DOI: 10.30495/hoviatshahr.2022.53545.11782

صفحات ۱۰۲-۸۷

# بررسی و تحلیل پارامتریک عملکرد گرمایشی گلخانه خورشیدی در اقلیم سرد
## (مطالعه موردی: شهر سنندج)*

مهندس پریسا عبدخالقی**، دکتر ژاله صابرنژاد***، دکتر ریما فیاض ****

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۰۶ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۲/۲۹

## چکیده

در این مقاله اثرات پارامترهای مختلف گلخانه خورشیدی بر میزان دریافت انرژی و کاهش هدر رفت انرژی ارائه‌شده است. لذا این دو متغیر وابسته تحت تأثیر پنج متغیر مستقل در ۱۵۳ حالت مختلف و بهینه‌ترین حالت با استفاده از الگوریتم ژنتیک در ۱۶۷۵۸ حالت مختلف موردبررسی قرار گرفت. انرژی موردنظر با استفاده از مدل‌سازی پارامتریک در نرم‌افزار گرس‌هاپر، مشاهده مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار راینو، شبیه‌سازی انرژی با انرژی‌پلاس و اعتبارسنجی با نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر انجام گرفت که نتایج حاصل با نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر مورد مقایسه قرار گرفت. طبق بررسی‌ها متغیرها در حالت‌های زیر بیشترین میزان دریافت انرژی را داشتند: جهت‌گیری جنوب با ۲۰ درجه چرخش به سمت غرب یا شرق، درصد جدار نورگذر به جدار کدر ۵۰٪، طول ۵ متر و عمق مطلوب ۱ متر. عایق حرارتی از جنس پلی یورتان باضخامت ۱۰ سانتیمتر کمترین کارایی را ازلحاظ کاهش اتلاف انرژی داشت.

## واژه‌های کلیدی

گلخانه خورشیدی، عملکرد گرمایشی، ساختمان، اقلیم سرد، شهر سنندج.

* این مقاله برگرفته از رساله دکتری پریسا عبدخالقی با عنوان «تدوین چارچوب طراحی گلخانه خورشیدی ساختمان‌های مسکونی در شهر سنندج» به راهنمایی دکتر ژاله صابرنژاد و مشاوره دکتر ریما فیاض در دانشگاه آزاد واحد بین‌الملل کیش است.

**دانشجوی دکتری معماری، گروه معماری، واحد بین‌الملل کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران.
Email: p.abdekhaleghi@yahoo.com

***استادیار معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، تهران، شهر تهران (مسئول مکاتبات).
Email:j_sabernejad@azad.ac.ir ORCID 0000-0002-8119-0760

**** دانشیار معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران.
Email: fayaz@art.ac.ir

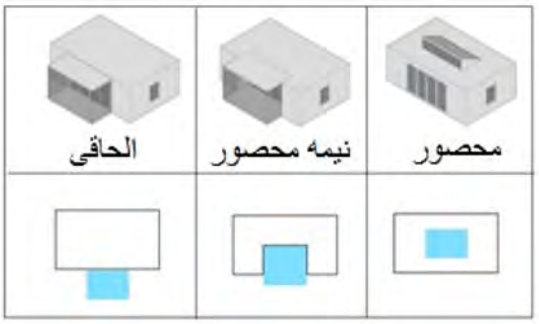
## مقدمه

از سال ۱۹۹۰ میزان انتشار آلاینده‌های حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی در طراحی ساختمان و ساخت‌وسازها ۴۵ درصد افزایش‌یافته است (International Energy Agency, 2017). توجه به اینکه سه‌چهارم تقاضای انرژی در طراحی ساختمان و ساخت‌وساز از همین بخش منشأ می‌گیرد، اتحادیه اروپا استراتژی‌ها و برنامه‌های عملی با اقدامات اقتصادی را برای ساختمان‌های مسکونی ترویج می‌کند. دستورالعمل‌ها و استراتژی‌های اتحادیه اروپا هدف بلندپروازانه ای برای کاهش انتشار $CO_2$ به میزان ٪۹۰ از سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۵۰ تعیین کرده‌اند (Berardi, 2017). استفاده از سامانه‌های غیرفعال خورشیدی می‌تواند با استفاده از راه‌حل‌های خاص معماری و برنامه‌ریزی شهری تا حدود ٪۵۰ صرفه‌جویی در گرمایش ساختمان را تأمین کند (International Energy Agency, 2017).

باید توجه داشت که در مناطق سرد، به‌منظور ایجاد سطوح تخت در سقف ابنیه سنتی، از سطوح گنبدی شکل و گرد (به دلیل کاهش سطح جذب‌کننده انرژی تابشی خورشید) کمتر استفاده‌شده و عمق ایوان‌های ضلع جنوبی برای بهره‌گیری از تابش خورشیدی در فصول سرد سال، نسبت به مناطق گرم و خشک کمتر است همچنین به‌منظور حفظ حرارت معمولاً ارتفاع تالار زیر گنبد در مقایسه با مناطق گرم و خشک نیز کمتر بوده و مشخص گردیده که اگر طاق یا گنبد دوپوسته باشد تأثیر تغییرات درجه حرارت خارج بر روی پوسته زیرین نیز کمتر بوده و درنتیجه هوای تالار زیر گنبد متعادل‌تر خواهد بود (احمدی ندوشن و بهادری نژاد، ۱۳۸۵). هرچند پژوهش‌های متعددی در این حوزه در ایران انجام‌شده اما بخش عمده‌ای از مطالعات صورت گرفته در سامانه گلخانه درزمینه استفاده‌های کشاورزی گلخانه بوده و درزمینه تأثیرات گرمایشی آن در ساختمان مطالعه کمتری صورت گرفته است. با توجه به موارد ذکرشده و نیاز به گرمایش فضای داخلی در حداقل ۶ ماه از سال در اقلیم شهر سنندج لزوم استفاده از انرژی خورشیدی ضروری می‌نماید. لذا در این پژوهش گلخانه خورشیدی موردبررسی قرار می‌گیرد، که ازجمله راه‌حل‌های ساختمانی هستند که به‌وسیله استفاده از تابش خورشید، انرژی خورشیدی را برای استفاده در فضاهای جانبی جذب کرده و شرایط مطلوبی را ازلحاظ آسایش حرارتی برای ساکنین فراهم می‌کنند.

گلخانه خورشیدی یک فضای شیشه‌ای است که در دیواره جنوبی ساختمان با کشیدگی شرقی-غربی قرار می‌گیرد (رحیم‌پور و رحیمی، ۱۳۹۲). این سامانه، می‌تواند قسمتی از نیازهای حرارتی فضاهای مجاور خود را تأمین کند، بدین‌صورت که انرژی خورشیدی را دریافت کرده (مازریا، ۱۳۸۵، ۱۸) و توسط یک دیوار مشترک، انتقال گرما از گلخانه خورشیدی به فضاهای مجاور، از طریق هدایت یا توسط بازشوهای موجود در دیوار مشترک با جریان همرفت، صورت می‌گیرد (Moore, 1993,137-138). با ایجاد گلخانه‌ها بازدهی حرارتی ٪۶۰ الی ٪۷۰ در زمستان است و مقدار حرارت منتقل‌شده به اتاق‌ها ٪۵۰ الی ٪۴۰ انرژی تابشی است که با اضافه کردن سیستم انباشت کننده این مقدار بیشتر می‌شود (رحیم‌پور و رحیمی،۱۳۹۲). به‌طورکلی گلخانه خورشیدی سه عملکرد اصلی دارد: الف-منبع کمکی حرارت تلقی می‌شود. ب-فضایی را برای رشد گیاهان فراهم می‌کند. ج- فضای دلپذیری برای نشیمن ایجاد می‌کند.

به‌طورکلی سه شیوه متفاوت برای ارتباط کالبدی گلخانه خورشیدی با ساختمان وجود دارد (شکل ۱) که بر مبنای میزان محصوریت، به انواع مختلف متصل یا الحاقی، نیمه محصور و محصور، دسته‌بندی می‌شوند (لکنر، ۱۳۸۵، ۱۶۲). گلخانه‌ها یا به‌صورت اتاقک‌های شیشه‌ای به جبهه‌های جنوبی بنا متصل می‌شوند که به آن گلخانه متصل یا الحاقی گفته می‌شود. شکل ۱ سمت راست، یا بخشی از آن بیرون و بخش دیگر به داخل بنا نفوذ نموده که به آن گلخانه نیمه




شکل ۱. پرسپکتیو (مأخذ: لکنر، ۱۳۸۵، ۱۷۴)
Figure 1. Perspective (Source: Lechner, 2001, 174)

محصور گفته‌شـــده، شکل ۱ پلان و پرســـپکتیو وسط و یا اینکه کاملاً در درون بنا محصورشـــده‌اند و تنها از ســـقف نور می‌گیرند که در این صورت به آن‌ها گلخانه محصور گفته می‌شـــود، شکل ۱ سمت راست و مانند آتریوم عمل می‌کند؛ که در این پژوهش گلخانه بررسی‌شـــده از نوع متصل یا الحاقی است.

