوح افقی بیشترین میزان انرژی را از خورشید دریافت می‌کند (Tahbaz & Jalilijan, 2005). بیشترین تابش دریافتی سطوح در شهر شیراز نیز متعلق به سطوح افقی (سقف) حدود 75 درصد است (Barzegar & Heidari, 2013). بام در برابر عوامل اقلیمی بیشتر از دیگر اجزای ساختمان تأثیر پذیر است. تابش اشعه با طول موج بلند از سطح بام به آسمان، باعث می‌شود بام سریع‌تر و بیشتر از دیوارها گرمای خود را از دست بدهد و در زمستان عمده‌ترین عامل اتلاف دمای هوای داخل است. در مناطق خیلی گرم نیز بام می‌تواند عامل اصلی گرم‌کننده هوای داخل ساختمان باشد. عمده‌ترین عامل تعیین‌کننده ویژگی‌های گرمایی بام‌های یکپارچه و توپر، رنگ خارجی، مقاومت و ظرفیت حرارتی مصالح آن‌هاست (Eslami, 2004). مطابق تعریف مبحث 19 مقررات ملی ساختمان می‌توان سقف را به لحاظ شکل به دو دسته بام تخت و بام شیب‌دار تقسیم کرد: - بام تخت: پوشش نهایی هر قسمت از ساختمان که شیبی کمتر یا مساوی 10 درجه نسبت به سطح افقی دارد. بام‌های تخت بخشی از پوسته خارجی ساختمان محسوب می‌شوند (National Regulation and Building Control, 2010). - بام شیب‌دار: پوشش نهایی ساختمان که شیبی بیشتر از 10 درجه و کمتر از 60 درجه نسبت به سطح افقی دارد. در بالای سقف شیب‌دار فضای خارج و در زیر آن فضای کنترل شده یا کنترل نشده قرار دارد (National Regulation and Building Control, 2010).

#### 1-2-2 - مؤلفه‌های کالبدی بام

الف) جهت و زاویه بام: ساختار هندسی سقف بخش وسیعی از سطح ساختمان را پوشش می‌دهد و در مصرف انرژی و آسایش حرارتی ساختمان نقش به‌سزایی دارد. هندسه سقف‌ها از نظر شکل اعم از قوسی، گنبدی، تخت و مورب معیاری عمده برای مشخص نمودن عملکرد حرارتی ساختمان است. بنابراین باید بهترین جهاتی که می‌تواند منجر به کاهش شدت تابش جذب شده و در

●	Farahanieh et
●	Gong et al.,
●	Banisadi et al.,
●	Goudarzi et al.,
●	Yu et al.,
●	Asadi et al.,
●	Fries et al.,
●	Aditya et al.,
●	Lollini et al.,
●	Hasan et al.,
●	Verbeeck et al.,
●	Anastaselos et
●	Gustavsson et
●	Kaynakli et al.,

جدول 4 - مؤلفه های موقعیت سقف از منظر پژوهشگران

Tab. 4- Roof position components

مؤلفه پژوهشگر	جهت گیری	محصوریت	بام در سایه
برزگر و همکار	●		
مهران و همکار	●		
کسمایی	●		
مهدوی نژاد	●		
Taheri et al.,	●		
Ascione et al.,	●		
Mardani et al.,		●	●
Friess et al.,	●		
Dubrow et al.,	●		
Znouda et al.,	●	●	

#### 1-2-1 - دیواره افقی ساختمان

کلیه سطوح پیرامونی ساختمان اعم از سقف، دیوار، بازشوها و کف که از یک سو با هوای خارج و از سوی دیگر با فضای داخل یا فضای کنترل نشده در ارتباط است، دیواره یا پوسته ساختمان را تشکیل می‌دهد (Mahdavinejad, 2013). دیواره‌های ساختمان را می‌توان به دو دسته کلی نورگذر (شفاف) و غیر نورگذر (کدر) دسته‌بندی کرد. هر کدام از این دیواره‌ها به لحاظ موقعیت قرارگیری نسبت به دیواره‌های افقی (سقف) و دیواره‌های عمودی (دیوار) دسته‌بندی می‌شوند. بام یا سقف بخشی از پوسته ساختمان است که به طور مستقیم در معرض تغییرات آب‌وهوایی است و از طریق جذب و

نتیجه منجر به کاهش مصرف انرژی شود را طراحی نمود (Mehran et al., 2008). از آنجا که مقدار انرژی خورشیدی تابیده شده بر سطوحی که در جهات مختلف قرار دارد، متفاوت است (Kasmae, 2005)؛ زاویه سقف و نحوه قرارگیری آن بر میزان شدت تابش جذب شده از سقف تأثیر نیز دارد (Mehran et al., 2008).

**ب) رنگ پوشش خارجی:** جذب انرژی خورشیدی توسط سطوح خارجی ساختمان موجب افزایش دمای جداره نسبت به دمای محیط می‌شود که آن را دمای خورشید و محیط می‌نامند. این افزایش بستگی به رنگ و جنس دیواره، شدت تابش خورشید، اثر خنک‌کنندگی جریان هوای پیرامون ساختمان و کاهش حرارتی ناشی از تابش ساختمان به محیط خنک اطراف دارد (Tahbaz & Jaliliyan, 2005). مقدار حرارتی که در اثر تابش آفتاب در سطح یک جسم ایجاد می‌شود، به رنگ و بافت آن سطح بستگی دارد و میزان حرارت ایجاد شده در سطح با روشنی رنگ نسبت عکس دارد (Kasmae, 2005). وقتی رنگ خارجی بام تیره است، دمای سطح آن تا 32 درجه سانتیگراد بالاتر از حداکثر دمای هوای خارج، افزایش می‌یابد؛ در حالی که این افزایش برای رنگ سفید، تنها یک درجه است. در شب، در نتیجه انتقال گرمای سقف به آسمان با بازتاب اشعه با طول موج بلند دمای کلیه سطوح، به ویژه سطوح سفیدرنگ پایین‌تر از دمای خارج است (Eslami, 2004). بازتاب خورشیدی بام‌های با مصالح رنگ تیره مانند آسفالت یا ایزوگام مشکی رنگ 20٪ است، یعنی حدود 80 درصد انرژی خورشیدی را جذب می‌کند (Razmgah, 2014).

**ج) مصالح و جزئیات اجرایی:** انتخاب مصالح پایدار به عنوان آسانترین راه برای طراحان در جهت تفکر پایداری در پروژه‌های ساختمانی شناخته شده است. انتخاب مصالح ساختمانی بخشی از روند طراحی است که اغلب در فاز طراحی جزئیات قرار می‌گیرد، این مرحله تا حد زیادی با توجه به نبود معیارها و ضوابط استفاده از مصالح، به صورت تجربی و غیر علمی انجام می‌شود (Akuchian & Khalatbari, 1397). ویژگی مصالح یک ساختمان به شرایط اقلیمی محیط آن ساختمان بستگی دارد، لذا خصلت ضروری مصالح ساختمانی در

مناطق اقلیمی مختلف باید متفاوت باشد (Kasmae, 2005). مهمترین عامل در رفتار حرارتی ساختمان جرم حرارتی است که به سه ویژگی اولیه مصالح وابسته است: چگالی، ظرفیت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی، به این صورت که 1- ظرفیت حرارتی بالاتر مقدار حرارت قابل جذب در هر کیلوگرم ماده را افزایش می‌دهد. 2- مصالح با چگالی بیشتر حرارت بیشتر جذب می‌کنند. 3- ضریب هدایت حرارتی متوسط کمک می‌کند تا ظرفیت حرارتی یک ماده کارآمد شود (Madahi & abassi, 2020). در اقلیم شهر شیراز دیواره‌ها علاوه بر ظرفیت حرارتی زیاد، بایستی از مصالح و باضخامتی ساخته شود که سقف دارای ضریب انتقال حرارت 1.02 تا 1.22 باشد (Tahbaz & Jaliliyan, 2005). همچنین درصد رطوبت مصالح ساختمانی تأثیر چشم‌گیری بر رفتار حرارتی دیواره دارد (Omidvar & Rosti, 2013).

### 1-2-3- طراحی سیستم‌های غیر فعال انرژی

سیستم‌های غیر فعال در ساختمان‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که نیازهای سرمایش و گرمایش آنها به طور طبیعی و همساز با اقلیم تأمین شود (Eslami, 2004). این روش‌ها می‌تواند سبب کاهش مصرف انرژی، کاهش بار اوج و نوسان دمای هوای داخل ساختمان، افزایش آسایش حرارتی ساختمان و نیز کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای شود. نمونه‌هایی از این نوع سیستم‌های غیر فعال که در ساختمان‌ها استفاده می‌شود شامل بام سبز، استخر سقفی یا حوضچه بام، مصالح تغییر فاز دهنده (PCM)، ذخیره انرژی گرمایی (TES)، بادگیر، ساختمان‌های زمین‌پناه، مبدل حرارتی زمین-هوا (EAHE)، دیوار سبز و دیوار ترومب استند (Goudarzi & Mostafaeipour, 2017).

#### الف) بام سبز

بام سبز بامی است که با محیط کشت روینده پوشانده می‌شود. ایجاد سبزی‌نگی در فضای پشت بام بر هوای داخل ساختمان تأثیر مثبت دارد و با پیش‌گیری از تابش اشعه خورشیدی در خنک‌سازی فضا نقش دارد. این خنک‌سازی با کاهش نوسان گرمایی بر روی سطح خارجی بام و با افزایش ظرفیت گرمایی بام انجام می‌شود.





تخت به صورت سقف کاذب رواج دارد (Masnadi & Heidari, 2010). عواملی که در ویژگی‌های گرمایی بام‌های دولایه تأثیر دارد، عبارت از: مصالح و رنگ سطح خارجی لایه بیرونی، وضعیت تهویه هوای بین دو لایه، مقاومت حرارتی مصالح هر دو لایه و ضخامت هوای بین دولایه است. اگر چه افزودن عایق حرارتی در بام‌های سبک دولایه باعث بالا رفتن حداقل دمای هوای داخل می‌شود؛ اما تأثیر آن در کاهش حداکثر دما به مراتب بیشتر است. به علاوه کاهش ارتفاع سقف حجم هوای داخل ساختمان را کم می‌کند و در نتیجه خنک یا گرم کردن آن با هزینه کمتری انجام می‌شود (Eslami, 2004). پژوهش انتقال حرارت در بام‌های دوپوسته که توسط عمر و همکاران انجام شده است، کاهش 50 درصدی مصرف انرژی را در بام‌های دو پوسته به همراه تهویه و کاهش 85 درصدی مصرف انرژی را در همان بام همراه با عایق حرارتی، در مقایسه با بام معمولی نشان می‌دهد (Omar et al., 2017).

#### د) عایق

عایق در ساختمان به عنوان یک روش ساده ولی کارآمد از نظر مصرف انرژی محسوب می‌شود. عایق گرمایی، متشکل از یک ماده و یا مواد کامپوزیتی است که از مشخصه بارز آن، مقاومت گرمایی بالا و توانایی کاهش سرعت جریان گرمایی است. در نتیجه، عایق ساختمانی قادر به حفظ گرما/سرما درون خانه و مانع از شار گرمایی با محیط اطراف می‌شود (Aditya et al., 2017). نتایج مطالعه رابطه بین دما و رسانش گرمایی<sup>4</sup> مصالح مختلف عایق (فایبرگلاس، پشم چوب، پشم سنگ، پشم مواد معدنی، پلی اتیلن، پلی اورتان و پلی استایرن) نشان داد که پلی اورتان و پلی استایرن دارای کمترین میزان تغییرات در رسانایی گرمایی در حالی که پلی اتیلن و پشم چوب دارای سرعت تغییرات بیشتری بود (Kaynakli, 2012). با تعیین اندازه بهینه ضخامت عایق و همچنین محل قرارگیری آن در دیواره‌های ساختمانی برای اقلیم‌های متفاوت می‌توان بار حرارتی و برودتی ساختمان را به حداقل رساند (Mahmoody et al., 2012).

