

مقاله پژوهشی

بررسی اثرات تابش خورشید بر سطوح گنبد مساجد مناطق بیابانی

توحید شیری، کارشناس ارشد معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران
کوروش مومنی^۱، دانشیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران

چکیده

ساختن بناهای مذهبی در گذشته با در نظر گرفتن آسایش و راحتی کالبد بنا در برابر شرایط اقلیمی سخت منطقه، مورد توجه معماران بوده است. ساختار مساجد به عنوان یکی از بناهای مذهبی کشورمان، در اکثر نقاط اقلیمی مخصوصاً مناطق بیابانی با سقف‌های گنبدی گوناگون بوده است. این پژوهش به دنبال بررسی عملکرد انواع گنبد‌های مساجد مناطق بیابانی به لحاظ فرم و ابعاد در میزان جذب تابش خورشید است. بدین منظور داده‌های آب و هوایی (دمای خشک و مرطوب، تابش و وضعیت تابش) از ایستگاه‌های هواشناسی شهرهای اصفهان و یزد طی دوره آماری پانزده ساله (۱۳۷۰-۱۳۸۵) استخراج شدند و همچنین نقشه گنبد مساجد از طریق اسناد کتابخانه‌ای رشته معماری دریافت شده است. در این راستا پنج نمونه از گنبد مساجد مناطق بیابانی (مسجد امام اصفهان، میر چخماق، شیخ لطف‌الله، سارو تقی و مسجد علی) انتخاب گردیده و سپس گنبد‌ها طبق ابعاد دقیق در نرم‌افزار رویت ۲۰۱۷ مدل‌سازی شده است تا میزان جذب تابش خورشید بر سطوح گنبد‌ها در گرم‌ترین روز سال در سه بازه زمانی ساعات ۱۴، ۱۶ و ۱۸ برای مناطق بیابانی با استفاده از انرژی پلاس تحت موتور ردینس بدست آید. نتایج نشان داد میزان جذب تابش خورشید بر سطوح گنبدی به فرم و ابعاد آن بستگی دارد. در ساعت ۱۴ گنبد‌های با خیز بلند تقریباً ۵۸٪ و گنبد‌های با خیز کم ۷۵٪، در ساعت ۱۶ گنبد‌های با خیز کم ۶۸٪ و گنبد‌های با خیز بلند ۵۱٪ و در ساعت ۱۸ گنبد با خیز بلند ۴۹٪ و گنبد با خیز کم ۴۶٪ از سطوح خود را در معرض تابش قرار می‌دهند. عملکرد گنبد‌های خیز بلند مساجد، در گرم‌ترین موقع روز نسبت به گنبد‌های خیز کم بسیار بهینه‌تر می‌باشد زیرا گنبد‌های خیز بلند در این ساعات سایه‌اندازی بیشتری ایجاد می‌نمایند.

کلمات کلیدی: تابش خورشید، گنبد مساجد، نرم افزار رویت، ردینس، مناطق بیابانی.

مقدمه

میزان مصرف انرژی ساختمان در کشورهای توسعه یافته حدوداً یک سوم از کل میزان انرژی‌های مصرفی و دوسوم انرژی برق مصرفی را شامل می‌شود (مدیریت اطلاعات انرژی، ۱۹۹۵: ۲۸۵). انرژی مصرفی در چهار بخش اصلی صنعتی، ساختمانی (مسکونی/تجاری)، حمل و نقل و کشاورزی تقسیم می‌شود. بخش ساختمان یکی از بزرگترین بخش‌های مصرف انرژی است که در بسیاری از کشورها، انرژی مورد نیاز برای گرمایش و سرمایش در این بخش بالاترین سهم از مقدار کل را به خود اختصاص می‌دهد (باکوس^۱، ۲۰۰۰، ال سانا و زدان^۲، ۲۰۰۲). از این رو روشن است که حفاظت موثر از انرژی در بخش ساختمان نقش مهمی در جهت کاهش مصرف انرژی بازی می‌کند. در این راستا شناسایی و منطقه بندی انرژی آن هم در گام ساعتی در آینده می‌تواند رهگشای مسائل بسیاری به منظور مدیریت انرژی پایدار باشد (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۷: ۳). امروزه، امید می‌رود که با تکیه بر روش‌های همساز با اقلیم بتوان میزان گرمایش و سرمایش مکانیکی را به حداقل رساند. «آب و هوای هر ناحیه مرکب از کلیه عوامل و عناصر آب و هوایی آن ناحیه بوده و هنگام تقسیم بندی باید همه آنها در نظر گرفته شود. در این بین استفاده مناسب از نور روز، بعنوان منبع رایگان انرژی خورشیدی، یکی از همین عوامل مهم می‌باشد. توجه به کیفیت و کمیت نور روز در مرحله اولیه طراحی به منظور خلق فضایی با مصرف انرژی کم از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است» (یظه‌ری کرمانی و همکاران، ۱۳۹۸: ۸۸). یکی از متغیرهای مهم در طراحی همساز با اقلیم، ویژگی‌های جداره خارجی بنا است (واتسون و همکاران ۱۳۷۲، ۴). سقف یکی از اجزای ساختمان است که در معرض حداکثر تابش است؛ بنابراین محافظت از آن در مقابل اشعه‌های خورشید در تابستان برای کاهش دریافتی و در معرض تابش بودن در زمستان از چالش‌های اصلی در طراحی است. تحقیقات زیادی نشان می‌دهند که ۵۰٪ از حرارت

¹ Bakos² Al Sanea & Zedan

دریافتی ساختمان از بام است (شیخ و بشیر^۱، ۲۰۰۸). فرم و شکل ساختمان باید با اثرات مطلوب و یا نامطلوب حرارتی محیط مطابقت داشته باشد. معماری سنتی ایران برای سال‌های متمادی با کمترین مصرف انرژی، شرایط آسایش را فراهم نموده است. مساجد اسلامی از دیرباز محل عبادت، تحصیل و سایر امور بوده؛ لذا توجه به امور اقلیمی در آن امری غیرقابل چشم‌پوشی است. در این میان گنبدها به عنوان مهمترین عارضه خارجی در مساجد می‌توانند مورد بررسی قرار گیرند. فرض بر آن است که گنبدها باید علاوه بر جنبه سازه‌ای و نشانه‌ای در زمینه ابعاد اقلیمی نیز پاسخ درخوری داشته باشند (آصفی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۱۴). گنبد در معماری مساجد، بدون توجه به مرزهای جغرافیایی در جهان اسلام، در مناطق مختلف گسترش داشته و به عنوان یک فضای معماری شاخص و شناخته شده، جایگاهی بارز دارد (آنا و همکاران^۲، ۲۰۱۸: ۳۹۲). سازه‌های گنبدی، بیشتر در مناطق روستایی نواحی مناطق بیابانی ایران مرسوم است که در این مناطق اکثر ساختمان‌ها از خشت و گل ساخته شده‌اند. یکی از ویژگی‌های سقف‌های گنبدی شکل، ایجاد سایه در طی روز توسط بخش رو به سمت خورشید آن‌ها بر روی بخش دیگر سقف است که به آن ویژگی سایه‌اندازی خودکار اطلاق می‌شود (ساوری و توی^۳، ۱۹۸۶). گنبد را می‌توان طاقی برای پوشش دهانه‌ای بزرگ دانست که در آن نه تنها مسائل ساختمانی پوششی مطرح است بلکه مسائل شکلی نمادی نیز جایگاه خاصی دارد (معماریان، ۱۳۶۷: ۵۳). ناصر خسرو در قرن پنجم از وجود گنبدی در راه نایین خبر می‌دهد و معتقد است که این بناها را در بیابان به همراه آب‌انبار (مصانع)، در هر دو فرسنگ می‌ساختند تا در گرما و سرما در آنجا آسایش یابند (ناصر خسرو، ۱۳۶۲: ۱۱۹). آغاز شکل گنبدها در ایران بر مبنای بیضی، با مقاطع مختلف بوده که در دوران اسلامی از لحاظ شکلی تنوعی بسیاری پیدا کرده است و همچنین ریشه‌یابی شکل گنبد می‌تواند حاصل نمادپردازی و راه‌حل‌های سازه‌ای و نیارشی باشد (معماریان، ۱۳۶۷: ۱۲۰).

¹ Cheikh & Bouchair

² Ana

³ Savory and Toy

معماری سنتی کشورمان در مناطق بیابانی برای سال‌های طولانی با کمترین مصرف سوخت، شرایط آسایش را فراهم نموده است. بنابراین برای شناسایی گنبدهای بهینه‌ی مساجد مناطق بیابانی، نیاز به تحلیل اساسی با نرم‌افزار انرژی پلاس می باشد که در این پژوهش تلاش شده است با استفاده از پلاگین‌های هانی بی و لیدی باگ^۱، تحت ردینس^۲ بر سطوح گنبدهای تک پوسته و دوپوسته مساجد اقلیم گرم خشک، میزان دریافت تابش خورشید مورد مطالعه و تحلیل قرار گیرد. نمونه‌های بررسی شده به ترتیب تک پوسته و دو پوسته عبارت‌اند از: گنبد مسجد امام اصفهان، مسجد میر چخماق و مسجد شیخ لطف‌الله، مسجد سارو تقی و مسجد علی که براساس ارزش بنا از لحاظ تاریخی، نوع قوس و فرم گنبد انتخاب شده‌اند. ابتدا نقشه تمامی این گنبدها از کتاب گنجنامه مساجد (حاجی قاسمی، ۱۳۹۴: ۱۲۴) تهیه شده، سپس گنبدها بر اساس ابعاد و اندازه‌ی دقیق در نرم افزار رویت ۲۰۱۷^۳ مدلسازی و به نرم افزار راینو^۴ انتقال داده شده است تا تحلیل دریافت حرارت بر سطوح گنبد مساجد گرم و خشک بیابانی با استفاده از ردینس بدست آید.