## پیشینه پژوهش

گلخانه خورشـــیدی در پژوهش‌های متعددی موردبررسی قرارگرفته است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد:

در پژوهشـــی که در ســـال ۲۰۱۷ توســـط ســـیمولتی و برادو انجام گرفت، این نتیجه حاصل شـــد که اســـتفاده از فضاهای خورشیدی در ساختمان‌های غیر انعطاف‌پذیر می‌تواند بدون توجه به نوع پنجره‌های موردنظـــر برای گلخانـــه، مصرف انرژی را به‌طـــور قابل‌توجهی کاهش دهد همچنین اســـتفاده از فضاهای خورشـــیدی در ساختمان‌های با عایق حرارتی بســـیار زیاد می‌تواند یک راهبـــرد برای کاهش تقاضای انرژی برای گرمایش بیشـــتر باشد، یک تحلیل دقیق باید انجام شود تا امکان‌سنجی اقتصادی این فن‌آوری‌ها را تضمین کند (Chiesa et al, 2017). گیلانی و محمـــد کاری (۱۳۹۰) در پژوهش خویش عملکرد گرمایشی گلخانه‌های خورشیدی متصل به ساختمان‌های مسکونی در اقلیم ســـرد کشور (شهر اردبیل) را بررســـی نموده‌اند، بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش که با کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی و ممیزی انرژی انجام‌شده است جهت‌گیری مناسب گلخانه برای این اقلیم بررسی‌شده و مشـــخص گردیده که برای دریافت بیشـــترین انرژی خورشیدی در فصول ســـرد ســـال جهت‌گیری جنوب غربی و غرب و برای کمترین بار گرمایشـــی در دوره گرم سال جهت‌گیری جنوب غرب مناسب‌ترین جهت برای اتصال گلخانه‌های خورشـــیدی به ســـاختمان می‌باشـــند. آلنیـــت و همکاران[1] (۲۰۱۴) تحلیل حساســـیت در مورد گلخانه‌های خورشیدی مورداســـتفاده در ساختمان مسکونی موجود در شش شهر مختلف پرتغال را با پنج پارامتر اصلی شامل تهویه طبیعی، سایبان‌ها، تعداد لایه‌های سطح شیشه‌ای، جهت و نسبت دیوار انجام دادند: در این مطالعه، مشخص شد که داشتن گلخانه خورشیدی می‌تواند برای دوره زمستان سودمند باشد. در طراحی گلخانه خورشیدی اقدامات غیرفعال با عملکرد بالا برای کاهش مشـــکلات گرمایش بیش‌ازحد، بسیار مهم و ضروری اســـت که مورداستفاده قرار گیرد. جورجنسون و هندرسون[2] (۲۰۰۰) طرح‌های مختلف بالکن‌های شیشـــه‌ای را در ســـه ساختمان مختلف در اروپا موردبررســـی قراردادند تـــا تعیین کنند که آیا گلخانه خورشـــیدی می‌تواند صرفه‌جویی در انـــرژی را موجب گردد یا درواقع تقاضای انـــرژی فضای مجاور را افزایش دهد. درنتیجه، نویســـندگان، دو راه‌حل اصلی درزمینه بار حرارتی در ســـاختمان‌ها پیشنهاد کردند:

- برای گلخانه‌های خورشـــیدی محصورشده، شیشه باانرژی کارآمد و عایق بین گلخانه خورشـــیدی و فضای مجاور، جهت افزایش کارایی گلخانه خورشیدی ازنظر عملکرد گرمایشی توصیه می‌شود. به‌این‌ترتیب، گرم شـــدن فضای گلخانه خورشـــیدی می‌تواند با گـــرم کردن فضا به دلیل ســـطح بالای عایق صرفه‌جویی در انـــرژی را فراهم کند. طراحی با پنجره‌های بســـیار «باز» توصیه می‌شـــود، زیرا این طراحی در برابر اســـتفاده غیرمستقیم جهت گرمایش گلخانه خورشیدی مفید است. با توجه به طراحی بسیار باز، رسیدن به سطح مناسبی از آسایش حرارتی دشوار اســـت. این نوع از فضاهای خورشـــیدی نیز می‌تواند از راه‌حل عایق‌کاری بهره‌مند شود، اما به دلیل قسمت‌های شیشه‌ای وسیع، هزینه زیادی خواهد داشت (Jørgensen & Henderson, 2000, 19-22).

آلپیانی[3] در تحقیق خود در ســـال ۲۰۱۷ افزایش دمای خورشـــیدی در طول روزهای برفی را ثبت کـــرده و می‌توان نتیجه گرفت که مواد اطراف ممکن اســـت بر بســـیاری از محدودیت‌های کاربردی سیستم خورشیدی غیرفعال غلبه کند (Ulpiani et al, 2017, 213). در یک مطالعه الذوبی و ملکاوی[4] (۲۰۱۵)، عملکرد حرارتی فن‌آوری خورشید را بـــرای آب‌وهـــوای مدیترانه معمولی در امان، اردن با زمســـتان‌های ســـرد و تابســـتان‌های گرم، ارزیابـــی کردند. شبیه‌ســـازی حرارتی با اســـتفاده از دروب-ال تی اچ[5]، یک ابزار شبیه‌سازی حرارتی پویا انجام گرفت. شبیه‌ســـازی‌ها با تجزیه‌وتحلیل اثر خورشید در یک ساختمان معمولی در اردن با تغییر تعداد ســـطوح شیشه‌ای فضای خورشیدی و جهت‌گیری انجام شد. همچنین اقدامات غیرفعال برای کنترل غلبه بر مسائل گرمایش بیش‌ازحد تابستان و زیان‌های شدید حرارتی در شب زمستان انجام و شبیه‌سازی شد. با شبیه‌سازی برای سه جهت مختلف (جنوب، شـــمال و شرق) دریافتند که حداقل بار حرارتی زمانی بود که گلخانه خورشیدی رو به سمت جنوب و بالاترین بار حرارتی زمانی که به سمت شمال قرارگرفته بود. درحالی‌که در مورد بار سرمایش، نتایج نشان داد که جهت‌گیری به سمت شمال دارای حداقل مقدار در تمام تنظیمات گلخانه خورشیدی است. برای گرمایش و سرمایش سالانه در تمام تنظیمات، بهترین جهت برای گلخانه خورشیدی به سمت جنوب بـــود و بدترین جهت شـــمال بود. در این مطالعه مشـــخص گردید که افزایش سطح شیشـــه، بار حرارت سالانه را کاهش داد. بااین‌حال، این امر منجر به افزایش بار خنک‌کنندگی سالانه به دلیل مشکل گرمایش بیش‌ازحد در تابســـتان گردید. در طول زمستان افزایش سطح شیشه باعث افزایش انتقال حرارت به هوای ســـرد در طول شب شد، بنابراین،

استفاده از پنجره‌های دوجداره برای کاهش نیاز انرژی سالانه مفید بود. با افزایش عمق فضا و کف، افزایش مقدار بار حرارتی در زمستان کاهش می‌یابد. بااین‌وجود، بار خنک‌کننده در تابستان افزایش یافت و این به خاطر مقدار بالای دریافت انرژی خورشیدی است که در طول تابستان جذب می‌شود. داشتن یک فضای خورشیدی که به یک ساختمان متصل است، می‌تواند در طول ماه‌های تابستان باعث بروز مشکلات جدی گرما شود. نویسندگان از تهویه شبانه و ابزارهای سایه در طول روز در فضای خورشیدی (برای جلوگیری از گرمایش بیش‌ازحد در طول دوره تابستان) استفاده نمودند. یکی دیگر از اقدامات غیرفعال، کاهش تلفات حرارتی در شب زمستان بود که از دستگاه تهویه داخلی را در طول شب استفاده کردند که باعث افزایش مقاومت حرارتی خورشید شد و میزان انتقال حرارت را به هوا در هوای سردتر کاهش داد. سایبان داخلی نیز می‌تواند تبادل تابش بین فضای خورشیدی و هوای خارج را متوقف کند (Alzoubi & Malkawi, 2015). طالقانی و همکاران[۶] (۲۰۱۲) محققین دانشگاه تکنولوژی دلفت هلند در یک پژوهش دانشگاهی اثرات سه فضای متفاوت شامل حیاط مرکزی، آتریوم و گلخانه خورشیدی را در میزان مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی در پنج اقلیم متفاوت اروپایی و آسیایی بررسی نمودند. بر اساس نتایج این پژوهش که با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و ممیزی انرژی انجام‌شده نشان می‌دهد که به‌طور مثال در هلند وجود حیاط مرکزی و یا گلخانه خورشیدی در مرکز ساختمان باعث افزایش مصرف انرژی ساختمان شده و همچنین باعث بیش گرمایش ساختمان در فصول گرم نیز خواهد گردید. میهالاکاکو و فرانته[۷] (۲۰۰۲) با بررسی تأثیر عواملی همچون جهت‌گیری، مصالح شیشه، شرایط مرزی کف گلخانه و سیستم لوله‌های زیرزمینی بر عملکرد حرارتی آن در ساختمان در چهار شهر اروپایی با استفاده از برنامه شبیه‌سازی ترانسیس پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که گلخانه خورشیدی متصل به ساختمان به میزان قابل‌توجهی دمای فضای داخلی را در فصول سرد سال افزایش می‌دهد اما در فصول گرم سال موجب افزایش کنترل نشده و بیش‌ازحد فضای داخلی می‌گردد البته این پدیده زمانی رخ می‌دهد که هیچ‌گونه تمهیدی برای خروج هوای گرم گلخانه در فصول گرم سال در نظر گرفته نشده باشد.

