

بررسی کمی صرفه‌جویی انرژی در خانه‌های گودال باغچه‌ی اقلیم گرم و خشک؛ نمونه‌ی موردی: خانه‌های سنتی شهر کاشان^۱

Investigating the Energy Saving of Pit Yard Houses in the Hot and Dry Climate; Case Study: Classic Houses of Kashan City

فائزه خسروی^۲، مجتبی مهدوی نیا^۳ و شهریار حبیبی^۴

چکیده

بحران انرژی به یکی از مهم‌ترین مسائل جهان تبدیل شده است. از سوی دیگر در کشور با سرانه‌ی مصرف انرژی بالاتر از مصرف جهان، سهم سوخت‌های فسیلی، که استفاده از آنها با آلودگی همراه است، در سبد انرژی ۹۵ درصد است (ایرنا، ۱۴۰۱). مطابق آمار شرکت ملی نفت ایران (شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت، ۱۳۹۶)، بیشترین سهم مصرف انرژی به میزان ۲۷.۲ درصد متعلق به بخش خانگی است. با توجه به سهم بالای مصرف در این بخش، در این مقاله تلاش شد که با بررسی تاثیر یک عنصر معماری سنتی مناطق گرم و خشک ایران در کاهش مصرف انرژی و پیشنهاد راهکاری برای طراحی ساختمان‌های کم مصرف‌تر، گامی به‌سوی کاهش مصرف انرژی در کشور برداشته شود. گودال باغچه، حیاطی است در میانه‌ی حیاط اصلی ساختمان که معمولاً به اندازه‌ی یک طبقه، درون زمین فرو رفته است. هدف اصلی از ایجاد گودال باغچه در اقلیم گرم و خشک، رسیدن به آب بوده، اما پژوهش‌ها نشان می‌دهد وجود این عنصر در ساختمان، منجر به کاهش مصرف انرژی در آن نیز شده است. هدف از این پژوهش محاسبه‌ی میزان کاهش مصرف انرژی ناشی از وجود گودال باغچه در بناهای سنتی و همچنین یافتن خصوصیات کالبدی بهینه برای رسیدن به بیشترین میزان کاهش مصرف در این گونه ساختمان‌ها بوده و روش آن توصیفی-تحلیلی است. به این منظور در قدم اول شهر کاشان، به دلیل تعدد پروژه‌های دارای گودال باغچه و اقلیم گرم و خشک انتخاب شدند. پس از انتخاب سه نمونه از کامل‌ترین خانه‌های این شهر، اطلاعات کالبدی و اندازه‌های آن‌ها استخراج شد. پس از آن هر سه خانه در هانی بی^۱ در دو حالت روی زمین و داخل زمین شبیه‌سازی شدند. مطابق نتایج ساخت گودال باغچه در این خانه‌ها، بیشترین تاثیر را در انرژی مورد نیاز سرمایه‌ی داشته و باعث صرفه‌جویی ۹.۴ درصدی شدت مصرف انرژی ساختمان شده است. در مرحله‌ی پایانی، با در نظر گرفتن ۸۱ حالت مختلف، تلاش شد تا بهینه‌ترین فرم کالبدی خانه‌های گودال باغچه برای ساخت‌وساز امروزی پیدا شود. مطابق نتایج در حالت بهینه، می‌توان به کاهش ۱۱.۲ درصدی در شدت مصرف انرژی نسبت به وضعیت موجود رسید. از یافته‌های این پژوهش می‌توان در پژوهش‌های آینده، برای رسیدن به الگوی مناسب ساختمان دارای گودال باغچه در اقلیم گرم و خشک ایران استفاده کرد.

کلیدواژه‌گان: گودال باغچه، بهینه‌سازی عملکرد حرارتی، کاهش مصرف انرژی، اقلیم گرم و خشک، معماری سنتی ایران.

^۱ مقاله‌ی حاضر از پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد نویسنده‌ی اول با عنوان «بررسی عملکرد حرارتی گودال باغچه در اقلیم گرم و خشک (نمونه‌ی موردی خانه‌های

سنتی شهر کاشان)»، استخراج شده و نویسنده‌ی دوم، استاد راهنمای اول و نویسنده‌ی سوم، استاد راهنمای دوم این پایان‌نامه بوده‌اند.

^۲ کارشناسی ارشد معماری و انرژی، گروه فناوری معماری (مدیریت پروژه و ساخت)، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران، ایران (نویسنده مسئول: khosravi.faezeh@gmail.com)

^۳ استادیار، گروه فناوری معماری (مدیریت پروژه و ساخت)، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران، ایران.

^۴ استادیار، گروه فناوری معماری (مدیریت پروژه و ساخت)، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران، ایران.

گرمایش جهانی کره‌ی زمین، یکی از مهم‌ترین معضلات عصر حاضر است. در بدترین سناریو پیش‌بینی شده، دمای کره‌ی زمین تا سال ۲۰۵۰ هشت درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. این در حالی است که سیصد سال گذشته دمای کره‌ی زمین تنها ۰/۷ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش داشته است (IPCC, 2007). افزایش غلظت کربن دی‌اکسید، مهم‌ترین عامل گرمایش کره‌ی زمین است و یکی از مهم‌ترین منابع تولید آن، سوخت‌های فسیلی هستند. کشور ایران با مصرف انرژی بیش از دو و نیم برابر متوسط جهانی، نهمین مصرف‌کننده‌ی انرژی در جهان است (ایسنا، ۱۳۹۸). دسترسی به منابع گسترده‌ی سوخت فسیلی باعث شده که لزوم به حداقل رساندن وابستگی به این منابع در کشور تا حدودی فراموش شود. با وجود ظرفیت گسترده‌ی استفاده از انرژی‌های پاک در ایران، آمار نشان می‌دهد، هم‌چنان چیزی در حدود ۹۵ درصد از نیاز انرژی کشور از سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود (ایرنا، ۱۴۰۱). مصرف بالای انرژی بخش ساختمان در کشور، تا حد زیادی مربوط به شرایط اقلیمی است.

مساحت زیادی از ایران در نواحی گرم و خشک قرار دارد. شرایط سخت اقلیمی در این بخش، نیاز انرژی سرمایشی در ساختمان‌ها را بسیار بالا می‌برد. با این وجود زندگی در این ناحیه از مدت‌ها پیش و بدون سوخت‌های فسیلی و تجهیزات سرمایشی در جریان بوده و ساکنان این اقلیم، در قرون گذشته، راهکارهای خاصی برای دوام آوردن در این شرایط ابداع کرده بودند. امروز استفاده از خلاقیت‌های آن‌ها، می‌تواند معماران را در طراحی ساختمان‌هایی که نیاز کمتری به تجهیزات سرمایشی دارند، یاری دهد و این امر می‌تواند به حذف قسمتی از مصرف انرژی بخش پر مصرف ساختمان منتهی شود که با توجه به وابستگی بالا به سوخت‌های فسیلی در ایران، این مسئله به حذف کربن دی‌اکسید تولید شده نیز منجر خواهد شد. به‌کارگیری روش‌هایی که باعث نوسان کمتر دمایی در داخل ساختمان و نزدیک شدن دمای داخل به دمای آسایش باشد، می‌تواند وابستگی ساختمان‌ها به تجهیزات مکانیکی سرمایش و گرمایش را کاهش داده و به‌دنبال آن مصرف انرژی را تا حد زیادی کاهش دهد. مطابق پژوهشی که درباره‌ی صرفه‌جویی انرژی در ساختمان‌های خاک پناه در اقلیم‌های مختلف ایران انجام شده، این مدل از ساختمان‌ها در اقلیم گرم و خشک ایران (شهر یزد) بیشترین صرفه‌جویی را داشته‌اند (ایمانی و حیدری، ۱۳۹۷). از سوی دیگر در مقالات مختلف، به نقش تعدیل حرارت حیاط مرکزی در اقلیم گرم و خشک اشاره شده است.

حیاط مرکزی به‌عنوان یک مفهوم و زمین‌پناهی به‌عنوان مفهومی دیگر، هر کدام تا حدود مشخصی توانایی اصلاح شرایط آب و هوایی را دارند. اما زمانی که این دو مفهوم در «گودال باغچه» به‌صورت مفهومی یکپارچه در می‌آیند، پتانسیل اصلاح آب و هوایی آنها بسیار بیشتر می‌شود (Al-Mumin, 2001). این عنصر به‌وفور در معماری سنتی ایران استفاده شده است. با این وجود تا کنون کمتر پژوهشی به بررسی کمی تاثیر این عنصر در مصرف انرژی ساختمان‌ها در ایران پرداخته است.

پژوهش‌های انجام شده در این زمینه در سطح جهانی هم بسیار اندک هستند. در این موارد معدود نیز تنها به میزان صرفه‌جویی ساختمان‌های دارای گودال باغچه پرداخته شده و از بررسی متغیرهای موثر بر عملکرد آن غافل مانده‌اند. نسبت طول به عرض گودال باغچه، عمق فرورفتن آن در زمین، نسبت پنجره به دیوار و مقاومت حرارتی سطحی جداره‌ها از مواردی هستند که می‌توانند در عملکرد حرارتی بهتر ساختمان دارای گودال باغچه تاثیرگذار باشند.

بررسی نقش عنصر «گودال باغچه» در کاهش نیاز ساختمان به انرژی در آثار باقی مانده از گذشته و تلاش برای بهینه‌سازی خصوصیات مختلف که به افزایش میزان صرفه‌جویی انرژی کمک می‌کند، می‌تواند در آینده به پیشنهاد یک مدل طراحی برای اقلیم گرم و خشک، اصلاح معماری امروز این مناطق از کشور، کمینه کردن نیاز ساختمان‌ها به تجهیزات مکانیکی و در نهایت پایین آمدن مصرف سوخت‌های فسیلی بی‌انجامد. در ادامه با توجه به موارد بیان شده، پرسش‌ها پژوهش تبیین شده‌اند.

- استفاده از گودال باغچه در طراحی ساختمان‌های سنتی شهر کاشان تا چه میزان باعث کم شدن مصرف انرژی در ساختمان شده است؟

- تا چه میزان می‌توان مصرف انرژی در خانه‌های سنتی گودال باغچه شهر کاشان را کاهش داد؟



۲- مبانی نظری

بحران انرژی سال ۱۹۹۳، توجه‌ها را به سمت روش‌های صرفه‌جویی در انرژی جلب کرد. پس از این دوران، پژوهش‌های متعددی درباره‌ی ابتکارات در طراحی ساختمان‌ها که می‌تواند به نیاز کمتر انرژی در آنها منتهی شود انجام شد. یکی از این روش‌ها که مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفت، «طراحی ساختمان زمین پناهی» است. پژوهش‌گران معتقدند این شیوه از ساخت‌وساز می‌تواند به صرفه‌جویی در مصرف انرژی بی‌انجامد.

اما با وجود همه‌ی مزایای حرارتی ساختمان‌های زمین‌پناه، به دلیل نامطلوب بودن فضای داخلی در ساختمانی که در خاک دفن شده، طراحان هنوز این نوع از فضاها را به صورت گسترده در طراحی خود مدنظر قرار نمی‌دهند. یکی از پیشنهادات راه‌گشا استفاده از فضای خالی در میانه‌ی ساختمان است. این به معنای ترکیب ساختمان زمین پناه، با حیاط مرکزی است که خود به عنوان المانی موثر در کاهش مصرف انرژی در ساختمان شناخته می‌شود. ترکیب این دو عنصر که به صورت گودال باغچه در معماری سنتی نقاط مختلف واقع در نواحی گرم و خشک استفاده شده، نیز در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. بدین ترتیب در ادامه به بررسی برخی از مفاهیم و پژوهش‌های انجام شده در رابطه با این از فضای معماری آورده می‌شود.