بر این مبنا سوالات اصلی تحقیق بدین صورت مطرح می باشد:

۱. عملکرد انواع گنبدهای مساجد مناطق بیابانی به لحاظ فرم و ابعاد در میزان

جذب تابش خورشید چگونه است؟

۲. کدام نوع گنبد مساجد مناطق بیابانی در برابر تابش خورشید عملکرد بهینه تری

داشته است؟

می توان گفت نتایج پژوهش فوق می‌تواند در انتخاب گنبد بهینه جهت دریافت حرارت برای اقلیم گرم و خشک مناطق بیابانی استفاده شود.

جذب حرارت سقف‌های گنبدی: در سال ۱۹۷۸ بهادری نژاد اولین کسی بود که در زمینه سقف‌های قوسی مطالعه نمود و نقش این‌گونه سقف‌ها در تهویه فضای داخل ساختمان

¹ Honeybee & ladybug

² RADIANCE

³ Revit 2017

⁴ Rhinoceros 5

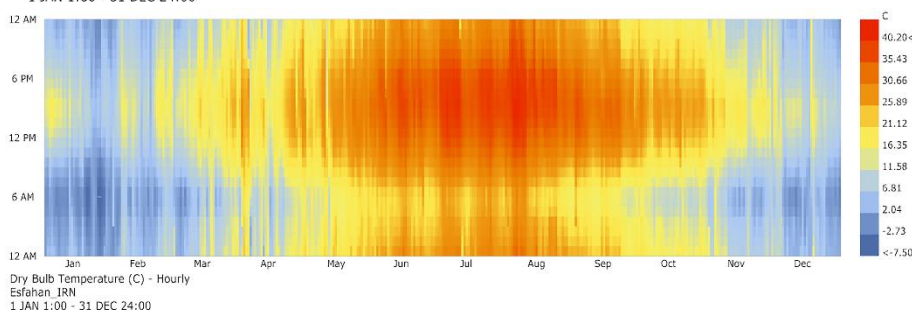
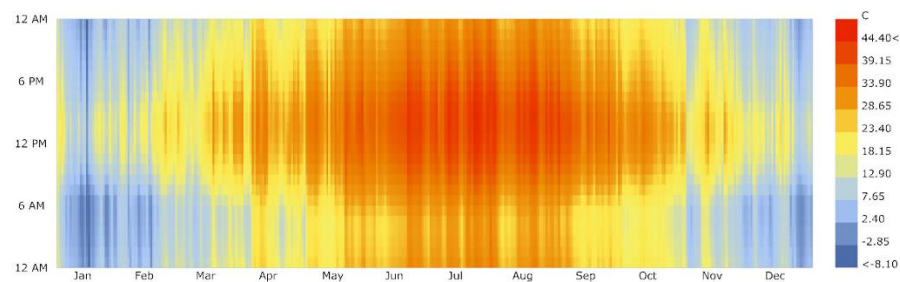
و خنک نگه داشتن آب درون آب‌انبارها را بررسی نمود. با توجه به مطالعات او سقف های قوسی کمتر از سقف‌های تخت، گرما را از طریق تابش جذب می‌نمایند (شیری و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۹). و همچنین طی پژوهشی شیری و همکاران (۱۳۹۸) تاثیر فرم بر میزان سایه‌اندازی و جذب حرارت در گنبد آب‌انبارهای یزد را با پلاگین‌های هانی بی و لیدی باگ مورد بررسی قرار دادند (شیری، دیده‌بان و تابان، ۱۳۹۸: ۷۸). در مورد سقف ساختمان در منطقه گرم و خشک، پژوهشگرانی مانند فتحی ۱۹۷۳، و مین استون ۱۹۸۳، باون ۱۹۸۱ و کیتا ۱۹۹۱، پژوهش‌هایی درباره‌ی انعکاس تابشی سقف‌های قوسی و گنبدی انجام دادند (تانگ.آر و دیگران ۲۰۰۳: ۵۳۹). بهادری نژاد و حقیقت مقایسه‌ای بین دمای درون اتاق و دمای متوسط تشعشع برای دو سقف تخت و گنبدی با روش آنالیز شبکه حرارتی انجام دادند. بر اساس موقعیت وابستگی زاویه‌ای، ضریب جذب خورشید نشان می‌دهد که در مناطقی با آب و هوای گرم و خشک، سقف گنبدی، دمای هوای اتاق را در فصل تابستان کاهش می‌دهد و انعکاس تابشی سقف گنبدی بیشتر از سقف تخت متناظرش است (سرپوشان و یعقوبی، ۱۳۸۱: ۳). فقیه کاشانی و بهادری نژاد تحقیقی را در شهر قم برای سقف بارگاه حضرت معصومه انجام داده و مدل و مقدار انرژی تابشی و شار حرارتی را محاسبه و کمترین اتلاف انرژی را برای زوایای ۵۰ الی ۶۰ درجه معرفی نموده‌اند. همچنین معتقدند استفاده از کاشی در معماری سنتی ایران در پوشاندن سطوح گنبدی باعث کاهش تشعشع خورشیدی جذب شده می‌شود (فقیه کاشانی و بهادری نژاد ۱۳۸۹: ۲۸۶). در مورد سقف‌های گنبدی دو پوسته، هر چه اختلاف ستون هوا کمتر شود، چون گردش هوا کمتر و اثر همرفت بسیار کاهش می‌یابد، اتلافات از سقف کمتر شده و تقریباً ۸ الی ۱۰ درجه شرایط آسایش را بهبود می‌بخشد. در حالتی که فضای گنبد دو پوسته با شکل منظم و شبیه‌تر به کره همراه با چرخش هوا باشد، به دلیل تماس کم جریان همرفت هوای قشر داخلی، حرارت به پوسته داخلی منتقل نمی‌شود و نتایج بهتری دیده می‌شود (مشفق و ابراهیمی، ۱۳۸۷: ۱۲۸). ویژگی گنبدها منجر به کاهش تابش مستقیم دریافتی از خورشید در طول روز می‌گردد. برای هر روز از سال و در هر عرض

جغرافیایی در هنگام طلوع خورشید، ۵۰٪ از گنبد، تابش مستقیم را دریافت می‌کند و در هنگام ظهر که شامل بیشترین مقدار تابش مستقیم می‌باشد، خاصیت سایه‌اندازی سقف به کمترین مقدار می‌رسد. در هنگام بعد از ظهر عکس این پدیده اتفاق می‌افتد و جهت سایه اندازی سقف تغییر می‌کند. بدین شکل بخش موجود در سایه در طی روز با جذب حرارت از بخش گرم‌تر در معرض خورشید و انتقال آن به هوای سردتر موجود در بخش سایه سقف، همانند رادیاتور عمل می‌کند (توکل و یعقوبی، ۱۳۸۸: ۹). نصرالهی (۲۰۰۹) بیان می‌کند بدلیل زاویه متغیر تابش بین تابستان و زمستان در سطوح افقی، این سطوح تابش بیشتری در تابستان و تابش کمتری در زمستان دریافت می‌کنند. برای جلوگیری از دریافت تابش شدید در تابستان و از دست دادن حرارت در زمستان باید مقاومت حرارتی مصالح عایق‌کاری در سطوح عمودی را افزایش داد. استفاده از مصالح منعکس‌کننده در سقف از جمله استراتژی‌هایی است که برای کاهش بار گرمایش در تابستان بکار می‌رود (نصرالهی، ۲۰۰۹: ۴۵۲). در سقف‌های گنبدی سرعت باد روی گنبد و در نتیجه ضریب انتقال حرارت افزایش یافته و با سطح بیشتر گنبد نسبت به بام مسطح، انتقال حرارت به هوای بیرون بیشتر شده و بنابراین حرارت کمتری به داخل ساختمان راه می‌یابد؛ در نتیجه سطح زیرین گنبد را خنک‌تر نموده و باعث کاهش تبادل حرارت تشعشعی این سطح با سطوح داخل ساختمان می‌گردد. به این ترتیب دریافت انرژی خورشیدی از طریق بام ساختمان به حداقل ممکن می‌رسد (فقیه خراسانی و بهادری نژاد، ۱۳۸۹: ۲۱۵). فولادی و همکاران (۱۳۹۵) در گنبد ناری با ایجاد لایه‌ای به ضخامت ۵ سانتی متر فضای پر شده از هوا، نتیجه گرفتند که عدم وجود گردابه باعث می‌شود تا سقف از نظر تبادل حرارت به روش هدایت بهتر از سقف با بدون لایه هوا عمل کند و در نتیجه انتقال حرارت به داخل بنا کمتر می‌گردد (فولادی و همکاران، ۱۳۹۵: ۹۶). چانک و همکاران (۲۰۰۸) در پژوهش خود، یک مدل سقف دوپوسته‌ی با یک سیستم منعکس‌کننده تابش، طراحی نموده‌اند. سپس جهت اندازه‌گیری تجربی با یک نمونه موردی به منظور اعتبارسنجی مدل، مقایسه کردند (چانک و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۴۰).

داده‌ها و روش‌ها

اقلیم گرم و خشک مناطق بیابانی: ساکنین مناطق گرم و خشک برای غلبه بر مشکلات آب و هوایی این نواحی، تدبیرهایی اندیشیده‌اند، من جمله ساخت سقف‌های گنبدی با خشت و آجر که عایق حرارتی بالایی دارند (کسمایی، ۱۳۸۳: ۸۹). با توجه به مشکلات اقلیمی فوق، معماری سنتی ما در اثر تجربه چند هزار ساله، راه حل‌های منطقی من جمله ساخت بناهای گنبدی برای یک زندگی دلپذیر در این مناطق فراهم نموده است (قبادیان ۱۳۹۳: ۱۲۳). در تصویر ۱ دمای خشک یک‌ساله شهرهای یزد و اصفهان نشان داده شده

است.