میهالاکاکو در ادامه تأثیر سه روش سرمایش غیرفعال شامل سایبان‌ها، لوله‌های زیرزمینی و تهویه شبانه را برای جلوگیری از بیش‌ازحد گرم شدن فضای گلخانه در فصول گرم با استفاده از برنامه ترانسیس شبیه‌سازی نمود. نتایج پژوهش او نشان می‌دهد که ترکیب هر سه روش در بهبود عملکرد حرارتی گلخانه متصل به ساختمان مؤثر است و آن را بهبود می‌بخشد

یکی از نمونه‌های موفق اجرای گلخانه خورشیدی در ساختمان بلوک کی ورکرز[۸]، یک پروژه مسکونی زدفکتوری در انگلستان است که گلخانه خورشیدی را به‌عنوان یک گردآورنده خورشیدی غیرفعال اجرا کرده است. در این پروژه، گلخانه خورشیدی با عرض زیاد رو به جنوب با پنجره‌های با عملکرد بالا ترکیب‌شده‌اند که به‌عنوان گردآورنده خورشیدی غیرفعال در ساختمان عمل می‌کنند. طبق گفته زدفکتوری[۹] (۲۰۱۵)، گلخانه خورشیدی قرارگرفته به سمت جنوب تا ۳۰ درصد نیاز به حرارت را فراهم می‌کند ذخیره گرمای فضا به‌وسیله گلخانه خورشیدی فراهم می‌گردد حرارت ایجادشده نیز به دلیل عایق زیاد مصالح ساختمانی با جرم حرارتی بالا و پنجره‌های با عملکرد حرارتی بالا است. یکی دیگر از مزایای استفاده از گلخانه خورشیدی در جبهه جنوب، اجازه ورود نور روز به فضاهای زندگی بود.

در تمام موارد مشاهده می‌گردد که جهت جلوگیری از افزایش بیش‌ازحد دما در تابستان‌ها باید تمهیداتی در نظر گرفت که با توجه به نتایج پژوهش‌ها از راه‌حل‌های مفید می‌توان استفاده از تهویه شبانه، ابزارهای ایجاد سایه در طول روز در فضای خورشیدی، سایبان داخلی، ابزار تهویه داخلی در طول شب، تمهیداتی برای خروج هوای گرم گلخانه در فصول گرم سال با استفاده از سه روش سرمایش غیرفعال شامل سایبان‌ها، لوله‌های زیرزمینی و تهویه شبانه استفاده نموده و عملکرد حرارتی گلخانه متصل به ساختمان را بهبود بخشید که با توجه به شرایط ساختمان و اقلیم موردنظر استفاده از هرکدام از این تمهیدات نیز باید موردبررسی قرار گیرد تا موجب اتلاف انرژی در ساختمان در فصول سرد و گرم نگردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که شرایط تحقیقات پژوهش‌های صورت گرفته در اقلیم‌های مختلف متفاوت بوده و با توجه به اقلیم و عرض جغرافیایی منطقه موردنظر گلخانه خورشیدی دارای ویژگی‌های مختلفی است. بر اساس نتایج حاصل از پژوهش‌ها به نظر می‌رسد عامل جهت‌گیری از عوامل مؤثر در عملکرد حرارتی گلخانه خورشیدی می‌باشند. پس در این پژوهش این عامل و در کنار آن سایر عوامل تأثیرگذار بر عملکرد گرمایشی فضای خورشیدی شهر سنندج (اقلیم سرد) موردبررسی قرار گرفت. همچنین از نتایج این پژوهش‌ها می‌توان دریافت که طراحی گلخانه خورشیدی به‌عنوان یک سامانه غیرفعال اجازه می‌دهد تا حداکثر نفوذ نور خورشید از طریق سطوح شفاف در طول روز و ذخیره آن در ساختار ساختمان یا جرم حرارتی انجام شود. لذا با توجه به تعداد روزهای آفتابی در شهر سنندج و مصرف بالای انرژی در بخش مسکونی بهره‌گیری از گلخانه به‌عنوان سامانه غیرفعال خورشیدی در اقلیم این شهر توجیه‌پذیر و

قابل‌اجرا است.

**نرم‌افزار گرس‌هاپر**[۱۰]: با توجه به اینکه نرم‌افزار شبیه‌ساز انرژی در این پژوهش نرم‌افزار گرس‌هاپر است که از موتور محاسباتی انرژی پلاس استفاده می‌نماید لذا در این قسمت به برخی از پژوهش‌هایی که اعتبارسنجی این نرم‌افزار را موردبررسی قرار داده‌اند، پرداخته‌شده است. پژوهش‌هایی که در حوزه اعتبارسنجی و دقت نرم‌افزارهای محاسبه مصرف انرژی انجام‌شده نشان‌دهنده آن است که این نرم‌افزارها با دقتی قابل‌قبول مصرف انرژی ساختمان را محاسبه می‌نماید (Yu et al., 2008, 1538). پژوهش‌هایی پیرامون به‌کارگیری نرم‌افزارهای شبیه‌ساز مصرف انرژی در ساختمان‌ها انجام‌گرفته که اعتبارسنجی و دقت این نرم‌افزارها را در محاسبات مصرف انرژی در مقایسه با میزان واقعی موردبررسی قرار داده است. دو پژوهش در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ انجام گردید که در پژوهش نخست که توسط اسکین و ترکمن در رابطه با مقایسه میزان بارهای حرارتی و سرمایشی توسط نرم‌افزار انرژی پلاس و میزان واقعی آن در یک بازه ۲۴ ساعته صورت پذیرفته، نشان می‌دهد که میزان این اختلاف بسیار ناچیز بوده و به ترتیب برای بارهای حرارتی ۳ و برای بارهای سرمایشی ۵ درجه است (Eskin &Turkmen, 2008, 771). در پژوهش بعدی که در ۲۰۰۸ توسط نتو و فیورلی در برزیل انجام‌شده است، نشان می‌دهد که نرم‌افزار انرژی پلاس با دقتی در حدود $^{\circ}$ ۱۳ ± مقادیر انرژی مصرفی ساختمان را شبیه‌سازی می‌نماید که مقدار قابل قبولی است (Neto & Fiorelli, 2008, 2172). پژوهش‌هایی که در حوزه اعتبارسنجی و دقت نرم‌افزارهای محاسبه مصرف انرژی انجام‌شده نشان‌دهنده آن است که این نرم‌افزارها با دقتی قابل‌قبول مصرف انرژی ساختمان را محاسبه می‌نمایند (Yu et al., 2008, 1538). در پژوهش‌های متعددی با استفاده از نرم‌افزار گرس‌هاپر تأثیر پارامترهای مختلف معماری و ساختمانی بر مصرف انرژی (Attia et al., 2013)، آسایش (Carlucci et al., 2015) مطالعه شده است. همچنین پارامترهای فرم (Raji et al, 2017)، جهت‌گیری، درصد پنجره، مشخصات شیشه، عایق حرارتی، جرم حرارتی و تعداد طبقات (Godoy-Shimizu et al., 2018) از طریق شبیه‌سازی پارامتریک بررسی‌شده است. در این مقاله پس از بررسی نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار گرس‌هاپر جهت بررسی اعتبار نتایج از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر نیز استفاده گردید؛ و درنهایت با توجه به مقایسه نتایج مربوط نتیجه‌گیری نهایی انجام گردید.

## روش پژوهش

بررسی عملکرد انرژی در سامانه غیرفعال خورشیدی (گلخانه خورشیدی) برای پارامترهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار گرس‌هاپر نسخه ۶ انجام شد. گرس‌هاپر یک ابزار منبع باز است که در صورت اتصال به پلاگین‌های مختلف می‌تواند برای انواع مختلف مدل‌سازی، تجزیه‌وتحلیل و شبیه‌سازی استفاده شود؛ بنابراین ابتدا الگوریتم‌های موردنیاز در نرم‌افزار گرس‌هاپر کدنویسی شد، سپس مدل‌های کدنویسی شده در نرم‌افزار راینو نسخه ۶ شبیه‌سازی گردید. جهت واردکردن فایل آب و هوایی از محیط برنامه‌نویسی لیدی باگ استفاده و پس‌ازآن با استفاده از پلاگین هانی بی، محیط برنامه‌نویسی بصری گرس‌هاپر را به موتور شبیه‌سازی انرژی پلاس نسخه ۸ و اپن استودیو نسخه ۲ متصل شد؛ بنابراین تجزیه‌وتحلیل انرژی در آن با نرم‌افزار انرژی پلاس انجام گردید و در پایان با استفاده از الگوریتم ژنتیک (گالاکاپوس[۱۱] و اکتاپوس[۱۲]) مورداستفاده نرم‌افزار گرس‌هاپر بهینه‌سازی انجام شد که در جدول ۱ به ترتیب معرفی‌شده است.