بام سبز چنانچه صحیح طراحی و اجرا شود و در آن ملاحظات اقلیمی در نظر گرفته شود، علاوه بر مزایای مختلف می‌تواند تا حد زیادی به کاهش مصرف انرژی کمک کند (Mahmoody et al., 2012). مزایای اصلی بام سبز، شامل کاهش مصرف انرژی ساختمان با افزایش ضخامت عایق بام، ایجاد سایه طبیعی در برابر اشعه مستقیم خورشید و کاهش دمای سطوح درونی و بیرونی سقف (بام) و کاهش دمای درونی ساختمان و بهینه‌سازی میزان مصرف انرژی در ساختمان است. به عنوان یک طبقه‌بندی عمومی، بام‌های سبز را می‌توان به دو نوع بام سبز متمرکز و گسترده<sup>1</sup> طبقه‌بندی نمود. بام‌های سبز گسترده، دارای لایه نازک‌تر و تراکم پوشش گیاهی کمتری (ضخامت خاک عموماً کمتر از 15 سانتی‌متر است) در مقایسه با نوع متمرکز است (ضخامت خاک عموماً بیش از 15 سانتی‌متر است) (Refahi & Talkhabi, 2015).

#### ب) حوضچه آب

استفاده از رطوبت بر بام ساختمان یکی از روش‌های خنک کردن بام است (Razmgah, 2014). چندین مدل از سیستم‌های سرمایش تبخیری غیر فعال وجود دارد که بسیاری از آنها در منابع و مطالعات در طی پنج دهه گذشته بررسی شده‌اند که از میان بسیاری از سیستم‌ها می‌توان به حوضچه‌های سقفی<sup>2</sup> با و بدون عایق متحرک، حوضچه‌های سقفی با عناصر سایه انداز، برج‌های خنک کننده جریان (مکش) طبیعی<sup>3</sup>، اشاره کرد. یکی از شناخته‌شده‌ترین سیستم‌های سرمایش تبخیری غیر مستقیم، شامل استفاده مستقیم از حوضچه‌های سقفی بر روی منطقه یا سطحی که قرار است خنک شود، است. از مزایای این روش می‌توان، وجود اطلاعات کافی، مدیریت آب باران، عدم افزایش رطوبت داخل ساختمان، عدم تبعیت از جهت ساختمان نام برد. همچنین افزایش وزن ساختمان، نگهداری نامناسب و نشت و آلودگی آب، الزام به ترکیب با سایر سیستم‌های غیر فعال، از معایب این سیستم است (Sharifi & Yamagata, 2015).

#### ج) بام دو پوسته

در این فناوری بام و سقف یکی نیست و بین آنها فاصله وجود دارد. مورد استفاده این روش در گذشته به صورت گنبد‌های دوپوسته و شیروانی‌هاست و امروزه در بام‌های

#### 1-2-4- ارزیابی انرژی ساختمان و شبیه‌ساز انرژی

نرم‌افزارهای شبیه‌ساز انرژی کارآمدترین ابزارها در زمینه ارزیابی رفتار انرژی ساختمان است. این نرم‌افزارها با ایجاد محیط مجازی ساختمان، پیش‌بینی عملکرد حرارتی و برودتی ساختمان را، تا حد ممکن نزدیک به واقعیت انجام می‌دهد و همچنین طراح می‌تواند با بهینه‌سازی و بهبود طرح خود، فن‌آوری‌های جدید صرفه‌جویی و انرژی‌کارایی را معرفی نماید (Hensen, 2002). ترکیب شبیه‌سازی انرژی ساختمان با بهینه‌سازی، یک شیوه نوظهور است که امروزه به طور خاص مورد مطالعه قرار گرفته. این روش بر اساس نتایج شبیه‌سازی و اهداف طراحی که توسط کاربر تعریف می‌شود، متکی به الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. این شیوه جدید در مقایسه با روش طراحی سنتی، که بر پایه دانش و تجربه طراحان است، کارآمدتر و قوی‌تر و منجر به افزایش احتمال یافتن راه حل طراحی بهینه شده است (Shi et al., 2016). شکل 1 روند بهینه‌سازی توسط موتور بهینه‌سازی و شبیه‌ساز انرژی را نشان می‌دهد.

#### 1-2-5- بهینه‌سازی و الگوریتم ژنتیک

بهینه‌سازی ساختمان، شیوه‌ای مؤثر برای ارزیابی گزینه‌های طراحی (مانند: دیواره ساختمان، شرایط دمای داخلی<sup>5</sup>، وسایل خانگی و لامپ‌های انرژی کارا و نوع و اندازه سیستم‌های تجدیدپذیر نصب شده) و راه‌حلی کامل برای یک هدف معین (مانند: اقتصاد، محیط زیست، انرژی یا اکسرژی) را مهیا می‌سازد، که به صورت توابع هدف (کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای، کمینه‌سازی مصرف انرژی، کمینه‌سازی هزینه سرمایه، بیشینه‌سازی کارایی مصرف انرژی و اکسرژی) با محدودیت‌های مختلف (آسایش حرارتی، قابلیت دسترسی به سطح، محدودیت‌های هزینه‌های سرمایه‌گذاری، مقررات حرارتی) مشخص می‌شوند (Harkouss et al., 2017). الگوریتم ژنتیک<sup>6</sup> یکی از روش‌های مورد استفاده در بسیاری از پروژه‌های بهینه‌سازی معماری است که به عنوان یک شیوه بهینه‌سازی، زمانی که تعداد متغیرها زیاد باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی دارای مزایایی است که باعث شده، در زمینه‌های مختلف مورد

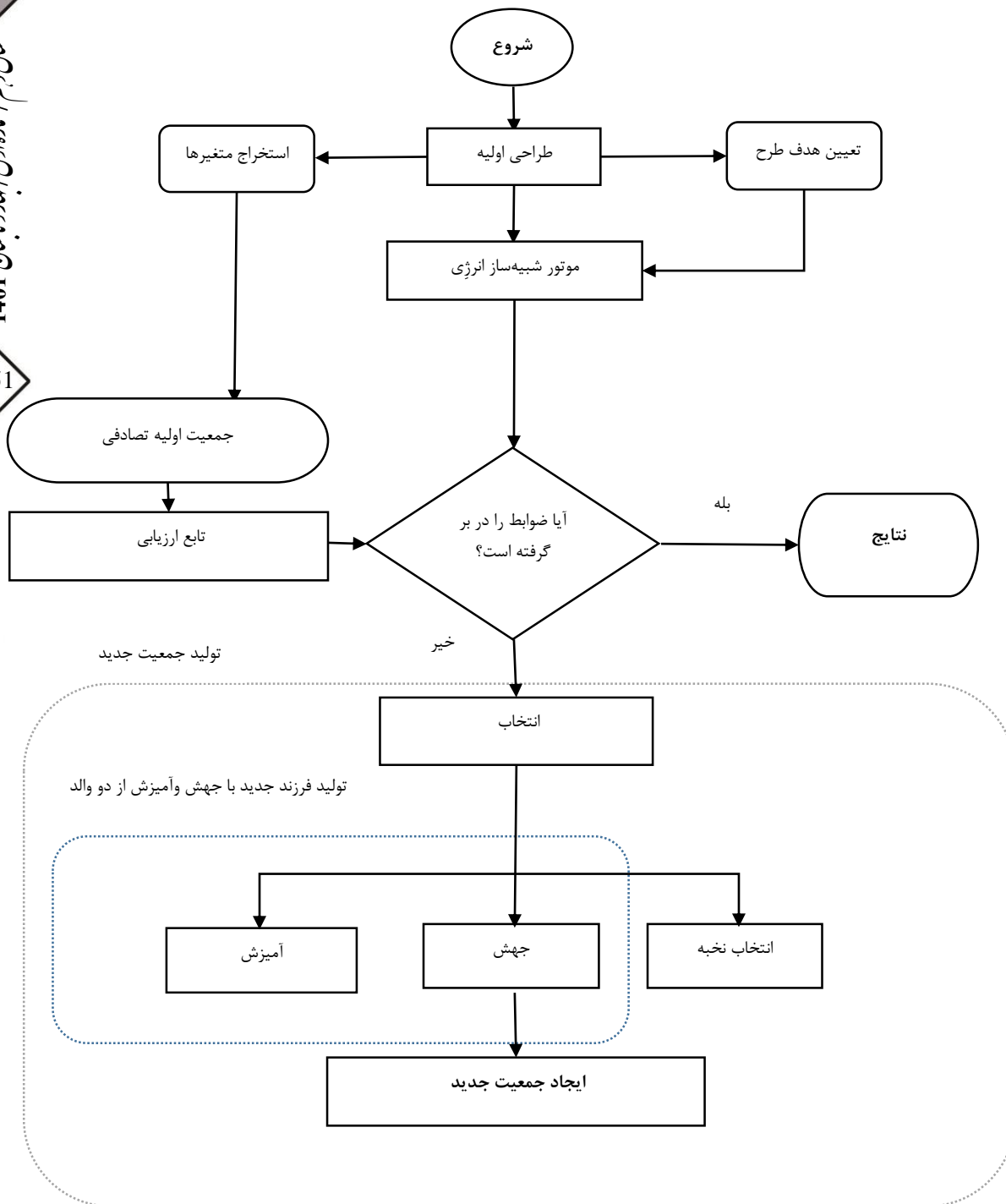
استفاده قرار گیرد. از جمله این که با مقادیر گسسته سر و کار دارد و در حقیقت محدود به مقادیر پیوسته نیست (Kheiri, 2018). الگوریتم ژنتیک از ایده تکامل طبیعی و اصل بقای اصلاح داروین<sup>7</sup> الهام گرفته است. به طور کلی، الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت است که به صورت الگوریتم بهینه‌یابی سراسری<sup>8</sup> طبقه‌بندی می‌شود که شامل عملیات جست‌وجوی راه حل بهینه سراسری و نیز عملیاتی برای بهبود راه‌حل‌های محلی است. فرایند تکراری الگوریتم ژنتیک به راه‌حل‌های بهتر بر اساس آمیزش و تلاقی والدین با عملکرد بالاتر منتهی می‌شود. کدگذاری ژنتیکی افراد موسوم به ژنوتیپ<sup>9</sup> است، اطلاعات رمزگذاری شده ویژگی‌های فرد موسوم به فنوتیپ<sup>10</sup> است. عملیات مربوط به رمزگذاری ژنتیکی والدین تولید نتایج برای نسل بعدی می‌کند. یک الگوریتم ژنتیکی پایه دارای سه عملگر اصلی است که در هر تکرار انجام می‌شود: وراثت، کراس اوور یا آمیزش، موتاسیون یا جهش<sup>11</sup>. فلوجارت کوتاه الگوریتم ژنتیک در شکل 1 نشان داده شده است (Kheiri, 2018).

#### 2- روش پژوهش

جهت دستیابی به پاسخ سؤال پژوهش از روش کمی و مدل‌سازی رایان‌های استفاده شده است. روش گردآوری اطلاعات این پژوهش، به صورت کتابخانه‌ای و محاسبات به دست آمده از نرم‌افزار شبیه‌ساز است. مطالعه جامعه آماری به روش میدانی انجام و یک ساختمان به عنوان ساختمان مرجع به شیوه غیر احتمالی هدفمند انتخاب شد. این پژوهش در راستای دستیابی به داده‌ها و آزمون فرضیه در سه مرحله انجام شد. در مرحله نخست برای محاسبات انرژی مصرفی ساختمان، مدل‌سازی در نرم‌افزار اسکچاپ<sup>12</sup> 2017 و پلاگین این استودیو<sup>13</sup> نسخه 2.9.0 انجام شد و جهت محاسبات مصرف انرژی و شاخص آسایش حرارتی، شبیه‌ساز انرژی با نرم‌افزار انرژی‌پلاس نسخه 9.0.1 انجام شد. در مرحله دوم جهت دستیابی به بهینه‌ترین حالت متغیرهای مستقل پژوهش، بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB نسخه<sup>14</sup> 2019 انجام شد. در مرحله

پلاس انجام شد. تغییرات این شاخص قبل و بعد از بهینه سازی سقف استخراج شد.