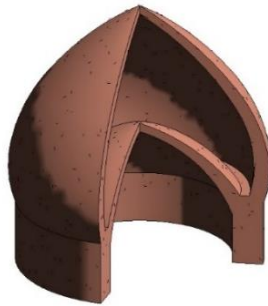


تصویر ۱- از سمت بالا دمای خشک شهر یزد (حداکثر دما ۴۲ و حداقل دما ۷ درجه

سائتیگراد). از سمت پایین دمای خشک شهر اصفهان (حداکثر دما ۴۰ و حداقل دما ۷ درجه

سائتیگراد)، منبع: ردینس (مأخذ: نگارندگان)

گنبد یک پوسته و دو پوسته: گنبدهای یک پوسته قدمت بیشتری نسبت به گونه‌های دیگر دارند و اولین نشانه گنبدهای باربر، حمال و ریشه تاریخی شکل‌گیری گنبدها می‌باشند (معماریان، ۱۳۶۷: ۱۲۲). سقف گنبدی دو پوسته، یکی از عناصر بومی معماری مناطق گرم و خشک ایران می‌باشد (معماریان، ۱۳۹۱: ۳۴۲). در سقف گنبدهای دو پوسته، خود و آهیانه کاملاً از هم جدا هستند (معماریان و پیرنیا، ۱۳۷۰: ۶۵). تصویر ۲ نحوه‌ی اجرای گنبد امام اصفهان حول محور عمودی را نشان می‌دهد.

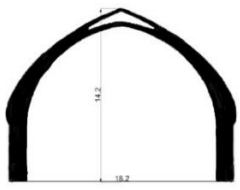

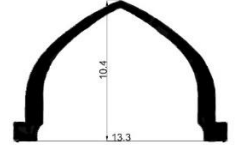

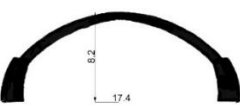



تصویر ۲- مدل‌سازی گنبد مسجد امام اصفهان، نحوه‌ی اجرای گنبد حول محور عمودی،

مأخذ: نگارندگان

گنبدهای تک پوسته: مسجد شیخ‌لطف‌الله به دستور شاه عباس اول صفوی ساخته شده و قدمت گنبد در داخل گنبدخانه مربوط به سال ۱۰۲۵ ه.ق است (هنرفر، ۱۳۵۰: ۴۰۲). شاردن در قرن یازدهم هجری در اصفهان بوده و از مسجد علی به عنوان مسجد سنجریه یاد نموده و بانی آن سلطان سنجر بوده است (کامبیز، ۱۳۹۴: ۱۳۵). بانی مسجد ساروتقی اصفهان، میرزا محمد تقی، صدر اعظم شاه عباس دوم صفوی بوده است. ساخت گنبد بنا با حمایت ساروتقی در سال ۱۰۵۳ صورت گرفته است (رفیعی مهرآبادی، ۱۳۷۸: ۱۲۹). در جدول ۱ مشخصات گنبد مساجد تک پوسته‌ای مناطق بیابانی درج شده است.

جدول ۱- مشخصات گنبد مساجد تک پوسته‌ی مناطق بیابانی

گنبد مساجد	مقطع گنبد مساجد	تصویر گنبد مساجد	ارتفاع گنبد	دهانه گنبد
گنبد شیخ لطف‌الله			۱۴.۲ m	۱۸.۲ m
گنبد سارو تقی			۱۰.۴ m	۱۳.۳ m
گنبد مسجد علی			۱۷.۴ m	۸.۲ m

منبع: حاجی قاسمی، ۱۳۹۴، تنظیم: نگارندگان


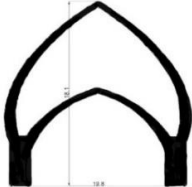

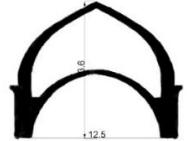
گنبد‌های دو پوسته: مسجد میرچخماق در دوره محمدشاه قاجار در خارج شهر ساخته شده است (افشار، ۱۳۵۴: ۱۸۹). گنبد اکنون با گچ، اندود شده است (دونالد^۱ و لیزا^۲، ۱۳۷۴: ۶۰۶). مسجد امام اصفهان همچون نگینی در جهان اسلام و حاصل تلاش هنرمندان ایرانی در شکل بخشیدن به فضایی متفاوت از نظر شکل، رنگ و فرم است (میشل^۳، ۱۳۸۰: ۱۵۰). مسجد امام در ضلع جنوبی میدان امام (نقش جهان) واقع شده و گنبد خانه با فضای بزرگ داری دیواری به ضخامت ۳.۵ متر است (معماریان، ۱۳۶۷: ۲۵۸). در جدول ۲ مشخصات گنبد مساجد دوپوسته‌ای مناطق بیابانی درج شده است.

¹ Donald

² Lisa

³ Michelle

جدول ۲- مشخصات گنبد مساجد دو پوسته‌ای مناطق بیابانی

دهانه گنبد	ارتفاع گنبد	تصویر گنبد مساجد	مقطع گنبد مساجد	گنبد مساجد
۱۹.۸ m	۱۸.۱ m			گنبد امام (شاه)
۱۳.۶ m	۱۲.۵ m			گنبد میر چخماق

منبع: حاجی قاسمی، ۱۳۹۴، تنظیم: نگارندگان

روش تحقیق: پلاگین‌های هانی بی و لیدی باگ با قابلیت آنالیز با موتورهای قدرتمند انرژی، انرژی پلاس^۱ و اوپن استیودیو^۲ و ردینس^۳ در بسیاری از پژوهش‌های خارجی مورد استفاده قرار گرفته است. این پلاگین‌ها از اعتبار بسیار بالایی برخوردار هستند و به دلیل داشتن برنامه نویسی به صورت الگوریتمی و امکان دسترسی به داده‌های آب و هوایی معتبر و تنوع در خروجی‌های گرافیکی و عددی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته اند. شین و همکاران (۲۰۱۹) جهت شناسایی و میزان دریافت تابش خورشید بر ۱۵ بلوک واقعی در سه گونه تجاری، صنعتی و مسکونی از منطقه‌ی ووهان با استفاده از پلاگین‌های هانی بی و لیدی باگ تحت ردینس پژوهشی انجام دادند و میزان PV بیرونی برای سقف‌ها و جداره‌های بلوک‌ها را محاسبه نمودند (شین^۴ و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۴۳). اولیوری^۵ و همکاران (۲۰۱۷) پژوهش میدانی و شبیه‌سازی درباره دیوارهای سبز عمودی در آب و هوای مدیترانه‌ای انجام و عملکرد ضخامت‌های مختلف دیوارهای سبز با

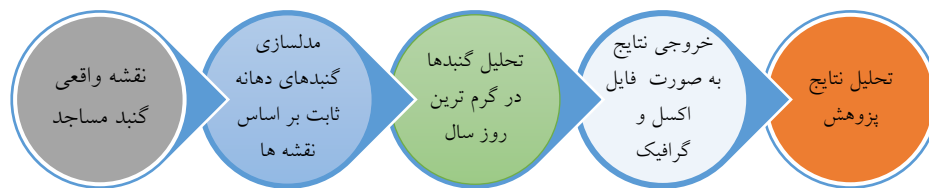
^۱ Energy Plus^۲ Open Studio^۳ RADIANCE^۴ Shen^۵ Olivieri

استفاده از پلاگین‌های هانی بی و لیدی باگ را مورد ارزیابی قرار دادند (اولیوری و همکاران، ۲۰۱۷: ۹۶۹).

در این تحقیق، برای تحلیل پتانسیل انرژی حرارتی تابش خورشید در سطوح گنبد مساجد مناطق بیابانی، با استفاده از نرم‌افزار راینو ۵، با پلاگین‌های هانی بی لیدی باگ تحت ردینس شبیه‌سازی بر اساس درصدی صورت گرفت تا تاثیر خیز و نوع قوس گنبدهای مساجد در میزان دریافت حرارت مشخص شود. محاسبات با انتخاب چهار نمونه از گنبد تک پوسته و دوپوسته از شهر اصفهان و یک نمونه گنبد دوپوسته از شهر یزد انتخاب گردید. سپس گنبدها بر اساس نقشه دقیق در نرم‌افزار روییت ۲۰۱۷ به صورت سه بعدی مدلسازی شد. برای تحلیل دریافت حرارت خورشید، از مدل‌ها خروجی fbx گرفته شد و به نرم‌افزار راینو ۵ انتقال داده شد. در این نرم‌افزار دهانه تمام گنبدها به طول ۱۰ متر بدون این که شکل مقطع گنبدها تغییر کند، در نظر گرفته شد تا با استفاده از پلاگین‌های هانی بی لیدی باگ، تحت ردینس الگوریتم تحلیل دریافت تابش خورشید در گرم‌ترین روز سال در سه بازه‌ی زمانی روز، ساعات ۱۴، ۱۶ و ۱۸ بعد از ظهر انجام گیرد. «یکی از فراسنج‌های تحت دما درجه ساعت است که در بسیاری از زمینه‌ها از جمله معماری، ساختمان و مدیریت مصرف انرژی جهت گرمایش دارای کاربرد می‌باشد. بسیاری از محققین در مطالعات خود بیان داشتند که درجه ساعت نسبت به فراسنج درجه روز دارای قابلیت بهتری برای محاسبه به ویژه جهت مشخص کردن میزان مصرف انرژی جهت گرمایش محیط می‌باشد» (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۷: ۲۷). همه مدل‌ها در تراز صفر قرار گرفته شد. خروجی‌های آنالیز در محیط نرم‌افزار راینو ۵ به صورت گرافیکی و در پلاگین گرس‌هاپر و هانی بی لیدی باگ به صورت عددی می‌باشد که در نرم‌افزار، قابلیت استخراج اعداد به صورت اکسلی وجود دارد. برای این محاسبات، داده‌هایی با فرمت آب و هوایی^۱ شامل دمای خشک و مرطوب، هوا، تابش و وضعیت تابش از ایستگاه‌های هواشناسی شهرهای اصفهان و یزد طی دوره‌ی آماری پانزده ساله

^۱ EPW

(۱۳۸۵-۱۳۷۰) استخراج گردید. مشخصات گنبد مساجد، طبق ابعاد درج شده در جدول ۱ در نظر گرفته شده و کلیه‌ی تحلیل‌ها در نرم افزار راینو ۵ سال ۲۰۰۵ انجام شده است.