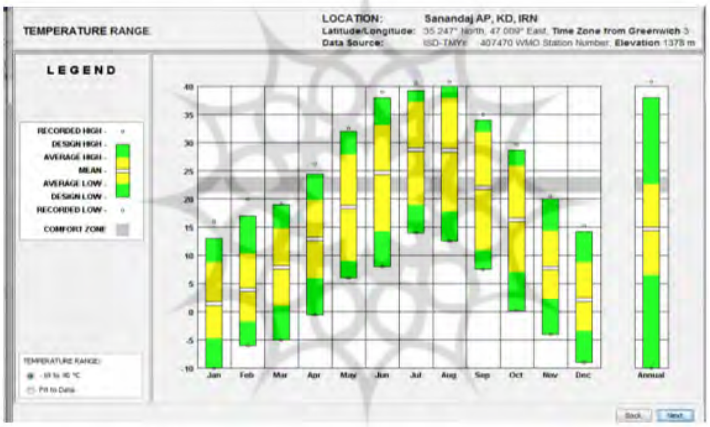
## اقلیم و داده‌های آب و هوایی

ازلحاظ جغرافیایی شهر سنندج در غرب کشور ایران و در ۳۵.۲۴ درجه عرض شمالی و ۴۷.۰۰ درجه طول شرقی قرارگرفته است. بر اساس پهنه‌بندی اقلیمی کسمایی در گروه اقلیمی ۲ و زیرگروه اقلیمی ۷ قرار دارد. بر اساس تقسیم‌بندی فوق دمای هوا در زمستان‌ها سرد و در تابستان‌ها نیمه گرم و خشک است. با توجه به فاکتورهای اقلیمی به‌طور متوسط در محدوده فوق ۶ ماه از سال نیاز به گرمایش فضای داخلی ساختمان وجود دارد (شکل ۲). در بررسی نمودار سایکومتریک (زیست‌اقلیمی) شهر سنندج با استفاده از داده‌های واقعی ده‌ساله ایستگاه هواشناسی سنندج (۲۰۱۷-۲۰۰۷) نمودار شرایط آسایش درونی در نرم‌افزار گرس‌هاپر طبق شکل ۳ است.

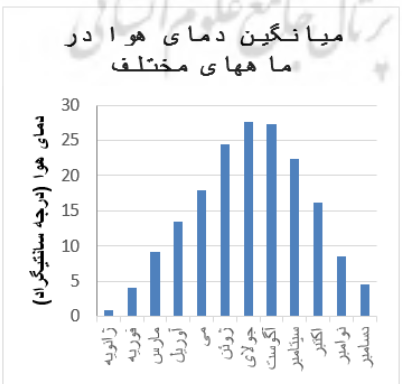
سند اقلیمی مورداستفاده با استفاده از نرم‌افزاری به نام تی ام وای کریتور[۱۳] که توسط دکتر ابراهیم پور تهیه‌شده و با در اختیار داشتن آمار ساعتی داده‌های آب و هوائی ایستگاه سینوپتیک شهر سنندج، ایجاد گردید. اعتبارسنجی این نرم‌افزار در کتاب تهیه فایل‌های اطلاعات اقلیمی TMY2 برای شهرهای مهم ایران (ابراهیم پور و کسمایی، ۱۳۹۲) و مقاله اصلاح روشی جهت تولید داده‌های اقلیمی تی ام وای برای شهر تهران (ابراهیم پور و معرفت، ۱۳۹۰) انجام‌شده، همچنین برای ۵ شهر مهم ایران توسط این نرم‌افزار داده‌های اقلیمی تی ام وای تهیه‌شده و در سایت انرژی پلاس تحت عنوان آی تی ام وای به ثبت رسیده است بنابراین محاسبات انجام‌شده بر اساس فایل اقلیمی موجود دارای اعتبار است.

جدول ۱. چهارچوب بهینه‌سازی در گرس‌هاپر
Table 1. Optimization framework in Grasshopper

| مراحل | عنوان | شرح |
|---|---|---|
| ۱ | مدل‌سازی پارامتریک | **راینو:** ساده‌سازی مدل واقعی و شبه سازی به‌صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار راینو مدل سه‌بعدی<br>**گرسهاپر:** الگوریتم نویسی و کدنویسی متغیرهای موردبررسی و ارتباط با مدل سه‌بعدی |
| ۲ | شبیه‌سازی انرژی | لیدی باگ: واردکردن فایل آب و هوایی و تحلیل اقلیم شهر سنندج<br>هانی بی: تحلیل انرژی با استفاده از انرژی پلاس |
| ۳ | بهینه‌سازی | **اکتاپوس:** یافتن بهینه‌ترین با استفاده از سیستم شبکه‌های عصبی حالت موجود در ارتباط با هریک از متغیرهای وابسته (کمترین میزان پرت انرژی یا بیشترین میزان انرژی دریافتی)<br>**گالاپاگوس:** یافتن بهینه‌ترین حالت موجود با در نظر گرفتن دو متغیر وابسته (کمترین میزان پرت انرژی و بیشترین میزان انرژی دریافتی) |
| ۴ | اعتبارسنجی | تحلیل انرژی با نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر و مقایسه نتایج حاصل از آن با نتایج مرحله قبل<br>بررسی میزان تفاوت نتایج دو نرم‌افزار استفاده‌شده |




شکل ۲. میانگین دما در ماه‌های مختلف
Figure 2. Average temperature in different months

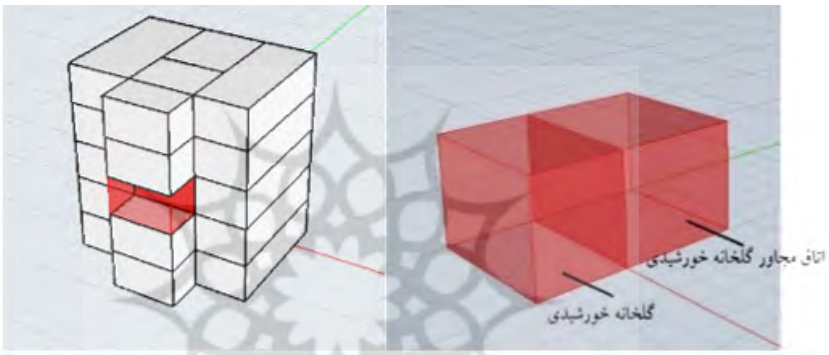



شکل ۳. میانگین دما در ماه‌های مختلف
Figure 3. Average temperature in different months

## توضیحات مدل‌های موردبررسی گلخانه خورشیدی

با توجه به اینکه نمونه موردبررسی ازنظر شیوه ساخت و مصالح مورداستفاده باید در گونه‌های متداول ساختمانی معماری معاصر شهر سنندج بوده و از منظر مالکیتی و اجرا قابلیت الحاق گلخانه خورشیدی را داشته باشد، لذا گزینه نهایی اتاقکی با کاربری مسکونی و ابعاد ۵*۴ متر و ارتفاع کف تا کف ۳ متر به مساحت مفید داخلی ۲۰ مترمربع است که گلخانه‌ای با ابعاد موردبررسی و ارتفاع ۳ متر در جبهه جنوبی آن قرارگرفته است که دیوارهای کناری آن کدر بوده و فقط دیوار جبهه جنوبی دارای جدار نورگذر است. اتاق شبیه‌سازی‌شده اتاقی در یک واحد مسکونی ۱۰ m *۱۰ m است که در اطراف و کف و سقف با قسمت‌های داخلی دیگر در ارتباط بوده و لذا فقط در جبهه جنوبی با گلخانه خورشیدی و گلخانه با فضای خارجی در ارتباط است. ارتباط بصری گلخانه و اتاق مجاور آن با پنجره‌ای به ابعاد ۱.۵*۲ متر برقرارشده است که در شکل ۴ می‌توان مشاهده نمود. همچنین مشخصات و ویژگی‌های مدل شبیه‌سازی‌شده در جدول ۲ و پارامترهای موردبررسی نیز در جدول ۳ نشان داده‌شده است.

**تحلیل‌ها:** در ادامه تأثیر هریک از پارامترهای عنوان‌شده بر عملکرد حرارتی گلخانه خورشیدی موردبررسی قرارگرفته که درنهایت بتوان به یک الگوی مناسب جهت چارچوب طراحی گلخانه خورشیدی دست‌یافت.




