صفحات ۱۰۰-۸۷

سنجش اثر جهت و زاویه بام شیب‌دار بر مصرف انرژی ساختمان‌های معاصر در اقلیم گرم و خشک (مطالعه موردی: شهر قم)

سید محمود معینی*، مهدی شعبانیان**

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

چکیده

در اقلیم گرم و خشک، شدت تابش و نوسانات دمایی باعث می‌شود جهت و شیب بام تأثیر چشمگیری بر مصرف انرژی ساختمان داشته باشد. با توجه به اینکه در پروژه‌های ساختمانی، این موضوع کمتر بررسی شده، هدف این پژوهش تحلیل انرژی محور این موضوع می‌باشد. برای شناسایی ترکیب بهینه جهت و شیب بام، نمونه ساختمانی بر اساس مدل ۹۰۰ اشری انتخاب شد. سپس با ترکیب هشت جهت جغرافیایی و پنج زاویه شیب، ۴۰ سناریو طراحی و در نرم‌افزار دیزاین بیلدر با استفاده از داده‌های اقلیمی شهر قم شبیه‌سازی و تحلیل شدند. یافته‌ها نشان داد بهینه‌ترین سناریو، جهت جنوب شرقی با زاویه ۳۰ درجه بود که مصرف انرژی سالانه را به ۱۳۸۲۰ کیلووات‌ساعت رساند. این مقدار نسبت به نامطلوب‌ترین حالت، حدود ۲۹/۵٪ کاهش نشان داد. نتایج بیان می‌کند که انتخاب صحیح جهت و زاویه بام می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای در کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان مؤثر باشد.

واژه‌های کلیدی

اقلیم گرم و خشک، بام شیب‌دار، شبیه‌سازی، زاویه، جهت.

* گروه معماری، واحد ملایر، دانشگاه آزاد اسلامی، ملایر، ایران. (مسئول مکاتبات).

Email: mmoeini.arch@iau.ac.ir
ORCID: 0009-0007-8957-9918

** گروه معماری، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

Email: shaabanianmahdi@iau.ac.ir
ORCID: 0000-0003-3356-7516

مقدمه

در سال‌های اخیر، بحران جهانی انرژی و اثرات زیست‌محیطی آن، توجه پژوهشگران و متخصصان حوزه معماری و مهندسی ساختمان را به‌طور ویژه به خود جلب کرده است. ساختمان‌ها به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین بخش‌های انرژی در سطح جهانی، سهم قابل‌توجهی از مصرف انرژی را به خود اختصاص داده‌اند؛ به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک، بارهای سرمایشی در تابستان و گرمایشی در شب‌های زمستان، فشار مضاعفی بر منابع انرژی وارد می‌سازد (Pérez-Lombard et al., 2008). سهم کلی ساختمان‌ها ۴۰٪ از تقاضای سالانه انرژی در سراسر جهان است (Morsali et al., 2021). طراحی معماری همساز با اقلیم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین راهکارهای کاهش مصرف انرژی، مورد توجه سیاست‌گذاران، معماران و محققان قرار گرفته است (Givoni, 1998). اغلب پژوهش هایی که هندسه ساختمان را در نظر می‌گیرند، فضاها را بدون بهینه‌سازی انرژی بررسی کرده و یا فرآیندهای بهینه‌سازی، تنها چند متغیر اساسی هندسه فضایی ساده شده را محاسبه می‌کنند (Kistelegdi et al., 2022).

در اقلیم گرم و خشک، که ویژگی‌هایی همچون تابش مستقیم شدید، رطوبت نسبی پایین، و نوسانات دمایی قابل‌توجه بین روز و شب دارد، نحوه طراحی بام می‌تواند نقشی کلیدی در تعادل حرارتی ساختمان ایفا کند. بام به‌عنوان سطحی افقی یا مایل که بیشترین تماس با تابش خورشید دارد، می‌تواند منبعی مهم برای جذب یا دفع انرژی گرمایی باشد. جهت‌گیری بام نسبت به مسیر خورشید، زاویه شیب، و نسبت تابش مستقیم و پراکنده، همگی بر شدت انتقال حرارت از این سطح مؤثرند (Ozel & Pihtili, 2008). از سوی دیگر، انتخاب نادرست شیب و جهت بام می‌تواند بارهای سرمایشی ساختمان را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد، به‌ویژه زمانی که عایق‌بندی کافی وجود نداشته یا طراحی پاسخگوی شرایط اقلیمی منطقه نباشد (Al-Tamimi & Fadzil, 2011).

قم به‌عنوان یکی از شهرهای واقع در ناحیه مرکزی ایران، از ویژگی‌های اقلیم گرم و خشک برخوردار است. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن و داده‌های بلند مدت هواشناسی، قم دارای تابستان‌هایی گرم و خشک با دمای متوسط بالای ۳۸ درجه سانتی‌گراد و زمستان‌هایی سرد با دمای شبانه پایین‌تر از صفر است. تابش مستقیم خورشید در بخش عمده‌ای از سال، موقعیتی چالش‌برانگیز اما در عین حال فرصت‌زا برای طراحی آگاهانه بام‌ها فراهم می‌آورد. با وجود این، در بسیاری از پروژه‌های ساختمانی معاصر در قم و مناطق مشابه، تصمیم‌گیری در مورد جهت‌گیری و شیب بام بیشتر بر مبنای عوامل غیرعلمی مانند زیبایی‌شناسی، هزینه ساخت یا تجربه شخصی صورت می‌گیرد و کمتر بر پایه ارزیابی‌های انرژی‌محور استوار است.

پژوهش‌های متعددی به بررسی تأثیر فرم، مصالح و زاویه بام بر عملکرد حرارتی ساختمان پرداخته‌اند. برای مثال، (Tae, 2005) از طریق شبیه‌سازی با نرم‌افزار DOE به تعیین شیب و جهت استقرار بهینه ساختمان به منظور به حداقل رسانده بار سرمایشی ناشی از تابش خورشید در اقلیم‌های مختلف پرداخته است. همچنین (Askar et al., 2025) در پژوهش خود با انتخاب مناطقی از مجارستان و عراق به عنوان اقلیم‌های به ترتیب معتدل و گرم به کمک شبیه‌سازی با نرم‌افزار ANSYS و تغییر زاویه سقف در پیکربندی‌های مختلف، به طور خاص بر جهت‌گیری جنوبی در طول زمستان برای به حداکثر رساندن دریافت گرما در طول روز و جهت‌گیری شمالی در طول تابستان برای به حداقل رساندن دریافت گرما تمرکز کردند. با توسعه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی مانند دیزاین بیلدر و انرژی پلاس، امکان تحلیل کمّی و دقیق متغیرهای طراحی فراهم آمده است. این ابزارها با بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی واقعی، ویژگی‌های مصالح و الگوهای مصرف، می‌توانند پیش‌بینی دقیقی از بارهای انرژی سالانه در ساختمان ارائه دهند (Crawley et al., 2001). بنابراین، طراحی مبتنی بر شبیه‌سازی می‌تواند ابزار مؤثری برای تصمیم‌سازی معماری باشد.

در اقلیم‌های گرم و خشک همچون شهر قم، شرایط آب‌وهوایی شامل تابش شدید خورشید در بیشتر روزهای سال، رطوبت پایین و اختلاف قابل‌توجه دمای شب و روز، فشار مضاعفی بر سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی ساختمان وارد می‌کند. این وضعیت نه تنها موجب افزایش هزینه‌های انرژی برای خانوارها و بهره‌برداران ساختمان می‌شود، بلکه آثار زیست‌محیطی ناشی از مصرف بالای سوخت‌های فسیلی را نیز تشدید می‌نماید. در این میان، بام ساختمان به‌عنوان وسیع‌ترین سطح در معرض تابش مستقیم خورشید، بیشترین سهم را در جذب حرارت و انتقال آن به فضای داخلی دارد؛ بنابراین، هرگونه تصمیم‌گیری در خصوص طراحی و اجرای بام، از جمله انتخاب جهت‌گیری جغرافیایی و زاویه شیب آن، می‌تواند به‌طور مستقیم بر تعادل حرارتی و عملکرد انرژی ساختمان اثرگذار باشد. اهمیت بهینه‌سازی ساده در طراحی بام، بدون نیاز به فناوری‌های پیچیده و هزینه‌های اضافی، قادر است مصرف انرژی سالانه ساختمان را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد و در عین حال آسایش حرارتی ساکنان را ارتقا بخشد. از این رو پرداختن به تأثیر جهت و زاویه بام در شرایط اقلیمی قم، ضرورتی علمی و کاربردی برای دستیابی به معماری پایدار و مدیریت بهینه انرژی به شمار می‌آید.