تصویر ۳- فرآیند مراحل انجام پژوهش، مأخذ: نگارندگان

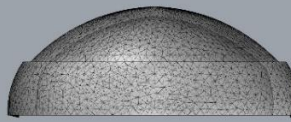
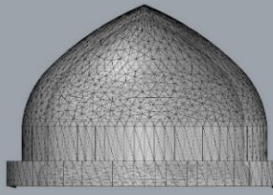
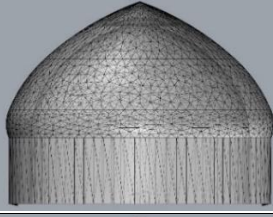
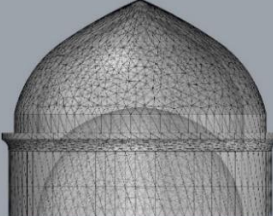
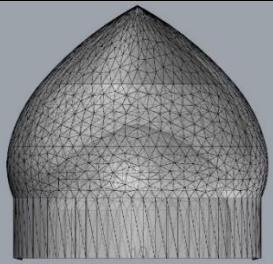
تحلیل دریافت تابش خورشید بر سطوح گنبد مساجد مناطق بیابانی: نحوه‌ی آنالیز گنبدها در پلاگین‌های هانی بی لیدی باگ تحت موتور ردینس در تصویر ۱ به صورت گام به گام ارائه شده است و جدول ۳ مشخصات مدلسازی گنبدها با دهانه یکسان در نرم‌افزار راینو ۵ می‌باشد که برای تحلیل دقیق نرم‌افزار، گنبدها از سطوح سورفیس^۱ به سطوح مش^۲ بندی تبدیل گردیده است. در سورفیس سطوح دارای تقسیم‌بندی منظم است ولی در سطوح مش گنبدها به تقسیم‌بندی‌های نامنظم تبدیل می‌گردد که به دلیل داشتن سطح منحنی گنبد مش مناسب‌ترین سطوح می‌باشد. مساحت گنبدها در پلاگین گرس هاپر^۳ با الگوریتم Area نوشته شد و مساحت پوسته‌ی بیرونی گنبدهای مش بندی به صورت خروجی اعداد نمایش داده شد. لازم به ذکر است در تمامی مراحل، فرم گنبدها به عنوان متغیر اصلی و دیگر پارامترهای پایه مانند ضخامت، مصالح گنبد، مناره‌ها ثابت فرض شده‌اند، زیرا هدف پژوهش بدست آوردن رابطه بین خیز گنبدها با میزان حرارت دریافتی بوده است.

¹ Surface

² Mesh

³ Grasshopper

جدول ۳- مشخصات نمونه گنبد مساجد مدل‌سازی شده با دهانه ثابت در نرم‌افزار راینو ۵ برای تحلیل دریافت تابش خورشید.

مساحت گنبدها	ساعات تحلیل	عرض دهانه گنبد	ارتفاع گنبد	مقطع گنبد مساجد در دهانه ثابت	گنبد مساجد
۲۶۵ m ²	۱۴ بعد از ظهر ۱۶ بعد از ظهر ۱۸ غروب	۳.۵ m	۱۰ m		مسجد علی
۴۱۲ m ²	۱۴ بعد از ظهر ۱۶ بعد از ظهر ۱۸ غروب	۷.۱ m	۱۰ m		ساروتقی
۴۹۱ m ²	۱۴ بعد از ظهر ۱۶ بعد از ظهر ۱۸ غروب	۸.۱ m	۱۰ m		شیخ لطف الله
۵۳۷ m ²	۱۴ بعد از ظهر ۱۶ بعد از ظهر ۱۸ غروب	۸.۳ m	۱۰ m		میر چخماق
۷۸۶ m ²	۱۴ بعد از ظهر ۱۶ بعد از ظهر ۱۸ غروب	۱۱.۴ m	۱۰ m		امام (شاه)

مأخذ: نگارندگان

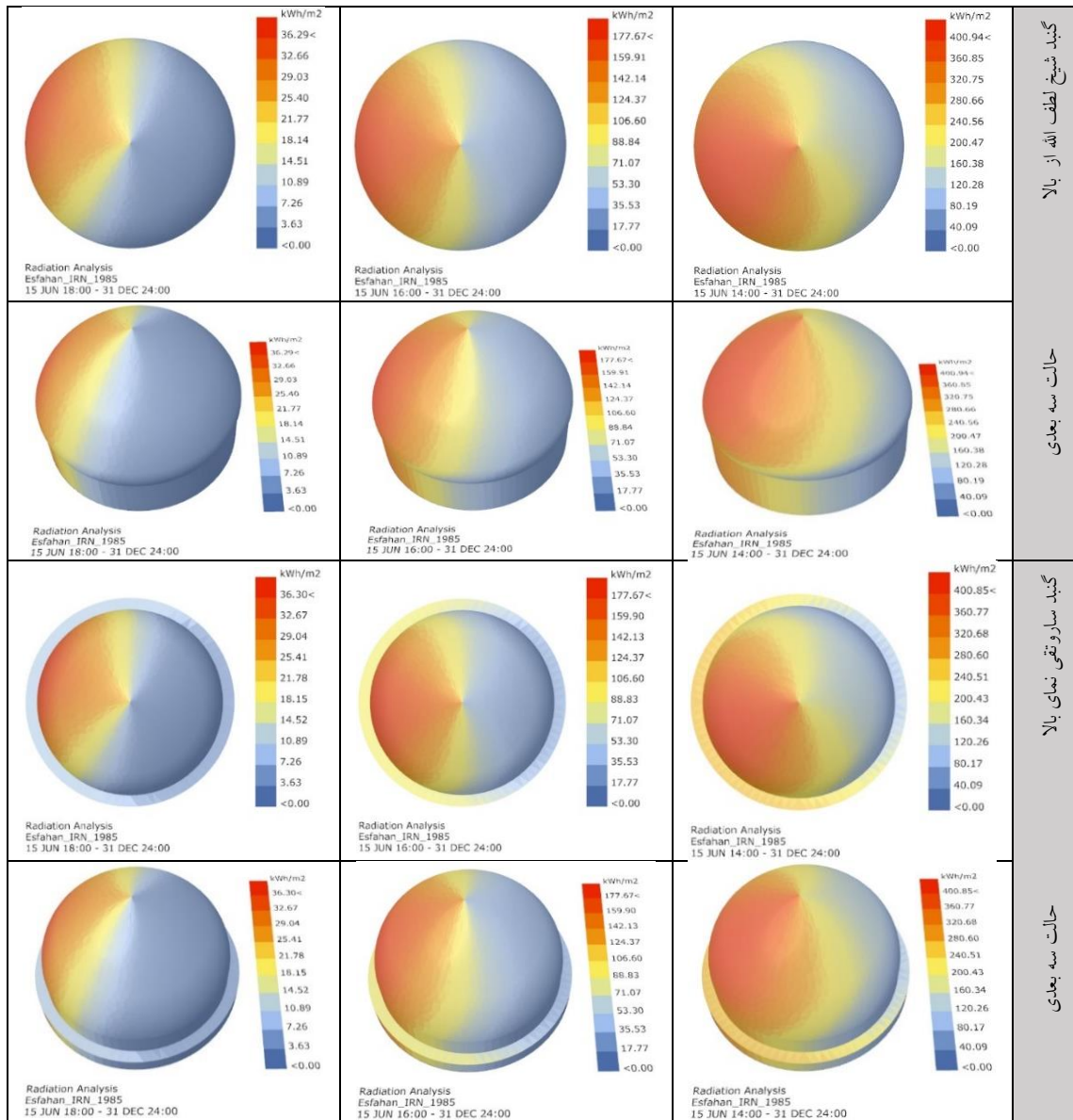
بحث اصلی

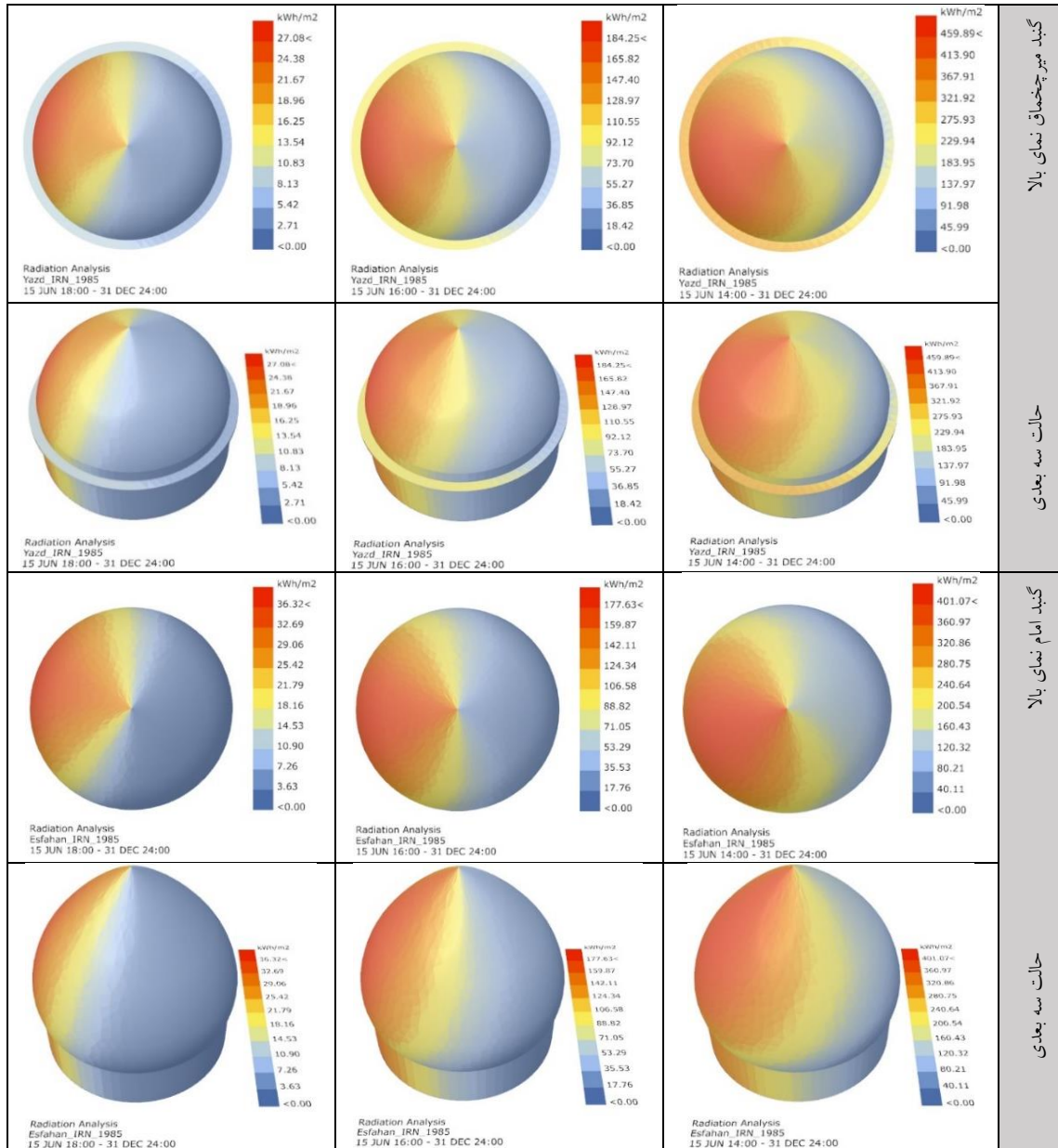
نتایج حاصل از تحلیل انرژی پلاس (هانی بی و لیدی باگ): کشف رابطه بین شکل و قوس گنبدها با میزان دریافت حرارت یکی از اهداف این پژوهش می‌باشد. جدول ۴ خروجی‌های گرافیکی تحلیل‌ها در سه بازه‌ی زمانی از نمای بالا و نمای سه‌بعدی گنبد مساجد مناطق بیابانی را نشان می‌دهد. جدول ۵ خروجی اکسلی میزان دریافت حرارت در معرض تابش و جدول ۶ خروجی اکسلی میزان دریافت حرارت در محدوده‌ی سایه گنبدها را مشخص می‌کند که داده‌ها بر حسب کیلووات بر متر مربع و مساحت، برحسب متر مربع لحاظ شده است. تصاویر گرافیکی و اعداد اکسلی حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که رابطه‌ی مستقیمی بین مساحت و قوس گنبد با مقدار جذب حرارت تابشی وجود دارد.