شکل ۴. مدل شبیه‌سازی‌شده گلخانه خورشیدی موردبررسی
Figure 3. Simulated model of Sunspace

جدول ۲. مشخصات مدل شبیه‌سازی‌شده
Table 2. The simulated model features

| کف | سقف | دیوار مشترک | دیوار خارجی | لایه‌ها به ترتیب خارجی‌ترین |
|---|---|---|---|---|
| ۱۰ سانتیمتر بتن مگر | ۲ سانتیمتر پوشش نهایی بام | ۱۰ سانتیمتر نمای آجری | ۳ سانتیمتر نمای آجری | لایه ۱ |
| ۵ سانتیمتر عایق حرارتی | ۱ سانتیمتر عایق رطوبتی | ۱ سانتیمتر ملات ماسه سیمان | ۲ سانتیمتر ملات ماسه سیمان | لایه ۲ |
| بخاربند (محافظ شیره بتن) | ۵ سانتیمتر عایق حرارتی | ۱۰ سانتیمتر بلوک سفالی | ۱۰ سانتیمتر بلوک سفالی | لایه ۳ |
| ۵ سانتیمتر بتن کف | ۱۵ سانتیمتر سقف تیرچه‌بلوک | ۲ سانتیمتر گچ‌وخاک | عایق حرارتی (ضخامت و جنس عایق در ۸ حالت مختلف و ۱ حالت بدون عایق حرارتی به‌عنوان پارامتر موردبررسی قرارگرفته) | لایه ۴ |
| ۳ سانتیمتر سرامیک کف | ۲ سانتیمتر گچ‌وخاک | - | ۲ سانتیمتر گچ‌وخاک | لایه ۵ (لایه داخلی) |
| ۰/۵۰۹ | ۰/۴۲۳ | ۲/۱۹ | متغیر بر اساس پارامترهای موردبررسی | ضریب انتقال حرارت $W/m^2K$ |

جدول ۳. پارامترهای گلخانه خورشیدی در مرحله بهینه‌سازی
Table 3. Sunspace parameters in optimization stage

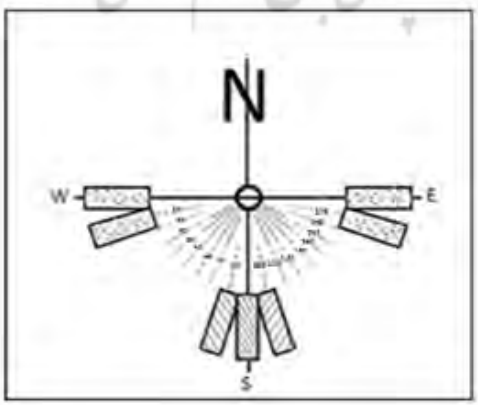
| پارامترها | ویژگی‌ها | تعداد متغیر |
|---|---|---|
| درصد بخش نورگذر به دیوار | ٪۴۰ -٪۵۰ - ٪۶۰ | ۳ |
| طول گلخانه | ۱ الی ۵ در بازه‌های ۱ متری | ۵ |
| عرض گلخانه | ۰/۵ الی ۳ در بازه‌های ۰/۵ متری | ۶ |
| جهت‌گیری | از جنوب به غرب و شرق در بازه‌های ۱۰ درجه | ۱۹ |
| عایق حرارتی | پلی یورتان، پلی استایرن، پشم سنگ، پشم‌شیشه در دو ضخامت ۵ و ۱۰ سانتی متر | ۹ |

## جهت‌گیری

در نیمکره شمالی در طول زمستان خورشید از جنوب شرقی طلوع و بعد از عبور از قسمت جنوبی در جنوب غربی غروب می‌کند. پس با توجه به این مسئله و نمودار تابش خورشید، جهت‌گیری‌های مختلف گلخانه خورشیدی در جبهه جنوبی که یکی از بهترین نقاط برای قرارگیری گلخانه خورشیدی جهت دریافت انرژی خورشید است، موردبررسی قرار گرفت. برای دستیابی به بیشترین بازده ازلحاظ عملکرد گرمایشی گلخانه و به دست آوردن زاویه بهینه جهت‌گیری، شبیه‌سازی در بازه‌های ۱۰ درجه از جنوب به سمت غرب و شرق انجام گرفت (شکل ۵). روی دستیابی به هدف موردنظر جهتی که بیشترین میزان دریافت انرژی خورشیدی را در فصل سرما و کمترین را در فصل گرم دارا است، مناسب است. لذا طبق شکل ۶ و جدول ۴ به‌دست‌آمده، می‌توان مشاهده نمود که در فصل گرم زوایای نزدیک به غرب و شرق بیشترین میزان انرژی خورشیدی دریافتی را دارا هستند اما در فصل سرد این امر در زوایای نزدیک به جنوب اتفاق می‌افتد. که با توجه به هدف طراحی فضای خورشیدی افزایش عملکرد گرمایشی در فصل سرد است، بنابراین جبهه جنوبی و بازه ۱۰ درجه به سمت غرب یا شرق جهت دستیابی به این هدف مناسب است.

در مدل‌های دیگری که موردبررسی قرار گرفت میزان جذب انرژی خورشیدی دریافتی در ماه‌های مختلف بسته به پارامترهای دیگری ازجمله هندسه گلخانه خورشیدی، ضخامت و نوع عایق حرارتی و نسبت سطح شیشه‌ای به دیوار موردبررسی قرار گرفتند.

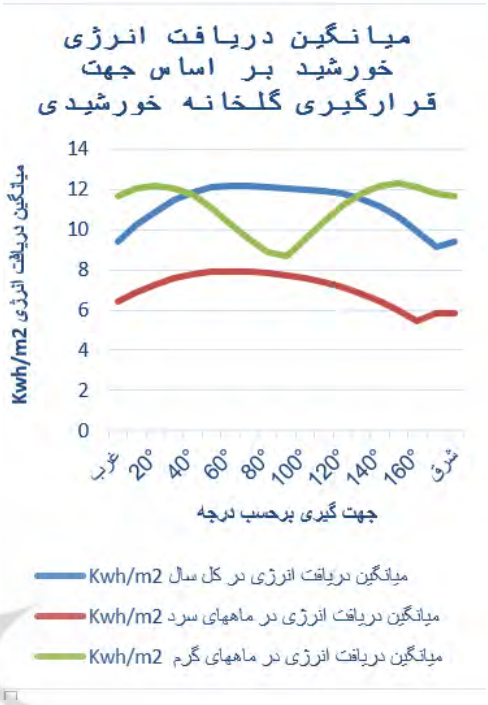
طول، عرض و نسبت سطح نورگذر به کدر جدار خارجی در گلخانه خورشیدی یکی از پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد گرمایشی گلخانه خورشیدی هندسه آن است؛ بنابراین در نظر گرفتن ابعاد مناسب جهت فضای خورشیدی حائز اهمیت است. در شبیه‌سازی انجام‌شده سه پارامتر طول، عرض و درصد سطح نورگذر هم‌زمان توسط الگوریتم ژنتیک گالاکاپوس موردبررسی قرار گرفت که نتایج به‌دست‌آمده با در نظر گرفتن هر سه پارامتر در شکل ۷ و هر پارامتر به‌طور جداگانه در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ موردبررسی قرار گرفت. به‌طور مثال در حالتی که



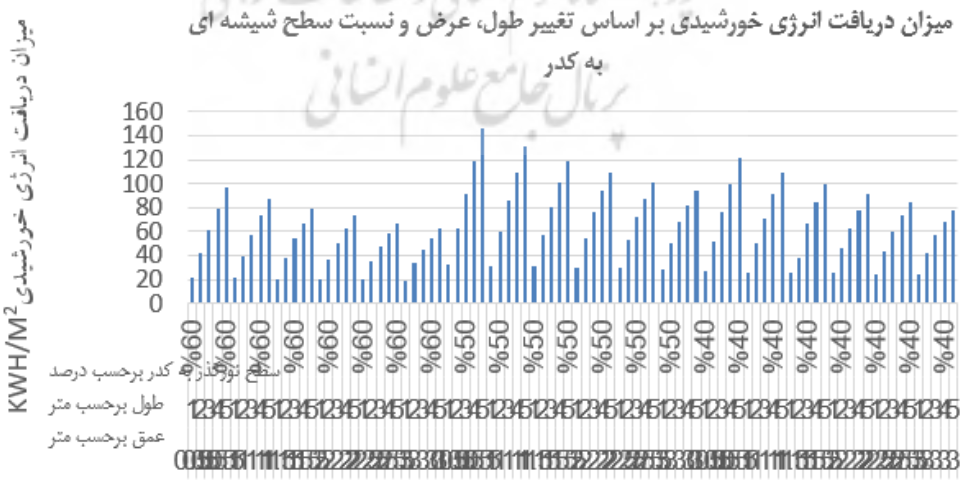

شکل ۵. چرخش مدل‌های شبیه‌سازی‌شده در جبهه جنوبی از غرب به شرق
Figure 5. Rotation of simulated models on the southern from west to east

جدول۴. میانگین دریافت انرژی خورشیدی در ماه‌های سرد و گرم سال
Table 4. Average solar energy intake in hot and cold months of the year

| جهت‌گیری | میانگین دریافت انرژی در کل سال $Kwh/m^2$ | میانگین دریافت انرژی در ماه‌های سرد $Kwh/m^2$ | میانگین دریافت انرژی در ماه‌های گرم $Kwh/m^2$ | جهت‌گیری | میانگین دریافت انرژی در کل سال $Kwh/m^2$ | میانگین دریافت انرژی در ماه‌های سرد $Kwh/m^2$ | میانگین دریافت انرژی در ماه‌های گرم $Kwh/m^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| غرب | 41/9 | 6/39 | 11.62 | جنوب | 12/04 | 7/69 | 8/67 |
| °10 | 10/22 | 6/87 | 12/01 | °100 | 11/98 | 7/57 | 9/53 |
| °20 | 10/90 | 7/28 | 12/16 | °110 | 11/92 | 7/39 | 10/36 |
| °30 | 11/46 | 7/59 | 12/07 | °120 | 11/79 | 7/14 | 11/17 |
| °40 | 11/85 | 7/81 | 11/70 | °130 | 11/53 | 6/82 | 11/80 |
| °50 | 12/10 | 7/91 | 11/10 | °140 | 11/14 | 6/42 | 12/18 |
| °60 | 12/18 | 7/94 | 10/30 | °150 | 10/59 | 5/96 | 12/28 |
| °70 | 12/16 | 7/89 | 9/50 | °160 | 9/92 | 5/45 | 12/13 |
| °80 | 12/10 | 7/84 | 8/89 | °170 | 9/16 | 5/84 | 11/76 |
| جنوب | 12/04 | 7/69 | 8/67 | شرق | 9/41 | 5/84 | 11/62 |




شکل ۶. میانگین دریافت انرژی خورشیدی در ماه‌های سرد و گرم سال
Figure 6. Average solar energy intake in hot and cold months of the year




شکل ۷. میزان دریافت انرژی خورشیدی بر اساس تغییر طول، عرض و نسبت سطح نورگذر به کدر در گلخانه خورشیدی
Figure 7. The amount of solar energy received based on the changes in length, width and ratio of transmittance in Sunspace

طول گلخانه خورشیدی برابر با ۱ متر بود، عمق‌های مختلف از ۰/۵- ۳ متـــر و در بازه‌های ۰/۵ متری و درصد جدار نورگذر در ســـه حالت ۴۰٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ یعنـــی مجموعاً ۱۸ حالـــت مختلف برای طول ۱ متر ازلحاظ میزان جذب انرژی خورشیدی بررسی گردید. جهت سایر طول‌ها و عمق‌ها و نســـبت‌های ســـطح نورگذر به کدر مجموعاً ۱۲۶ حالت مختلف تمام متغیرهای گفته‌شده موردبررسی قرار گرفت.