۲-۱- خاک پناهی

نظریه‌ی ذخیره‌سازی غیرفعال سالانه‌ی گرما نخستین بار توسط هیت، یکی از پژوهش‌گران پیش‌تاز زمین‌پناهی، مطرح شد. او این نظریه را این گونه توضیح می‌دهد: «... گرما بدون استفاده از تجهیزات مکانیکی، می‌تواند در طول سال جمع‌آوری، ذخیره و بازیابی شود (Hait, 1983)». تقریباً به صورت هم‌زمان گیوونی و کاتز مطرح کردند که ویژگی‌های مختلف خاک در دمای سالانه آن تاثیرگذار هستند. این ویژگی‌ها شامل درصد رطوبت، جرم حجمی خشک، ضریب هدایت حرارتی و ضریب نفوذ گرمایی خاک هستند. برای مثال ویژگی‌های حجمی خاک مانند رسانندگی گرمایی و ظرفیت گرمایی که نقش مهمی در انتقال حرارتی دارند، با افزایش میزان رطوبت خاک افزایش می‌یابد (Givoni & Katz, 1985).

از دید کارمودی و استرلینگ، احتمالاً در درون زمین، دمای هوا به‌ندرت به دمای هوای بیرون خواهد رسید و کاهش اختلاف دمای داخل و خارج، باعث انتقال کمتر حرارت از جداره‌ی ساختمان می‌شود. آنها معتقد بودند این مسئله حتی در عمق کم زمین و شرایط زیست‌محیطی طبیعی برقرار خواهد شد (Carmody & Sterling, 1984). کارپنتر نشان داد ساختمان‌های زمین پناه در همه‌ی طراحی‌ها بهترین پتانسیل برای صرفه‌جویی را دارند. مطابق پژوهش‌های او، تنها علت این صرفه‌جویی کاهش اختلاف دمای داخل و خارج نیست و حفاظت بدنه‌ی ساختمان در برابر تابش خورشید علت دیگری برای این مسئله است (Carpenter, 1994). پس از آن، کومار و همکارانش توانستند مدلی ریاضی برای انتقال حرارت و تغییرات رطوبت در ساختمان‌های در تماس با خاک در کشور هند ارائه دهند و نتایج آن را با یک مدل ساختمانی موجود مقایسه کنند. نتایج به‌دست آمده از بررسی مدل دقیق نشان داد که ساختارهای در مجاورت زمین، سیستم‌های غیرفعال ذخیره‌ی انرژی هستند (Kumar et al., 2007). با فاصله‌ی اندکی آنسلم، پس از ارزیابی شرایط آب‌وهوایی در زیرزمین و محاسبه‌ی دمای درون خاک، جریان گرمایی از طریق سطوح ساختمان را محاسبه کرد. او در اعماق مختلف زمین، بهره‌وری دیوارهای در تماس با خاک را بررسی و توانست ارزیابی برای ارزیابی عملکرد ساختمان‌های زیرزمینی ارائه دهد. نتایج پژوهش‌های او نشان داد تماس بیشتر نمای ساختمان با خاک، می‌تواند باعث عملکرد مناسب‌تر ساختمان در فصول مختلف باشد (Anselm, 2008).

پژوهشی که توسط ون درانکلار و همکارانش انجام شده، نشان می‌دهد که ۱۱٪ از ساختمان‌های زمین‌پناه بررسی شده، در گروه ساختمان‌های نزدیک به صفر انرژی قرار می‌گیرند. مطابق نتایج پژوهش آنها، ساختمان‌های زمین‌پناه با بار داخلی بالا در اقلیم سرد، و ساختمان‌ها با بار پایین در اقلیم گرم بهتر عمل می‌کنند. وی همچنین در مطالعات خود به این نتیجه رسید که عملکرد انرژی ساختمان‌های زیرزمینی با توجه به گرمایش و سرمایش مورد نیاز آن، تابعی از چند ویژگی مانند نوع کاربری ساختمان، مصالح ساختمانی، اندازه‌ی ساختمان، شکل ساختمان، شرایط آب‌وهوایی، میزان در عمق فرو رفتن و نوع تعامل با زمین است. به صورت کلی مطالعات او که هر کدام در شرایط متفاوت اقلیم، کاربری، اندازه، شکل ساختمان و... انجام شده، نشان می‌دهد که ساختمان زیرزمینی به ترتیب ممکن است صرفه‌جویی تا ۳۳-۳۵٪، ۴۷-۸۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪ در مصرف انرژی در مقایسه با ساختمان‌های مشابه بالای سطح زمین داشته باشند (Van Dronkelaar et al., 2013).

نصراللهی و اکرمی ابرقویی، پژوهشی درباره‌ی بهره‌وری انرژی ساختمان‌های خاک‌پناه در کاربری‌های مختلف انجام دادند. مطابق این پژوهش با افزایش عمق فرورفتن ساختمان در دل خاک، درصد صرفه‌جویی آن نسبت به ساختمان متداول روی سطح زمین افزایش می‌یابد. در این

شرایط افزایش عمق فرورفتگی، در کاربری مسکونی بیشترین و کاربری آموزشی کمترین میزان همبستگی را با کاهش مصرف انرژی دارد. همچنین عمق بهینه برای هر کاربری مقداری متفاوت پیش‌بینی می‌شود. در شرایط عمق بهینه، کاربری مسکونی ۶۹ درصد و کاربری مذهبی، اداری و آموزشی به‌ترتیب ۶۱، ۶۰ و ۵۴ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی خواهند داشت (نصراللهی و اکرمی ابرقویی، ۱۳۹۴). ایمانی و حیدری، به بررسی الگوی تبادل حرارت، دریافت و اتلاف گرما، برای شناسایی اصولی که باعث می‌شود ساختمان زیرزمینی به‌عنوان یک سیستم ذخیره‌ی انرژی عمل کند، پرداختند. آن‌ها پس از محاسبه‌ی دمای خاک در سه اقلیم تهران، یزد و تبریز، مدل‌های جداگانه روزمینی و زیرزمینی ساختمان را در انرژی پلاس، در هر سه اقلیم شبیه‌سازی و تحلیل کردند. نتایج پژوهش نشان داد، میزان کاهش مصرف انرژی در شهر یزد بیشتر از تهران و تبریز بوده و به‌طور کلی، ساختمان‌های زیرزمینی در اقلیم گرم‌وخشک و در فصول گرم سال عملکرد بهتری دارند، تاجایی که بار سرمایشی را در بعضی از اعماق به صفر می‌رسانند (ایمانی و حیدری، ۱۳۹۷). در سال ۱۳۹۷، عمادیان رضوی، درباره‌ی عملکرد بناهای زمین‌پناه در مواقع سرد سال پژوهش کرد. بدین‌منظور، وی از روش‌های ارزیابی ساختارهای روی زمین و تطبیق این محاسبات با شرایط بنای در پناه زمین استفاده کرد. در این روش، زمین به‌مثابه‌ی محیط بیرون ساختمان تلقی شده و دمای خاک مجاور ساختمان به‌جای دمای محیط در معادلات انتقال حرارت منظور می‌شود. پژوهش وی نشان داد، بهره‌برداری از معماری در پناه زمین در مواقع سرد سال نیز امکان‌پذیر و از نظر عملکرد حرارتی دارای جایگاهی واجد اعتبار است (عمادیان رضوی، ۱۳۹۷).

۲-۲- حیات مرکزی

الدوود به این نتیجه رسیده است که عملکرد حیات مرکزی، به‌نوع بازشو، درصد بازشو و شرایط آب‌وهوایی محل احداث بستگی دارد. او در پژوهش‌هایش نشان داد که حیات مرکزی در اقلیم گرم و خشک و گرم و مرطوب، نسبت به اقلیم معتدل و اقلیم سرد عملکرد حرارتی بهتری دارد (Aldawoud, 2008). چو و محمدزاده با بررسی خانه‌های سنتی ایرانی نشان دادند، حیات مرکزی تأثیر مثبت بالایی بر عملکرد حرارتی فضای داخلی مجاور آن، به‌خصوص در اقلیم گرم و خشک دارد (Cho & Mohammadzadeh, 2013). سفلائی و همکاران به بررسی پتانسیل سرمایش غیرفعال الگوی خانه‌های سنتی حیات مرکزی در ایران در اقلیم گرم و خشک برای ارائه‌ی الگویی معاصر پرداختند. نتیجه‌ی این پژوهش یافتن ارتباطی منطقی میان جهت‌گیری، ابعاد و نسبت پر و خالی و عناصر طبیعی در ساختمان‌های حیات مرکزی برای ارائه‌ی الگویی معاصر و دارای ظرفیت سرمایش غیرفعال بود (Soflaei et al., 2016).

۲-۳- گودال باغچه

در سال ۱۹۸۱ براون و نویستکی درباره‌ی فواید حرارتی گودال باغچه بحث کرده و استفاده از آن را توصیه کردند. اما مقدار کمی برای صرفه‌جویی آن ارائه نکردند (Novitski and Brown, 1981). الموتوا نیز در همین سال، استفاده از ایده‌ی گودال باغچه را برای غلبه بر شرایط سخت اقلیمی در کویت و کم شدن مصرف انرژی در این کشور توصیه می‌کند، اما آماری از میزان صرفه‌جویی این ساختمان‌ها ارائه نمی‌دهد (Al-Mutawwa, 1981). در سال ۱۹۸۸ گولانی با رصد دقیق عملکرد حرارتی خانه‌های بومی تونس که خانه‌هایی با گودال باغچه هستند، داده‌های مرتبط و دقیقی را گردآوری کرد. تحقیقات او نشان داد، درحالی‌که در میانه‌ی تابستان، دمای خشک در حدود ۴۲ درجه‌ی سانتی‌گراد است، دمای اتاق رو به گودال باغچه، ثابت و در حدود ۱۷ درجه خنک‌تر، یعنی ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد است و از سوی دیگر، در میانه‌ی زمستان درحالی‌که دمای خشک در حدود ۷ درجه‌ی سانتی‌گراد است، دمای اتاق رو به گودال باغچه ثابت و در حدود ۹ درجه‌ی گرم‌تر یعنی ۱۶ درجه‌ی سانتی‌گراد است (Golany, 1988).

المومن پژوهش‌گر کویتی در سال ۱۹۹۷، نرم‌افزاری برای محاسبه‌ی عملکرد حرارتی ساختمان‌های دارای گودال باغچه به‌نام سان‌کورت^۳ طراحی کرد. پس از آن وی در پژوهش خود در سال ۲۰۰۰، پایداری «گودال باغچه» در اقلیم گرم و خشک کویت را مورد بررسی قرار داد. در بخش مصرف انرژی، نتایج شبیه‌سازی او با نرم‌افزار پیش‌گفته نشان داد، یک ساختمان مسکونی یک طبقه دارای گودال باغچه با لایه‌ی یک متری خاک بر روی آن، صرفه‌جویی سالانه ۳۵-۲۳ درصدی خواهد داشت. در صورت عایق‌کاری دیوارها در سطح بالاتر از یک‌ونیم متر و پوشاندن سطح بالایی با گیاهان، می‌توان انتظار میزان بیشتر صرفه‌جویی را داشت. همچنین در ساختمان سه طبقه بدون عایق‌کاری دیوارها میزان صرفه‌جویی در حدود ۲۸ درصد خواهد بود و این میزان با اضافه کردن گیاه به سطح بالایی می‌تواند بیشتر شود. این مقادیر برای ساختمان با بار داخلی کم، مثل مسکونی یا دفتر اداری کوچک است. شبیه‌سازی ساختمان سه طبقه با بار بالا داخلی، صرفه‌جویی تنها ۸.۱۱ درصد را نشان داد (Al-Mumin, 2001). در سال ۲۰۱۴ طاهباز و همکاران، برای بررسی جرم حرارتی خاک بر کنترل تغییرات دمایی در تابستان‌های داغ و زمستان‌های سرد مناطق خشک، به بررسی میدانی بناهای زیرزمینی در شهر کاشان پرداختند. بررسی‌ها نشان داد، زمانی‌که دمای هوای محلی در روز و شب تابستان بین ۲۷ تا ۴۳ درجه‌ی سانتی‌گراد است، دمای هوای زیرزمین‌های مختلف بین ۲۳ تا ۲۹ درجه است.