جدول ۴- تحلیل دریافت تابش خورشید، جذب حرارت در محدوده سایه بر سطوح گنبد مساجد تک پوسته و

دو پوسته مناطق بیابانی بر حسب kWh/m^2

مساجد گنبد	تحلیل در ساعت ۱۴ بعد از ظهر	تحلیل در ساعت ۱۶ بعد از ظهر	تحلیل در ساعت ۱۸ بعد از ظهر
گنبد مسجد علی از بالا	<p>Radiation Analysis Esfahan_IRN_1985 15 JUN 14:00 - 31 DEC 24:00</p>	<p>Radiation Analysis Esfahan_IRN_1985 15 JUN 16:00 - 31 DEC 24:00</p>	<p>Radiation Analysis Esfahan_IRN_1985 15 JUN 18:00 - 31 DEC 24:00</p>
	<p>Radiation Analysis Esfahan_IRN_1985 15 JUN 14:00 - 31 DEC 24:00</p>	<p>Radiation Analysis Esfahan_IRN_1985 15 JUN 16:00 - 31 DEC 24:00</p>	<p>Radiation Analysis Esfahan_IRN_1985 15 JUN 18:00 - 31 DEC 24:00</p>
حالت سه بعدی	<p>Radiation Analysis Esfahan_IRN_1985 15 JUN 14:00 - 31 DEC 24:00</p>	<p>Radiation Analysis Esfahan_IRN_1985 15 JUN 16:00 - 31 DEC 24:00</p>	<p>Radiation Analysis Esfahan_IRN_1985 15 JUN 18:00 - 31 DEC 24:00</p>





منبع: انرژی پلاس (ردینس) مأخذ: نگارندگان.

جدول ۵- میزان جذب حرارت در محدوده در معرض تابش در گنبد مساجد مناطق بیابانی بر حسب kwh/m^2

جمع کل جذب حرارت بر حسب kwh/m^2	میزان بازه حرارت دریافتی در سطوح در معرض تابش در ساعت ۱۴ بعد از ظهر												مساحت گنبد	گنبد مساجد	
	۱۹۹ kwh/m^2		۲۳۹ kwh/m^2		۲۷۹ kwh/m^2		۳۱۹ kwh/m^2		۳۵۹ kwh/m^2		۳۹۹ kwh/m^2				
۴۹۰۹۰	۱۵۶ m^2	۳۴۲۷	۱۷ m^2	۵۵۱۰	۲۳ m^2	۷۰۹۷	۲۵ m^2	۸۷۰۷	۲۷ m^2	۱۱۱۳۰	۳۱ m^2	۱۳۲۱۶	۳۳ m^2	۲۶۵ m^2	مسجد علی
۶۵۲۱۷	۲۰۴	۴۷۵۵	۲۳	۶۵۹۷	۲۷	۹۰۸۰	۳۲	۱۱۵۶۵	۳۶	۱۴۶۴۲	۴۰	۱۸۵۷۵	۴۶	۴۱۲ m^2	ساروتقی
۷۲۹۶۵	۲۳۰	۵۳۷۳	۲۷	۷۳۹۲	۳۰	۱۰۱۳۷	۳۶	۱۳۳۱۳	۴۱	۱۶۵۶۹	۴۶	۲۰۱۷۸	۵۰	۴۹۱ m^2	شیخ لطف الله
۸۰۶۱۳	۲۵۶	۶۳۰۴	۳۱	۸۵۹۸	۳۵	۱۰۹۳۷	۳۹	۱۴۳۸۹	۴۵	۱۸۳۱۴	۵۱	۲۲۰۶۹	۵۵	۵۳۷ m^2	میرچخماق
۱۰۰۰۹۷	۳۱۸	۷۳۵۱	۳۶	۱۰۸۹۵	۴۵	۱۵۱۳۱	۵۴	۱۸۰۵۲	۵۶	۲۲۰۰۹	۶۱	۲۶۶۵۷	۶۶	۷۸۶ m^2	امام (شاه)
جمع کل جذب حرارت بر حسب kwh/m^2	میزان بازه حرارت دریافتی در سطوح در معرض تابش در ساعت ۱۶ بعد از ظهر												مساحت گنبدها	گنبد مساجد	
	۸۸ kwh/m^2		۱۰۶ kwh/m^2		۱۲۴ kwh/m^2		۱۴۲ kwh/m^2		۱۵۹ kwh/m^2		۱۷۷ kwh/m^2				
۱۸۲۹۹	۱۳۰ m^2	۱۲۵۹	۱۵ m^2	۲۰۲۲	۱۹ m^2	۲۶۶۱	۲۱ m^2	۳۳۴۹	۲۳ m^2	۴۱۲۹	۲۵ m^2	۴۸۷۸	۲۷ m^2	۲۶۵ m^2	مسجد علی
۲۱۴۶۱	۱۵۵	۱۵۵۹	۱۷	۲۲۷۰	۲۱	۳۲۱۸	۲۵	۴۱۵۳	۳۱	۴۷۱۶	۳۰	۵۵۴۲	۳۱	۴۱۲ m^2	ساروتقی
۲۷۵۱۱	۱۹۵	۲۱۱۷	۲۴	۲۹۶۶	۲۷	۳۷۱۳	۲۹	۵۰۸۹	۳۵	۶۳۲۳	۳۹	۷۳۰۰	۴۱	۴۹۱ m^2	شیخ لطف الله
۲۹۶۲۴	۲۱۱	۲۱۷۳	۲۴	۳۲۴۴	۳۰	۴۵۲۷	۳۶	۵۴۹۰	۳۸	۶۴۸۹	۴۰	۷۶۹۸	۴۳	۵۳۷ m^2	میرچخماق
۴۰۱۹۲	۲۹۰	۲۸۳۵	۳۲	۴۲۴۹	۴۱	۶۲۳۷	۵۰	۷۷۰۱	۵۴	۸۱۷۳	۵۵	۱۰۲۹۵	۵۸	۷۸۶ m^2	امام (شاه)
جمع کل جذب حرارت بر حسب kwh/m^2	میزان بازه حرارت دریافتی در سطوح در معرض تابش در ساعت ۱۸ بعد از ظهر												مساحت گنبدها	گنبد مساجد	
	۱۸ kwh/m^2		۲۱ kwh/m^2		۲۵ kwh/m^2		۲۹ kwh/m^2		۳۲ kwh/m^2		۳۶ kwh/m^2				
۲۷۵۸	۷۷ m^2	۲۰۰	۱۱ m^2	۲۸۳	۱۳ m^2	۴۱۰	۱۶ m^2	۵۴۵	۱۸ m^2	۶۰۲	۱۸ m^2	۷۱۵	۱۹ m^2	۲۶۵ m^2	مسجد علی
۳۹۵۱	۱۳۹	۳۰۴	۱۶	۴۴۱	۲۱	۵۹۷	۲۳	۷۲۸	۲۵	۸۵۶	۲۶	۱۰۲۳	۲۸	۴۱۲ m^2	ساروتقی
۴۶۲۲	۱۶۳	۳۶۲	۲۰	۵۰۵	۲۴	۶۶۲	۲۶	۸۶۸	۲۹	۱۰۲۱	۳۱	۱۲۰۱	۳۳	۴۹۱ m^2	شیخ لطف الله
۵۲۴۳	۱۸۶	۴۰۵	۲۲	۵۸۶	۲۷	۷۷۸	۳۱	۹۶۵	۳۳	۱۱۳۴	۳۵	۱۳۷۲	۳۸	۵۳۷ m^2	میرچخماق
۷۹۵۶	۲۸۲	۵۸۰	۳۲	۸۵۸	۴۰	۱۲۱۸	۴۸	۱۵۲۷	۵۲	۱۷۳۵	۵۴	۲۰۳۷	۵۶	۷۸۶ m^2	امام (شاه)

منبع: انرژی پلاس (ردینس) مأخذ: نگارندگان.