در شـــکل ۸ و جدول ۵ می‌توان مشـــاهده نمود کـــه با افزایش طول گلخانه ســـطح رو به جنوب افزایش‌یافته، لذا میزان انرژی دریافتی نیز افزایـــش می‌یابد، امـــا این افزایش تا طول ۵ متـــر ادامه دارد و پس از رونـــد نزولی پیدا می‌نماید به‌نحوی‌که در طـــول ۶ متر میزان دریافت انرژی کاهش‌یافته و پس‌ازآن به‌تدریج افزایش می‌یابد؛ بنابراین گلخانه خورشـــیدی درحالی‌که دارای طول (برابر با ۵ متر) باشد ازنظر دریافت انرژی خورشیدی دارای بیشترین بازده است.

در شـــکل ۹ می‌توان روند تأثیر افزایش عمق گلخانه خورشـــیدی در میزان دریافت انرژی خورشـــیدی را مشـــاهده نمود. در بررسی شکل این‌گونـــه دریافت می‌گردد که افزایش عمـــق گلخانه بیش از ۲/۵ متر اثر عکس در دریافت انرژی خورشیدی داشته، به‌طوری‌که عمق ۳ متر کمترین میزان دریافت انرژی را خواهد داشت. با توجه به شکل حاصل از نتایج به‌دســـت‌آمده با اختلاف اندکی نسبت به سایر مقادیر (شامل: ۰/۵-۱- ۱/۵ -۲) عمـــق ۰/۵ و ۱ متر بیشـــترین بـــازده جذب انرژی خورشیدی را داراست.

## نســـبت ســـطح نورگذر به کدر در جـــدار خارجی گلخانه خورشیدی

در خصوص نسبت ســـطح نورگذر به کدر با توجه به اینکه تنها جدار جنوبی دارای ســـطح نورگذر بوده و دیوارهای طرفین کدر می‌باشند، میزان جذب انرژی خورشـــیدی در ســـه حالت مختلف نســـبت سطح نورگذر به کدر برابر با: ۴۰٪ - ۵۰٪ و ۶۰٪ موردبررســـی قرار گرفت. طبق داده‌های به‌دســـت‌آمده که در جدول ۶ نشان داده‌شده با داشتن ۵۰٪ سطح نورگذر نســـبت به دیوار می‌توان حداکثر دریافت انرژی را داشت و افزایش این نسبت همانند درصد پایین‌تر عمل نموده و تأثیری در جذب بیشتر انرژی خورشیدی نمی‌تواند داشته باشد.

با توجـــه به اینکه غیر از جـــدار نورگذر دیوارهای اطـــراف نیز جدار خارجی گلخانه خورشیدی را تشکیل می‌دهند، بنابراین جلوگیری از

شکل ۸: میانگین انرژی دریافتی خورشیدی در ماه‌های سرد بر اساس تغییر طول گلخانه خورشیدی
Figure 8. Average solar energy received in cold months based on the change in the length of the Sunspace

جدول ۵. میانگین انرژی دریافتی خورشیدی در ماه‌های سرد بر اساس تغییر طول گلخانه خورشیدی
Table 5. Average solar energy received in cold months based on the change in the length of the Sunspace

| | ۱ | ۲ | ۳ | ٤ | ٥ | ٦ | ٧ | ٨ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| میزان انرژی خورشیدی دریافتی در کل سال ($kWh/m^2$) | 74/45 | 145/27 | 212/7 | 277/12 | 338/53 | 233/04 | 268/4 | 302/84 |
| میزان انرژی خورشیدی دریافتی در ماه‌های سرد ($kWh/m^2$) | 32/02 | 62/48 | 91/5 | 119/21 | 145/69 | 101/1 | 116/44 | 131/39 |
| میزان انرژی خورشیدی دریافتی در ماه‌های گرم ($kWh/m^2$) | 22/78 | 44/44 | 65/05 | 84/75 | 103/49 | 55/87 | 64/34 | 72/58 |

شکل ۹. میزان دریافت انرژی خورشیدی بر اساس تغییر عمق گلخانه خورشیدی
Figure 9. The amount of solar energy received based on the changes in the depth of the Sunspace

جدول ۶. میزان دریافت انرژی خورشیدی بر اساس نسبت سطح نورگذر به کدر در جبهه خارجی گلخانه خورشیدی
Table 6. The amount of solar energy received based on the ratio of transmittance in the outer front of the Sunspace

| درصد جدار نورگذر | میانگین دریافت انرژی در سال | میانگین دریافت انرژی در ماه‌های سرد | میانگین دریافت انرژی در ماه‌های گرم |
|---|---|---|---|
| ۴۰ | ۲۳/۵۲ | ۱۵/۱۸ | ۲۱/۵۷ |
| ۵۰ | ۲۸/۲۱ | ۱۸/۲۱ | ۲۵/۸۷ |
| ۶۰ | ۱۸/۸۲ | ۱۲/۱۴ | ۱۷/۲۷ |

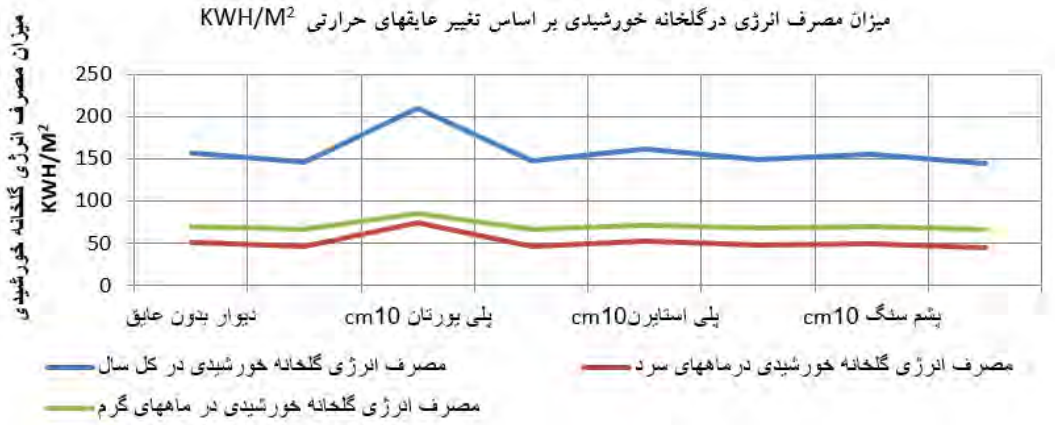
اتلاف حرارت از این جداره‌ها ضروری می‌نماید. لذا تأثیر عایق‌های حرارتی مختلف در دیوارهای کناری خارجی گلخانه خورشیدی نیز موردبررسی قرار گرفت.

## عایق‌بندی حرارتی دیوارهای کناری گلخانه خورشیدی الحاقی

دیوارها باوجوداینکه سبب ذخیره انرژی در طول روز می‌گردند درصورتی‌که به نحو مناسب ازلحاظ حرارتی عایق‌بندی نشوند می‌توانند مقداری از انرژی را در طول شب با توجه به کاهش دما به بیرون انتقال دهند؛ بنابراین نوع و ضخامت عایق حرارتی مورداستفاده در دیوارها می‌تواند در کاهش اتلاف حرارت از طریق دیوارها مؤثر باشد. درصورتی‌که با استفاده از عایق بتوان از کاهش دمای هوا در طول شب جلوگیری کرد فضای گلخانه در این شرایط نیز می‌تواند شرایط آسایش را برای افراد و همچنین دمای بالاتری را برای گیاهان فراهم کند. به همین منظور چهار نوع عایق حرارتی متداول با دو ضخامت مختلف موردبررسی قرار گرفت.

همان‌طور که از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود در حالتی که از عایق پلی استایرن باضخامت ۵ سانتی‌متر استفاده شود، بیشترین میزان هدر رفت انرژی را نسبت به سایر عایق‌ها داریم و در این حالت جلوگیری از هر رفت انرژی انجام نمی‌گردد. در حالت کلی می‌توان مشاهده کرد که ضخامت عایق‌ها در اتلاف انرژی مؤثر است و با اختلاف کمی با سایر عایق‌ها پشم‌شیشه باضخامت ۱۰cm می‌تواند در صرفه‌جویی در مصرف انرژی تأثیرگذار باشد.