در این پژوهش، با هدف سنجش اثر ترکیبی جهت و زاویه شیب بام بر مصرف انرژی ساختمان، یک اتاق نمونه با ابعاد ۶×۸ متر و ارتفاع

۲/۷ متر، همراه با دو پنجره جنوبی به طول ۳ و ارتفاع ۲ متر مجموعاً به مساحت ۱۲ مترمربع، به‌عنوان مرجع پایه بر مبنای مدل استاندارد شماره ۹۰۰ اشری در نظر گرفته شد. با ترکیب هشت جهت جغرافیایی شامل شمال، شمال شرقی، شرق، جنوب شرقی، جنوب، جنوب غربی، غرب و شمال غربی و پنج زاویه شیب ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، ۴۰ سناریو مدل‌سازی شد. تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر و داده‌های اقلیمی epw شهر قم انجام گردید.

پرسش اصلی پژوهش آن است که کدام ترکیب از جهت و شیب بام می‌تواند منجر به حداقل مصرف انرژی سالانه شود؟ همچنین هدف نهایی این مطالعه، ارائه مدلی علمی و قابل‌استفاده برای بهینه‌سازی طراحی بام در مناطق گرم و خشک، به‌ویژه در بافت‌های جدید شهری قم می‌باشد. با توجه به افزایش هزینه‌های انرژی، سیاست‌های بهینه‌سازی مصرف، و لزوم سازگاری ساختمان‌ها با اقلیم، نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری‌های طراحی معماری و دستورالعمل‌های ساختمانی آینده قرار گیرد.

پیشینه پژوهش

در دهه‌های اخیر، بهینه‌سازی فرم و اجزای کالبدی ساختمان‌ها با هدف کاهش مصرف انرژی، به یکی از موضوعات کلیدی پژوهش در حوزه معماری پایدار و طراحی همساز با اقلیم تبدیل شده است. در این میان، بام ساختمان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سطوح درگیر با تابش خورشیدی و انتقال حرارت، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک که بخش عمده‌ای از انرژی صرف سرمایش فضاهای داخلی می‌شود، جایگاه ویژه‌ای یافته است. بررسی نقش مؤلفه‌هایی چون جهت‌گیری و زاویه شیب بام می‌تواند نقشی تعیین‌کننده در عملکرد انرژی ساختمان ایفا کند.

در پژوهش (Givoni,1998) در کتاب مرجع خود درباره طراحی اقلیمی ساختمان‌ها، بر نقش حیاتی بام در کنترل تبادل حرارتی تأکید کرد. وی معتقد بود که بام در اقلیم‌های خشک و آفتابی باید به گونه‌ای طراحی شود که بیشترین بازتاب تابش مستقیم خورشید را داشته باشد و از انباشت گرمایی در ساعات اوج تابش جلوگیری کند. پیشنهاد او استفاده از شیب‌هایی با زاویه کم و سطح سفیدرنگ در نواحی بیابانی بود، گرچه در عین حال به مزایای شیب‌های متوسط در تعادل بار سرمایشی و گرمایشی نیز اشاره نمود. در پژوهشی دیگر (Runsheng et al.,2023) به محاسبه میزان جذب نور خورشید توسط سقف‌های خمیده در مقایسه با سقف‌های مسطح پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که یک سقف خمیده شکل، تابش خورشیدی بیشتری را نسبت به سقف مسطح مربوطه جذب می‌کند. همچنین مشاهده شد که یک سقف دارای جهت جنوب- شمال، در مقایسه با سقفی که رو به شرق- غرب است، در ماه‌های تابستان باعث کاهش دریافت گرمای خورشیدی و در ماه‌های زمستان باعث افزایش دریافت گرمای خورشیدی می‌شود. هرچه نسبت مساحت در معرض آفتاب بیشتر باشد، میزان تابش پرتو که توسط یک سقف منحنی جذب می‌شود، کمتر خواهد بود. مطالعه (AlAnzi et al., 2009) در کویت به‌عنوان یکی از تحقیقات کمی در این حوزه، نشان داد که جهت‌گیری مناسب ساختمان می‌تواند منجر به صرفه‌جویی انرژی قابل توجهی شود. آن‌ها با مدل‌سازی سه فرم مختلف پلان به شکل‌های U، L و H نیز شش جهت‌گیری متفاوت در نرم‌افزار EnergyPlus دریافتند که با تغییر جهت‌گیری از شمال به جنوب شرقی، مصرف سالانه انرژی سرمایشی در ساختمان‌های اداری تا ۱۸٪ کاهش می‌یابد. این نتیجه، اهمیت جهت‌یابی مناسب بناها در اقلیم گرم و خشک را به‌وضوح نشان داد. تحقیق (Faghih & Bahadori, 2011) به مطالعه عملکرد حرارتی سقف‌های گنبدی در کاهش دمای هوای داخل ساختمان‌ها در فصول گرم با در نظر گرفتن متغیرهایی مانند جریان هوا، تابش خورشید، انتقال حرارت تابشی و همچنین برخی از بازشوهای روی ساختمان پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد حرارتی سقف گنبدی مورد بررسی، به ویژه هنگامی که گنبد با کاشی‌های لعاب‌دار پوشانده شده است، بهتر از ساختمان با سقف مسطح است. در پژوهش دیگر (Mao & Yang, 2020) تأثیر پارامترهای فیزیکی بر عملکرد انتقال حرارت سقف شیشه‌ای با زوایای شیب مختلف در مناطق گرم تابستان و سرد زمستان را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با کاهش شیب سقف، تأثیر کاهش دمای سطح داخلی سقف نسبتاً مشهود است. هنگامی که زاویه سقف از ۴۵ درجه به ۳۰ درجه کاهش می‌یابد، حداکثر دمای سطح داخلی حدود ۱۲/۲ درصد کاهش می‌یابد. پژوهش (Renuka et al., 2022) که برای بررسی تاثیر جهت ساختمان در چند شهر هندوستان انجام شده نشان‌می‌دهد که بیشترین کاهش مصرف انرژی در دهلی با ساختمان رو به شمال و پس از آن چنای با ساختمان رو به شمال وجود دارد. در مطالعه‌ای که توسط (Bamdad, 2023) برای دو شهر کانبرا و ملبورن استرالیا انجام شده، اثر استفاده از بام خنک بر کاهش میزان بار حرارتی ساختمان مورد ارزیابی واقع شده است. نتایج پژوهش بیانگر این است که سقف‌های خنک، بارهای انرژی سالانه را در آب و هوای گرمسیری و نیمه‌گرمسیری به ترتیب تا ۱۴٪ و ۲۲٪ کاهش می‌دهند.

در ایران نیز مطالعات متعددی در رابطه با فرم بام و جهت‌یابی ساختمان در اقلیم گرم و خشک انجام شده است. به طور نمونه مهدوی نژاد (۱۳۹۲) در مطالعه‌ای به منظور معرفی و تحلیل انواع

روش تحقیق

بام‌ها که با اســـتفاده از شبیه‌ســـازی در نرم‌افزار انـــرژی پلاس برای ســـاختمان‌های شـــهر اصفهان انجام گرفته است، با هدف دستیابی به حداقل اتلاف انرژی، در پی شناخت مناسب‌ترین فرم بام در اقلیم گرم و خشـــک بوده‌اند. نتایج پژوهش ایشان نشان می‌دهد که مطلوب‌ترین بام در بین مدل‌ها از نظر عملکرد حرارتی، بام شیب‌دار ۳۰-۶۰ اســـت که بخش عمده‌ای از مســـاحت آن رو به جنوب قـــرار دارد. همچنین بخش دیگری از پژوهش بیانگر آن اســـت که بام گنبدی نامناسب‌ترین عملکرد حرارتی را دارد. نصراللهی و قبادی، (۱۳۹۳) در مطالعات خود که به غلظت آلاینده‌ها و جزایر حرارتی در لایه سطحی شهری براساس مطالعات کتابخانه‌ای و تحلیل و استنتاج منطقی از داده‌ها پرداخته‌اند، تنوع اشـــکال و ارتفاع بام‌ها را عوامل مهم بـــرای تخمین کیفیت هوا در دره‌های شـــهری دانســـته و نتیجه گرفته‌اند کـــه کاهش ارتفاع بام ســـاختمان، افزایش غلظت آلاینده‌ها و گرمای به دام افتاده در دره‌های شهری را به همراه دارد. همچنین میزان این دو متغیر در تنگه ما بین دو بام مسطح در مقایسه با بام‌های شیب‌دار بیشتر خواهد بود. این در حالی اســـت که بام‌های شیب‌دار دو طرفه و ذوزنقه‌ای کمترین گرمای به دام افتاده و بیشـــترین آشفتگی را ایجاد می‌کنند و با افزایش ارتفاع و شیب بام، آشـــفتگی و ســـرعت جریان هوای افقی نیز بیشتر خواهد شـــد. در این پژوهش سعی شده ضمن بررسی انواع اشکال بام، بهترین فرم ســـاختمان برای کلان شهرها جهت کاهش گرمای به دام افتاده و افزایش تلاطم لایه‌ها ارائه شود.

در مطالعه شرقی و عظیمی فریدنی (۱۳۹۵)، در اقلیم سرد کوهستانی کرج چهار تیپ سقف تخت، یک طرفه، دو طرفه و چهار طرفه با زوایای مختلف با هدف دستیابی به فرم و زاویه بهینه سقف شیب‌دار بر اساس انـــرژی دریافتی از طریق تابش خورشید، در نـــرم افزار رویت و انرژی پلاس مورد مقایسه قرار داده‌اند. نتایج نشان می دهد که سقف شیبدار دوطرفـــه بهتریـــن کارکرد را با توجه به دریافت انرژی در زمســـتان با مساحت کف در مقایسه با سایر گونه های سقف برای آسایش حرارتی افراد خواهد داشت.