جدول ۶- میزان جذب حرارت در محدوده سایه در گنبد مساجد مناطق بیابانی بر حسب

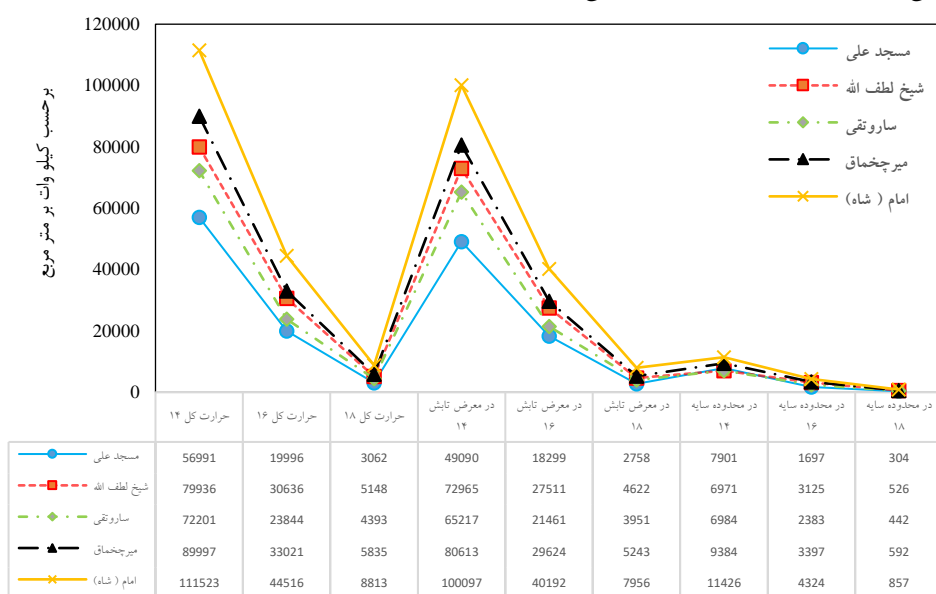
kwh/m^2 ، مأخذ: انرژی پلاس (هانی بی و لیدی باگ)، تنظیم: نگارندگان.

گنبد مساجد	مساحت گنبد	میزان بازه حرارت دریافتی در محدوده سایه در ساعت ۱۴ بعد از ظهر							
		39 kwh/m^2		79 kwh/m^2		119 kwh/m^2		159 kwh/m^2	
جمع کل جذب حرارت بر حسب kwh/m^2									
مسجد علی	265 m^2	۴۳	۷	۹	۱۲	۱۴۸۲	۱۵	۱۴۸۵	۱۵
ساروتقی	412 m^2	۶۴	۱۱	۱۵	۱۸	۲۱۵۷	۲۰	۳۱۴۴	۲۰
شیخ لطف الله	491 m^2	۷۰	۱۲	۱۵	۲۰	۲۴۵۴	۲۳	۳۷۴۷	۲۳
میرچخماق	537 m^2	۸۶	۱۶	۲۰	۲۵	۳۰۶۷	۲۵	۴۰۱۳	۲۵
امام (شاه)	786 m^2	۱۱۰	۲۵	۲۶	۲۹	۳۴۶۰	۳۰	۴۸۷۳	۳۰
گنبد مساجد	مساحت گنبد	میزان بازه حرارت دریافتی در محدوده سایه در ساعت ۱۶ بعد از ظهر							
		17 kwh/m^2		35 kwh/m^2		53 kwh/m^2		71 kwh/m^2	
جمع کل جذب حرارت بر حسب kwh/m^2									
مسجد علی	265 m^2	۳۷	۸	۸	۹	۴۴۹	۱۲	۸۶۵	۱۲
ساروتقی	412 m^2	۴۹	۹	۱۱	۱۳	۶۹۸	۱۶	۱۱۴۰	۱۶
شیخ لطف الله	491 m^2	۶۳	۱۱	۱۴	۱۸	۹۶۲	۲۰	۱۴۶۴	۲۰
میرچخماق	537 m^2	۷۱	۱۵	۱۶	۱۸	۹۹۶	۲۲	۱۵۶۳	۲۲
امام (شاه)	786 m^2	۸۸	۱۶	۱۹	۲۴	۱۲۹۱	۲۹	۲۰۶۴	۲۹
گنبد مساجد	مساحت گنبد	میزان بازه حرارت دریافتی در محدوده سایه در ساعت ۱۸ بعد از ظهر							
		3 kwh/m^2		7 kwh/m^2		11 kwh/m^2		14 kwh/m^2	
جمع کل جذب حرارت بر حسب kwh/m^2									
مسجد علی	265 m^2	۳۲	۶	۷	۹	۸۷	۱۰	۱۴۰	۱۰
ساروتقی	412 m^2	۴۵	۸	۱۰	۱۲	۱۵۲	۱۵	۲۴۰	۱۵
شیخ لطف الله	491 m^2	۵۵	۱۰	۱۳	۱۵	۱۲۷	۱۷	۲۰۷	۱۷
میرچخماق	537 m^2	۶۱	۱۱	۱۳	۱۷	۱۷۱	۲۰	۲۷۸	۲۰
امام (شاه)	786 m^2	۹۱	۱۸	۱۹	۲۶	۲۵۱	۲۸	۲۹۶	۲۸

منبع: انرژی پلاس (ردینس) مأخذ: نگارندگان.

تصویر ۴ میزان درصد جذب حرارت کل، در معرض تابش و در محدوده‌ی سایه بر سطوح گنبد دهانه ثابت (به طول ۱۰ متر) مساجد اقلیم گرم خشک اصفهان و یزد را نشان

می‌دهد. در این نمودار میزان جذب حرارت در سه بازه‌ی زمانی ۱۴، ۱۶ و ۱۸ بعد از ظهر به نمایش گذاشته شده که انرژی جذب شده در سطوح گنبد بر حسب KWh/m^2 می‌باشد. همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود میزان دریافت حرارت از ساعات ظهر به غروب سیر نزولی دارد. حداکثر حرارت کل در ساعت ۱۴ بعد از ظهر مربوط به گنبد امام اصفهان با 11523 KWh/m^2 و حداقل جذب حرارت در این ساعت در گنبد مسجد علی 56991 KWh/m^2 مشاهده می‌شود.



تصویر ۴- نمودار خطی میزان دریافت حرارت کل، در معرض تابش و در محدوده‌ی سایه

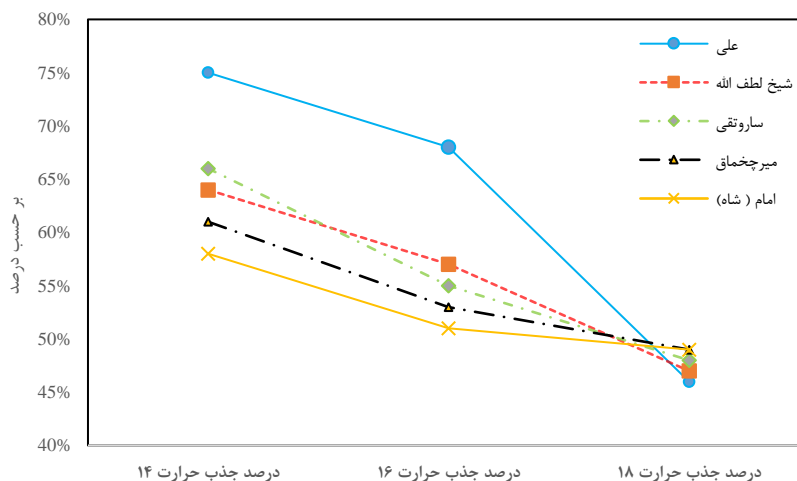
گنبد مساجد دهانه ثابت مناطق بیابانی، مأخذ: نگارندگان

مساحت گنبدها علاوه بر نوع قوس گنبدها در میزان جذب حرارت کل موثر است، زیرا گنبد امام اصفهان (۷۸۶ مترمربع) تقریباً ۲.۵ برابر مساحت گنبد مسجد علی اصفهان (۲۶۵ مترمربع) است. بنابراین سطوح زیادی از گنبد در معرض تابش قرار می‌گیرد. در ساعت ۱۸ بعد از ظهر که به دلیل زاویه تابش خورشید سطوح گنبدی انرژی کمتری دریافت می‌کنند، میزان جذب حرارت در تمام گنبدها بسیار پایین می‌آید. این میزان

جذب حرارت کل در سطوح گنبد امام اصفهان برابر با 8813 KWh/m^2 و گنبد مسجد علی با حداقل دریافت جذب حرارت برابر 3062 KWh/m^2 می‌باشد.

حداکثر دریافت حرارت در معرض تابش بر سطوح گنبد امام (شاه) اصفهان در ساعت ۱۴، 100097 KWh/m^2 می‌باشد و حداقل دریافت حرارت در معرض تابش در این ساعت بر سطوح گنبد مسجد علی 49090 KWh/m^2 است که کمترین میزان جذب حرارت در معرض تابش در بین سطوح گنبدها است. در ساعت ۱۸ نیز به دلیل خیز بلند گنبدها و تغییر زاویه تابش خورشید، گنبد امام اصفهان بیشترین سطوح خود را در معرض تابش قرار می‌دهد. میزان دریافت در معرض تابش بر سطوح گنبد امام (شاه) 7956 KWh/m^2 است و این میزان در سطوح گنبد مسجد علی برابر 3951 KWh/m^2 می‌باشد.

میزان جذب حرارت در محدوده‌ی سایه گنبدها نیز علاوه بر مساحت به نوع فرم و شکل گنبدها تا حد زیادی بستگی دارد، زیرا گنبدهای خیز کم (مسجد علی) در ساعات ظهر که زاویه تابش خورشید شدید است سطوح بیشتری را در معرض تابش خورشید قرار می‌دهند و اکثر سطوحشان انرژی را جذب می‌کنند؛ اما در گنبدهای خیز بلند در هنگام ظهر به دلیل نوع فرم و قوس گنبد، بخش زیادی از گنبد در محدوده‌ی سایه قرار می‌گیرد و کمترین انرژی را در شدیدترین موقع تابش روز جذب می‌نمایند. میزان جذب حرارت در محدوده سایه در سطوح گنبد مسجد امام (شاه) اصفهان در ساعت ۱۴، 11426 KWh/m^2 که حداکثر دریافت در بین گنبدها می‌باشد و کمترین جذب در محدوده سایه بر سطوح گنبد شیخ لطف الله اصفهان می‌باشد. این میزان جذب حرارت در ساعت ۱۸ در گنبد امام (شاه) 857 KWh/m^2 بیشترین دریافت و کمترین دریافت در این ساعت مربوط به گنبد مسجد علی اصفهان می‌باشد. جذب تابش خورشید در سطوح گنبدها به مساحت و نوع قوس گنبد مساجد بستگی دارد که با افزایش و تغییر نوع قوس گنبدها، میزان جذب حرارت خورشید نیز تغییر می‌نماید.