سوم جهت دستیابی به شاخص آسایش حرارتی از روش فنگر و شاخص آسایش حرارتی PMV در نرم افزار انرژی



شکل 1- فلوجارت بهینه سازی انرژی ساختمان با نرم افزار شبیه ساز انرژی و الگوریتم ژنتیک

General procedure of the building energy efficient design optimization with energy simulation and GA- 1.Fig

## 1-2- محیط پژوهش

مکان این پژوهش در شهر شیراز با مشخصات جغرافیایی 29 درجه و 32 دقیقه شمالی و 52 درجه و 36 دقیقه شرقی است (29°32'N 52°36'E) که در محدوده جنوب غربی کشور ایران واقع شده و بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی کوپن، شهر شیراز در پهنه اقلیمی بی اس کاس (BSks) قرار گرفته است (Soflaei et al., 2016). با توجه به داده‌های اقلیمی، شهر شیراز در اقلیم گرم و خشک و با ارتفاع 1484 متر از سطح دریا واقع شده است و بر اساس نمودار اقلیمی نشان داده شده در شکل 2 بیشترین میزان بارندگی در ماه ژانویه م. معادل دی‌ماه خورشیدی و کمترین میزان بارش در ماه سپتامبر م. معادل شهریور ماه خورشیدی و میانگین بارندگی سالانه 32 سانتی‌متر و بیشترین میانگین درجه حرارت در ماه جولای م. معادل تیرماه خورشیدی و حدود 30 درجه سانتی‌گراد است و کمترین درجه حرارت در ماه ژانویه م. معادل دی‌ماه خورشیدی و حدود 8 درجه سانتی‌گراد است.

جامعه آماری این پژوهش ساختمان‌های واقع در منطقه قصردشت شیراز است که به دلیل ضوابط ساخت کوتاه مرتبه، همجواری‌های مناسب منازل مسکونی و تأثیر کمتر جزایر گرمایی انتخاب شده. منطقه مورد مطالعه بلوک شهری واقع در ضلع جنوبی خیابان وکلا حد فاصل میدان معلم و میدان قصردشت است. شکل 3 بافت مسکونی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

## 2-2- مدل مرجع

یک آپارتمان کوتاه مرتبه واقع در کوچه فارابی خیابان وکلا منطقه قصرالدشت شیراز به عنوان مدل مرجع انتخاب شد. تعداد طبقات این ساختمان، دو طبقه روی همکف با کاربری مسکونی و یک طبقه زیرزمین با کاربری پارکینگ است. جهت ساختمان شمالی-جنوبی و دارای حیاط شمالی به مساحت 108 متر مربع است.

مجموع زیر بنای طبقات 801 متر مربع و مساحت سقف 104 متر مربع با احتساب خرپشته است. سازه ساختمان اسکلت فلزی و بیشترین ارتفاع آن 13 متر است. سقف ساختمان در دسته‌بندی بام تخت قرار دارد، نورگیر سقفی در سقف وجود ندارد (شکل 4). ساختار سقف تیرچه بلوک سیمانی و مصالح لایه‌های تشکیل دهنده

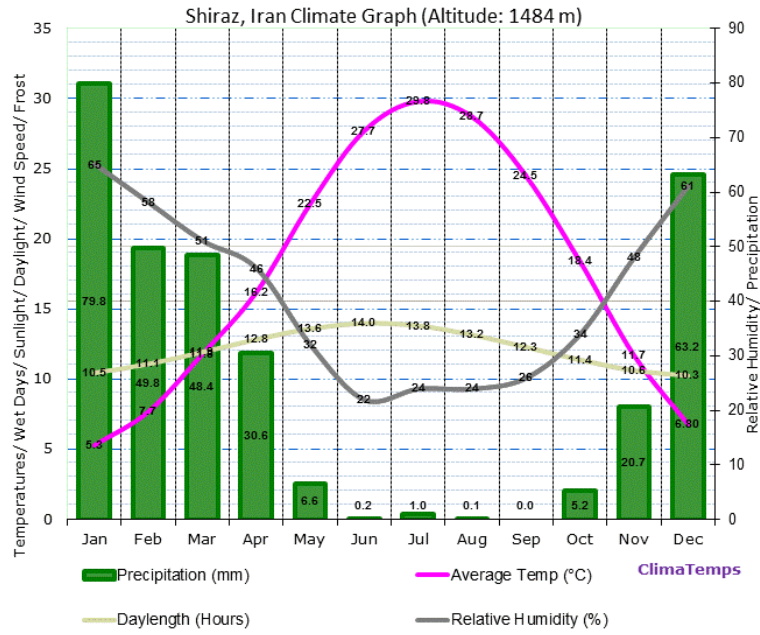
سقف مطابق جدول 5 است. مساحت بام 175 مترمربع مساحت سقف خرپشته 19 متر مربع، به ارتفاع 3.10 متر است. جان‌پناه به ارتفاع 80 سانتیمتر و طول محیطی 20 متر در محیط بام قرار گرفته است. ساختمان‌های همسایه، هم‌ارتفاع با مدل مرجع است، لذا جان‌پناه و خرپشته تنها عناصر سایه‌انداز بام است.

## 2-3- متغیرهای پژوهش

متغیرهای مستقل این پژوهش، شامل پنج گروه به شرح زیر است: گروه اول: روش‌های طراحی سیستم‌های غیر فعال انرژی شامل: بام سبز، عایق حرارتی، سقف کاذب و حوضچه بام. گروه دوم: ویژگی‌های کالبدی سقف شامل: شیب بام، رنگ پوشش خارجی بام، مصالح بام و جزئیات اجرایی بام. گروه سوم: موقعیت قرارگیری شامل: جهت-گیری، محصوریت و سایه‌اندازی. گروه چهارم: شرایط اقلیمی شهر شیراز شامل: دمای هوای خشک، دمای نقطه شبنم، فشار هوا، سرعت باد، جهت باد، متوسط دمای روزانه و میزان تابش خورشید که از سامانه‌های معتبر هواشناسی به دست آمده بود. گروه پنجم: مشخصات کالبدی بنا شامل: ارتفاع سقف زیرین، نوع کاربری و فعالیت زیرین، نوع دستگاه‌های سرمایش و گرمایش که با توجه به نقشه ساختمان و مشاهده ساختمان به دست آمده بود. متغیرهای وابسته میزان مصرف انرژی ساختمان، بار حرارتی و برودتی ساختمان و شاخص آسایش حرارتی است که با نرم‌افزار شبیه‌ساز انرژی پلاس به دست آمده است.

## 2-4- مدل سازی در شبیه ساز انرژی

از آنجا که انرژی پلاس یکی از قدرتمندترین و پرکاربردترین نرم‌افزارهای شبیه‌ساز حرارتی ساختمان است و بسیاری از متخصصین کشورهای مختلف از این نرم‌افزار برای تحلیل انرژی در ساختمان استفاده می‌کنند (Taheri, 2017). در این پژوهش از این نرم‌افزار برای محاسبات انرژی ساختمان مرجع استفاده شد. ابتدا ساختمان مرجع انتخاب شده در نرم‌افزار اسکچاپ 2017 توسط پلاگین اپن استودیو 2.9.0 مدل سازی شد (شکل 7).



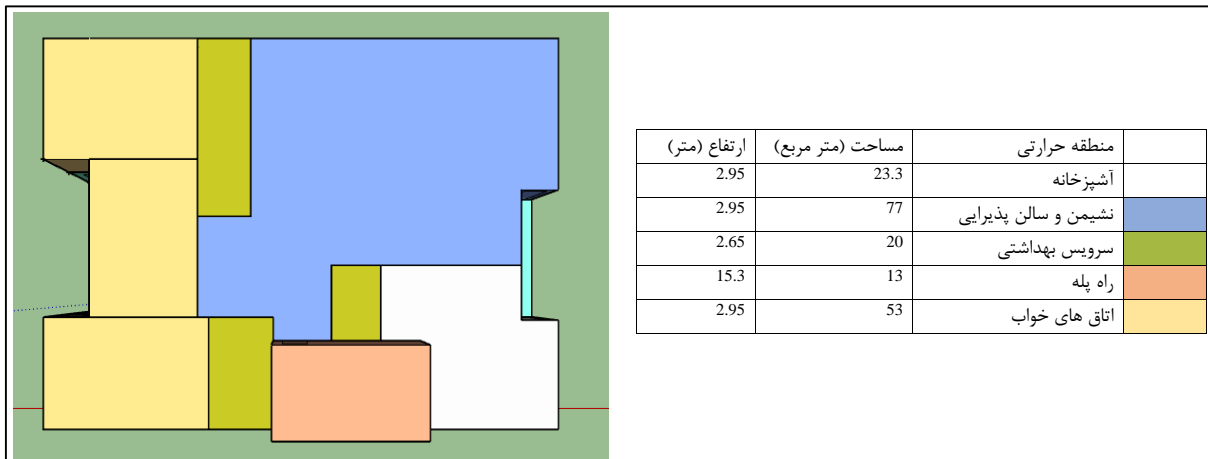
شکل 2- اطلاعات آب‌وهوایی شهر شیراز (www.climate-chart.org)

Fig.2- Shiraz Climate Data (www.climate-chart.org)



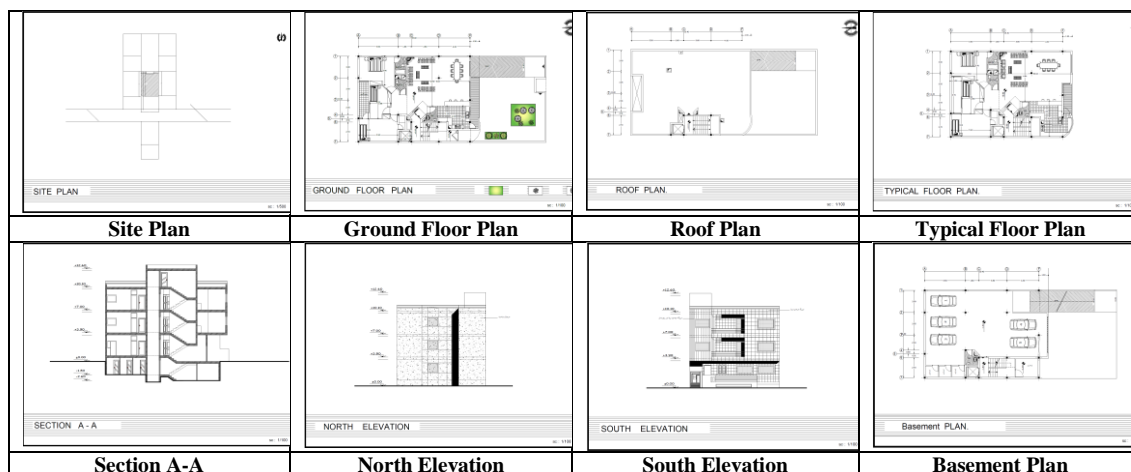
شکل 3- محدوده مورد مطالعه (Shiraz Municipality Urban Studies Office)

Fig.3- Study region (Shiraz Municipality Urban Studies Office)



شکل 5- مناطق حرارتی مدل مرجع

Fig.5- Thermal zones



شکل 4- نقشه های معماری مدل مرجع  
Fig.4-Architectural documents of reference model

جدول 5- مصالح لایه های تشکیل دهنده جدار ساختمان مرجع  
Tab. 5- Envelope material of reference model

استاندارد مرجع	چگالی Kg/ m <sup>3</sup>	ضریب هدایت حرارتی w/(m.k)	ضخامت cm	نام مصالح	نام لایه (خارج به داخل)	جدار ساختمان مرجع
مبحث 19 مقررات ملی	2500	2.8	2.5	سنگ نما گرانیت	1	دیوار خارجی
مبحث 19 مقررات ملی	1800	1	1	اندود سیمان	2	
مبحث 19 مقررات ملی	2200	0.98	10	بلوک سفالی	3	
مبحث 19 مقررات ملی	900	0.4	2	اندود گچ	4	
CIBSE	1000	0.85	2	سرامیک	1	کف
مبحث 19 مقررات ملی	1800	1	2.5	اندود سیمان	2	
مبحث 19 مقررات ملی	16600	1.15	20	بتن یا سنگدانه متداول	3	
مبحث 19 مقررات ملی	900	0.4	2.5	اندود گچ	4	
مبحث 19 مقررات ملی	2000	1.15	0.5	عایق رطوبتی (ایزوگام)	1	سقف (بام)
مبحث 19 مقررات ملی	1800	1	2.5	اندود سیمان	2	
مبحث 19 مقررات ملی	1500	1.05	5	پوکه معدنی	3	
مبحث 19 مقررات ملی	2300	2.03	20	بلوک سیمانی	4	
مبحث 19 مقررات ملی	900	0.4	2.5	اندود گچ	5	

#### 1-4-2- داده های ورودی نرم افزار

داده های مورد نیاز تحلیل انرژی در نرم افزار انرژی پلاس شامل اطلاعات کالبدی ساختمان، محدوده های حرارتی، داده های اقلیمی، برنامه زمانی بهره برداری و عملکرد تجهیزات است.