همچنین در زمستان درحالی که دمای هوای محلی بین ۳ تا ۱۴ درجه است، دمای هوای زیرزمین بین ۱۰ تا ۱۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این پژوهش نشان داد، فضاهای زیرزمینی از نظر کارایی حرارتی زمستان و تابستان بسیار مطلوب‌تر هستند و خرد اقلیم آنها، یا با معیارهای آسایش حرارتی تطابق دارد و یا به آن بسیار نزدیک است (طاهباز و همکاران، ۱۳۹۴). بنابراین با مرور پژوهش‌ها مشخص شد که این الگوها، الگوی مناسبی در رابطه با هدف پژوهش هستند. در ادامه روش پژوهش به صورت تفصیلی ارائه می‌شود.

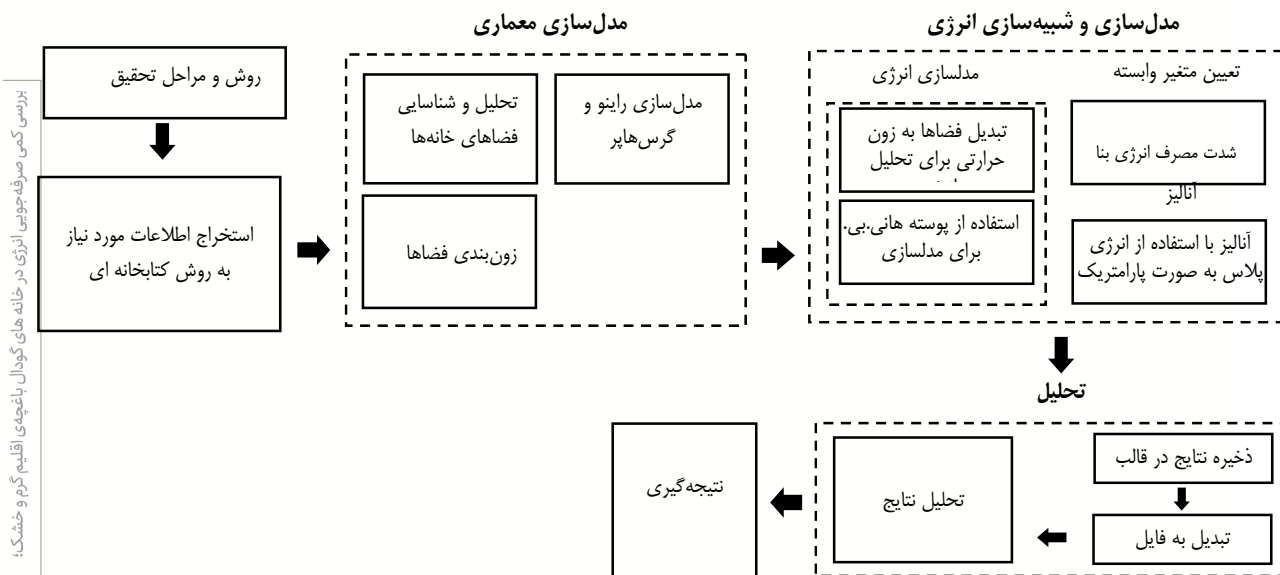
۳- روش پژوهش

هدف و ماهیت این پژوهش، کاربردی و روش انجام آن توصیفی-تحلیلی است. مراحل پژوهش شامل تحقیق کتابخانه‌ای، تعیین مدل الگو، شبیه‌سازی رایانه‌ای و در انتها تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی است. فرآیند انجام این پژوهش را می‌توان به مراحل زیر تقسیم کرد:

الف) مرحله نخست: در این مرحله، اطلاعات کلی مورد نیاز برای پژوهش از منابع استخراج شدند. مهم‌ترین بخش در این مرحله، استخراج اطلاعات و مدارک خانه‌های سنتی شهر کاشان بوده است. پس از بررسی نقشه‌های خانه‌های این شهر، سه خانه دارای گودال باغچه به عنوان نمونه‌های الگو برای انجام پژوهش‌ها و شبیه‌سازی انتخاب شدند. این خانه‌ها شامل خانه‌ی باکوچی، تهمامی و تاج هستند.

ب) در مرحله بعد، نقشه‌های این سه خانه برای شناسایی دقیق فضاهای آن‌ها و زون‌بندی فضاها برای شبیه‌سازی بررسی شدند. در این مرحله با استفاده از اطلاعات استخراج شده، شبیه‌سازی رایانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار هانی بی. انجام شد. نخست، ساختمان بدون گودال باغچه در نظر گرفته و مصرف انرژی آن محاسبه شده است. پس از آن گودال باغچه‌ی آن درون زمین فرو رفته و مجدداً مصرف انرژی آن محاسبه شده است. در این مرحله برای هر کدام از چهار متغیر تناسب حیاط، عمق ساخت و ساز، نسبت پنجره به دیوار ضلع شمالی و ضخامت دیوار، سه حالت در نظر گرفته شده است.

ج) در این مرحله، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی هر خانه در دو حالت با هم مقایسه شدند و میزان صرفه‌جویی حاصل از ساخت بنا به صورت گودال باغچه در هر یک از این خانه‌ها محاسبه شد. همچنین با بررسی ۸۱ سناریو به دست آمده، بهترین حالت از نظر کاهش مصرف انرژی مشخص شد.



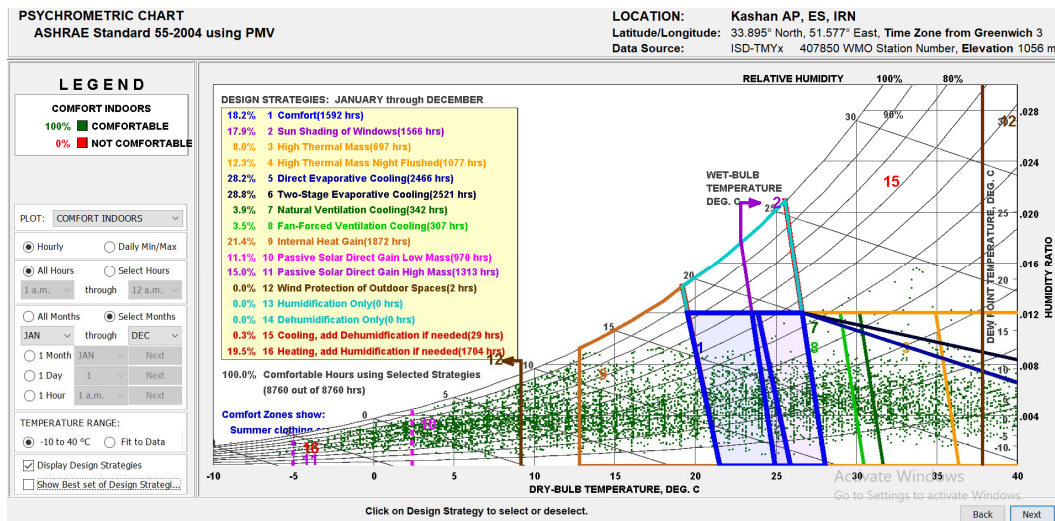
تصویر ۱- فرآیند انجام پژوهش

۴- تحلیل داده‌ها

۴-۱- اقلیم کاشان

طبق سیستم کوپن در تقسیم‌بندی اقلیمی، کاشان در ناحیه گرم و بیابانی دارد. بر پایه‌ی روش تقسیم‌بندی اقلیمی دوماتون که بر پایه‌ی ضریب خشکی است و دو عامل مهم دما و باران را مدنظر دارد، به دلیل اینکه، ضریب خشکی کاشان ۴/۵ است، براساس ضریب دوماتون، کاشان دارای آب‌وهوای بسیار گرم و خشک است (اداره‌ی هواشناسی کاشان، بی‌تا). مطابق پیوست ۳ مقررات ملی ساختمان مبحث ۱۹، این شهر در گونه‌بندی نیاز سالانه‌ی انرژی، متوسط ارزیابی شده و نیاز غالب حرارتی آن، گرمایش و سرمایش است. شهر کاشان ۹۵۵ متر از دریا ارتفاع دارد و معدل بارندگی آن ۱۳۲/۲ میلی‌متر است. معدل تعداد روزهای یخبندان در این شهر ۴۸/۴ است (کسمائی، ۱۳۸۹). براساس فایل آب و هوای ای. پی. دبلیو شهر کاشان، دما در کمترین حالت خود در سردترین روز در این شهر، به منفی شش درجه‌ی سانتی‌گراد می‌رسد و در گرم‌ترین روز سال، دما به بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد (حدود ۴۴ درجه‌ی سانتی‌گراد) خواهد رسید. اختلاف دمای هوا در گرم‌ترین و سردترین روز سال در این شهر، ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. میانگین دمای هوا در این شهر، تنها در ماه می در محدوده‌ی آسایش قرار دارد. میانگین بالای سالیانه‌ی دما در شهر کاشان ۲۶ درجه‌ی سانتی‌گراد و میانگین پایین دمای سالیانه در این شهر، ۱۳ درجه‌ی سانتی‌گراد است. همچنین میانگین سالیانه‌ی دما در این شهر در حدود ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده و در محدوده‌ی آسایش قرار ندارد.

تصویر ۲، نمودار سایکرومتریک شهر کاشان را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار در ۱۸/۲ درصد طول کل سال، محیط بیرون در شرایط آسایش قرار دارد. این مقدار معادل ۱۵۹۲ ساعت است. در سایر مواقع برای دستیابی به آسایش حرارتی، سرمایش و گرمایش مورد نیاز است. این نمودار همچنین نشان می‌دهد که رطوبت نسبی در این شهر، به‌ویژه در دوره‌ی گرم سال، بسیار پایین است. مطابق آن، اگر تنها شرایط اقلیمی شهر کاشان معیار سنجش باشد، در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، نوامبر و دسامبر نیاز به گرمایش و در ماه‌های ژوئن، جولای و اگوست و سپتامبر نیاز به سرمایش وجود دارد. همچنین در ماه‌های می و اکتبر، براساس زمان و شرایط، به سرمایش و گرمایش نیاز دارد. با استفاده از روش‌هایی مانند سایه‌بان خورشیدی، استفاده از جرم حرارتی، تهویه‌ی طبیعی، دریافت مستقیم خورشیدی و... در ساختمان می‌تواند شرایط آسایش را در مواقع بیشتری از سال در این اقلیم تامین کرد.