خانمحمدی و لسان (۱۳۹۵) در پژوهش خود چهار نمونه از بام های شیبدار اقلیم معتدل و مرطوب شـــامل، تیرچه بلوک، بام با پوشـــش ســـفال،حلب، لت ســـر را از طریق نرم افزار انرژی پلاس مورد مطالعه قرار داده اســـت. نتایج نشـــان می دهد که بام با پوشش لت سر از نظر عملکرد حرارتی بهترین عملکرد را در زمستان از دیدگاه افزایش دمای داخلی و در تابســـتان به منظور کاهش دمای داخلی دارد. اسدالهی و طاهباز (۱۴۰۰) نیز در پژوهش خود نشان داده اند که ساختار هندسی بام بخش وسیعی از سطح ساختمان را پوشش می دهد لذا تأثیر عمده ای بر مصرف انرژی و آســـایش حرارتی در ســـاختمان داشته و موجب کاهش اثرات منفی جزایر گرمایی شهری می شود. فرخی (۱۴۰۱) در پژوهش خود نشـــان داده است که استفاده از بام های گنبدی شکل ، بامهای شیبدار دو طرفه با جهت شیب شمالی جنوبی و شرقی غربی و همچنین بامهـــای شیبدار چهارطرفه می توانند به میزان قابل توجهی باعـــث صرفه جـــویی در مصرف انرژی کل ســـاختمان در اقلیم گرم و مرطوب شـــوند. همچنین کشـــتکاران و همکاران (۱۴۰۱) نشان داده اند که بهینه ترین آرایش مصالح ســـقف مصرف انرژی ساختمان را به میـــزان ۹/۶ درصد کاهش می دهد. عرب ســـلغار و همکاران (۱۴۰۲) نیز نقش مصالح و نوع ســـقف های مختلف را با استفاده از شبیه سازی دینامیک سیالات محاســـباتی مورد بررسی قرار داده و انواع سقف های تیرچه بلوک شـــامل بلوک ســـفالی، بلوک بتنی سبک، پلی استایرن و دال یوبوت را شبیه سازی کرده اند. در این پژوهش، به منظور بررسی عملکرد حرارتی ســـقف های مختلف، ضریب هدایـــت معادل، فاکتور کاهش و اختلاف زمانی مطالعه شـــد. نتایج نشان داد که سقف با بلوک پلی استایرن دارای کمترین ضریب هدایت حرارتی معادل می باشد و ســـقف دال یوبوت بیشترین اتلاف حرارتی را در میان سقف های مورد مطالعـــه دارد. خلاصه ای از این نظرات در قالـــب جدول ۱ با یکدیگر مقایسه شده است.

مرور پژوهش‌های پیشین نشـــان می‌دهد که اغلب مطالعات بر نقش بام در کنترل تبادل حرارتی و کاهش مصرف انرژی تأکید داشـــته‌اند، اما رویکردها و نتایج بســـته به اقلیم و شکل بام متفاوت بوده است. در تحقیقات خارجی، بیشـــتر به بررسی فرم‌های خاص مانند بام گنبدی، خمیده یا شیشـــه‌ای و نیز به‌کارگیری فناوری‌هـــایی چون بام خنک پرداخته شـــده و نتایج حاکی از آن است که انتخاب زاویه و جنس بام می‌تواند دمای ســـطح و بار انرژی را به‌طور محسوسی کاهش دهد. در پژوهش‌های داخلی نیز تمرکز بر شبیه‌ســـازی انواع بام در شـــهرهایی چون اصفهان، کرج و بابلســـر بوده و یافته‌ها نشان داده‌اند که بام‌های شیب‌دار بـــا زوایای میانی (۳۰ تا ۶۰ درجه) در اقلیم گرم و خشـــک و بام‌هـــای دوطرفه در اقلیم ســـرد بهترین عملکرد حـــرارتی را دارند. نقطه اشتراک این مطالعات، تأکید بر اهمیت فرم و جهت‌گیری بام در مدیریت انرژی اســـت، اما تفاوت اصلی آن‌هـــا در اقلیم مورد بررسی و نوع عامل مورد توجه (فرم، شیب، مصالح یا جهت) مشـــاهده می‌شود. آنچـــه در میان ایـــن پژوهش‌ها کمتر دیده شـــده، تحلیل همزمان اثر جهت‌گیری جغرافیایی و زاویه شیب بام در یک چارچوب منســـجم و با داده‌های واقعی اقلیمی است. ازاین‌رو، نوآوری پژوهش حاضر در آن اســـت که با ترکیب این دو عامل و شبیه‌ســـازی جامع در اقلیم گرم و خشـــک شهر قم، تصویری دقیق و کاربردی از سناریوی بهینه طراحی

بام ارائه می‌دهد کـــه می‌تواند به‌طور مســـتقیم در تصمیم‌گیری‌های معماری و مدیریت انرژی شهری به کار گرفته شود؛ لذا پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأها، ضمن انتخاب قم به‌عنوان شـــهر نمونه، با اســـتفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر یک اتاق استاندارد ۹۰۰ اشری را در ۴۰ ترکیب مختلف جهت و شیب بام مدل‌سازی کرده و تحلیل انرژی ســـالانه آن‌ها را انجام می‌دهد. این تحقیق می‌کوشـــد تا با استفاده از روش تجـــربی و داده‌های معتبر، چارچوبی علمی برای تصمیم‌ســـازی طراحی بام در اقلیم گرم و خشک ارائه دهد.

جدول ۵. مرحله همجواری شاخص های مولفه ارزشیابی
Table 5. The adjacency stage of the evaluation component indicators

نویسنده	سال انتشار	محل پژوهش	موضوع / روش	یافته‌های کلیدی
Givoni	۱۹۹۸	اقلیم‌های خشک و آفتابی	طراحی اقلیمی ساختمان‌ها	تأکید بر بازتاب بالای بام، استفاده از شیب کم و رنگ روشن برای کاهش انباشت گرما
Runsheng et al.	۲۰۰۳	–	مقایسه سقف خمیده و مسطح از نظر جذب تابش خورشید	سقف خمیده تابش بیشتری جذب می‌کند؛ سقف جنوب–شمال در تابستان مفیدتر است
AlAnzi et al.	۲۰۰۹	کویت–اقلیم گرم و خشک	شبیه‌سازی فرم پلان و جهت‌گیری ساختمان با EnergyPlus	جهت‌گیری مناسب (جنوب‌شرقی) مصرف انرژی سرمایشی را تا ۱۸٪ کاهش می‌دهد
Faghih & Bahadori	۲۰۱۱	–	عملکرد حرارتی سقف‌های گنبدی	بام گنبدی با پوشش لعاب‌دار عملکرد بهتری نسبت به سقف مسطح دارد
Mao & Yang	۲۰۲۰	اقلیم گرم تابستان و سرد زمستان	بررسی انتقال حرارت سقف شیشه‌ای با زوایای مختلف	کاهش شیب از ۴۵ به ۳۰ درجه دمای سطح داخلی را ۱۲٪ کاهش می‌دهد
Bamdad	۲۰۲۳	استرالیا (کانبرا و ملبورن)	اثر بام خنک بر بار حرارتی ساختمان	بام خنک بار انرژی سالانه را ۱۴٪ تا ۲۲٪ کاهش می‌دهد
مهدوی‌نژاد	۱۳۹۲	اصفهان- اقلیم گرم و خشک	شبیه‌سازی انواع بام با Energy-Plus	بام شیب‌دار ۳۰-۶۰ بهترین عملکرد، بام گنبدی نامطلوب‌ترین عملکرد حرارتی
نصراللهی و قبادی	۱۳۹۳	شهرهای ایران	تأثیر اشکال بام بر آلودگی و جزایر حرارتی	بام‌های شیب‌دار جریان هوای بهتر و کاهش گرمای محبوس ایجاد می‌کنند
شرقی و عظیمی فریدنی	۱۳۹۵	کرج- اقلیم سرد و کوهستانی	مقایسه سقف تخت و شیب‌دار با Revit و EnergyPlus	سقف دوطرفه شیب‌دار بهترین عملکرد از نظر دریافت انرژی زمستانی
خانمحمدی و لسان	۱۳۹۵	اقلیم معتدل و مرطوب- بابلسر	بررسی چهار نوع بام با EnergyPlus	بام با پوشش «لت سر» بهترین عملکرد حرارتی در تابستان و زمستان
عرب‌سلغار و همکاران	۱۴۰۲	ایران	CFD روی انواع سقف تیرچه بلوک	سقف با بلوک پلی‌استایرن کمترین هدایت حرارتی؛ دال یوبوت بیشترین اتلاف حرارتی