تصویر ۵- نمودار درصدی جذب میزان حرارت خورشید در سطوح گنبد مساجد دهانه

ثابت مناطق بیابانی، مأخذ: نگارندگان

تصویر ۵ مربوط به حرارت دریافتی بدست آمده از نرم افزار انرژی پلاس بر اساس درصد در سطوح گنبد مساجد مناطق بیابانی می باشد. در بازه های زمانی مختلف به دلیل زاویه تابش خورشید میزان سطوح در معرض تابش گنبدها نسبت به همدیگر تغییر می کند. فرم گنبدها و میزان سطح تماس گنبدها نسبت به دریافت تابش خورشید بسیار مهم است. گنبد مسجد امام به دلیل نوع قوس و خیز بلند در بازه ی زمانی ساعت ۱۴، ۵۸٪ از سطوح خود را در معرض حرارت قرار می دهد و گنبد مسجد علی به دلیل سطح تماس زیاد و خیز کم در این بازه ی زمانی ۷۵٪ از سطوح خود را در معرض حرارت قرار می دهد که در این بازه تابش شدید خورشید، عملکرد گنبدهای خیز بلند نسبت به گنبدهای خیز کم، ۱۷٪ درصد بهینه تر است. در ساعت ۱۶ بعد از ظهر، گنبد مسجد امام (شاه) اصفهان ۶۸٪ از سطوح خود را در معرض حرارت قرار می دهد و گنبد مسجد علی، ۵۱٪ از سطوحش در معرض تابش می باشد. عملکرد گنبد خیز بلند در این بازه نیز ۱۷٪ بهینه تر از گنبد خیز کم است. در ساعت ۱۸ بعد از ظهر زاویه تابش خورشید تغییر می کند که این تغییر زاویه تابش در دریافت حرارت بر سطوح گنبدها موثر است. گنبد

امام (شاه) به دلیل خیز بلند در این بازه زمانی سطوح بیشتری را در معرض تابش خورشید قرار می‌دهد. گنبد مسجد امام (شاه) ۴۹٪ از سطوحش در معرض حرارت قرار می‌گیرد و گنبد خیز کم مسجد علی به دلیل سطح تماس کم در معرض حرارت ۴۶٪ از سطح خود در معرض تابش قرار می‌گیرد. در این بازه به دلیل تغییر زاویه تابش خورشید، عملکرد گنبدهای خیز کم ۳٪ نسبت به گنبدهای خیز بلند بهینه‌تر است.

نتیجه‌گیری

شناسایی و درک پیشینیان از وضعیت محیطی و اقلیمی هر منطقه از کشورمان، موجب خلق بناهای مذهبی با هدف ارتقاء عملکرد حرارتی شده است. با بررسی و تحلیل نوع قوس و طاق گنبد مساجد معماری است که می‌توان به دانش ساخت و زمینه‌های پیدایش کالبدی آن دست یافت تا بهینه‌ترین طاق گنبد مساجد برای مناطق بیابانی مشخص گردد و همین فرم بهینه گنبد را ارتقاء داده و به صورت امروزی در مساجد و بناهای گنبدی استفاده نمود. در این پژوهش تلاش گردیده است تا چند نمونه از گنبد تک‌پوسته و دوپوسته از مناطق بیابانی به صورت اقلیمی در نرم‌افزار انرژی پلاس مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. به منظور بررسی میزان جذب حرارت، محدوده تابش نور خورشید و محدوده سایه سطوح گنبد مساجد امام (شاه) اصفهان، شیخ لطف‌الله اصفهان، ساروتقی اصفهان، میرچخماق یزد و مسجد علی با دهانه ثابت در مناطق بیابانی مورد ارزیابی و تحلیل حرارتی قرار گرفت.

با توجه به یافته‌های پژوهش، اندازه مساحت سطوح گنبد در مقدار جذب حرارت در محدوده تابش نور خورشید و در محدوده سایه بسیار مهم است. هر چقدر گنبد مساجد مساحت بیشتری داشته باشند، مقدار جذب حرارت بیشتری خواهند داشت. میزان دریافت تابش خورشید در سطوح گنبدهای مساجد در بازه‌های زمانی مختلف به دلیل تغییر زاویه تابش متفاوت است. علاوه بر این نوع قوس و طاق گنبد مساجد در جذب حرارت موثر می‌باشد، هرچقدر گنبدها در هر بازه‌ی زمانی سطوح بیشتری در معرض

تابش قرار دهند، جذب حرارت بیشتری خواهند داشت. گنبدهایی با خیز بلند در بازه‌ی زمانی ظهر که شدت تابش نور خورشید شدید است، سطوح کمتری را در معرض تابش قرار می‌دهند و گنبدهایی با خیز کم در این بازه‌ی زمانی به دلیل سطح تماس زیاد و خیز کم سطوح بیشتری را در معرض تابش قرار می‌دهند و میزان سایه‌اندازی ایجاد شده بر سطوح گنبد بسیار کمتر از گنبدهایی با خیز بلند است. انرژی جذب شده بر سطوح گنبدها بر حسب KWh/m^2 می‌باشد که بر این مبنای حداکثر حرارت کل جذب شده در ساعت ۱۴ بعد از ظهر به ترتیب مربوط به گنبد مسجد امام اصفهان با KWh/m^2 ۱۱۱۵۲۳، گنبد مسجد میر چخماق با KWh/m^2 ۸۹۹۹۷، گنبد مسجد شیخ لطف الله با KWh/m^2 ۷۹۹۳۶ و گنبد مسجد سارو تقی با KWh/m^2 ۷۲۲۰۱ است و حداقل جذب حرارت در این ساعت، گنبد مسجد علی KWh/m^2 ۵۶۹۹۱ می‌باشد که گنبد امام اصفهان KWh/m^2 ۵۴۵۳۲ بیشتر از گنبد مسجد علی که کمترین جذب را دارد، حرارت دریافت می‌نماید. بیشترین دریافت حرارت در ساعت ۱۶ بعد از ظهر در سطوح گنبد مسجد امام اصفهان با میزان KWh/m^2 ۴۴۵۱۶ و کمترین میزان دریافت در گنبد مسجد علی با میزان KWh/m^2 ۱۹۹۶ می‌باشد که در این بازه‌ی زمانی نیز گنبد مسجد امام اصفهان از همه گنبدها بیشترین دریافت حرارت را دارد که این اختلاف دریافت حرارت به میزان KWh/m^2 ۲۴۵۲۰ می‌باشد. کل دریافت حرارت در ساعت ۱۸ بعد از ظهر در گنبد مسجد امام اصفهان KWh/m^2 ۸۱۳، گنبد مسجد میر چخماق KWh/m^2 ۵۸۳۵، گنبد مسجد شیخ لطف‌الله KWh/m^2 ۵۱۴۸، گنبد مسجد سارو تقی KWh/m^2 ۴۳۹۳ و گنبد مسجد علی با حداقل دریافت جذب حرارت KWh/m^2 ۳۰۶۲ می‌باشد که گنبد مسجد امام اصفهان در این بازه‌ی زمانی از تمامی گنبدها حرارت بیشتری با میزان KWh/m^2 ۵۷۵۱ جذب می‌نماید. در بازه‌ی زمانی غروب که زاویه تابش خورشید تغییر می‌نماید، میزان شدت حرارت خورشید نسبت به سطوح گنبد کاهش می‌یابد. بطور کلی گنبد با خیز بلند در بازه‌ی زمانی ساعت ۱۴، ۵۸٪ و گنبد با خیز کم در این بازه‌ی زمانی ۷۵٪ از سطوح خود را در معرض تابش خورشید قرار می‌دهد اما در ساعت ۱۸ با تغییر

زاویه تابش خورشید، گنبد با خیز بلند ۴۹٪ و گنبد خیز کم به دلیل سطح تماس کم ۴۶٪ از سطح خود را در معرض تابش قرار می‌دهد و عملکرد گنبدهای خیز کم نسبت به گنبدهای خیز بلند بهتر می‌گردد.

در مقایسه با تحقیقاتی که دیگر پژوهشگران بر روی سطوح گنبدی با استفاده از مدلسازی عددی انجام داده‌اند، تحقیق حاضر به دلیل بررسی مقایسه‌ای میزان دریافت تابش خورشید در اقلیم گرم خشک، روش جامع‌تری را ارائه می‌دهد و نرم‌افزار استفاده شده نیز قابلیت نمایش نتایج به صورت گرافیکی و اکسلی را دارد که میزان دریافت حرارت در سطوح گنبدها به صورت دقیق و درصدی نمایش داده می‌شود. به عنوان مثال فولادی و همکاران (۱۳۹۵) عملکرد حرارتی یک نمونه از گنبد واقع در اقلیم گرم خشک را مورد بررسی قرار دادند و دریافت تابش و جریان هوا را در گنبد مدلسازی کردند. نتایج آنها نشان داد که گنبد حاضر مناسب‌ترین و بهینه‌ترین فرم برای اقلیم مورد مطالعه است. با این حال پژوهش آنها تنها بر روی یک نمونه از گنبد انجام شد که با توجه به تنوع و عملکرد گنبدها در اقلیم گرم خشک، با یک تحلیل بر روی نمونه خاص نمی‌توان به انتخاب درست دست یافت. همچنین دریافت حرارت تابش خورشید به صورت گرافیکی و کلی بیان شده بود. فقیه و بهادری‌نژاد (۱۳۸۹)، بهادری و حقیقت (۱۹۸۵)، سرپوشان و یعقوبی (۱۳۸۱)، بهادری نژاد (۱۹۷۸) بر روی سقف‌های گنبدی مطالعه کردند که نتایج آنها همانند این تحقیق نشان داد که سقف‌های گنبدی در دریافت حرارت تابش خورشید عملکرد بهتری دارند و میزان دریافت تابش خورشید در بازه‌های زمانی مختلف روز تغییر نموده و تابش خورشید در طول روز بخشی از گنبد را در معرض خود قرار می‌دهد و قسمت دیگر در سایه است که در خنک نگه داشتن دمای داخلی گنبد بسیار موثر می‌باشد. تفاوت پژوهش حاضر با این پژوهشگران در این است که آنها عملکرد حرارتی تنها یک نمونه از گنبد را با روش عددی و تجربی انجام دادند، و یا با یک نمونه از سقف تخت مقایسه کردند و به شناخت و انتخاب نوع مناسب قوس گنبدها پرداخته‌اند. در واقع وجه تمایز این تحقیق با پژوهش‌های دیگر در این است که

میزان دریافت تابش خورشید در این پژوهش به صورت مقایسه‌ای در بازه‌ی زمانی مختلف روز در گرم‌ترین روز سال انجام گردیده است. همچنین نتایج به صورت گرافیکی، اعدادی و درصدی بر حسب مساحت متر مربع گنبدها ارائه شده است.