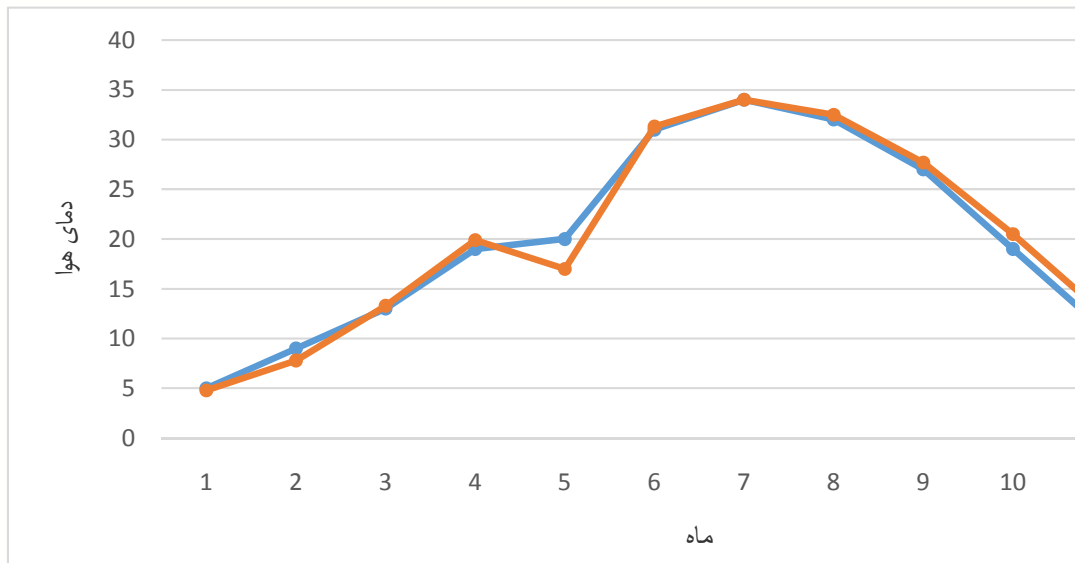


تصویر ۲- نمودار سایکرومتریک شهر کاشان (خروجی فایل آب و هوایی کاشان در نرم افزار متونرم)

۴-۲- اعتبارسنجی اطلاعات آب‌وهوایی

اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی انرژی، اطلاعات کامل آب‌وهوایی شهر مورد نظر است که شامل پارامترهای دمای خشک، دمای تر، جهت و سرعت باد، میزان رطوبت نسبی، تعداد روزهای یخبندان، ساعات آفتابی، درصد پوشش ابر آسمان، جهت و شدت تابش آفتاب و... است. در این پژوهش فایل به‌دست آمده از نرم‌افزار شبیه‌ساز متونرم^۴، با آمار ۴۷ ساله (۲۰۱۴-۱۹۶۷) هواشناسی اصفهان اعتبارسنجی شده است. چنانچه در تصویر ۳ مشاهده می‌کنید، اختلاف بین اطلاعات اندک بوده و اطلاعات استخراج شده قابل استفاده است.





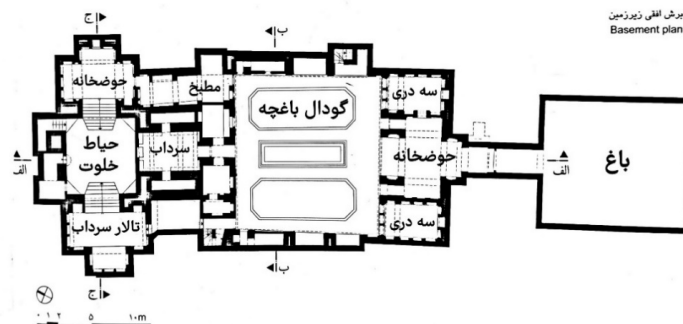
تصویر ۳- اعتبارسنجی اطلاعات آب و هوایی

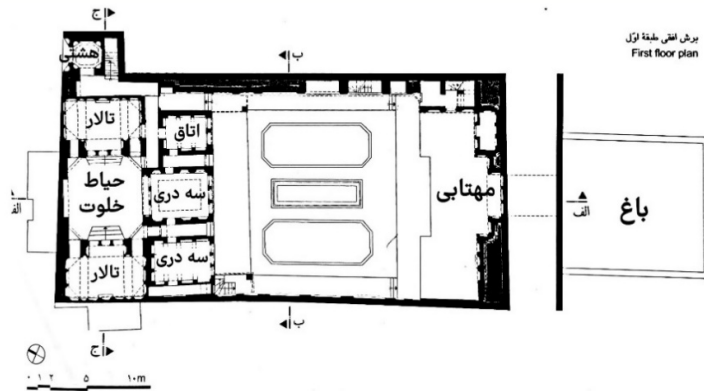
۳-۴- مدل الگو

از آنجاکه تعداد خانه‌های گودال باغچه در شهر کاشان به اندازه‌ای نیست که با بررسی آنها بتوان به یک مدل کلی رسید، سه مورد از معروف‌ترین و کامل‌ترین خانه‌های گودال باغچه این شهر جهت بررسی انتخاب شدند. ملاک انتخاب این خانه‌ها، متراژ تقریباً نزدیک به هم و طراحی و تعداد طبقات شبیه به هم است. خانه‌های باکوچی، تهامی و تاج سه خانه‌ای هستند که به‌عنوان مدل الگو انتخاب شده‌اند. میانگین نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی آن‌ها، به‌عنوان نتیجه‌ی نهایی در این پژوهش مورد استناد قرار خواهد گرفت.

۳-۴-۱- خانه‌ی باکوچی

خانه‌ی باکوچی در شهر کاشان در نزدیکی چندین اثر تاریخی معروف دیگر، واقع در خیابان علوی، کوچه سلطان امیر احمد است. این خانه در سال ۱۲۵۴ شمسی به‌دستور حاج مهدی بادکوبه‌پی، از تاجران سرشناس کاشان ساخته شده (حاجی قاسمی، سلطانزاده و موسوی روضاتی، ۱۳۷۵). این خانه که به‌صورت گودال باغچه بنا شده، دارای کشیدگی شمالی-جنوبی است. همچنین فضاهای اصلی خانه در شمال و جنوب آن بنا شده و در جبهه‌ی شرقی و غربی تنها به نماسازی برای یک‌پارچگی معماری ساختمان، اکتفا شده است. در تصویر ۴، فضاهای مختلف این خانه معرفی شده است.





تصویر ۴- فضاهای خانه باکوچی (حاجی قاسمی، سلطانزاده و موسوی روضاتی، ۱۳۷۵)

مشخصات کالبدی خانه باکوچی: چنانچه پیشتر گفته شد، یکی از اهداف این پژوهش بهینه‌سازی برخی خصوصیات کالبدی خانه‌های گودال باغچه است. این خصوصیات شامل، نسبت طول به عرض گودال باغچه، عمق گودال باغچه، مقاومت حرارتی سطحی جداره‌ها و درصد پنجره به دیوار است. در ادامه با بررسی نقشه‌ها، این مشخصات در خانه باکوچی استخراج شده‌اند.

- **نسبت طول به عرض حیاط:** حیاط خانه باکوچی در دو طبقه ساخته شده است. حیاط طبقه اول یعنی حیاط اصلی به صورت راهی باریک، در اطراف حیاط زیرزمین یعنی گودال باغچه چرخیده است. مجموع این دو حیاط با هم در پلان به صورت یک حیاط مرکزی دیده می‌شود. در جدول شماره‌ی یک، نسبت‌های مربوط به حیاط مرکزی بدون در نظر گرفتن اختلاف ارتفاع استخراج شده است.

جدول ۱- طول و عرض حیاط مرکزی خانه باکوچی

مقدار	ویژگی
۲۵ متر	طول حیاط مرکزی
۱۸ متر	عرض حیاط مرکزی
۱/۴	نسبت طول به عرض حیاط مرکزی

- **عمق گودال باغچه:** چنانچه کد ارتفاعی حیاط اصلی خانه، صفر در نظر گرفته شود، گودال باغچه خانه‌ی باکوچی، در ارتفاع منفی چهار و نیم قرار گرفته است. در این پژوهش منظور از عمق گودال باغچه در واقع میزان فرورفتن آن در زمین است و به این ترتیب، گودال باغچه خانه‌ی باکوچی تماماً در درون خاک فرورفته است.

- **مقاومت حرارتی سطحی جداره:** مقدار مقاومت حرارتی سطحی جداره، با استفاده از ضریب هدایت حرارتی و ضخامت دیوار محاسبه می‌شود. در این پژوهش بهینه‌سازی این مقدار، با تغییر دادن ضخامت دیوارها و ثابت نگه‌داشتن ضریب هدایت حرارتی انجام شده است. از آنجاکه جنس تمامی جداره‌های خانه از خشت و گل است، با در نظر گرفتن ضخامت متوسط دیوارها، مقاومت حرارتی سطحی جداره در وضعیت موجود ساختمان در این قسمت محاسبه می‌شود. محاسبات این مقدار مطابق روش ارائه شده در پیوست ششم مقررات ملی مبحث ۱۹ انجام شده است.

جدول ۲- محاسبه‌ی مقاومت سطحی جداره در خانه باکوچی طبق مقررات ملی مبحث ۱۹

مقادیر فیزیکی	تعیین کمیت	واحد	عدد
ضخامت لایه	متوسط ضخامت جداره‌ها	متر	۰/۶
ضریب هدایت حرارتی	مطابق پیوست ۷ مقررات ملی مبحث ۱۹	وات/ متر، کلوبین	۱/۱
مقاومت حرارتی سطحی	ضخامت/ ضریب هدایت حرارت	متر مربع، کلوبین/ وات	۰/۵۵

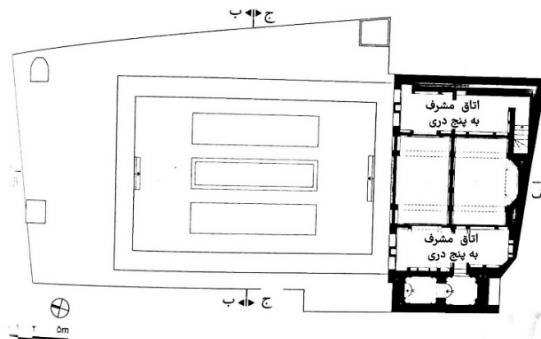
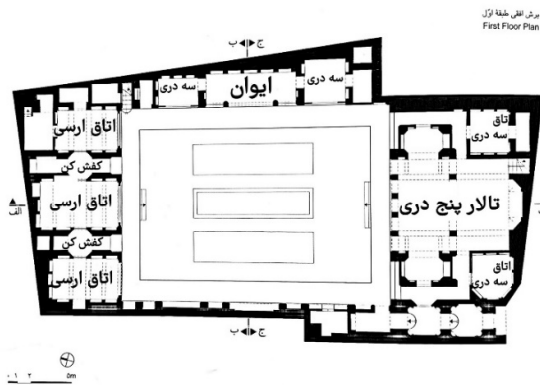
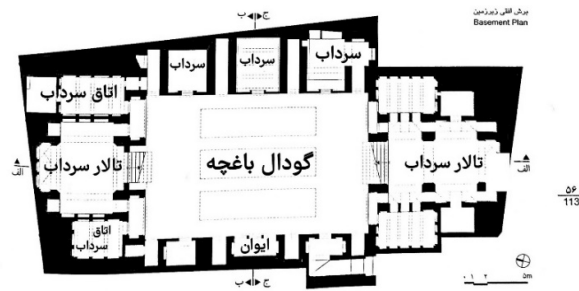
- **نسبت پنجره به دیوار:** در آثار تاریخی معماری ایران، نورگیرهای متنوعی برای تامین شرایط آسایش حرارتی و روشنایی فضاهای داخلی وجود دارد که اصلی‌ترین آنها در، پنجره‌ها و ارسی‌ها هستند. سطوح نورگذر در دیوارهای رو به تابش خورشید (به‌طور خاص، دیوارهای رو به جنوب)، منبع مناسبی برای تامین شرایط گرمایی در فصل سرد محسوب می‌شوند (فلاح، ۱۳۹۸). در این



پژوهش به دلیل اهمیت پنجره‌های رو به نور جنوب (جبهه‌ی شمالی)، نسبت پنجره به دیوار تنها در این جداره‌ها بررسی و بهینه‌سازی می‌شود. برای محاسبه، ابتدا نمای جنوبی هر طبقه از خانه به قسمت‌های کوچک‌تر تبدیل شد و نسبت پنجره به دیوار در هر قسمت محاسبه شد. در انتها، از محاسبه مجموع سطح پنجره‌ها و تقسیم آن به مجموع سطح نما، نسبت پنجره به دیوار کل نما به دست آمد. این عدد برای نمای جنوبی در خانه باکوچی، ۲۵/۱ درصد است.