مبانی نظری

در طراحی ساختمان‌های اقلیمی، بام به‌عنوان یکی از سطوح اصلی تبادل حرارتی میان فضای داخلی و محیط بیرونی، نقش کلیدی ایفا می‌کند. بام‌ها به دلیل گستردگی سطح و مواجهه مستقیم با تابش خورشید، سهم قابل توجهی در بارهای حرارتی ساختمان دارند و طراحی صحیح آن‌ها می‌تواند به شکل چشمگیری بر مصرف انرژی ساختمان تأثیرگذار باشد. در اقلیم‌های گرم و خشک مانند شهر قم، تابش مستقیم شدید خورشید در تابستان و همچنین تفاوت زیاد دمای شب و روز، چالش‌های ویژه‌ای را در طراحی بام ایجاد می‌کند. بام‌هایی با طراحی نامناسب می‌توانند باعث افزایش بار سرمایشی تابستان و در نتیجه افزایش مصرف انرژی شوند. انتخاب جهت مناسب استقرار جغرافیایی بام یکی از نکات مهم برای بام‌های شیب‌دار محسوب می‌شود. جهت بام به زاویه بین سطح بام و یک سطح تراز افقی فرضی گفته می‌شود و بر میزان تابش خورشیدی دریافتی اثر می‌گذارد. تابش خورشید در عرض‌های جغرافیایی میانی و در اقلیم‌های خشک، غالباً از سمت جنوب و جنوب‌غربی است، به همین دلیل، جهت‌گیری بام نسبت به این جهات، میزان تابش خورشیدی مستقیم و غیرمستقیم دریافت شده را تعیین می‌کند. زاویه شیب بام بر نحوه برخورد تابش خورشید، تجمع گرد و غبار، جمع‌آوری آب باران و حتی کاربردهای دیگر مانند نصب پنل خورشیدی تأثیرگذار است. در اقلیم گرم و خشک، شیب بام باید به گونه‌ای انتخاب شود که در تابستان تابش شدید خورشید تا حد ممکن منعکس یا منحرف شود، و در زمستان نیز بتواند تابش خورشیدی کم‌زاویه را جذب کند. برخی از مطالعات نشان داده‌اند که زاویه‌های بین ۲۰ تا ۴۵ درجه، به ویژه زاویه حدود ۳۰ درجه، بهترین تعادل را بین کاهش بار سرمایشی و افزایش بار گرمایشی ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، زاویه شیب بر تهویه طبیعی زیر بام نیز مؤثر است؛ شیب‌های مناسب می‌توانند جریان هوای مطلوب را تسهیل کرده و به کاهش دمای بام و فضای زیر سقف کمک کنند.

انتقال حرارت در بام به طور کلی شامل سه مکانیزم اصلی هدایتی، همرفتی و تابشی است. در اقلیم گرم و خشک، تابش خورشید نقش غالب را در افزایش دمای سطح بام دارد که این دما به نوبه خود از طریق هدایت به داخل ساختمان منتقل می‌شود. هدایت حرارتی، انتقال حرارت از سطح گرم بام به داخل بنا بوده و به جنس مصالح، ضخامت و عایق‌بندی وابستگی دارد. مصالحی با ضریب هدایت پایین، مانند کاهگل و خشت، عایق حرارتی بهتری هستند. تابش حرارتی مستقیم خورشید روی بام نیز سبب افزایش دمای سطح می‌شود که مقدار آن به زاویه تابش و خواص بازتابی سطح بستگی دارد. استفاده از پوشش‌های بازتابنده و رنگ‌های روشن می‌تواند تابش جذب شده را کاهش دهد. همرفت نیز جریان هوای اطراف و زیر سقف بوده که در انتقال حرارت مؤثر است. تهویه مناسب زیر بام می‌تواند دمای ساختار سقف را کاهش داده و بار حرارتی را کاهش دهد.

در اقلیم گرم و خشک با ویژگی‌هایی مانند تابش شدید خورشید، رطوبت بسیار پایین، و اختلاف زیاد دمای شب و روز، طراحی ساختمان و اجزای مختلف آن از جمله بام، نیازمند استراتژی‌های خاص طراحی معماری است. به طوری که بام باید قادر به بازتابش بیشترین میزان تابش تابستانه باشد تا از افزایش دمای داخل جلوگیری شود. همچنین استفاده از مصالح با ظرفیت حرارتی بالا مانند خشت و کاهگل و امکان بهره‌گیری از تهویه شبانه برای کاهش دمای داخلی را افزایش می‌دهد. از جنبه‌ای دیگر، زاویه بام و شیب مناسب می‌تواند به جمع‌آوری و هدایت بهتر آب باران کمک کند که در مناطق خشک ارزشمند است.

با پیشرفت فناوری، استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی مانند دیزاین بیلدر و انرژی پلاس، امکان تحلیل دقیق و کمی اثرات جهت و زاویه بام بر مصرف انرژی فراهم شده است. این نرم‌افزارها قادرند شرایط اقلیمی واقعی را وارد کرده و تاثیرات پارامترهای مختلف طراحی را در بارهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان شبیه‌سازی کنند. این قبیل نرم‌افزارها و فناوری‌ها به معماران و مهندسان انرژی کمک می‌کنند تا ضمن حفظ ویژگی‌های فرهنگی و اقلیمی، بهینه‌ترین فرم بام را با کمترین مصرف انرژی انتخاب کنند. با توجه به اهمیت بام در عملکرد حرارتی ساختمان و اثرات قابل توجه جهت‌گیری و زاویه شیب بر تبادل حرارتی، این پژوهش در چارچوب نظری طراحی اقلیمی و مدیریت مصرف انرژی قرار دارد. تمرکز بر اقلیم گرم و خشک و استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی پیشرفته، این مطالعه را در خط مقدم تحقیقات کاربردی قرار می‌دهد. تحلیل توأمان جهت و زاویه شیب بام، با بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی واقعی شهر قم و مدل‌سازی عددی جامع، امکان شناسایی سناریوی بهینه جهت کاهش مصرف انرژی را فراهم می‌آورد که می‌تواند راهنمای مؤثری برای معماران، طراحان و برنامه‌ریزان شهری باشد.

روش تحقیق

این تحقیق از نظر هدف، در زمره پژوهش‌های کاربردی و توسعه‌ای قرار می‌گیرد و از نظر ماهیت و روش، مبتنی بر شبیه‌سازی عددی با رویکرد شبه آزمایشگاهی است. هدف اصلی، بررسی اثر ترکیبی جهت‌گیری جغرافیایی و زاویه شیب بام بر مصرف انرژی سالانه ساختمان در اقلیم گرم و خشک شهر قم است. روش اجرای تحقیق بر شبیه‌سازی انرژی دینامیک با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر استوار است که بر پایه موتور محاسباتی انرژی پلاس طراحی شده و قادر است بارهای

سرمایشی و گرمایشی سالانه ساختمان را با دقت بالا محاسبه نماید.

در گام اول، یک نمونه ساختمانی پایه مطابق شکل شماره یک بر اساس مشخصات مدل ۹۰۰ استاندارد ASHRAE تعریف شد. این نمونه، یک فضای مستقل مستطیل‌شکل به ابعاد ۸ متر طول، ۶ متر عرض و ارتفاع ۲/۷ متر است. در ضلع جنوبی این اتاق، دو پنجره مستطیلی به ابعاد هر یک ۱/۵×۲ متر قرار دارد که در مجموع ۱۲ مترمربع سطح شفاف در معرض تابش خورشید ایجاد می‌کند. نوع پنجره‌ها، شیشه دوجداره با ضریب انتقال حرارتی (U-value) برابر ۲/۸ W/m²K در نظر گرفته شد. جداره‌ها و کف و سقف نیز با مصالح رایج در اقلیم گرم و خشک شبیه‌سازی شدند. ساختار کلی این نمونه در شکل ۱ دیده می شود.

در گام دوم، سناریوهای مختلف ترکیب جهت و زاویه بام تعریف گردید. جهت بام در هشت حالت اصلی: شمال (N)، شمال‌شرق (NE)، شرق (E)، جنوب‌شرق (SE)، جنوب (S)، جنوب‌غرب (SW)، غرب (W) و شمال‌غرب (NW) بررسی شد. زاویه شیب بام نیز در پنج حالت: ۰ (بام تخت)، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در نظر گرفته شد. در نتیجه، ۴۰ سناریوی مجزا تشکیل شد که هر یک بیانگر ترکیبی یکتا از جهت و شیب بام است. در مرحله سوم، کلیه سناریوها در نرم‌افزار مدل‌سازی و بارهای سرمایشی، گرمایشی و انرژی کل سالانه برای هر حالت محاسبه شد. برای اطلاعات اقلیمی، از فایل آب‌وهوای epw مربوط به ایستگاه هواشناسی شهر قم استفاده شد. داده‌های این فایل شامل پارامترهایی مانند دمای خشک، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی، سرعت باد و زاویه خورشید به‌صورت ساعتی برای یک سال کامل (۸۷۶۰ ساعت) است.