1-4-2- داده های اقلیمی: فایل های آب و هوایی مورد استفاده در نرم افزار باید با فرمت استاندارد مورد تأیید مراجع جهانی باشد. لذا فایل آب و هوایی شهر شیراز با فرمت APW<sup>15</sup> از سایت داده های آب و هوایی<sup>16</sup> انرژی پلاس

استخراج و در بخش اطلاعات اقلیمی موقعیت مکانی وارد شد.

2-1-4-2- مناطق حرارتی<sup>17</sup>: به دلیل اینکه نیازهای حرارتی هر فضا بسته به عملکرد آن متفاوت است، پنج منطقه حرارتی ساختمان با توجه به پلان و عملکرد فضاها در نرم افزار به شرح زیر تعریف شد: 1- آشپزخانه 2- راه پله 3- سرویس های بهداشتی 4- اتاق های خواب 5- نشیمن و سالن پذیرایی.

2-1-4-2- شاخص آسایش حرارتی<sup>18</sup>: جهت اندازه گیری آسایش حرارتی از شاخص PMV با تعریف توسط



ضخامت 6 mm است که در لایه میانی آن 13 mm گاز هوا وجود دارد. لازم به ذکر است میزان ضریب انتقال حرارتی<sup>22</sup> آن برابر 2.66 وات بر متر مربع درجه کلونین<sup>23</sup> است. مشخصات لایه‌های تشکیل دهنده بدنه دیوار خارجی به ترتیب از خارج به داخل، سنگ نما، اندود سیمان، سفال و اندود گچ است. لایه‌های تشکیل دهنده سقف مدل مرجع به ترتیب از خارج به داخل، عایق رطوبتی، اندود سیمان، پوکه، بلوک بتنی و اندود گچ است. در این حالت ضریب انتقال حرارت<sup>24</sup> سقف 2.17 وات بر متر مربع درجه کلونین<sup>25</sup> با نرم‌افزار انرژی پلاس محاسبه شد. لایه‌های تشکیل دهنده کف مدل مرجع به ترتیب از درون به بیرون: سرامیک، اندود سیمان، بتن و اندود گچ است. در این حالت ضریب انتقال حرارت<sup>26</sup> کف 1.7 وات بر متر مربع درجه کلونین<sup>27</sup> با نرم‌افزار انرژی پلاس محاسبه شد.

**2-4-1-5-برنامه زمانی بهره‌برداری:** برنامه زمان‌بندی حضور افراد مطابق با ساعات حضور ساکنین مطابق جدول 6 در نرم‌افزار وارد شد. دمای محدوده آسایش مطابق نمودار سایکومترئ شیراز (شکل 6) 21-24 درجه سانتی‌گراد است. دمای تنظیم گرمایش و سرمایش مطابق با استاندارد مبحث 19 مقررات ملی به ترتیب 20 و 28 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. نرخ تهویه مطابق با مبحث 14 مقررات ملی عدد 1 تعیین شد و میزان متوسط توان تجهیزات خانگی در 24 ساعت روزانه به طور متوسط 4 وات بر متر مربع بر اساس مبحث 19 مقررات ملی در نظر گرفته شد.

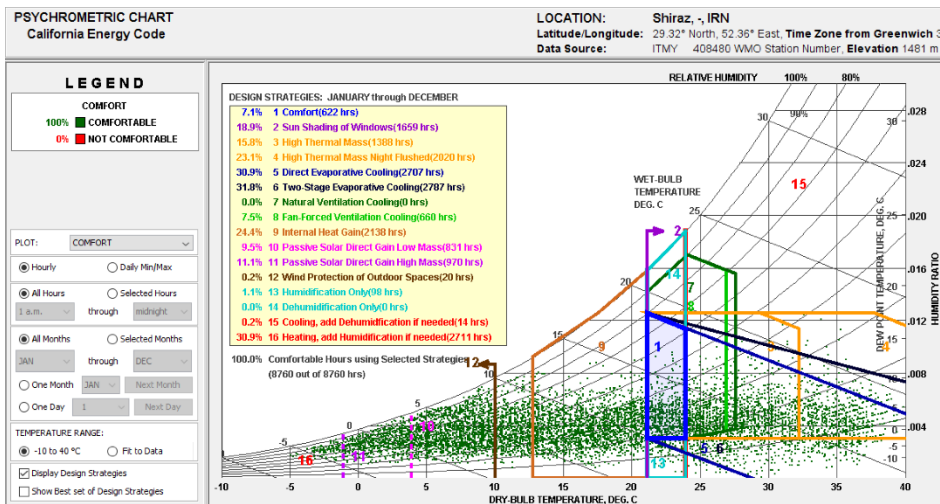
فنگر<sup>19</sup> استفاده شد. جهت محاسبه این شاخص، نرخ سوخت‌وساز و لباس افراد بر اساس عملکردهای هر منطقه حرارتی مشخص و تعریف شد. عوامل محیطی و آب‌وهوایی مؤثر بر این شاخص در هر مرحله زمانی به طور خودکار با نرم‌افزار انرژی پلاس محاسبه می‌شود. نرخ لباس در ماه‌های فصل زمستان 1 clo و ماه‌های فصل تابستان 0.5 clo تعیین و میانگین شاخص آسایش حرارتی (PMV) در گرمترین ماه و سردترین ماه سال به ترتیب در دی‌ماه و تیرماه سنجیده شد. عدد شاخص آسایش حرارتی مطابق استاندارد اشری<sup>20</sup> بین +1 و -1 در محدوده کمی گرم و کمی سرد در نرم‌افزار تعریف شده که برای انسان قابل تحمل و انسان در آسایش حرارتی، تعریف می‌شود. هر چه عدد این شاخص به صفر نزدیکتر باشد، انسان در تعادل حرارتی بهتری قرار می‌گیرد.

**2-4-1-4-ساختار دیواره:** هندسه مدل که شامل تمامی سطوح مناطق حرارتی و سطوح سایه‌اندازهاست، در مدل مرجع تعریف شده. این سطوح شامل دو بخش سطوح شفاف و غیر شفاف است که سطوح غیر شفاف شامل کف، سقف و دیوارها و سطوح شفاف شامل در و پنجره‌هاست. عناصر ساختار دیواره‌های<sup>21</sup> مدل مرجع متشکل از لایه‌های مصالح بر اساس وضع موجود بنا و نقشه‌های معماری و اجرایی ساختمان در نرم‌افزار انرژی پلاس تعریف و ویژگی‌های چگالی و هدایت حرارتی مصالح از مبحث 19 مقررات ملی ساختمان استخراج و در جدول 5 نشان داده شده است. همه پنجره‌های مدل مرجع از نوع دو دیواره شفاف به

جدول 6- برنامه زمان‌بندی بهره‌برداری از فضا

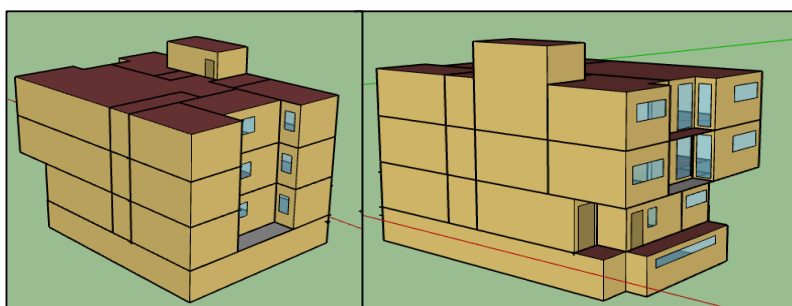
Tab.6- Occupancy Schedule

تعداد ساکنین هر واحد	5	تعداد منطقه حرارتی
5 نفر	آشپزی، خواب، استراحت، نشستن	نوع فعالیت
21 تا 24 درجه سانتی‌گراد	0.25	حساسیت وزش باد
1	ضریب درزهای ساختمان (نرخ تهویه)	زمان آماده به کار
ندارد	تمام ماه‌های سال	ساعت کار (شنبه تا چهارشنبه)
مطابق جدول مصالح لایه-های دیوار ساختمان	3 بعدازظهر تا 12 شب 12 شب تا 8 صبح 8 صبح تا 12 شب	(پنج شنبه و جمعه)
درجه سانتی‌گراد (در دمای پایین تر از 20 درجه سیستم گرمایش و در دمای بالاتر از 28 درجه سیستم سرمایش به کار گرفته می‌شود).	Set point	دمای تنظیم سرمایش و گرمایش



شکل 6- نمودار سایکومتري شهر شیراز (Climate consultant software, v.5.3)

Fig.6- Shiraz Psychrometric chart (Climate consultant software, v.5.3)



شکل 7- مدل سازی ساختمان مرجع (راست: نمای جنوبی، چپ: نمای شمالی)

Fig.7- Baseline model (Right: south view, Left north view)

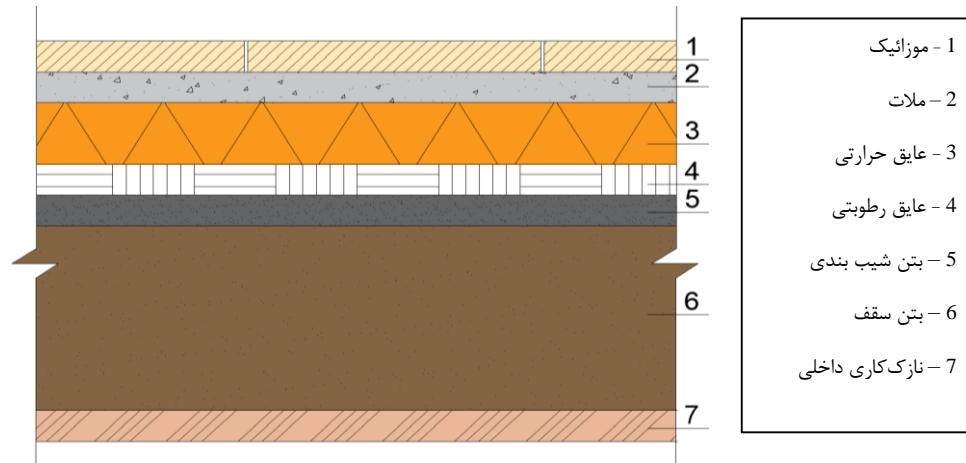
ژن را با ویژگی خاص دارد که در ترکیب با سایر متغیرها، افراد جامعه را تشکیل می‌دهند.

1- فرایند انتخاب: متغیرهای این پژوهش بر اساس ویژگی‌های فردی (جدول 7) موسوم به جمعیت<sup>32</sup> در الگوریتم ژنتیک تعریف می‌شود. این جمعیت‌ها به ترتیب صعودی بر اساس مقدار برازش یا تناسب (پس از ارزیابی تابع هدف برای هر فرد از جمعیت) رتبه‌بندی شده و احتمالات برای انتخاب بر اساس رتبه هر فرد تعیین می‌شود. بدین ترتیب در هر گروه از متغیرهای جدول 7 بهترین حالت ژن انتخاب می‌شود به گونه‌ای که تابع هدف الگوریتم که میزان مصرف انرژی ساختمان محاسبه شده در نرم‌افزار شبیه‌ساز است، کمینه باشد. این رویکرد موسوم به وزن‌دهی رتبه‌ای است. چرخ رولت مجازی برای تعیین اعضا در جمعیت جدید منتخب برای تولید مثل چرخیده می‌شود (با تولید یک عدد تصادفی بین 0 و 1).

## 2-5- بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

برای دستیابی به مدل بهینه در راستای به کمینه رساندن مصرف انرژی ساختمان از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک<sup>28</sup> و نرم‌افزار MATLAB نسخه 2019<sup>29</sup> استفاده شد. این الگوریتم با واسطه برنامه جی‌ای‌پلاس<sup>30</sup> به ابزار شبیه‌ساز انرژی‌پلاس وصل شده به گونه‌ای که تابع هدف آن داده‌های خروجی نرم‌افزار شبیه‌ساز است. جمعیت تعریف شده در این الگوریتم سه گروه از متغیرهای مستقل مطابق جدول 7 است، که برای تولید جمعیت جدید برای نسل بعدی از سه عملگر: انتخاب، آمیزش و جهش<sup>31</sup> استفاده می‌کند. فلوجارت الگوریتم ژنتیک در شکل 1 نشان داده شده است. شکل 8 ساختار سقف مسطح را در 7 لایه نشان می‌دهد. مصالح هر لایه از مبحث 19 مقررات ملی استخراج به دست آمده است. همان‌گونه که گفته شد، هر کدام از این مصالح در الگوریتم ژنتیک نقش یک





شکل 8- جزئیات اجرایی بام مسطح (Guidelines OF Topic 19,2017)

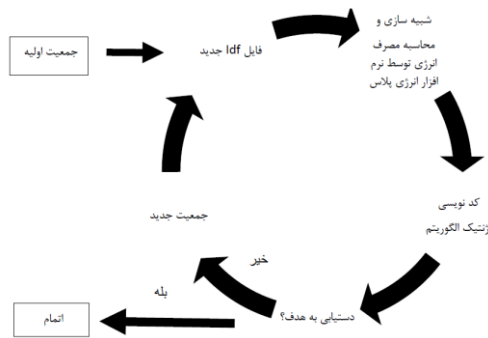
Fig.8- Flat roof executive detail (Guidelines OF Topic 19,2017)

جدول 7- گروه بندی متغیرها موسوم به جمعیت جهت بهینه سازی در الگوریتم ژنتیک

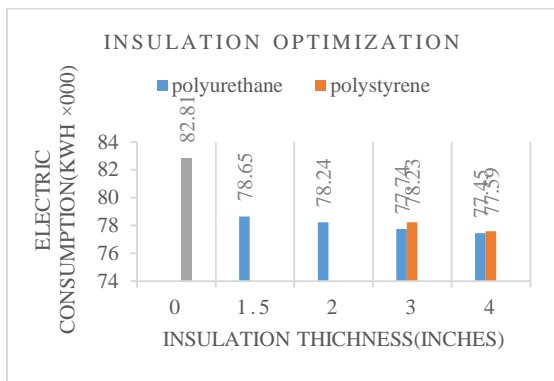
Tab. 7- Variable category called population in GA optimization

گروه اول		
توضیحات	ویژگی کالبدی	سیستم های غیر فعال انرژی
	درصد پوشش از 0 تا 100 درصد	بام سبز
مصالح مطابق پیوست 7 مبحث 19 مقررات ملی ساختمان	نوع مصالح عایق	عایق حرارتی
ضخامت از 0 تا 10 سانتی متر	ضخامت عایق	
ارتفاع هوا از 0 تا 50 سانتی متر	فاصله سقف کاذب	سقف کاذب
با توجه به خشک سالی در شیراز حذف شد.	درصد اشغال از 0 تا 100 درصد	حوضچه بام
گروه دوم		
توضیحات	ویژگی کالبدی	ویژگی های کالبدی سقف
شیب دوسویه / شیب یک سویه	بیش از ده درجه کمتر از 60 درجه نسبت به افق	شیب بام
	رنگ روشن / رنگ تیره	رنگ پوشش خارجی
	طبق با پیوست 7 مبحث 19 مقررات ملی ساختمان	مصالح
	وضع موجود (تیرچه بلوک بتنی) / سایر جزئیات اجرایی متداول	جزئیات اجرایی بام
گروه سوم		
توضیحات	ویژگی کالبدی	موقعیت قرارگیری
به عنوان مثال: شمال - جنوب شرق - غرب		
شمال شرق - جنوب غرب (22 درجه از شمال) شمال شرق - جنوب غرب (45 درجه از شمال) شمال شرق - جنوب غرب (67 درجه از شمال) شمال غرب - جنوب شرق (22 درجه از شمال) شمال غرب - جنوب شرق (45 درجه از شمال) شمال غرب - جنوب شرق (67 درجه از شمال)	چرخش 360 درجه از شمال جغرافیایی در جهت عقربه های ساعت	جهت گیری
	ساختمان های کوتاه مرتبه تا 3 طبقه ارتفاع باغ و درختان ساختمان های بلند مرتبه تا 8 طبقه روی همکف	محصولیت
	درصد پوشش سایه از 0 درصد تا 100 درصد	بام در سایه (سایه-اندازی)

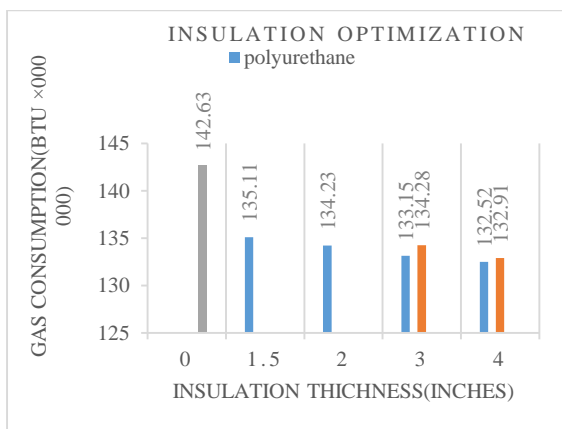
است. عایق پلی اورتان به ضخامت 4 اینچ (10.16 سانتی متر) با کاهش  $5.36 \times 10^3$  کیلو وات ساعت انرژی الکتریکی و  $10.11 \times 10^6$  بی تی یو انرژی گاز نسبت به مدل مرجع، بهینه ترین است. در این حالت شاخص آسایش حرارتی در تیرماه +1 و دی ماه -0.8 است.



شکل 9- دیاگرام عملکرد الگوریتم ژنتیک  
Fig.9- GA diagram



شکل 10- مصرف انرژی الکتریکی با عایق بهینه ساختمان  
Fig.10- Electric consumption of optimized building insulation



شکل 11- مصرف انرژی گازی با عایق بهینه ساختمان  
Fig.11- Gas consumption of optimized building insulation

2- فرایند آمیزش: وقتی که جمعیت برای تولید مثل انتخاب شد، افراد جفت شده و با استفاده از روش کراس-آور<sup>33</sup>، آمیزش می یابند. یک نقطه آمیزش به طور تصادفی برای هر جفت انتخاب می شود و دو فرد جدید با ترکیب اولین بخش از نخستین رشته با دومین بخش از دومین رشته و وارونه ایجاد می شود.

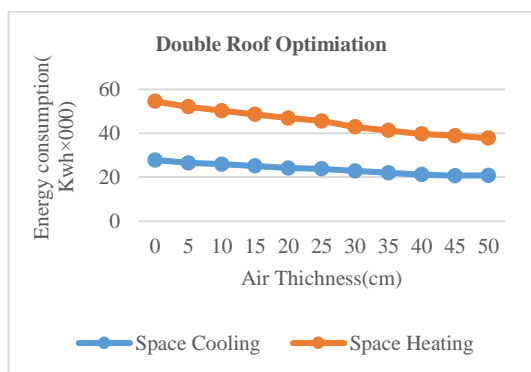
3- فرایند جهش: این فرایند آخرین گام در تشکیل جمعیت برای نسل بعدی است و شامل وارونه سازی بیت<sup>34</sup> در جمعیت از 0 تا 1 یا وارونه است. جهش مانع از همگرایی زود هنگام ژنتیک الگوریتم شد و سبب اطمینان از جستجوی سراسری می شود. نرخ یا سرعت جهش در شروع الگوریتم تنظیم می شود. در نهایت، این جمعیت جهش یافته به جمعیت نسل بعدی تبدیل و فرایند تا زمان رسیدن به همگرایی تکرار می شود.

### 3- نتایج و بحث

دیاگرام شکل 9 مراحل انجام بهینه سازی با کدهای الگوریتم ژنتیک نوشته شده در برنامه MATLAB را نشان می دهد. همان گونه که گفته شد، این روند با انتخاب جمعیت اولیه آغاز و تا زمان دستیابی به اندازه بهینه تابع هدف ادامه خواهد داشت و در هر گروه، جمعیت تعریف شده اندازه بهینه آن با توجه به میزان مصرف انرژی نسبت به مدل مرجع نشان داده می شود. برای مدل های بهینه شاخص آسایش حرارتی در نرم افزار انرژی پلاس محاسبه شد. نتایج مستخرج از نرم افزار انرژی پلاس میزان مصرف کل انرژی برق ساختمان مرجع را 82810 کیلو وات ساعت<sup>35</sup> و میزان مصرف کل انرژی گاز ساختمان مرجع را 142630000 بی تی یو<sup>36</sup> نشان می دهد. میانگین شاخص حرارتی (PMV) ساختمان مرجع در تیرماه (گرمترین ماه سال) معادل +1.1 و در دی ماه (سردترین ماه سال) معادل -0.98 بود. در زمستان در محدوده آسایش حرارتی نزدیک به کمی سرد قرار گرفته، اما در تابستان خارج از محدوده آسایش حرارتی است.

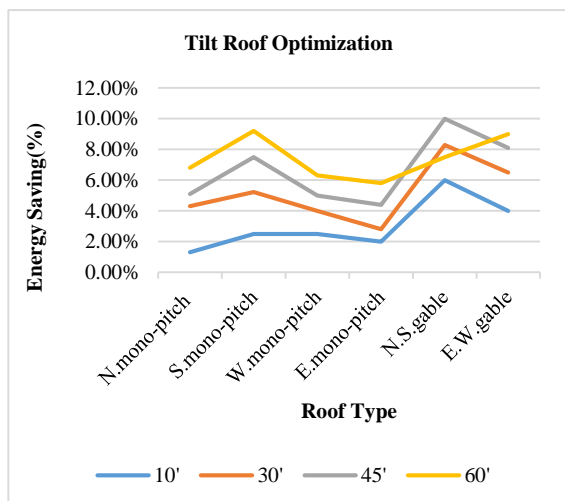
نمودارهای شکل 10 و شکل 11 نشان می دهد که عایق پلی اورتان با ضخامت های 1.5 و 2 و 3 و 4 اینچ بهترین عملکرد را نسبت به سایر عایق های مطالعه شده داشته

حالت میانگین شاخص آسایش حرارتی کاهش یافته و به ترتیب در دی ماه 0.9- و در تیرماه 0.8+ بوده است.



شکل 13- مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی با استفاده از سقف کاذب

Fig.13- Heating and cooling energy consumption of double roof



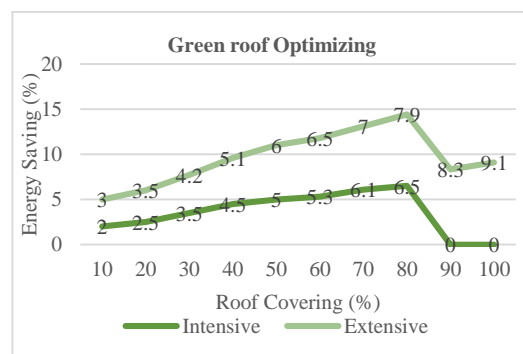
W. mono-pitch	بام شیبدار یک طرفه غربی	N. mono-pitch	بام شیبدار یک طرفه شمالی
E. mono-pitch	بام شیبدار یک طرفه شرقی	S. mono-pitch	بام شیبدار یک طرفه جنوبی
E.W. gable	بام شیبدار دو طرفه شرقی - غربی	N.S. gable	بام شیبدار دو طرفه شمالی - جنوبی

شکل 14- صرفه جویی در مصرف انرژی در بام شیبدار بهینه

Fig.14- Energy saving of optimized tilt roof

جهت ایجاد سایه بر بام ساختمان و بررسی میزان تأثیر آن بر مصرف انرژی ساختمان پوشش افقی مانند سقف آلاچیق روی بام در نظر گرفته شد، به گونه‌ای که درصدی از بام از ساعت 11 صبح تا 4 بعد از ظهر در سایه باشد، همچنین در بام تخت ارتفاع جان پناه افزایش داده شد. نمودار شکل 15 نشان می‌دهد که هر چه درصد بیشتری از بام در سایه قرار می‌گیرد انرژی سرمایشی کاهش، اما

جهت استفاده از روش غیر فعال بام سبز، میزان پوشش سقف با بام سبز گسترده از ده تا صد درصد با گام گسسته 10 تعریف شد. با توجه به پژوهش‌های انجام شده (Refahi & Talkhabi, 2015)، بام سبز گسترده با ضخامت بهینه (خاک) 10 سانتی‌متر جهت شبیه‌ساز انرژی تعریف شد. پوشش صددرصدی بام توسط بام سبز گسترده با کاهش 9.1 درصد مصرف انرژی بهینه‌ترین حالت است. در این حالت میانگین شاخص آسایش حرارتی در تیرماه و دی ماه به ترتیب با کاهش 0.2، 0.3، عدد 0.7+ در تیرماه و 0.6- در دی ماه را نشان می‌دهد. دیاگرام شکل 12 نشان می‌دهد که هر چه پوشش بام سبز بیشتر باشد، میزان کاهش مصرف انرژی بیشتر است.



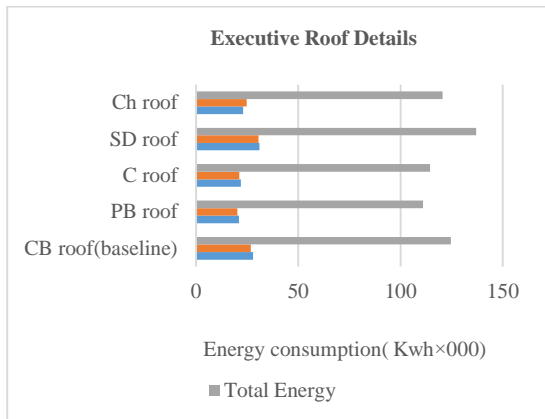
شکل 12- میزان صرفه جویی انرژی در استفاده از بام سبز

Fig.12- Energy saving of green roof design

شکل 13 کاهش مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی را با افزایش ضخامت لایه هوا نشان می‌دهد. ایجاد لایه هوا میان بام ساختمان و سقف کاذب مقاومت حرارتی دیواره را افزایش می‌دهد و میزان انتقال حرارت از دیواره کاهش می‌یابد. ضخامت عایق هوا به عنوان کد متغیر گسسته با گام 5 سانتی‌متر تعریف و میزان تأثیر بر تابع هدف (مصرف انرژی) محاسبه شد. میانگین شاخص آسایش حرارتی در حالتی که ضخامت هوای بام و سقف کاذب 50 سانتی‌متر است، در تیرماه 0.8+ و در دی ماه 0.9- محاسبه شده است.

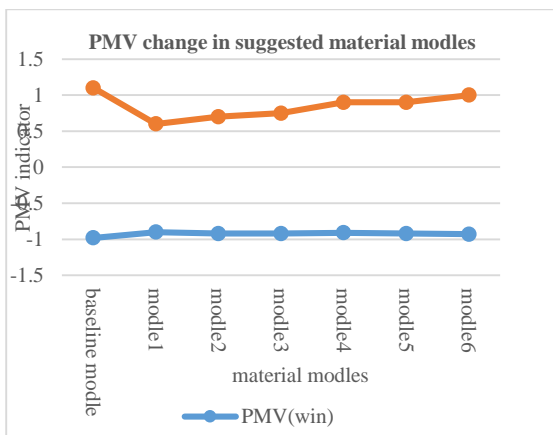
شکل 14 مصرف انرژی در سقف‌های شیب‌دار دو سویه و یک سویه با زاویه از 10 درجه تا 60 درجه نسبت به افق را نشان می‌دهد. بیشترین درصد کاهش انرژی مصرفی مربوط به سقف شیب‌دار دو سویه با زاویه 45 درجه و کشیدگی شمالی جنوبی با عدد 10 درصد است. در این

نهایی سقف از داخل پانل چوب پنبه است که کاهش 9.6 درصد مصرف انرژی را نسبت به مدل مرجع نشان می‌دهد.



شکل 16- میزان مصرف انرژی در جزئیات اجرایی سقف  
Fig.16- Energy consumption of executive roof details

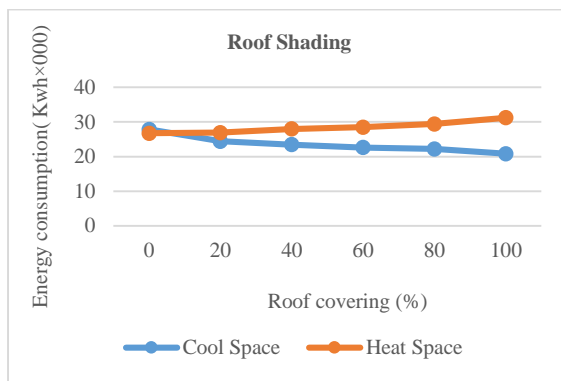
تغییرات شاخص آسایش حرارتی در بهینه سازی مصالح در شکل 17 نشان داده شده است.



شکل 17- شاخص آسایش حرارتی با استفاده از مدل‌های پیشنهادی مصالح  
Fig.17- PMV indicator in suggested material models

میانگین شاخص حرارتی در مدل یک در گرمترین ماه تابستان با بهبود 0.5 رقم +0.6 را نشان می‌دهد این رقم در مدل شش +0.1 بهبود نسبت به شاخص حرارتی مدل یک را نشان می‌دهد. میانگین شاخص آسایش حرارتی در زمستان با مدل مصالح یک 0.8 بهبود را نسبت به مدل مرجع نشان می‌دهد. از آنجا که هر چه عدد شاخص

انرژی گرمایشی افزایش می‌یابد. بنابراین بهینه این است که مساحت حداکثر بام در تابستان در سایه و در زمستان مساحت کمتری در سایه قرار گیرد. طراحی سایبان متحرک و به عنوان مثال در بام سبز متمرکز، استفاده از گیاهان خزان پذیر پیشنهاد می‌شود.

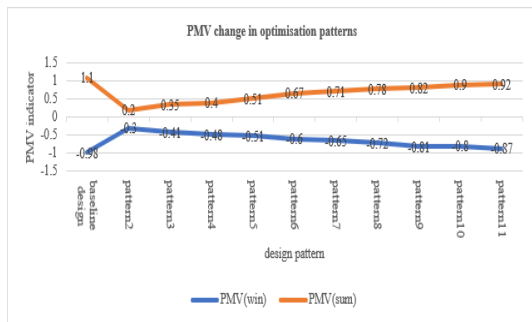


شکل 15- مصرف انرژی بام در سایه  
Fig.15- Energy consumption of roof shading

شکل 16 مصرف انرژی ساختمان با پنج تیپ جزئیات اجرایی سقف را نشان می‌دهد. مدل مرجع تیرچه بلوک با بلوک سفالی (CB roof)<sup>37</sup> و تیرچه بلوک با بلوک پلی استایرن (PB roof)<sup>38</sup>، سقف کامپوزیت (C roof)<sup>39</sup>، سقف تیرچه فولادی (کرومیت) (Ch. roof)<sup>40</sup> و سقف عرشه فولادی (SD roof)<sup>41</sup> است. کمترین میزان مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی نسبت به مدل مرجع را به ترتیب سقف‌های تیرچه بلوک با بلوک پلی استایرن و سقف کامپوزیت دارند. شاخص آسایش حرارتی در بهترین حالت، سقف تیرچه بلوک با بلوک پلی استایرن، در زمستان و تابستان به میزان 0.1 بهبود یافته است. مصرف انرژی در سقف با جزئیات اجرایی عرشه فولادی بیشتر از مدل مرجع است.

جدول 8 مدل‌های بهینه آرایش مصالح در لایه‌های مختلف سقف که توسط الگوریتم ژنتیک انجام شده است را نشان می‌دهد. در این جدول شش مدل بهینه آرایش مصالح نشان داده شده به گونه‌ای که بیشترین کاهش مصرف انرژی را نسبت به مصرف انرژی ساختمان مرجع دارند. بهینه‌ترین آرایش مصالح سقف از خارج به داخل: کاشی سفالی، اندود سیمان، عایق پلی اورتان به ضخامت 10 سانتی‌متر، قیر اصلاح شده، بتن متخلخل و پوشش

عملکرد را در تعادل حرارتی ساکنین نشان می‌دهد.



شکل 18- شاخص آسایش حرارتی در الگوهای پیشنهادی ده گانه

Fig.18 - Optimization patterns PMV

این الگو علاوه بر کاهش مصرف انرژی کل ساختمان، شاخص آسایش حرارتی را به عدد صفر نزدیکتر کرده، که نشان دهنده آسایش حرارتی بهتر ساکنین است. مطابق نمودار شکل 18 الگوهای 3 تا 11 نیز میانگین شاخص آسایش حرارتی در زمستان و تابستان را کاهش دهد، اما مناسب‌ترین شرایط آسایش حرارتی را الگوی 2 تأمین می‌کند که بهینه‌ترین الگو است و آسایش حرارتی بهتری را در تابستان نسبت به زمستان تأمین می‌کند. پارامترهای بهینه ساختمان در جدول 9 نشان می‌دهد که در الگوهای ده گانه: عایق حرارتی با ضخامت 10 سانتی‌متر، سقف کاذب با حداقل ضخامت لایه هوا 10 سانتی‌متر و آرایش مصالح مدل 1 تا 3 پیشنهاد شده است که باعث می‌شود دیواره سقف به عنوان عایق حرارت عمل نماید و مانع انتقال حرارت از یک سمت به سمت دیگر سقف شود. رنگ روشن پوشش خارجی الگوها جذب حرارتی ناشی از تابش خورشید را کاهش می‌دهد. پیشنهاد حداقل 30 درصد از بام در سایه در ساعات 11 صبح تا 4 بعد از ظهر که تابش خورشید بیشترین است، ایجاد سقف شیب‌دار در الگو 2، 3، 6، 8 و همچنین پوشش بام سبز در الگوهای 4، 7، 3، 2 باعث کاهش جذب تابش خورشید در فصول بحرانی، با توجه به شدت تابش خورشید در اقلیم شیراز، می‌شود. تغییر شکل بام از افقی به شیب‌دار در الگوی 2 با زاویه شیب دو طرفه 30 درجه شدت تابش خورشید را با توجه به زاویه برخورد اشعه

حرارتی به صفر نزدیکتر باشد، انسان تعادل حرارتی مناسبتری در محیط دارد، برخلاف تفاوت در عدد میزان کاهش شاخص آسایش حرارتی، استفاده از مدل یک در تابستان آسایش حرارتی بهتری را فراهم می‌سازد. در مجموع مدل مصالح یک در هر دو فصل زمستان و تابستان شاخص آسایش حرارتی را بهبود بخشیده است. جدول 9 ده مدل پیشنهادی بهینه‌سازی شده سقف ساختمان مرجع که با الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی انرژی استخراج شده است را نشان می‌دهد. بهینه‌ترین پیشنهاد برای طراحی سقف ساختمان سه طبقه در منطقه قصردشت شیراز کاهش 51 درصد مصرف کل انرژی را نشان می‌دهد. این مدل که در ردیف 2 جدول است، پیشنهاد بام شیب‌دار دو سویه با زاویه 30 درجه و پوشش صد درصد بام سبز گسترده در حالی که سی درصد بام در ساعت 11 صبح تا 4 بعد از ظهر در سایه باشد را می‌دهد، که این سایه‌اندازی با توجه به شیب بام و جهت کشیدگی شمالی جنوبی بام و طراحی لبه‌های بام تأمین می‌شود. آرایش مصالح مدل 1 مطابق جدول 6 و عایق پلی اورتان به ضخامت 10 سانتی‌متر و سقف کاذب با حداکثر ضخامت لایه هوای 10 سانتی‌متر است. نتایج نشان می‌دهد که محصوریت بنا با فضای سبز و درختان تأثیر بیشتری در کاهش مصرف انرژی دارد. سپس محصوریت با بناهای کوتاه مرتبه پیشنهاد می‌شود و احداث بناهای بلند مرتبه پیشنهاد نمی‌شود. ده مدل بهینه‌سازی سقف که در جدول 9 آورده شده است، مصرف انرژی ساختمان مرجع را از 51 درصد تا 39 درصد کاهش می‌دهد. آخرین مدل پیشنهادی بام مسطح با جهت کشیدگی شمال شرقی-جنوب غربی است که 39.32 درصد مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. رنگ پوشش خارجی بام روشن، محصوریت بنا در فضای سبز و درختان، مدل 2 آرایش مصالح با عایق پلی استایرن به ضخامت 10 سانتی‌متر و سقف کاذب به ضخامت 10 سانتی‌متر لایه هوا پیشنهاد شده است. شکل 18 نمودار تغییرات میانگین شاخص حرارتی را با مدل‌های پیشنهادی جدول 9 نشان می‌دهد. الگوی 2 با کاهش میانگین شاخص حرارتی در تابستان به میزان 0.9 و در زمستان به میزان 0.68 نسبت به مدل مرجع، بهترین

تابشی کاهش می‌دهد و میزان انرژی خورشیدی کمتری را دریافت می‌کند و با پوشش صد درصدی بام سبز در این الگو در کنار سایر عوامل ذکر شده، بیشترین کاهش مصرف انرژی سالانه را نسبت به مدل مرجع داشته است. چنانچه الگوهای 8، 6، 3 با سقف شیبدار 45 و 40 درجه جنوبی و دوسویه تابش بیشتری را از جهت جنوب و با توجه به زاویه بیشتر بام دریافت می‌کند. پارامتر محصوریت ساختمان با فضای سبز و ساختمان کوتاه مرتبه پیشنهادی در الگوها نیز تابش بازتاب شده از بناهای پیرامون و محیط را به کمترین حد می‌رساند و نه تنها جذب تابش مستقیم را کاهش می‌دهد که جذب تابش انعکاسی را نیز کم می‌کند. جهت پیشنهادی (کشیدگی بنا) الگوها، شمالی-جنوبی یا شمال غربی- جنوب شرقی است. البته با توجه به اینکه پارامترهای دیوارهای ساختمان مرجع ثابت فرض شده است و در این بخش با تغییر جهت ساختمان بهره‌مندی دیوارهای ساختمان از تابش خورشید نیز تغییر می‌کند نمی‌توان این پارامتر را صرف تأثیر طراحی سقف لحاظ نمود. اما در الگوهای دارای بام شیب‌دار زاویه بام و سطح بام به

سمت شمال و جنوب در جذب و بازتاب تابش مستقیم خورشید تأثیر دارد. بر این اساس استنباط می‌شود که الگوهای پیشنهادی با ارایه پارامترهای طراحی در جهت کاهش جذب تابش خورشید و طراحی دیواره سقف به مثابه دیواره عایق مصرف سالانه انرژی ساختمان را کاهش داده است. همچنین استفاده از روش بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک توانسته است به طراحی مطلوب‌تر و کارآمدتری به لحاظ کارایی انرژی نسبت به طراحی موجود ساختمان منجر شود. به عنوان یک نتیجه کلی، پارامترهای طراحی معماری و همچنین شرایط اقلیمی در طراحی مهم هستند و تأثیر قابل توجهی در بهره‌وری انرژی ساختمان دارند، به گونه‌ای که با انتخاب پارامترهای مناسب معماری ساختمان با توجه به آب‌وهوا، می‌توان مصرف انرژی را بسیار کاهش داد. این روش بهینه‌سازی تمام پارامترهای طراحی معرفی شده را در یک مجموعه به کار گرفته و مناسب‌ترین حالت را به عنوان الگوی بهینه پیشنهاد کرده است که این الگو علاوه بر تأمین شرایط آسایش حرارتی، میزان مصرف انرژی سالانه ساختمان را به کمترین حد می‌رساند.

جدول 8- مدل‌های بهینه آرایش مصالح سقف  
Tab.8- Roof materials' optimization

کل مصرف انرژی (Kwh × 000)	گرمایش قضا (Kwh × 000)	سرمایش قضا (Kwh × 000)	لایه (از خارج به داخل)						
			7	5,6	4	3	2	1	
124.61	26.75	27.82	اندود گچ	یلوک بتنی	پوکه معدنی	-----	اندود سیمان	ایزوگام	مدل مرجع
	41.80	82.81							
112.62	21.75	20.83	پانل چوب	یتن متخلخل	قیر اصلاح شده	عایق پلی‌اورتان (10 سانتی‌متر)	اندود سیمان	کاشی سفال (چ 1000)	مدل 1
	36.80	75.82	پنبه						
114.2	21.22	22.61	گچ یا الیاف معدنی	یتن انوکلاو	قیر اصلاح شده	عایق پلی‌استایرن (10 سانتی‌متر)	اندود سیمان	یلوک رسی (متراکم-خشت)	مدل 2
	36.60	77.6							
115.52	22.21	22.27	پانل الیاف چوب	یتن سیک	قیر اصلاح شده	عایق پلی‌اورتان (7 سانتی‌متر)	اندود سیمان	صفحه سیمانی / سلولزی	مدل 3
	37.26	78.26							
115.89	22.39	23.46	گچ اندود یا یزلیت	یتن سیک	قیر اصلاح شده	عایق پلی‌اورتان (7 سانتی‌متر)	اندود سیمان	کاشی	مدل 4
	37.44	78.45							
117.38	23.12	24.22	صفحات پیش‌ساخته گچی یا روکش مقوا	یتن سیک	قیر اصلاح شده	عایق پلی‌اورتان (7 سانتی‌متر)	اندود سیمان	موزلیک	مدل 5
	38.17	79.21							
118.14	23.55	24.55	صفحات سیمانی سلولزی	یتن سیک	قیر اصلاح شده	عایق پلی‌اورتان (کسانتی‌متر)	اندود سیمان	یلوک رسی متراکم (خشت)	مدل 6
	38.6	79.54							

مصرف انرژی الکتریکی

مصرف انرژی گازی



جدول 9- مدل بهینه طراحی سقف ساختمان  
Tab.9- Building roof design optimization

الگو مصالح	آرایش	درصد پوشش یام سبز (%)			عایق حرارتی		سقف کاذب	شیب یام (deg)	رنگ پوشش خارجی	جزئیات اجرایی یام				جهت گیری (کشیدگی بتا)	محصولیت	درصد یام در سایه (%)	مصرف کل انرژی (Kwh×000)	کاهش مصرف انرژی (%)
		گسترده	متمرکز	نوع	ضخامت (cm)	ضخامت لایه هوا (cm)				دو طرفه	یک سو	روشن تیره	1					
مدل مرجع	1	-	-	-	-	-	-	-	*	-	-	-	-	-	1	124.61		
مدل 1	2	100	-	Pu	10	≥30	30	-	*	*	*	*	*	30	60.9	51		
مدل 1	3	50	-	Pu	10	≥30	45	-	*	*	*	*	*	30	61.74	50		
مدل 1	4	100	-	Pu	10	30	-	*	*	*	*	*	*	30	63.97	48.66		
مدل 1	5	-	80	Pu	10	30	-	*	*	*	*	*	*	60	64.57	48		
مدل 1	6	-	-	Pu	10	≥30	45	-	*	*	*	*	*	40	64/79	48		
مدل 2	7	100	-	Ps	10	25	-	*	*	*	*	*	*	30	64.45	45		
مدل 1	8	-	-	Pu	10	≥30	45	-	*	*	*	*	*	30	68.22	45.25		
مدل 3	9	-	10	Pu	10	10	-	*	*	*	*	*	*	60	70.74	43.2		
مدل 1	10	-	-	Pu	10	20	-	*	*	*	*	*	*	60	82.81	41		
مدل 2	11	-	-	Ps	10	10	-	*	*	*	*	*	*	30	75.61	39.32		

جزئیات اجرایی یام: 1- تیرچه بلوک یا بلوک پلی استایرن 2- سقف کامپوزیت 3- تیرچه فولادی (گرومیت) 4- سقف عرشه فولادی  
Pu: عایق پلی اورتان Ps: عایق پلی استایرن

#### 4- نتیجه گیری

این مقاله به تأثیر طراحی بهینه سقف بر میزان مصرف انرژی ساختمان پرداخته است. زیرا سقف ساختمان بیشترین سهم را در انتقال حرارت دیواره ساختمان دارد. هدف این پژوهش کاهش انرژی مصرفی ساختمان و بهبود شرایط آسایش حرارتی ساختمان در شهر شیراز با بهینه‌سازی بدنه سقف بوده است. جامعه آماری این پژوهش ساختمان‌های آپارتمانی کوتاه مرتبه در شهر شیراز بود که مدل مرجع با روش نمونه‌گیری غیر احتمالی هدفمند انتخاب و جهت آزمون فرضیه در نرم‌افزار انرژی‌پلاس شبیه‌سازی و محاسبات انرژی ساختمان در این نرم‌افزار انجام شد. سپس برنامه‌نویسی

الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار MATLAB برای تعیین بهینه‌ترین مدل سقف انجام شد. در بخش دوم متغیرهای طراحی سقف مؤثر در میزان مصرف انرژی ساختمان از مطالعات کتابخانه‌ای استخراج شد. بخش مبانی نظری پژوهش در سه گروه سیستم‌های غیر فعال انرژی، ویژگی‌های کالبدی سقف، موقعیت قرارگیری در مدل مرجع اعمال و میزان کاهش مصرف انرژی بررسی شد. جهت انجام این عمل به جهت وسعت متغیرها و تغییر پیوسته دامنه متغیرها از الگوریتم ژنتیک استفاده و برنامه‌نویسی آن در نرم‌افزار MATLAB 2019 انجام شد. بررسی و محاسبه تأثیر همزمان متغیرهای سقف بر میزان مصرف انرژی ساختمان توسط الگوریتم ژنتیک

- <sup>26</sup> U-value
- <sup>27</sup> wat/(m<sup>2</sup> k)
- <sup>28</sup> GA
- <sup>29</sup> Matlab R2019a
- <sup>30</sup> JE+
- <sup>31</sup> selection, crossover, and mutation
- <sup>32</sup> population
- <sup>33</sup> Cross Over
- <sup>34</sup> flipping a bit
- <sup>35</sup> kWh
- <sup>36</sup> Btu
- <sup>37</sup> Clay block beam roof
- <sup>38</sup> Polystyrene block beam roof
- <sup>39</sup> Composite roofing
- <sup>40</sup> Chromite roof
- <sup>41</sup> Steel deck roof

### منابع

Aditya, L., Mahlia, T. M. I., Rismanchi, B., Ng, H. M., Hasan, M. H., Metselaar, H. S. C., ... Aditya, H. B. (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73(August 2015), 1352–1365. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034>

Anastaselos, D., Oxizidis, S., & Papadopoulos, A. M. (2011). Energy, environmental and economic optimization of thermal insulation solutions by means of an integrated decision support system. *Energy and Buildings*, 43(2–3), 686–694. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.013>

Asadi, E., da Silva, M. G., Antunes, C. H., & Dias, L. (2012). A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB. *Building and Environment*, 56, 370–378. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.005>

Akoochakian, S., & Khalatbari, R. (2018). The Selection of Materials for Residential Building Facade in the Hot and Dry climate of Iran Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) Method. *Maramat-E Asar & Baft-Haye Tarikhi-Farhangi*, 8(15), 13-28 [In Persian]

Barzegar Z, Heidari SH. (2013). Investigation of the Effects of Building Envelopes Received Solar Radiation on Residential Energy Consumption: A Case of SW and SE Orientation in Shiraz. *Honarha-ye-ziba*, Volume 18, Issue 1 - Serial Number 1; Pages 45-56. [In Persian]

Baniassadi, A., Sajadi, B., Amidpour, M., & Noori, N. (2016). Economic optimization of PCM and insulation layer thickness in residential buildings. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 14, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.01.008>

انجام شد و نتایج محاسبات مصرف انرژی نشان داد که بیشترین تأثیر در کاهش مصرف انرژی را بهینه‌ترین حالت طراحی بام که در ردیف یک جدول 7 نشان داده شده است؛ را دارد. در این حالت میانگین شاخص آسایش حرارتی در گرمترین ماه سال (تابستان) +0.5 و در سردترین ماه سال (زمستان) -0.9 محاسبه شد که نسبت به مدل مرجع آسایش حرارتی بهتری را دارد. سقف شیب‌دار دوسویه با زاویه 30 درجه، پوشش 100 درصد بام سبز گسترده با جزئیات اجرایی سقف کامپوزیت، جهت کشیدگی شمالی جنوبی بنا و 30 درصد بام در بازه زمانی 11 صبح تا 4 بعد از ظهر در سایه باشد، بهترین حالت طراحی است که مصرف انرژی ساختمان 51 درصد کاهش خواهد داد و شرایط آسایش حرارتی را به میزان 0.9 در تابستان و 0.68 در زمستان بهبود بخشیده است. در این حالت میانگین شاخص آسایش حرارتی در گرمترین ماه سال +0.2 و در سردترین ماه سال -0.3 محاسبه شده است. مصالح سقف در این حالت از خارج به داخل به ترتیب: پوشش بام سبز، اندود سیمان، قیر اصلاح شده، بتن متخلخل، لایه هوا، عایق پلی اورتان به ضخامت 30 سانتیمتر یا بیشتر و نهایتاً پانل چوب پنبه پوشش داخلی سقف است.

### پی‌نوشت

- <sup>1</sup> Intensive and Extensive
- <sup>2</sup> roof ponds
- <sup>3</sup> natural draft cooling towers
- <sup>4</sup> thermal conductivity
- <sup>5</sup> internal set points
- <sup>6</sup> GA
- <sup>7</sup> survival of the fittest principle of Darwin
- <sup>8</sup> global-optimum finding algorithm
- <sup>9</sup> genotype
- <sup>10</sup> phenotype
- <sup>11</sup> selection, crossover, and mutation
- <sup>12</sup> Sketchup 2017
- <sup>13</sup> Open studio 2.9.0
- <sup>14</sup> Matlab R2019a
- <sup>15</sup> epw
- <sup>16</sup> <https://energyp.us.net>weather>
- <sup>17</sup> Thermal zones
- <sup>18</sup> Thermal comfort indicator
- <sup>19</sup> Fanger
- <sup>20</sup> Ashrae
- <sup>21</sup> Surface Construction Element
- <sup>22</sup> U-value
- <sup>23</sup> wat/(m<sup>2</sup> k)
- <sup>24</sup> U-value
- <sup>25</sup> wat/(m<sup>2</sup> k)





primary energy analysis of residential buildings. *Energy and Buildings*, 42(2), 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.017>

Guidelines OF Topic 19. (2017). Office of National Regulation and Building Control. Tehran.. V2. [In Persian]

Harkouss, F., Fardoun, F., & Biwole, P. (2017). Author ' s Accepted Manuscript. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2017.12.003>

Hasan, A., Vuolle, M., & Sirén, K. (2008). Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation. *Building and Environment*, 43(12), 2022–2034. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.12.003>

Hensen, J. (2002). Hensen, J.L.M. (2002). Simulation for performance based building and systems design: some issues and solution directions. *Proceedings of the 6th International Conference on Design and Decisions Support Systems in Architecture and Urban Planning*, 7-10 July, 7–10.

Kaynakli, O. (2012). A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161. *Kayna*(1), 415–425. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.006>

Kheiri, F. (2018). A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92(May 2017), 897–920. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.080>

Kasmae, M. (2005). *Architecture and climate*. Khak, Esfehan. [In Persian]

Lai, C. M., & Wang, Y. H. (2011). Energy-saving potential of building envelope designs in residential houses in Taiwan. *Energies*, 4(11), 2061–2076. <https://doi.org/10.3390/en4112061>

Lollini, Barozzi, Fasano, Meroni, & Zinzi, M. (2006). Optimisation of opaque components of the building envelope. *Energy, economic and environmental issues*. *Building and Environment*, 41(8), 1001–1013. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.011>

Masnadi M, Heidari SH. (2010). Roof simulation a method of detailed thermal survey in visual environmen. *Honar-ha-ye-ziba*. 2(42): 5-8. [In

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. *APPLIED ENERGY*, 170, 293–303. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.141>

Ebrahimipour A, Marefat M, Kari M. (2004). Optimization Of Thermal Insulation Of Residential Buldings In Climatic Condition Of Iran For Annual Thermal Loads. *Modares Technical And Engineering*. ; 17; 33 - 52. [In Persian]

Eslami M. *Architecture & Energy*. (2004). Iranian Fuel Conservation Company. Tehran. [In Persian]

Farhanieh, B., & Sattari, S. (2006). Simulation of energy saving in Iranian buildings using integrative modelling for insulation. *Renewable Energy*, 31(4), 417–425. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.04.004>

Fesanghary, M., Asadi, S., & Geem, Z. W. (2012). Design of low-emission and energy-efficient residential buildings using a multi-objective optimization algorithm. *Building and Environment*, 49(1), 245–250. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.09.030>

Friess, W. A., & Rakhshan, K. (2017). A review of passive envelope measures for improved building energy efficiency in the UAE. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72(November 2016), 485–496. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.026>

Gagliano, A., Nocera, F., Patania, F., & Capizzi, G. (2013). A case study of Energy Efficiency Retrofit in social housing units. *Energy Procedia*, 42, 289–298. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.11.029>

Gong, X., Akashi, Y., & Sumiyoshi, D. (2012). Optimization of passive design measures for residential buildings in different Chinese areas. *Building and Environment*, 58, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.014>

Goudarzi, H., & Mostafaeipour, A. (2017). Energy saving evaluation of passive systems for residential buildings in hot and dry regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 432–446. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.002>

Gustavsson, L., & Joelsson, A. (2010). Life cycle



performance of exterior walls. *Modaress mechanical engineering*; 13(10); 152-156. [In Persian]

Omar, I., Virgone, J., David, D., & Corre, O. Le. (2017). ScienceDirect ScienceDirect Energy Saving Potential with a Double-Skin Roof Ventilated by The 15th International Symposium on District Heating and Cooling Natural Convection in Djibouti Assessing the feasibility of using the Vergnault temperature function. *Energy Procedia*, 140, 361–373. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.149>

Ramin, H., Hanafizadeh, P., & Akhavan-Behabadi, M. A. (2016). Determination of optimum insulation thickness in different wall orientations and locations in Iran. *Advances in Building Energy Research*, 10(2), 149–171. <https://doi.org/10.1080/17512549.2015.1079239>

Refahi, A. H., & Talkhabi, H. (2015). Investigating the effective factors on the reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs. *Renewable Energy*, 80, 595–603. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.030>

Razmgah, F. (2014). The Cool Roof Experimenting with Change of Color to Cool the Roof. *Soffeh*, 24(2), 25-34. [In Persian]

Sharifi, a., & Yamagata, Y. (2015). Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review. *Applied Energy*, 160, 336–357. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.061>

Sharghi, A., & Azimi Fereidani, N. (2017). The Role Of Slope Shape Roofs In Heating Energy Consumption Based On Energy Gain. *Journal Of Sustainable Architecture And Urban Design*, 4(2), 65-74 [In Persian]

Shi, X., Tian, Z., Chen, W., Si, B., & Jin, X. (2016). A review on building energy efficient design optimization from the perspective of architects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 872–884. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.050>

Shirzadi, M., & Nagashzadeghan, M. (2015). Building Energy Optimization using Sequential Search Approach for Different Climates of Iran. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 5(1), 210–216.

Soflaei, F., Shokouhian, M., Majid, S., & Shemirani, M. (2016). Investigation of Iranian

Persian]

Mardani, A., Zavadskas, E. K., Streimikiene, D., Jusoh, A., & Khoshnoudi, M. (2017). A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) approach in energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70(December), 1298–1322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.030>

Mirzaei, M., & Bekri, M. (2017). Energy consumption and CO2 emissions in Iran, 2025. *Environmental Research*, 154(January), 345–351. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.023>

Mohammadnejad, M., Ghazvini, M., Mahlia, T. M. I., & Andriyana, A. (2011). A review on energy scenario and sustainable energy in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4652–4658. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.087>

Mehran, S., & Rad, M., & Jafarkazemi, F. (2008). An Analysis Of Absorbed Solar Radiation By Domed And Tilted Roofs And Comparison With Flat Roofs. *Journal Of Technology Of Education*, 2(4), 249-258. [In Persian]

Mahdavinejad M, Fakhari M. Stabishment of Optimum Designing Pattern in Buildings Roof Shape Based on Energy Loss.( 2013). *Naqshejahan.*; 3 (2) :35-42 [In Persian]

Madahi, m., & Abbasi, M. (2020). External thermal shell thermal behavior analysis-Exposure of building with materials and traditional and modern technology to optimize energy consumption (Case study: Residential buildings in Mashhad). *ARMANSHAH*, 12(29), 167-183 [In Persian]

Mahmoody, M., Pakari, N., Bahrami, H. (2012). The effect of green roof on reducing environment temperature. *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, 9(20), 73-82. [In Persian]

Mirhashemi M, Shapoorian SM. (2010). A new method of optimizing single glazed windows. *Honar-ha-ye- ziba.* 2(43): 43-48. [In Persian]

Nasrollahi, N., & Salehi, M. (2015). Performance enhancement of double skin facades in hot and dry climates using wind parameters. *Renewable Energy*, 83, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.019>

Omidvar A. Rosti B. (2013). Effect of moisture content of building materials on thermal



Yu, J., Tian, L., Yang, C., Xu, X., & Wang, J. (2011). Optimum insulation thickness of residential roof with respect to solar-air degree-hours in hot summer and cold winter zone of china. *Energy and Buildings*, 43(9), 2304–2313. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.012>

Znouda, E., Ghrab-Morcos, N., & Hadj-Alouane, A. (2007). Optimization of Mediterranean building design using genetic algorithms. *Energy and Buildings*, 39(2), 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.11.015>

Zarghami, E., & c, E. (2016). Thermal Performance Evaluation Of Green Roof On Sustainability And Energy Efficiency In Residential Buildings In Hot And Dry Climates Off Iran. *Journal Of Sustainable Architecture And Urban Design*, 4(1 ), 75-90. [In Persian]

traditional courtyard as passive cooling strategy ( a field study on BS climate ). *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1), 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2015.12.001>

Taheri, M., & Shafie, S. (1995). A case study on the reduction of energy use for the heating of buildings. *Renewable Energy*, 6(7), 673–678. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(95\)00090-7](https://doi.org/10.1016/0960-1481(95)00090-7)

Taheri, H. (2017). Thermal building simulation with Energyplus. Yazda, Tehran. [In Persian]

Tahbaz M.Jalilian SH.( 2005). The Role of Building Envelope In Residents' Thermal Comfort. 4th International conference in Fuel Use Optimization in Bulding . Tehran; 1-18. [In Persian]

Topic 19.(2010).Office of National Regulation and Building Control. Tehran.V19. [In Persian]