۴-۳-۲- خانه‌ی تهامی

خانه‌ی تهامی در نزدیکی خانه‌ی باکوچی واقع شده است. نقشه‌ی این خانه نیز همچون خانه‌ی باکوچی به صورت حیاط مرکزی و حیاط اصلی آن یک گودال باغچه است. کشیدگی خانه به صورت شمالی-جنوبی است و فضاهایی در جبهه‌های شمالی، جنوبی و شرقی آن قرار گرفته و در جبهه‌ی غربی تنها برای ایجاد یک پارچگی نما، طاق نماهایی ایجاد شده است. اصلی‌ترین فضاهای این خانه در بخش جنوبی قرار دارد. در این خانه‌ی دو طبقه، حیاط طبقه‌ی اول پایین‌تر از سطح معبر عمومی قرار گرفته است. بر این اساس حیاط اصلی خانه به صورت گودال باغچه در آمده که در هر چهار طرف آن فضاهای گوناگونی ساخته شده است. دسترسی به فضاها در این طبقه از طریق گودال باغچه انجام می‌شود. طبقه‌ی بالا نسبت به طبقه‌ی پایین کمی عقب‌تر نشسته و بدین سان سطح باریکی پیرامون حیاط پدید آمده که ضمن اینکه نقش ارتباطی را در طبقه بالا ایفا می‌کند، موجب وسعت یافت و دل‌باز شدن فضای باز خانه نیز شده است (حاجی قاسمی، سلطانزاده و موسوی روضاتی، ۱۳۷۵). تصویر ۵ فضاهای خانه‌ی تهامی را معرفی می‌کند.



تصویر ۵- معرفی فضاهای خانه‌ی تهامی (حاجی قاسمی، سلطانزاده و موسوی روضاتی، ۱۳۷۵)

مشخصات کالبدی خانه‌ی تهامی با توجه به پارامترهای معرفی شده، در ادامه ارائه می‌شود.

- **نسبت طول به عرض گودال باغچه:** هم‌چون خانه‌ی باکوچی، برای بهینه‌سازی، لازم است ابعاد و نسبت طول به عرض حیاط مرکزی، مشخص شود. در بهینه‌سازی، ابعاد حیاط، با تغییر طول درحیاط مرکزی، ابعاد گودال باغچه نیز تغییر می‌کند. مطابق جدول ۳، در این خانه نسبت طول به عرض حیاط مرکزی، $1/3$ است.

جدول ۳- طول و عرض حیاط مرکزی خانه تهامی

ویژگی	مقدار
طول حیاط مرکزی	۳۲ متر
عرض حیاط مرکزی	۲۴ متر
نسبت طول به عرض حیاط مرکزی	$1/3$

- **عمق گودال باغچه:** گودال باغچه‌ی خانه تهامی، نسبت به معبر اصلی کاملاً درون زمین فرو رفته و این بدان معنا است که طبقه‌ی اول این خانه، کاملاً درون زمین و اصطلاح زیرزمینی است. در شبیه‌سازی این خانه، برای وضع موجود، طبقه‌ی اول کاملاً مجاور زمین در نظر گرفته شده است.
- **مقاومت حرارتی سطحی جداره:** برای بهینه‌سازی مقاومت حرارتی سطحی جداره، دیتیل دیوار در خانه تهامی نیز مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق مدارک، در این خانه نیز هم‌چون خانه‌ی باکوچی، جنس دیوارها خستی و ضخامت آن‌ها به‌طور متوسط، ۶۰ سانتی‌متر است. برای تغییر مقاومت حرارتی در شبیه‌سازی، ضخامت دیوارها تغییر داده شده است. در جدول ۴، محاسبات مطابق مبحث ۱۹ مقررات ملی انجام شده است.

جدول ۴- محاسبه مقاومت حرارتی سطحی جداره خانه تهامی مطابق مقررات ملی مبحث ۱۹

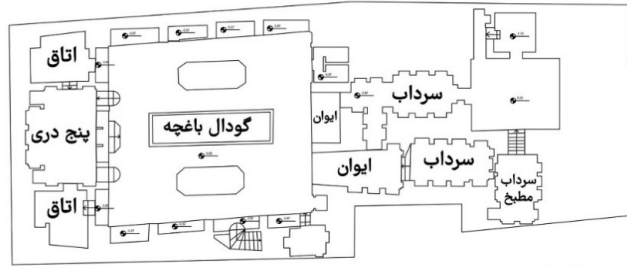
مقادیر فیزیکی	تعیین کمیّت	واحد	عدد
ضخامت لایه	متوسط ضخامت جداره ها	متر	۰/۶
ضریب هدایت حرارتی	مطابق پیوست ۷ مقررات ملی مبحث ۱۹	وات / متر، کلوین	۱/۱
مقاومت حرارتی سطحی	ضخامت/ضریب هدایت حرارت	متر مربع، کلوین / وات	۰/۵۵

- **نسبت پنجره به دیوار:** در محاسبه نسبت پنجره به دیوار خانه تهامی نیز هم‌چون خانه‌ی باکوچی عمل شد. بدین منظور، نخست نمای هر طبقه به قسمت‌های کوچک‌تر تقسیم و نسبت پنجره به دیوار در هر قسمت تعیین شد. پس از آن با محاسبه‌ی مجموع مساحت پنجره‌ها در قسمت‌ها و طبقات با یک‌دیگر و تقسیم آن بر مجموع نماها، عدد نسبت پنجره به دیوار در نمای رو به جنوب این خانه مشخص شد. مطابق نتایج، نسبت پنجره به دیوار نمای رو به جنوب در این خانه بیشتر از خانه باکوچی و مقدار $39/30$ درصد است.

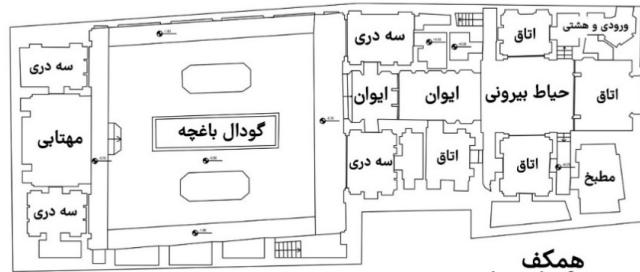
۴-۳-۳- خانه‌ی تاج

نقشه‌ی این خانه، هم‌چون خانه‌های باکوچی و تهامی براساس حیاط مرکزی شکل گرفته و ارتباط فضاها از طریق حیاط انجام می‌شود. حیاط این خانه نیز هم‌چون دو خانه‌ی دیگر در دو طبقه است. بخش اصلی حیاط پایین‌تر از سطح معبر قرار گرفته و گودال باغچه است. حیاط در طبقه‌ی بالاتر یعنی طبقه‌ی اول به‌صورت راهرو باریک دور گودال باغچه چرخیده و فضاها را به هم مرتبط کرده است. تصویر ۷، فضاها‌ی خانه-ی تاج را معرفی می‌کند.





زیرزمین



همکف

تصویر ۶- معرفی فضاهای خانه‌ی تاج (ترسیم: نویسندگان)

در ادامه به مشخصات کلیدی خانه تاج اشاره شده است.

- **نسبت طول به عرض گودال باغچه:** حیاط مرکزی خانه‌ی تاج به نسبت دو خانه‌ی دیگر کوچک‌تر است و شکل آن بیشتر مربعی شکل است. در این خانه نیز نسبت طول به عرض حیاط به‌عنوان معیار در بهینه‌سازی اندازه‌گیری شده است. در این خانه نسبت طول به عرض حیاط مرکزی ۱/۱ است (جدول ۵).

جدول ۵- نسبت طول به عرض حیاط مرکزی در خانه‌ی تاج

مقدار	ویژگی
۱۸/۵ متر	طول حیاط مرکزی
۱۶/۵ متر	عرض حیاط مرکزی
۱/۱	نسبت طول به عرض حیاط مرکزی

- **عمق گودال باغچه:** گودال باغچه خانه‌ی تاج، مانند دو خانه‌ی دیگر کاملاً در زمین فرو رفته و طبقه‌ی اول، زیرزمینی و در مجاورت خاک قرار دارد. عمق فرورفتن خانه در زمین، به اندازه‌ی یک طبقه است. در شبیه‌سازی وضع موجود این خانه، تمامی دیوارهای خارجی طبقه‌ی اول، در شرایط مجاورت با خاک در نظر گرفته شده است.
- **مقاومت حرارتی سطحی جداره:** جنس دیوار در این خانه مانند دو خانه‌ی دیگر، خشتی است و ضخامت متوسط دیوارها ۶۰ سانتی‌متر است. برای بهینه‌سازی مقاومت حرارتی سطحی جداره، برای دیوارها ضخامت‌های مختلف در نظر گرفته شد و جنس آنها ثابت نگه داشته شده است.

جدول ۶- محاسبه‌ی مقاومت حرارتی سطحی جداره‌ی خانه‌ی تاج مطابق مقررات ملی ساختمان، میحث ۱۹

مقادیر فیزیکی	تعیین کمیت	واحد	عدد
ضخامت لایه	متوسط ضخامت جداره‌ها	متر	۰/۶
ضریب هدایت حرارتی	مطابق پیوست ۷ مقررات ملی میحث ۱۹	وات/متر، کلوین	۱/۱
مقاومت حرارتی سطحی	ضخامت/ضریب هدایت حرارت	متر مربع، کلوین/وات	۰/۵۵

- **نسبت پنجره به دیوار:** محاسبه درصد نسبت پنجره به دیوار در جداره‌ی رو به جنوب، در خانه‌ی تاج نیز با تقسیم نمای هر طبقه به قسمت‌های کوچک‌تر و محاسبه درصد در هر قسمت، و در انتها محاسبه‌ی نسبت مجموع مساحت‌های پنجره‌ها و تقسیم آن بر مجموع مساحت نما انجام شد. نسبت پنجره به دیوار این نما در خانه تاج ۲۵/۸۷ درصد است.

۴-۴- شبیه‌سازی

در این پژوهش برای تبدیل به مدل انرژی از لیدی باگ تولز ای.بی.تی. نسخه ۱.۳ و هانی بی. نسخه ال.تی.بی. ورژن ۱.۳ استفاده شده است. تحلیل انرژی با انرژی پلاس ۹.۴ صورت گرفته است. برای آنالیز انرژی در هانی بی.، اطلاعات باید به برای ورود به موتور انرژی پلاس آماده شوند. برای این کار ابتدا با استفاده از مقادیر استاندارد به شکل حجمی و هندسی در راینو و یا به صورت پارامتریک در گرس‌هاپر فضاها طراحی و سپس به زون تبدیل می‌شوند. بدین منظور، فضاها ابتدا به سه دسته کلی تقسیم شدند. نخستین گروه، فضاهای بسته‌ای هستند که فضای زندگی به حساب می‌آیند و افراد خانواده در آن‌ها ساکن هستند. در این فضاها به دلیل زیست افراد، دمای هوا باید در محدوده‌ی آسایش قرار داشته باشد. به همین منظور، این فضاها، کنترل شده^۵ در نظر گرفته شده‌اند.