جزئیات مصالح به‌کار رفته در مدل پایه بر اساس استاندارد ۹۰/۱ ASHRAE با تطبیق با مصالح رایج در منطقه به شرح زیر است:

دیوارها: دیوار دو جداره آجری با لایه عایق داخلی پلی‌استایرن، مجموع ضریب انتقال حرارتی ۰/۵۷ W/m²K

سقف: بام با روکش ایزوگام و عایق حرارتی پلی‌یورتان، ضریب انتقال حرارتی ۰/۳۵ W/m²K

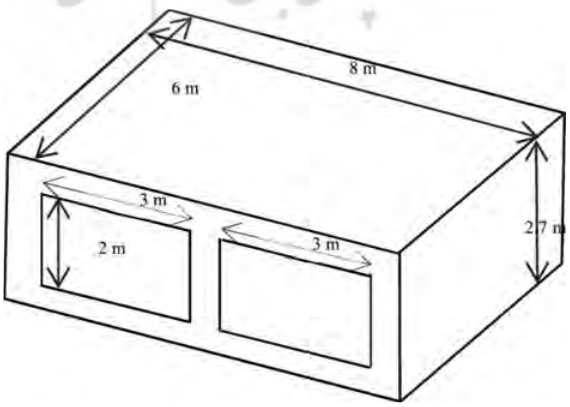
کف: عایق نشده، در تماس با زمین ضریب انتقال حرارتی ۰/۷ W/ m²K

پنجره‌ها: شیشه دوجداره ساده با فریم آلومینیومی، ضریب انتقال حرارتی ۲/۸ W/m²K

تهویه و تبادل هوا در مدل با نرخ تعویض ۰/۵ در نظر گرفته شد و بهره‌گیری از سیستم سرمایش و گرمایش استاندارد بر مبنای راندمان‌های تعریف‌شده در ASHRAE مدل‌سازی شد.

معیارهای ارزیابی شامل سه متغیر اصلی، یعنی بار سرمایشی سالانه (Cooling Load) بار گرمایشی سالانه (Heating Load) و بار کل انرژی سالانه (Total HVAC Load)می‌باشند. داده‌های به‌دست‌آمده از هر سناریو در قالب جدول، نمودار و تحلیل‌های عددی پردازش و مقایسه شدند. سناریو بهینه، حالتی بود که در آن مجموع بارهای سرمایشی و گرمایشی سالانه در کمترین مقدار قرار داشته باشد.

برای اطمینان از صحت و دقت نتایج شبیه‌سازی، فرایند اعتبارسنجی این تحقیق بر مبنای مقایسه تطبیقی یافته‌ها با نتایج مطالعات پیشین انجام شده است. به‌منظور این مقایسه، سه معیار کلیدی شامل جهت بهینه بام، زاویه شیب مناسب، و تأثیر نسبی این عوامل بر بارهای سرمایشی، گرمایشی و کل انرژی مد نظر قرار گرفت. در نهایت، یافته‌ها به‌صورت تحلیلی گزارش شدند و با مقایسه درصدی میان سناریوها، میزان تأثیر هر متغیر (جهت و شیب بام) بر عملکرد انرژی ساختمان در اقلیم گرم و خشک قم ارزیابی شد. مدل مفهومی پژوهش در شکل ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۱. نمونه ساختمانی پایه (مأخذ: Mirabi & Akrami Abarghuie, 2021)

Figure 1. Sample of basic building (Source: Mirabi & Akrami Abarghuie, 2021)

یافته‌ها

تمام فرآیند شبیه‌سازی ۴۰ سناریوی ترکیبی حاصل از جهت‌های هشت‌گانه جغرافیایی و زوایای پنج‌گانه شیب بام (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه)، بارهای سرمایشی، گرمایشی و انرژی کل سالانه برای مدل پایه ساختمان (اتاق استاندارد ۹۰۰ اشری) در نرم‌افزار استخراج شد. این داده‌ها در ادامه تحلیل و مقایسه گردیدند تا مشخص شود کدام ترکیب از جهت و شیب بام در اقلیم گرم و خشک شهر قم منجر به بهینه‌ترین عملکرد انرژی می‌گردد. در این پژوهش، هر سه نوع بار انرژی (سرمایشی، گرمایشی و کل) مورد تحلیل قرار گرفتند تا نتایج از نظر جامعیت، کاربردی و قابل اتکا باشند.

۱) بار سرمایشی: روندها و مقایسه‌ها

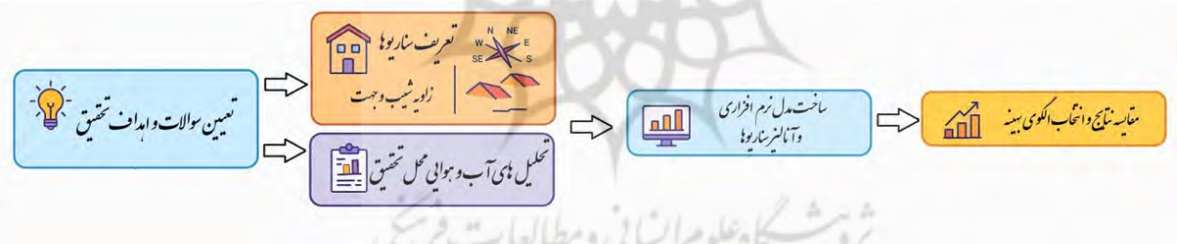
بار سرمایشی، به عنوان سهم اصلی مصرف انرژی در اقلیم گرم و خشک قم، بیشترین حساسیت را نسبت به تابش مستقیم خورشید و جذب گرمایی از سطح بام نشان داد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن بود که جهت‌های غربی، جنوب‌غربی و تا حدی جنوبی، در حالت بام تخت یا با شیب پایین، بیشترین بار سرمایشی را تولید می‌کنند. برای مثال، سناریو با جهت غرب و شیب ۰ درجه (بام تخت) دارای بار سرمایشی ۱۳۸۵۰ کیلووات‌ساعت در سال بود؛ در حالی که همین جهت با شیب ۳۰ درجه، بار سرمایشی را تا ۱۲۲۰۰ کیلووات‌ساعت کاهش داد. در نقطه مقابل، جهت‌های شمال‌شرقی، شمالی و شرق، در ترکیب با شیب‌های متوسط (۱۵ تا ۳۰ درجه) کمترین بار سرمایشی را ثبت کردند. کمترین بار سرمایشی کل متعلق به ترکیب جهت جنوب‌شرقی با زاویه ۳۰ درجه بود که در آن تنها ۹۷۸۰ کیلووات‌ساعت انرژی سرمایشی در طول سال مصرف شده است. این ترکیب به دلیل دریافت تابش خورشیدی ملایم صبحگاهی، هم در تابستان و هم در زمستان عملکرد متعادل‌تری ارائه می‌دهد. در جدول ۲، پنج سناریوی دارای کمترین بار سرمایشی ارائه شده‌اند.

این روند نشان می‌دهد که شیب ۳۰ درجه، به‌ویژه در جهات شرقی، بهترین عملکرد در کاهش بار سرمایشی داشته و شیب‌های بالاتر (۴۵ و ۶۰ درجه) به دلیل افزایش زاویه نسبت به افق، کارایی را کاهش داده‌اند. بار سرمایشی سالانه در شکل ۳ مشاهده می شود.

در واقع، در شیب‌های بالا، سطح بام کمتر در معرض تابش عمودی خورشید قرار گرفته و اتلاف تابشی کاهش می‌یابد، اما در عوض بازتاب مستقیم افزایش می‌یابد و منجر به پایداری گرمایی ضعیف‌تر می‌شود.

۲) بار گرمایشی: تحلیل اثر تابش زمستانی

برخلاف سرمایش، بار گرمایشی در سناریوهایی که بام کمترین



شکل ۲. مدل مفهومی پژوهش (مأخذ: نگارندگان)
Figure 2. Conceptual model of research (Source: Authors)

جدول ۲. بار سرمایشی در پنج سناریو دارای کمترین مقادیر (مأخذ: نگارندگان)
Table 2. Cooling load in five scenarios has the lowest measure (Source: Authors)

ردیف	جهت استقرار بام	زاویه شیب	بار سرمایشی (kWh/year)
۱	SE	۳۰°	۹۷۸۰
۲	E	۳۰°	۱۰۰۶۰
۳	NE	۳۰°	۱۰۱۲۰
۴	E	۴۵°	۱۰۳۰۰
۵	NE	۱۵°	۱۰۴۳۰

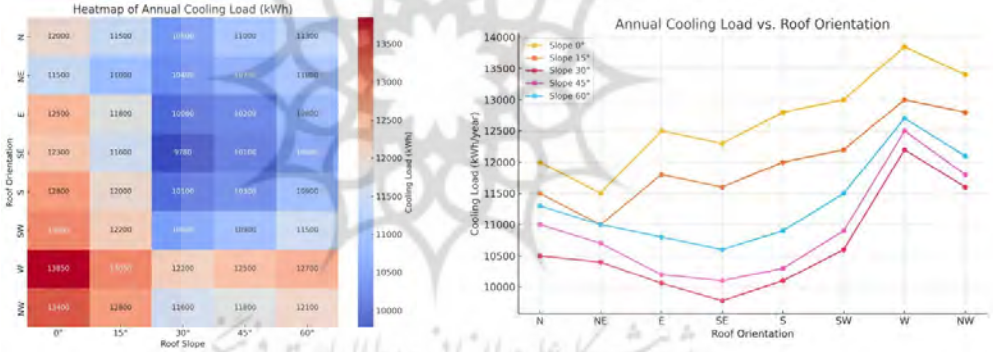
دریافت تابش را در زمستان داشته‌اند، افزایش یافته است. برای مثال، جهت شمال با شیب ۰ درجه (بام تخت)، بار گرمایشی سالانه‌ای معادل ۶۶۵۰ کیلووات‌ساعت را نشان داد. در حالی که در جهت جنوب‌شرقی با شیب ۳۰ درجه، این مقدار به ۳۹۲۰ کیلووات‌ساعت رسید. تفاوت ۲۷۳۰ کیلووات‌ساعتی در طول سال نشان می‌دهد که در زمستان جهت‌گیری مناسب می‌تواند انرژی مورد نیاز برای گرمایش را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. در جدول ۳ پنج سناریوی دارای کمترین بار گرمایشی ارائه شده‌اند.