منابع

- Afshar, I. (1975). *Yazd Monuments (Introduction of historical buildings and antiquities of Yazd city)*. Tehran: National Monuments Association.
- AlSanea, S. A., & Zedan, M. F. (2002). Optimum insulation thickness for building walls in a hot-dry climate. *International Journal of Ambient Energy*, 23(3), 115-126.
- Ana J. m., Gordano, A. T., & Aleksandra. A. C. (2018). *Architecture and Ceramic Materials, Development through Time: Adobe and Brick*. No 3. Vol. 16: 387-400.
- Asefi, M. F., Haghparast, F. & Gholizadeh. A. (2016). Comparative study of the difference in thermal behavior of dome prefabricated materials in hot and dry climate of Iran (case study: Yazd and Isfahan)" *Quarterly Journal of Islamic Research*, 12 (4).
- Bakos, G. C. (2000). Insulation protection studies for energy saving in residential and tertiary sector. *Energy and buildings*, 31(3), 251-259.
- Bowen, A. B. (1981). Cooling Achievement in the Gardens of Moghul India. C. Bowen, K. Labs (Eds.), In *Proceeding of the International Passive and Hybrid Cooling Conference*, 27-32. Miami Beach, FL, 6-16 November.
- Chang, P. C. Et al. (2008). Development and Preliminary Evaluation of Double Roof Prototypes Incorporating RBS (Radiant Barrier System). *Energy & Buildings* (40), 140-147.
- Cheikh, H. B., & Bouchair, A. (2008). Experimental studies of a passive cooling roof in hot arid areas. *Revue des Energies Renouvelables*, 11, 515-522.
- Donald, W., & Lisa, G. (2005). *Teimurid Architecture in Iran and Turan*, translated by Afshar, K., Yousef, M. K., edited by Defaei, S., (Tehran, Cultural Heritage Organization.
- Energy Information Administration. (EIA). (1995). *U.S. State Energy Data Report-95*.
- Fathy, H. (1973). *Architecture for the Poor*. University of Chicago Press, Chicago, London.
- Ghobadian, V. (2014). *Climate study of traditional Iranian buildings*. Tehran: University of Tehran.
- HajiGhasemi, K. (2015). *Ganjnameh Far hang Acre Islamic Iran*. Tehran:

- Shahid Beheshti University.
- Honarfar, L. (1969). *Treasure of Isfahan's historical monuments*, (ancient monuments, tablets and historical inscriptions in Isfahan province), Isfahan: Saghafi.
- Kasmaei, M., & Ahmadinejad, M. (2004). *Climate and Architecture*. Tehran: Khak.
- Khorasani, F. A. & Bahadorinejad, R. M. (2009). Sunlight on Dome-shaped Roofs, at the 18th Annual International Conference on Mechanical Engineering of Iran 2010. (ISME), Tehran, Sharif University of Technology, 21 to 23 May.
- Khosrow, N. (1982). Excerpt from Nasser Khosrow's Divan. Tehran: Qariani.
- Main stone, R. J. (1983). *Developments in Structural Form*. M.L.T. Cambridge Press.
- Memmaryan, G. H. (1988). *Architectural Structures in Iranian Islamic Architecture*, Tehran: Iran University of Science and Technology.
- Memmaryan, G. H. (2012). *Iranian Architecture of Nayaresh*. Volume II. Tehran: Naghma Nawandish.
- Memmaryan, G. H., & Pirnia, M. K. (1991). *Stylistics of Iranian Architecture*, Tehran: University of Science and Technology.
- Michelle, G. (2001). *Architecture of the Islamic World*, translated by Yaghoub Ajvandi, Tehran: Molavi.
- Moshfegh, M., & Ibrahim, M. (2008). Determining the Most Optimal Half Dome Angle to Ministry of Energy. 2014. 2012 Energy Balance Sheet. Tehran: Ministry of Energy, Power and Energy Affairs, Macro Planning Office of Electricity and Energy.
- Nasrollahi, F. (2009). *Climate and Energy Responsive Housing in Continental Climates the Suitability of Passive Houses for Iran's Dry and Cold Climate*, PhD thesis Berlin University of Technology.
- Olivieri, R., Cocchi Grifoni, D., Redondas, J. A., Sanchez, R., & Tascini, S. (2017). An experimental method to quantitatively analyses the effect of thermal insulation thickness on the summer performance of a vertical green wall. *Energy and building*. 112, 965-982.
- Omidvar, k., Ebrahimi, R., Mahdavinejad, & Elham, D. (2018). Modeling of the heating degree hours (HDH) at dawn in the dry desert regions of Iran. *Journal of Geographical Research on Desert Areas*. 6(1), 1-32.
- Rafiei, A. M. (1999). *National Works of Isfahan*, Tehran, National Works Association, 1977.
- Savory, E., & Toy, N. (1986). Hemispheres and Hemisphere-cylinders in turbulent boundary layers. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, Vol. 23, pp. 345-364.
- Serpooshan, S., & Yaghoubi, M. (2002). Calculation of solar energy on three-dimensional surfaces, *Iran Energy Magazine* 7 (13): 3-21.

- Shen, Xu., Huang, Z., Wang, J., & Mendes, T. J. (2019). Huang Evaluation of photovoltaic potential by urban block typology: A case study of Wuhan, China. *Renewable Energy Focus*, 29, 141-147.
- Shiri, T., Didehban, M., & Taban. M. (2019). Temporary Accommodation Design with a Thermal Optimization Approach Taken from the Potential of Water Reservoir Dome, Master Thesis in Architecture and Urban Planning. Jundishapur Dezful University of Technology.
- Shiri, T., Didehban, M., & Taban. M. (2019). The effect of form on the amount of shading and heat absorption in the dome of Yazd reservoirs. *Journal of Islamic Architectural Research*. 2019; 7 (4): 75-92.
- Tang, R. S., Meir I. A., & Etzion, Y. (2003). An Analysis of Absorbed Radiation by Domed and Vaulted Roofs as Compared with Flat Roofs. *Energy and Building* 35 (6): 539-548.
- TAVAKOL, M., & YAGHOUBI, M. (2009). Experimental studies of three-dimensional turbulent airflow around dome shapes. Master Thesis in Mechanical Engineering (Energy Conversion). Shiraz university.
- Vahdaneh, F., Mansoureh, T., & Majedi, H. (2016). Double dome from the perspective of thermal performance in Kashan desert climate. *Islamic Architectural Research*, 4 (11), 90-108.
- Watson, D., & Kent, L. (1993). *Climatic Design: Energy Efficient Building Principles and Practices*. Translated by Ghobadian, V., Mahdavi, M, F. Tehran: Tehran University Press.
- Yazhari, K., A. Nasrollahi, F., & Mahdavinejad. M. J. (2019). The Climate Zoning of Office Buildings with an Emphasis on Radiant Factors in Hot and Dry Regions: A Case Study of Kerman, *Journal of Geographical Research on Desert Areas*, 7(1), 87-112.

Investigation of the effects of sunlight on the surface of the domes of mosques in desert areas

Tohid Shiri, Master of Architecture, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

Kourosh Momeni¹, Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

Received: 04-06-2020

Accepted: 16-08-2020

Abstract

The construction of religious buildings in the past would occur by taking into account the comfort and convenience of the building, in the face of harsh climatic conditions of the region. Mosques, as one of the religious buildings of our country, have been built everywhere in various climatic conditions, especially in desert areas with dome roofs of different shapes and sizes. This study seeks to investigate the performance of domes in desert areas in terms of form and dimensions versus the amount of sunlight absorption. For this purpose, some weather file data were obtained from the meteorological stations of Isfahan and Yazd cities. Also, the maps of the domes of the mosques were received through library documents in the field of architecture. In this regard, five examples of domes in desert areas were selected, including the domes of Imam of Isfahan, Mir Chakhmaq, Sheikh Lotfollah, Saro Taghi and Ali Mosque. Then, the domes were modeled with accurate dimensions by the 2017 Revit software. This was done to calculate the absorption of sunlight on the surfaces of the domes on the hottest days of the year at three times including 2, 4, and 6 p.m. in desert areas by the use of the energy Plus Ladybug and Honeybee plugins RADIANCE. The results showed the amount of sunlight absorption on the surfaces of the domes depends on the shape and the dimensions of the domes. At 2 o'clock p.m., domes with a high rise and domes with a low rise were exposed to the sun for 58% and 75% respectively. At 4 o'clock p.m., domes with a low rise and those with a high rise were exposed to the sun by 68% and 51%. Also, at 6 o'clock p.m., the domes with a high rise and those with a low rise had the exposures of 49% 46%. The performance of high domes is, therefore, much more optimal than that of low domes at the hottest times of the day. This is because high domes provide more shade during these hours.

Keywords: Sunlight, Mosque dome, Revit software, RADIANCE, Desert areas.

¹ Corresponding Author Email: K_Momeni@jsu.ac.ir