با بررسی ۱۶۷۵۸ حالت مختلف از متغیرهای بررسی‌شده توسط روش الگوریتم ژنتیک شکل ۱۱ (در فرمان اکتاپوس نرم‌افزار گرس‌هاپر) حالت بهینه زمانی است که گلخانه خورشیدی به جهت جنوب بوده




شکل ۱۰. تأثیر انواع مختلف عایق حرارتی بر روی میزان دریافت انرژی و اتلاف انرژی
Figure 10. The effect of different types of thermal insulation on energy intake and energy loss

شکل ۱۱. الگوریتم ژنتیک، نرم‌افزار گرس‌هاپر
Figure 11. Genetic Algorithm, Grasshopper Software

و دارای طـــول ۵ متر و عرض ۰٫۵ متر با درصـــد جدار نورگذر ۵۰٪ باشـــد که بیشـــترین میزان دریافت انرژی خورشیدی را در دوره سرد سال دارد.

اعتبارســـنجی نتایـــج: مهم‌ترین پرسشـــی که پیرامـــون به‌کارگیری نرم‌افزارهای شبیه‌ســـاز مصرف انرژی در ســـاختمان ممکن اســـت به ذهن خطور نماید، «اعتبارسنجی» و دقت این نرم‌افزارها در محاسبات مصرف انرژی در مقایســـه با میزان واقعی آن اســـت. پژوهش‌هایی که در این حوزه انجام‌شـــده، نشـــان‌دهنده آن است که این نرم‌افزارها با دقتی قابل‌قبول مصرف انرژی ســـاختمان را محاســـبه می‌نماید (Yu et al., 2008, 1537). عوامل متعـــدد تأثیرگذار بر عملکرد انرژی در ســـاختمان، پیش‌بینی دقیق میزان مصرف انرژی در شرایط واقعی را بسیار مشـــکل کرده است. ازاین‌رو لازم اســـت با تطبیق خروجی‌های حاصل از شبیه‌ســـازی با داده‌های اندازه‌گیری شده در شرایط واقعی، اعتبار نرم‌افزارهای شبیه‌ســـازی بررســـی شـــود. جامعـــه متخصصان شبیه‌ســـازی پیش‌ازاین اعتبارســـنجی را هنری وابسته به تجربه کاربر نرم‌افزار و دانش مهندســـی می‌دانســـتند و به‌طور گسترده به سعی و خطا برای رســـیدن بـــه هدف تکیه می‌کردند، اما در ســـال‌های اخیر، محققان روش‌هایی علمی برای اعتبارســـنجی نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی ارائه کرده‌اند (Coakley et al, 2012).

برای بررسی اعتبار نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی روش‌های مختلفی در تحقیقات معرفی‌شده اســـت. به‌طورکلی، این روش‌ها به سه دسته کلی روش‌های تحلیلی، مقایســـه‌ای و تجربی تقســـیم می‌شـــوند. در میان تحقیقات اعتبارســـنجی نرم‌افزارهای انرژی ساختمان، روش‌های تجربی، (مقایســـه نتایج شبیه‌ســـازی با اندازه‌گیری‌هـــای میدانی) و مقایســـه‌ای، (مقایســـه نتایج نرم‌افزارهای مختلف شبیه‌ســـازی انرژی با یکدیگـــر) رایج‌ترین نوع اعتبارســـنجی‌اند. در ایـــن پژوهش جهت اعتبارسنجی نرم‌افزار مورداستفاده از روش مقایسه‌ای استفاده گردید، که نتایج حاصل از شبیه‌ســـازی در نرم‌افزار گرس‌هاپر با نتایج نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر مقایســـه شـــد. نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر یکـــی از به‌روزترین نرم‌افزارهای شبیه‌ســـازی انرژی است که به دلیل دقت و توانایی‌های بالای مدل‌ســـازی، پوشـــش کلیه نیازهای شبیه‌ســـازی انرژی (شامل محاســـبه مصرف انرژی، محاسبه بار حرارتی و برودتی، شبیه‌سازی نور روز و غیـــره) و درعین‌حـــال گرافیکی بودن و ســـهولت کار به یکی از اصلی‌ترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی تبدیل گردیده است. به‌منظور اعتبارسنجی نرم‌افزار مورداستفاده نتایج حاصل از میزان دریافت انرژی خورشـــیدی در جهت جنوب با تغییر طول گلخانه خورشیدی در مدل شبیه‌سازی با دو نرم‌افزار با یکدیگر مقایسه شده و درصد اختلاف بین نتایج محاسبه و ارائه‌شده است.

شکل ۱۲. مقایسه میانگین انرژی خورشیدی دریافتی در دو نرم‌افزار گرس‌هاپر و دیزاین‌بیلدر
Figure 12. Comparison of average solar energy received by Grasshopper and Design builder software

جدول ۷. مقایسه میانگین انرژی خورشیدی دریافتی در دو نرم‌افزار گرس‌هاپر و دیزاین‌بیلدر
Table 7. Comparison of average solar energy received by Grasshopper and Design builder software

| | ۱ | ۲ | ۳ | ٤ | ٥ | ٦ | ۷ | ۸ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| انرژی خورشیدی دریافتی در سال (نرم‌افزار گرس‌هاپر) | ٤٥/٧٤ | ۲۷/۱٤٥ | ۷/۲۱۲ | ۱۲/۲۷۷ | ٥۳/۳۳۸ | ۰٤/۲۳۳ | ٤/۲٦۸ | ۸٤/۳۰۲ |
| انرژی خورشیدی دریافتی در سال (نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر) | ٦۰ | ۸۲/۱۳۰ | ۲٥/۱۹۸ | ۲٦/۲۸۰ | ۹/۳۳۲ | ۱/۲۲۹ | ۳/۲۲۷ | ٦/۳۰٤ |

طبق نتایج به‌دست‌آمده آن‌طور که در شکل زیر مشخص است نتایج حاصل از دو نرم‌افزار تفاوت چندانی نداشته و روند افزایش و کاهش انرژی با تغییر طول به یک صورت است که در شکل ۱۲ و جدول ۷ می‌توان مشاهده کرد. اختلاف به‌دست‌آمده معادل ۱,۳٪ است که طبق اصول اعتبارسنجی عدد قابل قبولی است.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله شبیه‌سازی مدل بهینه گلخانه خورشیدی در شهر سنندج با استفاده از جهت‌گیری، ابعاد، درصد سطح شیشه‌ای و عایق حرارتی به‌کاربرده شده که از مقایسه بین چندین حالت مختلف به‌دست‌آمده منجر به نتایج ذیل شده است:

مناسب‌ترین جهت‌گیری در فصول سرد سال (از ماه ژانویه تا می و اکتبر تا دسامبر) به‌منظور دریافت بیشترین انرژی تابش خورشیدی و بهترین طول گلخانه (کشیدگی رو به جنوب) ۱۰-۲۰ درجه به سمت غرب و شرق مناسب‌ترین حالت را نشان می‌دهد.

به نظر می‌رسد بهترین الگوی شکل‌گیری ساختار فضایی و عملکردی معماری گلخانه خورشیدی با توجه به نمودارهای به‌دست‌آمده با توجه به بالاترین میزان دریافت انرژی خورشیدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و اکتاپوس در نرم‌افزار گرس‌هاپر در جهت جنوب بوده با طول ۵ متر و عرض ۰,۵ متر با درصد جدارنورگذر ۵۰٪ باشد اما در بررسی هریک از متغیرها به‌طور جداگانه بیشترین میزان دریافت انرژی خورشیدی در گلخانه خورشیدی به شرح ذیل است:

گلخانه خورشیدی با جهت‌گیری در جبهه جنوبی تا ۲۰ درجه به سمت غرب و شرق بیشترین کارایی را ازلحاظ جذب انرژی خورشیدی دارد که این امر با افزایش طول گلخانه به جهت افزایش جبهه مناسب تأثیرگذارتر می‌گردد لذا با توجه به بررسی‌های انجام‌شده از میان طول‌های موردبررسی (از ۱ تا ۵ متر در بازه‌های یک متری) طول ۵ متر تواند در افزایش عملکرد گرمایشی گلخانه تأثیرگذار باشد اما در طول‌های بیشتر نتیجه معکوس دارد که ۵۰٪ جدار نورگذر در این جبهه در دستیابی به هدف طراحی بهتر عمل می‌کند. بعلاوه برخلاف طول، با افزایش عمق نمی‌توان بازده بالاتری ازنظر دریافت انرژی خورشیدی داشت و مناسب‌ترین حالت در عمق ۱ متر است. عایق‌های باضخامت ۱۰ سانتی‌متر در کاهش اتلاف انرژی مؤثرتر بوده و نوع عایق تأثیر چندانی در این دستاورد نداشت؛ بنابراین نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار گرس‌هاپر بیانگر آن است که تأثیر برخی متغیرهای معماری در تلفیق با سامانه گلخانه خورشیدی، موجب تقویت کارایی گلخانه و تأثیر مستقیم و مثبت در کاهش مصرف اتلاف انرژی سالیانه می‌گردد. از آثار مثبت گلخانه خورشیدی به‌عنوان مهم‌ترین و تأثیرگذارترین متغیرهای معماری در راستای تحقق اهداف پژوهش همانا استفاده از روش‌های غیرفعال در ساختمان‌های مسکونی در اقلیم سرد و کوهستانی کشور (شهر سنندج) می‌باشند.