این یافته‌ها نشان می‌دهد که بام‌هایی با شیب متوسط در جهت‌های جنوبی و شرقی با زاویه مطلوب تابش خورشید در زمستان، بیشترین بهره حرارتی را از تابش آفتاب دریافت می‌کنند و از این رو بار گرمایشی را کاهش می‌دهند. در مقابل، جهت‌هایی مانند شمال و شمال‌غربی، که در زمستان تابش مستقیم کمی دارند، به‌ناچار انرژی بیشتری برای گرمایش صرف می‌کنند. وضعیت بار گرمایشی سالانه در شکل ۴ مشاهده می شود.

۳) بار کل انرژی سالانه: استخراج سناریوی بهینه

از جمع بار سرمایشی و گرمایشی، بار کل انرژی سالانه (Total HVAC Load) استخراج شد. این شاخص اصلی‌ترین معیار برای مقایسه نهایی سناریوها بود. بر اساس تحلیل مقایسه‌ای، بهینه‌ترین سناریوی ترکیبی از منظر مصرف انرژی سالانه، سناریوی بام با شیب ۳۰ درجه و جهت‌گیری جنوب‌شرقی بود که مجموع بار سرمایشی و گرمایشی آن برابر با ۱۳۸۲۰ کیلووات‌ساعت در سال بود. در مقابل، بدترین سناریو مربوط به جهت غرب با بام تخت (۰ درجه) بود که بار کل آن ۱۹۶۰۰ کیلووات‌ساعت گزارش شد.

مقایسه این دو مقدار نشان می‌دهد که صرفاً با انتخاب مناسب جهت و شیب بام، می‌توان تا ۳۹۸۰ کیلووات‌ساعت در سال معادل ۲۰/۳٪ در مصرف انرژی سیستم‌های سرمایش و گرمایش صرفه‌جویی کرد. این میزان در مقیاس شهری یا در سطح یک محله مسکونی بزرگ، عددی بسیار قابل توجه از منظر طراحی پایدار و کاهش آلاینده‌ها محسوب می‌شود.



شکل ۳. بار سرمایشی سالانه سناریوها (مأخذ: نگارندگان)

Figure 3. Annual cooling load of scenarios (Source: Authors)

جدول ۳. بار گرمایشی در پنج سناریو دارای کمترین مقادیر (مأخذ: نگارندگان)

Table 3. Heating load in five scenarios has the lowest measure (Source: Authors)

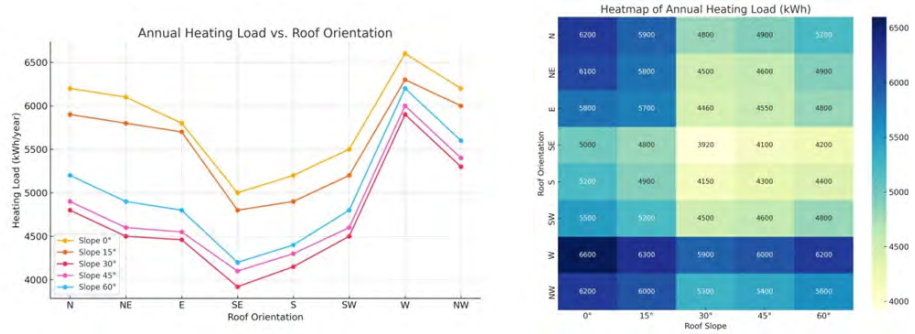
ردیف	جهت استقرار بام	زاویه شیب	بار سرمایشی (kWh/year)
۱	SE	۳۰°	۳۹۲۰
۲	S	۳۰°	۴۱۵۰
۳	SE	۱۵°	۴۲۸۰
۴	E	۳۰°	۴۴۶۰
۵	S	۴۵°	۴۵۱۰

۴) تحلیل میانگین‌های جهت و شیب به صورت مستقل

در بخـــش دیگری از تحلیل‌ها، میانگین بـــار کل برای هر زاویه و هر جهت به‌صورت جداگانه محاســـبه شد تا اثر مستقل هر عامل در قالب جدول ۴ مشخص گردد.

همان‌طور که در شـــکل ۵ مشاهده می‌شـــود، زاویه ۳۰ درجه به طور میانگیـــن حدود ۱۴/۷٪ عملکرد بهتری نســـبت به بام تخت دارد و از سایر شیب‌ها نیز کاراتر است.

این نتایج با داده‌های اقلیمی قم همخوانی دارد؛ به‌طوری که تابش



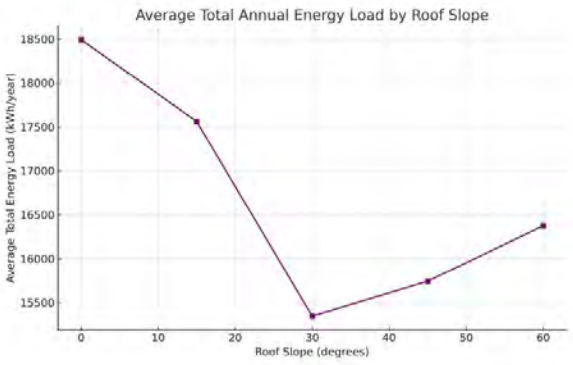
شکل ۴. بار گرمایشی سالانه سناریوها (مأخذ: نگارندگان)

Figure 4. Annual heating load of scenarios (Source: Authors)

جدول ۴. میانگین بار کل برای هر زاویه شیب از ۸ جهت (مأخذ: نگارندگان)

Table 4. Average total load for each slope angle from 8 directions (Source: Authors)

زاویه شیب	میانگین بار کل (kWh/year)
۰°	۱۷۴۲۰
۱۵°	۱۶۲۸۰
۳۰°	۱۴۸۵۰
۴۵°	۱۵۲۲۰
۶۰°	۱۵۸۱۰



شکل ۵. متوسط بار انرژی سالانه سناریوها براساس زاویه شیب بام (مأخذ: نگارندگان)

Figure 5. Average annual energy load of scenarios based on roof slope angle (Source: Authors)

سالانه خورشید در زوایای ۲۵ تا ۳۵ درجه در این عرض جغرافیایی بیشینه است. در جدول ۵ میانگین بار کل این مرتبه برای پنج جهت منتخب براساس میانگین پنج زاویه ارائه شده است.

داده های شکل ۶ بیانگر این است که جهت جنوب‌شرقی در تمامی حالات کمترین مصرف انرژی را دارد و این اختلاف نسبت به جهت غرب بیش از ۳۷۰۰ کیلووات‌ساعت در سال است. این داده‌ها تأیید می‌کند که حتی در صورت ثابت بودن زاویه بام، تغییر جهت‌گیری می‌تواند در مصرف انرژی تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد.

۵) تحلیل اقلیمی نتایج و ارتباط با شهر قم

نتایج به‌دست‌آمده با ویژگی‌های اقلیمی شهر قم کاملاً همخوانی دارد. قم دارای تابستان‌های طولانی، گرم و با آفتاب شدید است و زمستان‌هایی کوتاه، خشک و با میانگین دمای پایین در شب‌ها. در چنین شرایطی، جهت‌گیری بام به سمت جنوب شرقی که موجب جذب ملایم تابش صبحگاهی در زمستان و جلوگیری از جذب شدید در تابستان می‌شود، ایده‌آل‌ترین گزینه محسوب می‌شود. همچنین زاویه ۳۰ درجه با زاویه تابش خورشید در عرض جغرافیایی قم (حدود ۳۴ درجه شمالی) بیشترین هم‌راستایی را دارد.

۶) جمع‌بندی و تأکید بر سناریوی بهینه

مقایسه یافته‌های این پژوهش در شکل ۷ به‌صورت روشن نشان می‌دهد که انتخاب صحیح جهت‌گیری و شیب بام می‌تواند تأثیر عمده‌ای بر عملکرد انرژی ساختمان در اقلیم گرم و خشک داشته باشد. لذا سناریوی بهینه نهایی دارای جهت: جنوب‌شرق، شیب: ۳۰ درجه که دارای بار سرمایشی ۹۷۸۰ و بار گرمایشی ۳۹۲۰ و بار کل انرژی ۱۳۸۲۰ کیلووات‌ساعت در سال می‌باشد.