تصویر ۷- فضاهای گروه اول خانه‌ها (ترسیم: نویسندگان)

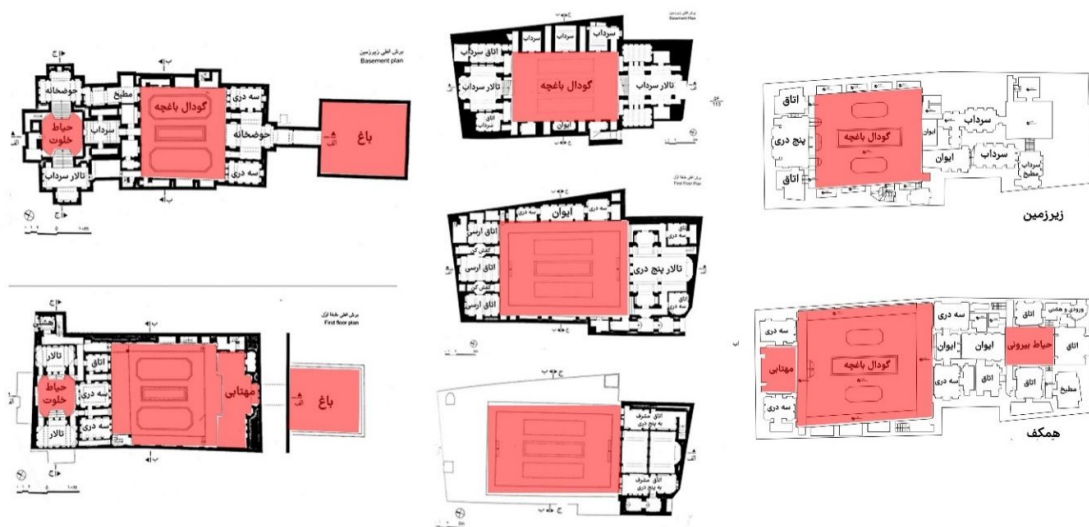
گروه بعدی فضاهای بسته‌ای هستند که محیط زندگی به حساب نمی‌آیند و فضاهای عبوری میان فضاهای اصلی هستند. این فضاها شامل، راهروهای بین فضاها، کفش‌کن‌ها، حوض خانه‌ها و هر فضای دیگری هستند که فضای اصلی زیست نیستند و بیشتر برای بالا بردن کیفیت و یا اتصال این فضاها طراحی شده‌اند. از این رو دمای آسایش در آنها چندان اهمیتی ندارد و بیشتر از آنکه برای توقف باشند، فضایی برای عبور به حساب می‌آیند. در شبیه‌سازی انرژی، این فضاها کنترل نشده^۶ در نظر گرفته شده‌اند.



تصویر ۸- فضاهای گروه دوم خانه‌ها (ترسیم: نویسندگان)



گروه سوم فضاهای باز هستند. این فضاها در واقع بر اثر قرارگیری فضاهای بسته در کنار هم شکل می‌گیرند. در معماری سنتی ایران، این دسته از فضاها بسیار استفاده شده‌اند. این فضاها شامل، حیاطها، باغها، مهتابی‌ها و هر فضای باز دیگری هستند که در بازی پر و خالی حجم در طراحی خانه‌ها به‌وجود آمده‌اند. این فضاها، در شبیه‌سازی، فضای بیرون خانه در نظر گرفته می‌شوند.



تصویر ۹- فضاهای گروه سوم خانه‌ها (ترسیم: نویسندگان)

در ترسیم اولیه، فضایی که بیرون‌زدگی دارند، به‌صورت زون‌های جدا ترسیم شده و در مدل‌سازی انرژی، حریم بین این فضاها پرده‌ی هوای^۲ تعریف می‌شود تا محاسبات تبادلات حرارتی میان آن‌ها به‌گونه‌ای صورت گیرد که پیوستگی فضایی حفظ شود. برای مدل‌سازی فرو رفتن در خاک، مقطع هر خانه به دو تقسیم شده است. طبقه‌ی بالا همیشه روی خاک قرار می‌گیرد. در طبقه‌ی پایین برای هر خانه سه حالت کاملاً درون خاک، نیمه در خاک، و کاملاً خاک در نظر گرفته شده است.

در طراحی تناسبات حیاط، عرض حیاط، ترسیم شد و برای تعیین فاصله دو قسمت جنوبی و شمالی آن، سه حالت مساوی با عرض ساختمان، ۱/۵ برابر عرض ساختمان و دو برابر آن در نظر گرفته شد. طول و عرض معیار در مدل‌سازی طول و عرض حیاط طبقه‌ی بالا است. نسبت پنجره به دیوار تنها در بخش رو به جنوب، یعنی جبهه‌ی شمالی ساختمان، متغیر طراحی تعریف و برای آن سه عدد ۲۵ درصد، ۳۵ درصد و ۴۵ درصد در نظر گرفته شد. در مدل‌سازی، عدد ضریب هدایت حرارتی خشت از مقررات ملی ساختمان مبحث ۱۹ استخراج شد (۱/۱ وات/متر، کلوین) و برای ضخامت دیوارهای خارجی، سه حالت ۰/۴ متر، ۰/۶ متر و ۰/۸ متر در نظر گرفته شد. سایر مشخصات دیوارها نیز مطابق اعداد موجود برای خشت وارد شده است. در تنظیمات خروجی، مقدار بار تجهیزات الکتریکی، صفر در نظر گرفته و به‌غیر از آن سایر پارامترها مطابق برنامه‌ی مسکونی میان مرتبه در نظر گرفته شد. از آنجایی که هدف اصلی این پژوهش، مقایسه دو حالت با یک‌دیگر است و مقدار دقیق مصرف انرژی در آن‌ها موضوع مورد بحث نیست، برنامه‌ی پیش‌فرض مسکونی میان مرتبه‌ی هانی بی. برای فضاها در نظر گرفته شده است. استخراج برنامه‌ی دقیق زیست در خانه‌های سنتی مطابق سبک زندگی آن دوران، برای محاسبه‌ی عدد دقیق مصرف انرژی، می‌تواند موضوعی جداگانه برای پژوهش در آینده باشد. درجه‌ی حرارت معیار باز و بسته شدن پنجره‌ها در این مدل، ۲۲ به‌عنوان دمای مینیمم و ۲۷ به‌عنوان دمای ماکسیمم است. مبنای انتخاب این اعداد، تصویر ۱۰ است. در این نمودار، در محور ایکس دمای ماهیانه و در محور ایگرگ، آسایش تطبیقی مطابق اقلیم کاشان قرار گرفته است. مطابق این نمودار، در هشتاد درصد مواقع، شرایط آسایش تقریباً بین ۲۲ تا ۲۷ درجه‌ی سانتی‌گراد است.



Kashan AP

تصویر ۱۰- نمودار آسایش تطبیقی و دمای ماهیانه

نتایج به دست آمده از محاسبات، ساعتی هستند. بهینه‌سازی با پلاگین تی.تی. تول باکس^۸ انجام گرفته است. برای این کار، ابتدا متغیرها، شامل تناسبات حیاط، عمق ساخت‌وساز، نسبت پنجره به دیوار ضلع شمالی و ضخامت دیوار، در مولفه^۹ کالیبری ایتربتور^{۱۰} تعریف شدند. سپس خروجی‌های مورد نظر، با استفاده از همان مولفه تعریف شدند. خروجی‌ها شامل شدت مصرف انرژی، مصارف گرمایش، سرمایش و تجهیزات روشنایی، مجموع مساحت ساختمان در هر حالت، دریافت خورشیدی، نفوذ ناخواسته و تهویه طبیعی هستند.

۵- یافته‌ها و بحث

۵-۱- مصرف انرژی

در جداول شماره ۶، ۷ و ۸ نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشاهده می‌شود. همچنین در این جداول، درصد صرفه‌جویی حاصل از وجود گودال باغچه در خانه‌ها در مقایسه با حالت حیاط مرکزی و بدون گودال باغچه محاسبه شده است. در قسمت آبی رنگ تصویر هر حالت، رنگ آبی در طبقه‌ی پایین به معنای مجاورت با هوا و رنگ قهوه‌ای به معنای مجاورت با خاک است.

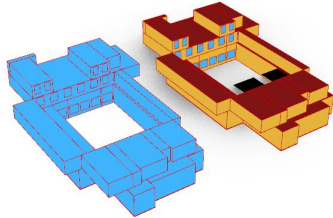
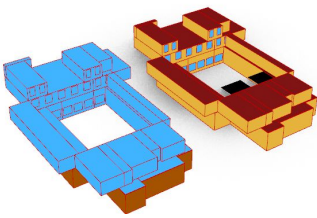
جدول ۶- نتایج حاصل از شبیه‌سازی خانه‌ی باکوچی

ویژگی	وضعیت فرضی		وضعیت موجود	
	تصویر	تصویر	تصویر	تصویر
بارهای وارد بر ساختمان	تابش ^{۱۱} (کیلووات ساعت) نفوذ ناخواسته ^{۱۲} (کیلووات ساعت) بار تهویه طبیعی ^{۱۳} (کیلووات ساعت)	۲۶۴۸/۴۱ -۲۰۲۳۴/۵۱ ۴۴۶۲۰/۳۵	۲۶۴۸/۴۱ -۱۸۱۲۵/۷۲ ۴۳۵۰۲/۵۸	۲۶۴۸/۴۱ -۱۸۱۲۵/۷۲ ۴۳۵۰۲/۵۸
مصرف انرژی	انرژی گرمایشی ^{۱۴} (کیلووات ساعت) انرژی سرمایشی ^{۱۵} (کیلووات ساعت) شدت مصرف انرژی ^{۱۶} (کیلووات ساعت/متر مربع)	۱۲۹/۶۲۶ ۱۶۱/۱۲۱ ۳۰۲/۷۷	۱۲۶/۸۸۵ ۱۴۳/۲۰۴ ۲۸۲/۱۱۲	۱۲۶/۸۸۵ ۱۴۳/۲۰۴ ۲۸۲/۱۱۲
	درصد کاهش بر اثر احداث گودال باغچه در خانه			



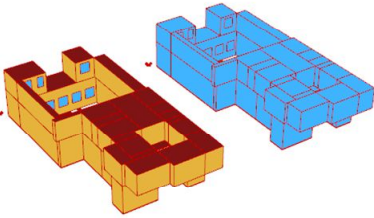
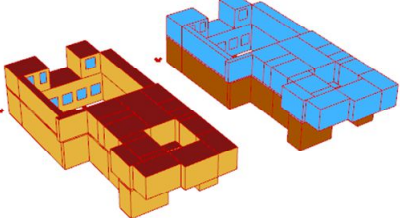
با توجه به جدول ۶، در بخش بارهای حرارتی وارد بر ساختمان، بیشترین بار وارد شده بر ساختمان از تهویه طبیعی و پس از آن نفوذ ناخواسته است. مقدار دریافت خورشیدی نسبت به دو مقدار دیگر اندک و این احتمالاً به دلیل فرم ویژه ساختمان و سایه‌اندازی جداره‌ها بر روی یک‌دیگر است. اتلاف ساختمان در بخش نفوذ ناخواسته و تهویه طبیعی با فرو رفتن در خاک کمتر شده است. این کاهش که احتمالاً به دلیل مجاورت با خاک اتفاق افتاده، بیشتر در بخش نفوذ ناخواسته و به میزان ۱۰/۶۵ درصد بوده است. به دلیل سایه‌اندازی قسمت‌های مختلف ساختمان روی هم در ساختمان‌های حیاط مرکزی، درون خاک یا بیرون بودن ساختمان تأثیری در دریافت تابشی آن ندارد. مطابق پیش‌بینی، بیشترین مصرف انرژی ساختمان در بخش سرمایش و پس آن مصرف گرمایشی است. بیشترین مقدار صرفه‌جویی نیز به میزان ۱۲/۴۶ درصد در بخش سرمایش بوده است. همچنین به صورت کلی، ساخت این خانه به صورت گودال باغچه باعث کاهش ۶/۵۴ درصدی در شدت مصرف انرژی شده است.