## پی‌نوشت‌ها

1.Aeleneiet al
2.Jørgensen & Henderson
3. Ulpiani
4.Alzoubi & Malkawi
5.Derob-LTH
6.Taleghani et al.,
7.Mihalakakou & Ferrante
8.Key Worker
9.ZEDFactory
10.Grasshopper
11.Galapagos

12.Octapos

13. TmyCreator

## فهرست مراجع


۱. ابراهیم پور، عبدالسلام؛ و معرفت، مهدی. (۱۳۹۰). اصلاح روشی جهت تولید داده های اقلیمی TMY برای شهر تهران، *مهندسی مکانیک مدرس*، ۱۱ (۲)، ۷۷-۹۱.

۲. ابراهیم پور، عبدالسلام؛ و کسمایی، مرتضی. (۱۳۹۲). *تهیه فایل‌های اقلیمی TMY برای شهرهای مهم ایران*، انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

۳. احمدی ندوشن، افشین و بهادری نژاد، مهدی، (۱۳۸۵)،کاهش انرژی برودتی و حرارتی مجتمع‌های مسکونی با استفاده از بادبزن‌های سقفی، *چهاردهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک*، اصفهان.

۴. رحیم‌پور، آیدا؛ و رحیمی، مجتبی. (۱۳۹۲). اهمیت و لزوم استفاده از انرژی‌های نو در ساختمان‌های مسکونی استان کرمان و طراحی. *ساختمان سبز، اولین همایش ملی انرژی‌های نو و پاک*، همدان.

۵. لکنر. نربرت. (۱۳۸۵). *گرمایش، سرمایش، روشنایی رویکردهای طراحی برای معماران*، (محمدعلی کی‌نژاد و رحمان‌آذری، مترجمان)، تبریز: انتشارات دانشگاه هنر اسلامی تبریز. (نشر اثر اصلی:۲۰۰۱)

۶. مازریا، ادورد. (۱۳۸۵). *معماری خورشیدی غیرفعال*. (بیژن آقازاده، مترجم). تهران: نشر پیک ادبیات.

۷. گیلانی، سارا؛ و محمدکاری، بهروز. (۱۳۹۰). بررسی عملکرد گرمایشی گلخانه‌های خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی اقلیم سرد نمونه موردی: شهر اردبیل. *مهندسی مکانیک مدرس*، ۱۱ (۲)، ۱۴۷-۱۵۷.

8. Alzoubi, H. H., & Malkawi, A. T. (2015). The optimal utilization of solar energy in residential buildings in light of the Jordanian building regulations. *Sustainable Cities and Society*, 14, 441-448.

9. Attia, S., Hamdy, M., O'Brien, W., & Carlucci, S. (2013). Computational optimisation for zero energy buildings design interviews results with twenty eight international expert. *In Proceedings of the 13th Conference of International Building Performance Simulation Association.*

10. Berardi, U. (2017). A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. *Resources, Conservation and Recycling*, 123, 230-241.

11. Carlucci, S., Cattarin, G., Causone, F., & Pagliano, L. (2015). Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). *Energy and Buildings*, 104, 378-394.

12. Coakley, D., Raftery, P., & Molloy, P. (2012). Calibration of whole building energy simulation models: detailed case study of a naturally ventilated building using hourly measured data. *Building Simulation and Optimization*, 57-64.

13. Eskin, N., & Türkmen, H. (2008). Analysis of annual heating and cooling energy requirements for office buildings in different climates in Turkey. *Energy and buildings*, 40(5), 763-773.

14. Chiesa, G., Simonetti, M., & Ballada, G. (2017). Potential of attached sunspaces in winter season comparing different technological choices in Central and Southern Europe. *Energy and Buildings*, 138, 377-395.

15. Godoy-Shimizu, D., Steadman, P., Hamilton, I., Donn, M., Evans, S., Moreno, G., & Shayesteh, H. (2018). Energy use and height in office buildings. *Building Research & Information*, 46(8), 845-863.

16. International Energy Agency, Energy Access Outlook 2017, Retrieved October 2016, from: https://www.iea.org/reports/energy-access-outlook-2017

17. Jørgensen, O. B., & Hendriksen, O. J. (2000). Glazed balconies and sun spaces–energy savers or energy wasters. *In Proceedings of the Third ISES Europe Solar Congress* (Eurosun2000), Copenhagen, Denmark, 19-22.

18. Moore, F. (1993). *Environmental control systems: Heating, cooling, lighting. architecture and urban planninig series.* New York: McGraw-Hill.

19. Neto, A. H., & Fiorelli, F. A. S. (2008). Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption. *Energy and buildings*, 40(12), 2169-2176.

20. Raji, B., Tenpierik, M. J., & Van den Dobbelsteen, A. (2017). Early-stage design considerations for the energy-efficiency of high-rise office buildings. *Sustainability*, 9(4),

1-28.

21. Taleghani, M., Tenpierik, M. J., & Van den Dobbelsteen, A. A. J. F. (2012). The effect of different transitional spaces on thermal comfort and energy consumption of residential buildings. *In 7th Windsor Conference 2012: The changing context of comfort in an unpredictable world, Windsor, UK,* 12-15 April 2012.

22. Ulpiani, G., Giuliani, D., Romagnoli, A., & di Perna, C. (2017). Experimental monitoring of a sunspace applied to a NZEB mock-up: Assessing and comparing the energy benefits of different configurations. *Energy and Buildings,* 152, 194-215.

23. Yu, J., Yang, C., & Tian, L. (2008). Low-energy envelope design of residential building in hot summer and cold winter zone in China. *Energy and Buildings,* 40(8), 1536-1546.

24. ZEDFactory (2016), Retrieved April 2022, from https://www.zedfactory.com/zero-bills-home

**COPYRIGHTS**

©2022 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

ISSN 17359562 DOI: 10.30495/hoviatshahr.2022.53545.11782

# Energy Parametric Analysis of Sunspace Heating Performance of Building in Cold Climate
## (Case Study: Sanandaj)

***Parisa Abdolkhaleghi,*** *Ph.D. Candidate in Architecture, Department of Architecture, Kish International Branch, Islamic Azad University, Kish Island, Iran.*

***Jaleh Sabernejad*,*** *Assistant Professor of Architecture, Faculty of Architecture, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

***Rima Fayaz,*** *Associate Professor of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, University of Arts, Tehran, Iran.*

## Abstract

Increasing energy consumption in buildings has resulted in environmental issues and has led many researchers to explore ways to reduce fossil fuel consumption. One of the most cost-effective and logical ways to use energy resources in residential buildings is to use passive solar systems such as sunspaces. Sunspaces are passive systems that can easily be integrated into the structure of a building, whether it is under construction or already completed. The primary role of passive sunspace systems is to collect solar energy, accumulate it inside, and transfer it to other living areas. In addition, sunspaces also serve as buffer zones, protecting the indoor space from excessive heat loss.The design of a building with a sunspace can be improved if optimization algorithms accompany the method of energy performance simulation. Building optimization can include a variety of goals, such as energy, environmental, economic, etc. The use of passive systems in residential buildings can provide a substantial portion of passive solar heating, but the degree of efficiency of sunlight depends on numerous parameters, such as climatic parameters. This paper presents the effects of sunspaces on energy gain and reducing energy consumption. The best-known static methods, such as those used in the EN ISO 13790 standard, do not yield sufficiently accurate results. Dynamic simulation methods that can determine the energy needs of buildings more precisely require computer support and more time for the simulation to be performed. The energy performance of the sunspace was calculated using parametric modeling in Grasshopper software and Rhino software, and energy simulation was carried out using Energy plus. Simulations were performed according to the climate of Sanandaj, which is located in a cold climate area. Meteorological data considered in the model represent a meteorological year. The proposed performance optimization method utilizes various tools and technologies, including parametric design, building simulation modeling, and Genetic Algorithms. To achieve simulation goals, different models of sunspace with different dimensions and orientations in Sanandaj have been studied. Modifications of the models included different proportions of sunspace dimensions, orientations, and the use of different thermal insulations. The orientation towards the south receives the highest energy, and with a 20 degrees rotation to the west or east, the highest amount of energy can be gained. Examination of sunspace models with three percentages of window-to-wall ratio: 40%, 50%, and 60% showed that the 50% percent WWR is more desirable than other models. The highest increase in energy absorption to help reduce the heating load during the cold season occurs when the sunspace has the most extended length, i.e., 5 meters, because in this case, the southward is increased, and the desired depth is 1 meter, while by reducing or increasing this amount, solar energy gain is reduced. Also, to improve the performance of the sunspace, the use of conventional thermal insulation has been investigated. Polyurethane with a thickness of 10 cm has the lowest efficiency in reducing energy consumption in the sunspace, while other insulating materials with similar thicknesses are effective.

**Keywords:** Sunspace, Residental Building, Energy Performance, Cold Climate, Sanandaj City.

* Corresponding Author Email: j_sabernejad@azad.ac.ir