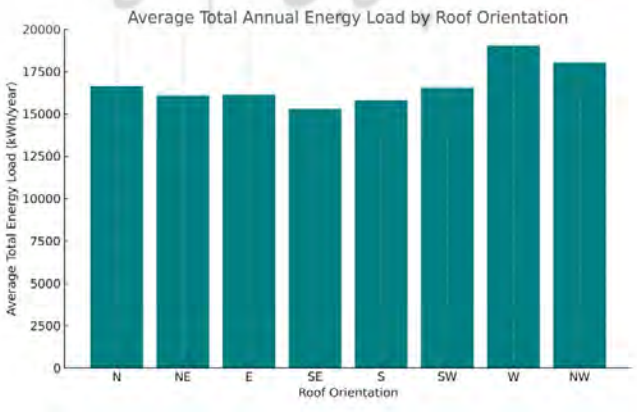
نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف سنجش اثر جهت و زاویه بام شیب‌دار بر مصرف انرژی ساختمان در اقلیم گرم و خشک شهر قم انجام شد. با استفاده از مدل‌سازی دقیق نرم‌افزاری در دیزاین بیلدر و بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی معتبر epw برای قم، چهل سناریوی ترکیبی از

جدول۵. میانگین بار کل برای هر جهت براساس میانگین از پنج زاویه مختلف (مأخذ: نگارندگان)

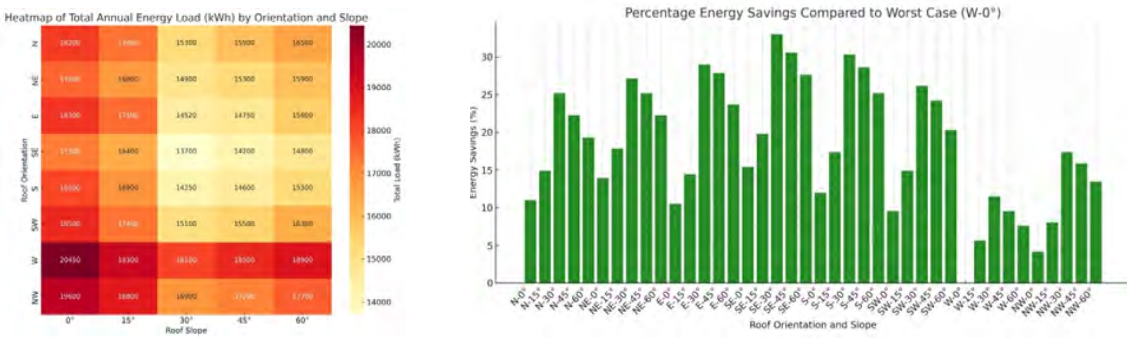
Table 5. Average total load for each direction based on the average of five different angles (Source: Authors)

جهت بام	میانگین بار کل (kWh/year)	جهت بام	میانگین بار کل (kWh/year)
W	۱۸۰۴۰	NE	۱۵۸۲۰
SW	۱۶۹۵۰	E	۱۵۱۴۰
NW	۱۶۵۱۰	S	۱۴۶۸۰
N	۱۶۰۸۰	SE	۱۴۲۷۰



شکل ۶. متوسط بار انرژی سالانه سناریوها براساس جهت بام (مأخذ: نگارندگان)

Figure 6. Average annual energy load of scenarios based on roof orientation (Source: Authors)



شکل ۷. درصد کاهش مصرف انرژی هر سناریو (مأخذ: نگارندگان)
Figure 7. Percentage reduction in energy consumption for each scenario (Source: Authors)

جهت‌های جغرافیایی (۸ حالت) و زاویه‌های شیب بام (۵ حالت) طراحی و شبیه‌سازی شدند. یافته‌های حاصل از این شبیه‌سازی‌ها اطلاعات جامعی درباره بارهای سرمایشی، گرمایشی و مصرف کل انرژی ساختمان ارائه کردند که منجر به تعیین سناریوی بهینه از نظر مصرف انرژی گردید.

نتایج نشان داد که جهت‌گیری بام در سمت جنوب‌شرقی همراه با شیب ۳۰ درجه، بهترین عملکرد انرژی را دارد. این سناریو به بار سرمایشی ۹۷۸۰ کیلووات‌ساعت، بار گرمایشی ۳۹۲۰ کیلووات‌ساعت و مجموع بار کل ۱۳۸۲۰ کیلووات‌ساعت در سال دست یافت که نسبت به بدترین سناریو (بام تخت یا جهت غرب) حدود ۲۹/۵٪ صرفه‌جویی در مصرف انرژی سالانه را به همراه دارد. این صرفه‌جویی قابل توجه، اهمیت تعیین دقیق جهت و زاویه بام را در طراحی اقلیمی ساختمان‌های مناطق گرم و خشک نشان می‌دهد.

یافته‌ها همچنین حاکی از آن بود که زاویه شیب ۳۰ درجه به طور مستقل بهینه‌ترین زاویه در کاهش مصرف انرژی است؛ چرا که این زاویه همزمان باعث دریافت تابش مفید خورشید در زمستان و کاهش تابش شدید تابستانی می‌شود. در مورد جهت بام نیز، جهت‌های شرقی تا جنوب‌شرقی به دلیل بهره‌گیری از تابش ملایم صبحگاهی، عملکرد بهتری نسبت به جهت‌های غربی و شمالی ارائه کردند. این نتایج با ویژگی‌های اقلیمی قم که تابستان‌های گرم و آفتابی و زمستان‌های سرد دارد، کاملاً سازگار است.

از لحاظ کاربردی، نتایج این پژوهش می‌تواند راهنمای مهمی برای مهندسان معمار، طراحان شهری و سیاست‌گذاران حوزه انرژی باشد تا با انتخاب جهت و شیب مناسب بام، به کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری در ساختمان‌ها کمک کنند. این موضوع ضمن کاهش هزینه‌های انرژی، به کاهش آلاینده‌های محیطی و بهبود کیفیت زندگی ساکنان نیز منجر خواهد شد. همچنین این تحقیق نشان داد که طراحی دقیق و مبتنی بر داده‌های اقلیمی، به مراتب از راهکارهای کلی و تجربی، در کاهش بار انرژی ساختمان‌ها مؤثرتر است؛ لذا توصیه می‌شود که در برنامه‌های طراحی شهری و توسعه معماری در مناطق گرم و خشک ایران، استفاده از شبیه‌سازی‌های انرژی و تعیین بهینه پارامترهای ساختمانی به صورت جدی دنبال شود. در پایان، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، علاوه بر جهت و زاویه بام، عوامل دیگری مانند نوع پوشش سقف، عایق‌بندی، و تأثیر پنجره‌ها و سایبان‌ها نیز در تحلیل اثرگذاری بر مصرف انرژی مورد بررسی قرار گیرند. همچنین تعمیم نتایج به ساختمان‌های با هندسه و عملکرد متفاوت، یا استفاده از داده‌های اقلیمی بلندمدت‌تر، می‌تواند به تعمیق دانش طراحی اقلیمی و بهینه‌سازی انرژی کمک کند.

نقش نویسندگان

مدل‌سازی، تجزیه و تحلیل داده‌ها، تفسیر نتایج و بازبینی متن نهایی توسط سید محمود معینی انجام شده است. انتخاب نمونه، بررسی سوابق پژوهش و تهیه متن دست‌نویس اولیه توسط مهدی شعبانیان صورت گرفته است.

تعارض منافع نویسندگان

نویسندگان به‌طورکامل از اخلاق نشر تبعیت کرده و از هرگونه سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافعی تجاری در این راستا وجود ندارد و نویسندگان در قبال ارائه اثر خود وجهی دریافت ننموده‌اند.

فهرست مراجع

۱. تکباش، مرتضی؛ حاتمیان حقیقی، محمدرضا؛ و فرشچی، حمید رضا. (۱۴۰۳). تاثیر طراحی فرم بام بر عملکرد اقلیمی آن در مکان گرم و

خشـــک تحلیل نرم افزاری در اقلیم شهر کاشان. کارافن، ۲۱(۴)، ۱۹۲- ۱۶۹. https://karafan.tvu.ac.ir/article_220691.html

۲. خانمحمدی، و لســـان. (۱۳۹۵). مقایســـه ی رفتار حرارتی مصالح بام شیبدار درمتوســـط دمای داخلی بنادر اقلیم معتدل و مرطوب- نمونه ی موردی اقلیم بابلسر. چهارمین کنگره بین المللی عمران ، معماری و توسعه شهری. دی ۷، (ص۱-۹). تهران. https://civilica.com/doc/619265

۳. اســـدالهی، شـــکوه ســـادات؛ و طاهباز، منصوره. (۱۴۰۰). بام ســـرد اســـتراتژی مثبت جهت بهبود پارامترهای جزایر گرمایی شهری، مدیریت انرژی و آســـایش حـــرارتی. معماری ســـبز، ۷(۲)، ۱-۱۰. http://www. greenarchitecture.ir/post.aspx?id=707

۴. شـــرقی، علی؛ و عظیمی فریدنی، نازنین. (۱۳۹۵). نقش فرم ســـقف درکاهـــش هدر رفت انرژی با معیـــار انرژی تابشی دریافـــتی. معماری و شهرسازی پایدار، ۴(۲)، ۶۵-۷۴. https://jsaud.sru.ac.ir/article_667. html

۵. عرب ســـلغار، علیرضـــا؛ ربیعی، میلاد.؛ ایرانمنش، افشین؛ و شـــفیعی دهج، محمد. (۱۴۰۲). بررسی رفتار حرارتی انواع ســـقف‌های متداول در ســـاختمان‌ها با اســـتفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی. مهندسی و مدیریت انـــرژی. ۱۳(۱)، ۱۲۲-۱۳۵. https://energy.kashanu.ac.ir/ article_113609.html

۶. فـــرخی، پویا. (۱۴۰۱). بررسی تاثیر هندســـه بام بـــر کاهش مصرف انرژی ســـاختمان در اقلیم گرم و مرطوب (مطالعه موردی، جزیره کیش). هجدهمین کنفرانس ملی شهرســـازی، معماری، عمران و محیط زیست. بهمن۴، (ص۱-۹). شیروان. https://civilica.com/doc/1597209

۷. کشتکاران، پری ناز؛ موحد، خســـرو؛ و برزگرمروستی، زهرا. (۱۴۰۱). کاهش مصرف انرژی در ســـاختمان به وسیله بهینه ســـازی جدار سقف (نمونه موردی: ســـاختمان مســـکونی سه طبقه در شـــهر شیراز). علوم و تکنولوژی محیط زیســـت، ۲۴(۳ (پیـــاپی ۱۱۸))، ۲۰۵-۲۲۰. https:// sanad.iau.ir/fa/Article/838671

۸. مهـــدوی نژاد، محمدجواد. (۱۳۹۲). تبیین الگوی انرژی دوســـتی در ســـاختمان ها بر اســـاس رفتار حرارتی انواع بام ها. نقش جهان-مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی، ۳(۲)، ۳۵-۴۲. https:// bsnt.modares.ac.ir/article_708.html

۹. نصراللهی، نازنین؛ و قبادی، پریسا. (۱۳۹۳). تاثیر فرم و پیکربندی بام هـــا بر روی رفتار حرارتی، الگوی تلاطم لایـــه ها و کیفیت هوا درفضاهای شـــهری. اولین کنفرانس ملی شهرسازی، مدیریت شهری و توسعه پایدار. خرداد۱۷، تهران. https://civilica.com/doc/361906/

10. AlAnzi, A., Seo, D., & Krarti, M. (2009). Impact of building shape on thermal performance of office buildings in Kuwait. Energy Conversion and Management, 50(3), 822–828. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009ECM....50..822A/abstract

11. Al-Tamimi, N. A., & Fadzil, S. F. S. (2011). The potential of shading devices for temperature reduction in high-rise residential buildings in the tropics. Procedia Engineering, 21, 273-282. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811048491

12. Askar, A. H., Omle, I., & Kovács, E. (2025). The role of roof angle and geographic location on the thermal performance of buildings. International Journal of Thermofluids, 27, 101192. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666202725001399

13. Bamdad, K. (2023). Cool roofs: A climate change mitigation and adaptation strategy for residential buildings. Building and Environment, 236, 110271. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132323002986

14. Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., ... & Glazer, J. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. Energy and buildings, 33(4), 319-331. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001EneBu..33..319C

15. Faghih, A. K., & Bahadori, M. N. (2011). Thermal performance evaluation of domed roofs. Energy and Buildings, 43(6), 1254-1263. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778811000119

16. Givoni, B. (1998). Climate considerations in building and urban design. John Wiley & Sons. https://www.wiely.com/en-us/Climate+Considerations+in+Building+and+Urban+Design-p-9780471291770

17. Kistelegdi, I., Horváth, K. R., Storcz, T., & Ercsey, Z. (2022). Building geometry as a variable in energy, comfort, and environmental design optimization—A review from the perspective of architects. Buildings, 12(1), 69. https://www.mdpi.com/2075-5309/12/1/69

18. Mao, Q., & Yang, M. (2020). Experimental and numerical investigation on heat transfer performance of a solar double-slope hollow glazed roof. Applied Thermal Engineering, 180, 115832. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/

on buildings energy consumption information. Energy and Buildings, 40(3), 394–398. https://www.researchgate.net/publication/223885675

23. Runsheng, T., Meir, I. A., & Etzion, Y. (2003). An analysis of absorbed radiation by domed and vaulted roofs as compared with flat roofs. Energy and buildings, 35(6), 539-548. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003EneBu..35..539R

24. Renuka, S. M., Maharani, C. M., Nagasudha, S., & Priya, R. R. (2022). Optimization of energy consumption based on orientation and location of the building. Materials Today: Proceedings, 65, 527-536. https://www.researchgate.net/publication/359181531

25. Tae, W. J. (2005). A Study on the Optimum Slope of the Roof for Minimum Cooling Load. Journal of the Korean Solar Energy Society, 25(4), 119-123. https://koreascience.kr/article/JAKO200533338223546.do

S1359431120333147

19. Mirabi, E., & Akrami Abarghuie, F. (2021). Investigating the climate-adaptive design strategies of residential earth-sheltered buildings in Iran. International Journal of Building Pathology and Adaptation, 41(5), 1029-1048. https://www.researchgate.net/publication/357353237

20. Morsali, S., Akbarian, S., & Hamed Zar Gari, Z. (2021). Simulation of the roof shapes and building orientation on the energy performance of the buildings. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 6(1), 36. https://avesis.gazi.edu.tr/yayin/7ea3fd1e-054a-40bb-9bd0-e7053c9e6566

21. Özel, M., & Pıhtılı, K. (2008). Determination of optimum insulation thickness by using heating and cooling degree-day values. J. Eng. Nat. Sci, 26, 191-197. https://sigma.yildiz.edu.tr/article/1041

22. Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review

© 2024 by author(s); Published by Science and Research Branch Islamic Azad University, This work for open access publication is under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

ISSN 17359562 Doi:

Measuring the Effect of Sloped Roof Direction and Angle on Contemporary Buildings Energy Consumption in Hot and Dry Climates
(Case study: Qom City)

Seyed Mahmood Moeini*, Department of Architecture, Mal.c., Islamic Azad University, Malayer, Iran.
Mahdi Shaabanian, Department of Architecture, Ha.c., Islamic Azad University, Hamedan, Iran.

Abstract
In hot and dry climates, the roof plays an important role in heat transfer, solar radiation reception, and ultimately energy consumption. In semi-desert areas such as Qom, where solar radiation is intense and the temperature difference between day and night is large. Buildings, as one of the most energy-intensive sectors globally, account for a significant share of energy consumption; especially in hot and dry climates, cooling loads in summer and heating loads in winter nights place additional pressure on energy resources. The roof, as a horizontal or inclined surface that is most exposed to solar radiation, can be an essential source of heat energy absorption or dissipation. The orientation of the roof relative to the sun's path, the angle of inclination, and the ratio of direct to diffuse radiation all affect the intensity of heat transfer from this surface. In this study, with the aim of measuring the combined effect of roof direction and slope angle on building energy consumption, a sample room with dimensions of eight by six meters and a height of 2.7 meters, along with two windows with a length of three meters and a height of two meters, for a total area of 12 square meters, was considered as a basic reference based on the Asher Standard Model No. 900. By combining eight geographical directions, including north, northeast, east, southeast, south, southwest, west, and northwest, and five slope angles of 0, 15, 30, 45, and 60 degrees, 40 scenarios were modeled. The analyses were performed using Design Builder software and EPW climatic data of Qom city. Cooling load, as the main contributor to energy consumption in the hot and dry climate of Qom, showed the greatest sensitivity to direct solar radiation and heat absorption from the roof surface. Simulation results indicated that the western, southwestern, and, to some extent, southern directions, in the case of flat or low-slope roofs, produced the greatest cooling load. Unlike cooling, the heating load increased in scenarios where the roof received the least radiation in winter. For example, the north orientation with a 0-degree slope (flat roof) showed an annual heating load of 6650 kWh. While in the southeast orientation with a 30-degree slope, this value reached 3920 kWh. The total annual energy load (Total HVAC Load) was derived from the sum of the cooling and heating loads. This indicator was the main criterion for the final comparison of the scenarios. The results obtained are fully consistent with the climatic characteristics of the city of Qom. Qom has long, hot, and sunny summers and short, dry winters with low average temperatures at night. The results showed that the southeast roof orientation with a 30-degree slope had the best energy performance. This scenario achieved a cooling load of 9,780 kWh, a heating load of 3,920 kWh, and a total load of 13,820 kWh per year. This significant saving demonstrates the importance of accurately determining the direction and angle of the roof in the climatic design of buildings in hot and dry regions.

Keywords: Hot and dry climate, pitched roof, simulation, angle, direction.

* Corresponding Author Email: mmoeini.arch@iau.ac.ir