جدول ۷- نتایج حاصل از شبیه‌سازی خانه تهامی

ویژگی	وضعیت فرضی	وضعیت موجود	
تصویر			
بارهای وارد بر ساختمان	تابش (کیلووات ساعت)	۷۲۲۵/۷۸	۷۲۲۷/۰۲
	نفوذ ناخواسته (کیلووات ساعت)	-۲۴۳۲۰/۶۶	-۲۱۷۲۸/۹۶
	بار تهویه طبیعی (کیلووات ساعت)	۸۵۴۵۳/۷۷	۸۴۱۲۳/۹۵
مصرف انرژی	انرژی گرمایشی (کیلووات ساعت)	۱۵۳/۵۷	۱۵۳/۰۶
	انرژی سرمایشی (کیلووات ساعت)	۱۶۷/۵۸	۱۴۶/۶۹
	شدت مصرف انرژی (کیلووات ساعت / متر مربع)	۳۳۷/۳۱	۳۰۵/۹۰
درصد کاهش بر اثر احداث گودال باغچه در خانه			۰
			٪۱۰/۴۲
			٪۲/۵
			٪۲/۱۱
			٪۱۱/۱۲
			٪۶/۸۲

مطابق جدول ۷، بیشترین بار وارد بر خانه تهامی، بار تهویه طبیعی و پس از آن بار نفوذ ناخواسته است. مانند خانه باکوچی در این خانه نیز دریافت تابشی بسیار کمتر از بارهای حرارتی دیگر است. نتایج نشان می‌دهد، هم‌چون خانه‌ی باکوچی، در این خانه نیز کاهش بار حرارتی در وضعیت فعلی ساختمان نسبت به حالت فرضی، در بخش نفوذ ناخواسته بیشتر از بخش تهویه طبیعی است. دریافت تابشی نیز تقریباً برابر با حالت روی خاک است. مصرف انرژی خانه‌ی تهامی در بخش سرمایش و گرمایش در هر دو حالت تقریباً با هم برابر است. مقایسه‌ی نتایج حالت فرضی با وضع موجود نشان می‌دهد ساختمان به دلیل فرو رفتن در خاک، نسبت به حالت بیرون خاک در بخش سرمایش به میزان ۱۱/۱۲ درصد صرفه‌جویی داشته است. اما در بخش گرمایش مصرف انرژی تغییر چندانی نداشته است. همچنین با احداث بنا در دل خاک ۶/۸۲ درصد در شدت مصرف انرژی صرفه‌جویی شده است.

جدول ۸- نتایج حاصل از شبیه‌سازی خانه‌ی تاج

ویژگی	وضعیت فرضی	وضعیت موجود	
تصویر			
درصد کاهش بر اثر احداث گودال باغچه در خانه			

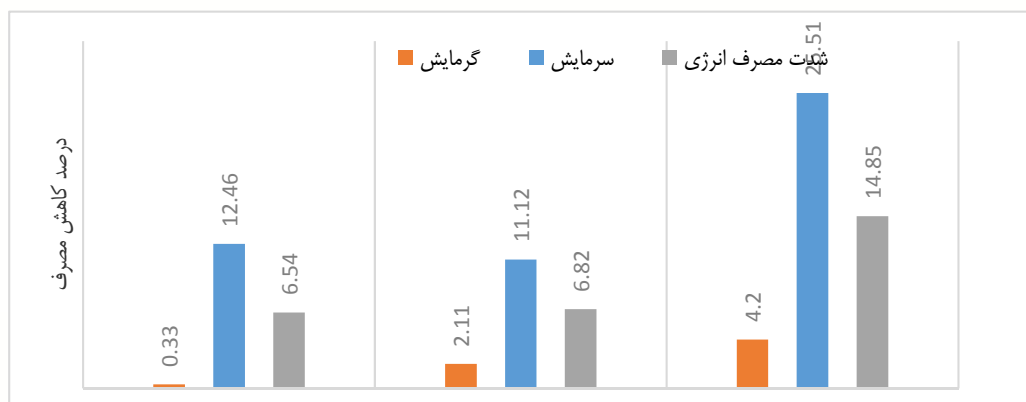
بارهای وارد بر ساختمان	تابش (کیلووات ساعت)	۱۸۵۱/۳۳	۱۸۵۸
	نفوذ ناخواسته (کیلووات ساعت)	-۱۱۰۹۳/۰۲	-۷۵۸۶/۸۱
مصرف انرژی	بار تهویه طبیعی (کیلووات ساعت)	۳۳۵۲۷/۵۰	۳۲۲۰۴/۷۶
	انرژی گرمایشی (کیلووات ساعت)	۱۵۹/۰۳	۱۵۲/۳۴
	انرژی سرمایشی (کیلووات ساعت)	۱۷۵/۶۸	۱۳۰/۸۵
	شدت مصرف انرژی (کیلووات ساعت/ متر مربع)	۳۴۷/۵۱	۲۹۵/۹۰
			۰
			٪۳۱/۶۰
			٪۳/۹۰
			٪۴/۲۰
			٪۲۵/۵۱
			٪۸۵/۱۴

جدول ۸ نشان می‌دهد، بیشترین بار وارد شده بر ساختمان از طریق تهویه‌ی طبیعی و پس از آن نفوذ ناخواسته است. در این خانه نیز مانند دو خانه‌ی دیگر، مقدار دریافت خورشیدی نسبت به سایر بارها اندک است. اتلاف ساختمان در بخش نفوذ ناخواسته و تهویه‌ی طبیعی با فرورفتن در خاک کمتر شده است. این کاهش بیشتر در بخش نفوذ ناخواسته بوده است. در بخش دریافت تابشی، در هر دو حالت تقریباً مشابه یک‌دیگر بوده است.

نتایج نشان می‌دهد، بر خلاف دو خانه‌ی دیگر در وضعیت فعلی این خانه، مصرف گرمایشی بیش از سرمایشی است. مقایسه‌ی نتایج موجود از شبیه‌سازی حالت موجود ساختمان با حالت فرضی نشان می‌دهد که ساختمان درون خاک در بخش سرمایش و گرمایش صرفه‌جویی داشته است. این صرفه‌جویی بیشتر در بخش سرمایش و به میزان ۲۵/۵۱ درصد بوده است. صرفه‌جویی در گرمایش نیز در این خانه بیش از خانه‌های قبلی است.

میزان صرفه‌جویی در شدت مصرف انرژی ۱۴/۸۵ درصد و بیشتر از دو خانه‌ی دیگر بوده است. ممکن است علت بیشتر بودن صرفه‌جویی در این خانه، پلان متراکم‌تر این خانه و ارتباط بیشتر فضاهای زیرزمین با خاک باشد. تصویر ۱۱، کاهش مصرف خانه‌ها در بخش‌های مختلف را نشان می‌دهد.

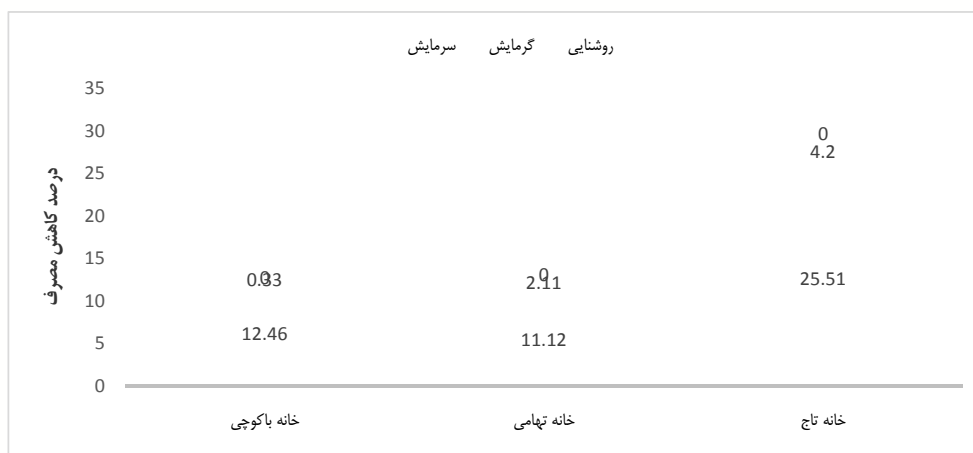
مطابق این نمودار در هر سه خانه بیشترین میزان صرفه‌جویی در بخش انرژی سرمایشی بوده و میزان صرفه‌جویی گرمایشی در هر سه خانه اندک (کمتر از ۵ درصد) بوده است. مقدار کاهش مصرف سرمایشی در خانه‌ی تاج بیشترین مقدار و تقریباً دو برابر دو خانه‌ی دیگر بوده است. میزان کاهش مصرف گرمایشی و شدت مصرف انرژی نیز در این خانه از دو خانه‌ی دیگر بیشتر است.



تصویر ۱۱ - مقایسه‌ی کاهش مصرف خانه‌ها در بخش‌های مختلف



تصویر ۱۲ مجموع کاهش مصرف در سه خانه را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار، میزان کاهش مصرف تجهیزات روشنایی در هر سه خانه، صفر بوده است. مجموع کاهش مصرف در خانه‌ی باکوچی و تهامی در حدود ۱۳ درصد و تقریباً مشابه یک‌دیگر بوده است. کاهش مصرف کلی انرژی در خانه تاج در حدود سی درصد و حدوداً ۲.۵ برابر دو خانه دیگر بوده است.



تصویر ۱۲- مجموع کاهش مصرف در خانه‌ها

در جدول ۹، میانگین درصد صرفه‌جویی سه خانه دارای گودال باغچه در بخش‌های مختلف محاسبه شده است. مطابق این نتایج با ساخت گودال باغچه در اقلیم گرم‌وخشک به‌صورت میانگین ۲/۲۱ درصد در انرژی گرمایی صرفه‌جویی شده است. میزان صرفه‌جویی میانگین در سرمایش ۱۶/۳۶ درصد و مجموع صرفه‌جویی ۱۸/۵۷ درصد بوده است. همچنین ساخت گودال باغچه در این اقلیم، به‌صورت میانگین باعث صرفه‌جویی ۹/۴ درصدی در شدت مصرف انرژی شده است.

جدول ۹- میانگین نتایج سه خانه

خانه	درصد صرفه‌جویی %		
	گرمایش	سرمایش	مجموع
باکوچی	۰/۳۳	۱۲/۴۶	۱۲/۷۹
تهامی	۲/۱۱	۱۱/۱۲	۱۳/۲۳
تاج	۴/۲	۲۵/۵۱	۲۹/۷۱
میانگین	۲/۲۱	۱۶/۳۶	۱۸/۵۷

۲-۵- بهینه‌سازی

در بخش بهینه‌سازی، مصرف انرژی هر بنا، در ۸۱ سناریو بررسی و محاسبه شد. از بین آن‌ها، سناریو با کمترین شدت مصرف انرژی به‌عنوان حالت بهینه هر خانه انتخاب شد. نتایج سناریوهای بهینه در هر سه خانه در جدول ۱۰ گردآوری شده است. میزان کاهش مصرف در این جدول نسبت به وضعیت موجود خانه‌ها محاسبه شده است. مطابق این نتایج تاثیر گودال باغچه بر مصرف انرژی سرمایشی بیشتر از گرمایشی است.

جدول ۱۰- نتایج بهینه‌سازی

خانه	ملاک سنجش	سنار یو بهینه	خصوصیات				درصد کاهش مصرف %	
			نسبت طول به عرض حیاط	عمق گودال باغچه	ضخامت دیوار	نسبت پنجره به دیوار	شدت مصرف انرژی	سرمایش
خانه باکوچی	شدت مصرف انرژی	۶۳	۲	کامل در خاک	۰/۸ متر	۲۵%	۷/۶۸	۷/۱۳
	سرمایش	۶۳	۲	کامل در خاک	۰/۸ متر	۲۵%	۷/۶۸	۷/۱۳
	گرمایش	۶۰	۲	نیمه در خاک	۰/۸ متر	۲۵%	۵/۴۸	۴/۱۸
خانه تهامی	شدت مصرف انرژی	۶۳	۲	کامل در خاک	۰/۸ متر	۲۵%	۱۵	۲۶/۳۶
	سرمایش	۶۳	۲	کامل در خاک	۰/۸ متر	۲۵%	۱۵	۲۶/۳۶
	گرمایش	۵۷	۲	کامل بیرون خاک	۰/۸ متر	۲۵%	۹/۵۲	۱۴/۰۱
خانه تاج	شدت مصرف انرژی	۶۳	۲	کامل در خاک	۰/۸ متر	۲۵%	۱۱/۳۶	۱۵/۹۴
	سرمایش	۶۳	۲	کامل در خاک	۰/۸ متر	۲۵%	۱۱/۳۶	۱۵/۹۴
	گرمایش	۶۰	۲	نیمه درون خاک	۰/۸ متر	۲۵%	۷/۳۸	۶/۵

۶- نتیجه‌گیری

بحران انرژی یکی از مهم‌ترین چالش‌های امروز جهان و کشور است. یکی از بخش‌های مهم مصرف‌کننده انرژی بخش ساختمان است. نیاز انرژی در این بخش به‌خصوص در اقلیم گرم‌وخشک به دلیل شرایط سخت زیست‌نیازمند بازنگری و در نظر گرفتن تمهیدات ویژه برای کاهش است. در این مقاله، تلاش شده با جستجو درباره‌ی تاثیر یک عنصر متداول در معماری گذشته‌ی اقلیم گرم و خشک ایران در کاهش مصرف انرژی قدمی در مسیر احیای این عنصر در معماری امروز این مناطق برداشته شود.

بدین‌منظور سه مورد از خانه‌های دارای گودال باغچه در شهر کاشان، که در اقلیم گرم‌وخشک ایران قرار دارد، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی این خانه‌ها در دو حالت دارای گودال باغچه و بدون گودال باغچه نشان می‌دهد، وجود این عنصر در خانه‌ها به صورت میانگین باعث صرفه‌جویی ۱۶/۳۶ درصدی در نیاز سرمایشی ساختمان، که نیاز اصلی این اقلیم می‌باشد، شده است. مجموع صرفه‌جویی گرمایشی و سرمایشی در سه خانه ۱۸/۵۷ درصد و به‌صورت کلی میانگین صرفه‌جویی در شدت مصرف انرژی ۹/۴ بوده است.

نتایج نشان می‌دهد ساخت گودال باغچه در اقلیم گرم‌وخشک می‌تواند در کاهش انرژی مصرفی ساختمان در این اقلیم تاثیرگذار باشد. در قدم بعد برای رسیدن به کاهش مصرف انرژی هرچه بیشتر در خانه‌های گودال باغچه، سناریوهای دیگری که در آنها برخی خصوصیات کالبدی خانه‌ها تغییر کردند، مورد بررسی قرار گرفتند.

مطابق نتایج به‌صورت میانگین، با ساخت ساختمان به‌صورت گودال باغچه با خصوصیات بهینه شده می‌توان به صرفه‌جویی ۴۳/۵۱ درصدی در شدت مصرف انرژی نسبت به ساختمان‌های متداول امروزی ساخته شده روی زمین رسید. میانگین مشخصات و میزان کاهش مصرف در سناریوهای بهینه، در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۱- میانگین نتایج بهینه‌سازی

ویژگی	مقدار
نسبت طول به عرض حیاط مرکزی	۲
میزان فرو رفتن گودال باغچه در خاک	کاملاً در خاک
نسبت پنجره به دیوار	۲۵%
مقاومت حرارتی سطحی	-/۷۲
درصد صرفه‌جویی در سرمایش نسبت به وضع موجود	۱۶/۳۲
درصد صرفه‌جویی در گرمایش نسبت به وضع موجود	۷/۲۱
درصد صرفه‌جویی در شدت مصرف انرژی نسبت به وضع موجود	۳۴/۱۱



با این وجود این تنها قدم نخست است و در اینجا بررسی عملکرد حرارتی گودال باغچه بدون در نظر گرفتن تاثیر خرد اقلیم حیات مرکزی انجام شده است. همچنین رفتار ساکنین و محدوده‌ی آسایش حرارتی آنها نیز مورد توجه قرار نگرفته است. از سوی دیگر بررسی هم‌زمان جنبه‌های اقتصادی ساخت‌وساز در مدل‌های بهینه‌ی حرارتی، می‌تواند برای انتخاب نمونه‌ی کاربردی برای ساخت‌وساز امروزی مفید باشد.

- 1- Honeybee
- 2- PAHS
- 3- SUNCOURT
- 4- Meteonorm
- 5- Conditioned
- 6- Unconditioned
- 7- Air wall
- 8- TT Toolbox
- 9- Component
- 10- Colibri Iterator
- 11- Solar grain
- 12- Infiltration load
- 13- Natural ventilation load
- 14- Heating
- 15- Cooling
- 16- EUI

منابع

- ایمانی، فاطمه. حیدری، شاهین (۱۳۹۷). بررسی میزان مصرف انرژی ساختمان زیرزمینی در مقایسه با مدل مشابه بر روی سطح زمین در اقلیم‌های تهران، یزد و تبریز. *دوفصل‌نامه‌ی معماری ایرانی*، ۱۳، ۸۹-۱۰۵.
- حاجی قاسمی، کامبیز. سلطانزاده، حسین. موسوی روضاتی، مریم‌دخت (۱۳۷۵). *گنج‌نامه: فرهنگ آثار معماری اسلامی ایران دفتر اول خانه‌های کاشان*. تهران: انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.
- کارمودی، جان. استرلینگ، ریموند (۱۹۹۳). *طراحی فضاهای زیرزمینی*. ترجمه‌ی وحیدرضا ابراهیمی. تهران: مردییز.
- کسمائی، مرتضی (۱۳۸۹). *اقلیم و معماری*. اصفهان: نشرخاک
- عمادیان رضوی. سیده زینب (۱۳۹۷). ارزیابی عملکرد حرارتی بناهای زمین پناه در مواقع سرد سال (نمونه‌ی موردی: اقلیم گرم و خشک یزد). *نشریه معماری اقلیم گرم و خشک*، ۷، ۸۵-۹۹.
- عمادیان رضوی، سیده زینب. آیت‌اللهی، سید محمد حسین (۱۳۹۳). بهره‌گیری از ثبات حرارتی زمین در ایجاد آسایش حرارتی. *نشریه صفا*، ۶۴، ۳۳-۴۲.
- طاهباز، منصوره. جلیلیان، شهربانو. موسوی، فاطمه (۱۳۹۳). نقش جرم حرارتی خاک در کنترل شرایط محیطی ساختمان. *نشریه صفا*، ۶۶، ۵۵-۳۳.
- نصراللهی، نازنین. اکرمی ابرقویی، فاطمه (۱۳۹۴). ارزیابی اثر بهره‌وری انرژی ساختمان‌های خاک‌پناه در کاربری‌های مختلف، نمونه‌ی موردی: اقلیم گرم و خشک شهر یزد. *دوفصلنامه علمی-پژوهشی مرمت و معماری ایران*، ۱۱، ۵۰-۴۱.
- اداره هواشناسی کاشان (بی تا). میانگین آمارکاشان.
- <http://www.esfahanmet.ir/ShowPage.aspx?page=form&order=show&lang=1&sub=13&PageId=1276&codeV=1&tempname=>
- شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت (شرکت ملی نفت ایران) (۱۳۹۶). *آنچه مدیر انرژی باید از آمار و ارقام مرتبط با انرژی بداند*. <https://ifco.ir/images/1400/mv/amar.pdf>
- خبرگزاری جمهوری اسلامی ایران (ایرنا) (۱۴۰۱). سهم ۹۵ درصدی سوخت‌های فسیلی در سبد انرژی کشور. <https://irna.ir/xjKzZB>
- خبرگزاری دانشجویان ایران (ایسنا) (۱۳۹۸). چرا ۲/۵ برابر جهان انرژی مصرف می‌کنیم؟ isna.ir/xdFbLb
- Aldawoud A. (2008). Thermal performance of courtyard buildings. *Energy and Buildings*, 40 (5), 906-910.
- Al-Masri N., Abu-Hijleh B (2012). Courtyard housing in midrise buildings: An environmental assessment in hot-arid climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (4), 1892-1898.
- Al-Mumin A.A. (2001). Suitability of sunken courtyards in the desert climate of Kuwait. *Energy and Buildings*, 33 (2), 103-111.
- Al-Temeemi A.A., Harris D.J. (2004). A guideline for assessing the suitability of earth-sheltered mass-housing in hot-arid climates. *Energy and Buildings*, 36 (3), 251-260.



-
- Anselm A.J. (2008). Passive annual heat storage principles in earth sheltered housing, a supplementary energy saving system in residential housing. *Energy and Buildings*, 40 (7), 1214-1219.
 - Anselm A.J. (2012). Earth shelters: a review of energy conservation properties in earth sheltered housing. *Energy Conservation*, (31). Nigeria: InTech, 125-48
 - Carmody, J, Sterling, R. (1984). Design considerations for underground buildings. *Underground space*, 8, 352-362
 - Carpenter, P (1994). 'Sod it' *An introduction to earth sheltered development in England and Wales*. Coventry: Coventry University.
 - Givoni, B, Katz, L. (1985). Earth temperatures and underground buildings. *Energy and Buildings*, 8 (1), 15-25.
 - Hait, J N. (1984). *Passive annual heat storage: improving the design of earth shelters or how to store summer's sunshine to keep your wigwam warm all winter*. United States: N. p., Web.
 - Kumar R., Sachdeva S., Kaushik S.C. (2007). Dynamic earth-contact building: A sustainable low-energy technology. *Building and Environment*, 42 (6), 2450-2460.
 - S. Cho, N. Mohammadzadeh (2013). Thermal comfort analysis of a traditional Iranian courtyard for the design of sustainable residential buildings, in: *Proceedings of 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Chambéry, France.
 - Soflaei F., Shokouhian M., Mofidi Shemirani S.M. (2016). Investigation of Iranian traditional courtyard as passive cooling strategy (a field study on BS climate). *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5 (1), 99-113.
 - Taleghani, M., Tenpiereik, M. & Dobbelsteen, A.V.D (2012). Environmental impact of courtyards-a review and comparison of residential courtyard buildings in different climates. *Journal of Green Building*, 7(2), 113-136
 - Van dronklear, C. (2013). *Underground buildings*. Master's thesis. Netherlands: Eindhoven University of Technology Department of the Built Environment.
 - Golany, G. (1988). *Earth-sheltered dwellings in Tunisia: ancient lessons for modern design*. United States of America: University of Delaware Press.
 - Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf