

ارزیابی حرارتی پوشش سفید سیلیکونی بام در کاهش بار سرمایشی: موردپژوهی ساختمان های اداری در اقلیم گرم و مرطوب

پرویز مهبودی^{۱*}، محمد شاری^۲، منصور خلیفه زاده^۳

^۱*پژوهشگر دکتری معماری، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران Mehboodi.1983@gmail.com

نویسنده مسئول: پرویز مهبودی

^۲استادیار گروه شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران Moh.sharee@mail.ir

^۳مهندسی شیمی، پتروشیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران Mansour.kh@gmail.com

چکیده

در اقلیم گرم و مرطوب خوزستان، تابش شدید خورشید بر بام ساختمان ها یکی از عوامل اصلی افزایش دمای سطح بام، رشد بار سرمایشی و افزایش مصرف برق سامانه های تهویه مطبوع است. پژوهش حاضر با هدف بررسی فنی اثر اجرای پوشش سفید سیلیکونی با بازتابندگی خورشیدی بالا بر کاهش بار سرمایشی ساختمان انجام شد. روش پژوهش بر تحلیل انتقال حرارت از بام و مقایسه عملکرد بام دارای ایزوگام تیره با جذب خورشیدی تقریبی ۹۰ درصد و بام پوشش داده شده با پوشش سیلیکونی سفید با بازتابندگی تقریبی ۹۰ درصد استوار است. مطالعه برای یک ساختمان ویلایی با زیربنای ۱۶۰ مترمربع و مجهز به هشت دستگاه اسپلیت ۳۰,۰۰۰ BTU/h انجام شد. شدت تابش خورشیدی از داده های اقلیمی، ضریب بازتاب و جذب از استانداردهای تعیین بازتابندگی و روابط حرارتی بر مبنای روش دمای خورشیدی - هوایی، قانون فوریه و ضریب کلی انتقال حرارت استخراج شد. نتایج محاسبات نشان داد کاهش جذب تابش بر سطح بام می تواند دمای سطح خارجی بام را حدود ۱۵ تا ۲۰ درجه سلسیوس کاهش دهد و اختلاف دمای مؤثر انتقال حرارت را حدود ۵/۳۷ درصد کاهش دهد. همچنین، کاهش انرژی خورشیدی جذب شده در شرایط اوج تابش حدود ۱۲۸ کیلووات ساعت برآورد شد که می تواند به کاهش تقریبی ۸/۵ تا ۷ کیلووات در توان مصرفی لحظه ای سامانه های اسپلیت منجر شود. نتایج نشان می دهد پوشش سفید سیلیکونی، اگرچه جایگزین عایق حرارتی ضخیم نیست، راهکاری اجرایی و اقتصادی برای کاهش بار سرمایشی، بهبود آسایش حرارتی و کمک به مدیریت اوج مصرف برق در ساختمان های مناطق گرم و مرطوب است.

واژگان کلیدی: پوشش سفید سیلیکونی، بام سرد، بار سرمایشی، بازتابندگی خورشیدی، انتقال حرارت، خوزستان.

۱. مقدمه

در مناطق گرم و مرطوب، پوسته خارجی ساختمان، به ویژه بام، نقش تعیین کننده ای در دریافت تابش خورشیدی و انتقال حرارت به فضای داخلی دارد. در این اقلیم ها، تابش مستقیم و طولانی مدت خورشید سبب افزایش قابل توجه دمای سطح بام شده و از طریق انتقال حرارت هدایتی، بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان را افزایش می دهد. این مسئله در استان خوزستان، به دلیل دمای بالای هوا، شدت قابل توجه تابش خورشیدی و دوره طولانی نیاز به سرمایش، اهمیت مضاعف دارد. داده های اقلیمی و تابشی قابل دریافت از پایگاه NASA POWER نیز امکان استفاده از شدت تابش خورشیدی و متغیرهای هواشناسی محل برای تحلیل انرژی ساختمان را فراهم می کند (National Aeronautics and Space Administration [NASA], n.d). یکی از مؤثرترین راهکارهای غیرفعال برای کنترل دریافت حرارت خورشیدی بام، استفاده از پوشش های با بازتابندگی خورشیدی بالا، موسوم به بام سرد، است. این پوشش ها با بازتاب بخش بزرگی از تابش خورشید، ضریب جذب خورشیدی سطح را کاهش می دهند و از افزایش بیش از حد دمای خارجی بام جلوگیری می کنند. بازتابندگی خورشیدی یک مشخصه فیزیکی قابل اندازه گیری است و استاندارد ASTM C1549 روش تعیین آن را با استفاده از بازتاب سنج خورشیدی قابل حمل در دمای نزدیک به شرایط محیط ارائه می دهد (ASTM International, 2016). از منظر حرارتی، در یک سطح کدر، کاهش بازتابندگی با افزایش ضریب جذب همراه است و رابطه میان این دو کمیت، در حالت ساده شده، به صورت $\rho = 1 - \alpha$ بیان می شود؛ به طوری که α ضریب جذب و ρ ضریب بازتاب خورشیدی است. افزایش انرژی جذب شده در بام، دمای سطح خارجی آن را بالا برده و اختلاف دمای مؤثر میان سطح بام و محیط داخلی را افزایش می دهد. در نتیجه، شار حرارتی عبوری از سقف نیز افزایش می یابد. این فرایند بر پایه اصول انتقال حرارت، از جمله قانون فوریه و مفهوم مقاومت حرارتی کل، قابل تحلیل است. نرخ انتقال حرارت از یک جزء ساختمانی معمولاً با رابطه $UA\Delta T = UA\Delta TQ = UA\Delta TQ = Q$ برآورد می شود که در آن UUU ضریب کلی انتقال حرارت، AAA مساحت سطح و ΔT اختلاف دمای مؤثر است (Bergman et al., 2011). همچنین، روش دمای خورشیدی - هوایی، اثر هم زمان دمای هوای بیرون، جذب تابش خورشیدی و تبادل حرارتی سطح خارجی را در ارزیابی بار حرارتی پوسته ساختمان لحاظ می کند (ASHRAE, 2021). کاهش بار حرارتی بام، مستقیماً بر عملکرد سامانه های سرمایشی، از جمله کولرهای اسپلیت، اثر می گذارد. ضریب عملکرد سرمایشی یا COP، نسبت ظرفیت سرمایشی تولید شده به توان الکتریکی ورودی دستگاه است. بنابراین، در صورت کاهش بار سرمایشی ساختمان و ثابت فرض شدن شرایط عملکرد دستگاه، توان مورد نیاز برای تأمین سرمایش نیز کاهش می یابد (ASHRAE, 2021; International Organization for Standardization [ISO], 2013). استاندارد AHRI 210/240 نیز چارچوب ارزیابی ظرفیت و توان ورودی تجهیزات تهویه مطبوع یکپارچه و پمپ های حرارتی را ارائه می دهد (Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute [AHRI], 2023). بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر پوشش سفید سیلیکونی با بازتابندگی بالا بر کاهش جذب تابش خورشیدی، کاهش دمای سطح بام، کاهش شار حرارتی عبوری از سقف و در نهایت کاهش بار سرمایشی و توان مصرفی کولرهای اسپلیت در یک ساختمان نمونه در اقلیم خوزستان انجام شده است. این بررسی می کوشد جایگاه پوشش سفید سیلیکونی را به عنوان یک راهکار اجرایی برای بهبود عملکرد حرارتی بام و مدیریت مصرف برق در ساعات اوج بار روشن سازد. از این رو در چنین شرایطی، بام ساختمان یکی از مهم ترین سطوح دریافت کننده انرژی خورشیدی است. در ساعات اوج تابش، به ویژه حدود ساعت ۱۲ ظهر در مردادماه، شدت تابش خورشیدی می تواند در حدود:

$$G = 950 \text{ تا } 1050 \text{ W/m}^2$$

باشد. در این گزارش، برای انجام محاسبات، مقدار میانگین زیر در نظر گرفته شده است:

$$G = 1000 \text{ W/m}^2$$

از طرف دیگر، دمای هوای محیط در روزهای گرم تابستان خوزستان می تواند به حدود:

تعریف G

نماد G معمولاً بیانگر تابش خورشیدی فرودی روی سطح است و در منابع مهندسی با عناوین زیر نیز دیده می شود:

1. Solar irradiance

2. Incident solar radiation

3. Total solar radiation incident on a surface

واحد آن: W/m^2 یعنی $G = 1000 W/m^2$ به این معناست که در هر لحظه، حدود 1000 وات انرژی تابشی خورشید به هر مترمربع سطح افقی یا سطح مورد بررسی می رسد. نکته مهم درباره مقدار $G = 1000 W/m^2$ یک عدد ثابت جهانی برای همه ساعات و همه مکان ها نیست. این مقدار معمولاً به عنوان مقدار تقریبی تابش لحظه ای در شرایط آسمان صاف و نزدیک ظهر خورشیدی استفاده می شود.

$$T_{out} = 50^{\circ}C$$

تعریف T_{out}

نماد T_{out} به معنی دمای هوای بیرون ساختمان یا:

1. Outdoor air temperature

2. Exterior air temperature

برسد. در این وضعیت، بام های دارای پوشش تیره مانند ایزوگام، به دلیل جذب بالای تابش خورشید، به دمایی بسیار بالاتر از دمای هوا می رسند. بر این اساس، دمای سطح بام در تابستان می تواند به بیش از: $70^{\circ}C$ برسد.

بنابراین، استفاده از پوشش های سفید بازتابنده، به ویژه پوشش سفید سیلیکونی، می تواند به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش دمای سطح بام، کاهش انتقال حرارت به داخل ساختمان، کاهش مصرف انرژی سرمایشی و کاهش فشار بر تجهیزات تهویه مطبوع بررسی شود.

۲. مشخصات ساختمان مورد بررسی:

در این بررسی، ساختمان مورد مطالعه به صورت یک ساختمان ویلایی با زیربنای تقریبی ۱۶۰ مترمربع در نظر گرفته شده است. ساختمان دارای دو واحد است و هر واحد شامل چهار اتاق ۱۲ مترمربعی است. بنابراین، در مجموع ساختمان دارای هشت اتاق اصلی است.

مشخصات کلی ساختمان به شرح زیر است:

ردیف	مشخصه	مقدار فرض شده
۱	زیربنای کل ساختمان	۱۶۰ مترمربع
۲	تعداد واحدها	۲ واحد
۳	تعداد اتاق ها	۸ اتاق
۴	مساحت هر اتاق	۱۲ مترمربع
۵	تعداد پنجره ها	هر اتاق یک پنجره
۶	مساحت هر پنجره	۲ مترمربع
۷	وضعیت معمول پنجره ها	بسته
۸	سیستم سرمایشی	اسپلیت ۳۰ هزار برای هر اتاق

۹	تعداد اسپلیت ها	۸ دستگاه
۱۰	اقلیم	گرم و مرطوب، خوزستان
۱۱	دمای هوای طراحی تابستان	حدود ۵۰ درجه سانتی گراد
۱۲	ساعت بحرانی بررسی	حدود ساعت ۱۲ ظهر

ظرفیت اسمی هر اسپلیت برابر است با:

$$30000 \text{ BTU/hr}$$

بنابراین ظرفیت سرمایشی کل نصب شده برای هشت اتاق برابر است با:

$$8 \times 30000 = 240000 \text{ BTU/hr}$$

برای تبدیل به کیلووات:

$$1 \text{ BTU/hr} = 0.000293 \text{ kW}$$

پس:

$$240000 \times 0.000293 = 70.32 \text{ kW}$$

بنابراین ظرفیت سرمایشی کل ساختمان برابر است با:

$$70.3 \text{ kW}$$

این عدد نشان می دهد که ساختمان در شرایط موجود، به دلیل اقلیم بسیار گرم و بار حرارتی بالا، نیازمند ظرفیت سرمایشی قابل توجهی است.

۳. مشخصات عایق حرارتی سیلیکونی بر اساس کاتالوگ کارخانه

بر اساس مندرجات کاتالوگ و جدول ۱ پوشش سفید سیلیکونی دارای ویژگی های اصلی زیر است:

شاخص فنی	مقدار ذکر شده در کاتالوگ
بازتاب خورشیدی	حدود ۸۰ درصد
بازتاب پذیری	۸۵ تا ۹۵ درصد
گسیلندگی حرارتی	۰,۹۵ تا ۰,۹۰
کاهش دمای سطح بام	۱۵ تا ۲۰ درجه سانتی گراد
کاهش مصرف انرژی سرمایشی	۲۰ تا ۳۰ درصد
مقاومت حرارتی	تا بیش از ۱۵۰ درجه سانتی گراد
عمر مفید	بیش از ۲۰ سال
مصرف تقریبی پوشش	۷۰۰ تا ۱۰۰۰ گرم بر مترمربع
دوره بازگشت سرمایه	۲ تا ۳ سال

با توجه به مساحت بام ۱۶۰ مترمربع و میزان مصرف پیشنهادی پوشش در این پروژه (به گفته سازنده مواد و بخش عملیاتی این نوع پوشش: به ازای هر ۱ مترمربع حدوداً ۱ کیلوگرم پوشش سفید سیلیکونی در ۳ لایه انجام می شود)، که مقدار مورد نیاز پوشش به صورت زیر محاسبه می شود:

مصرف واحد سطح $\times$ مساحت بام = مقدار پوشش

$$160 \times 0.7 = 112 \text{ kg}$$

$$160 \times 1.0 = 160 \text{ kg}$$

بنابراین برای بام ۱۶۰ مترمربعی، مقدار تقریبی پوشش مورد نیاز برابر است با:

کیلوگرم ۱۶۰ تا ۱۱۲

۴. مقایسه رفتار حرارتی ایزوگام و پوشش سفید سیلیکونی

در این بخش، رفتار حرارتی دو پوشش ایزوگام (سطح تیره) و سیلیکون سفید (سطح روشن) بر اساس موازنه انرژی سطحی مقایسه می شود. بر اساس استانداردهای مهندسی ساختمان، میزان جذب تابش توسط سطح تابع ضریب جذب خورشیدی (α) است که طبق رابطه ($\alpha = 1 - \rho$) با بازتابندگی خورشیدی (ρ) نسبت عکس دارد (Incropera et al., 2011). برای محاسبه دمای سطح و شار حرارتی عبوری از بام، از روش دمای خورشیدی، هوایی (Sol-Air Temperature) استفاده شده است که در استانداردهای طراحی بار سرمایشی مرجع اصلی محسوب می شود (ASHRAE, 2021). طبق این روش، کاهش دمای سطح در اثر استفاده از پوشش های با بازتابندگی بالا، مستقیماً منجر به کاهش اختلاف دمای (ΔT) محرک انتقال حرارت می شود. نرخ انتقال حرارت نهایی (Q) رابطه $Q = U A \Delta T$ محاسبه می گردد که در آن U نشان دهنده ضریب انتقال حرارت کلی سقف است (Incropera et al., 2011). این محاسبات نشان می دهد که جایگزینی ایزوگام با پوشش سیلیکونی که دارای بازتابندگی خورشیدی بالای ۸۰٪ بر اساس استاندارد ASTM C1549 است، بار سرمایشی را به طور چشمگیری کاهش می دهد (ASTM, 2016).

۴.۱. ایزوگام و جذب بالای انرژی خورشیدی

ایزوگام به دلیل ماهیت قیری و رنگ تیره، صرف نظر از عایق بازتابنده که بعد از مدت زمانی عایق رویی خود را از دست می دهد، بخش زیادی از تابش خورشید را جذب می کند. در بسیاری از بام های دارای ایزوگام، ضریب جذب خورشیدی می تواند در حدود ۸۵ تا ۹۵ درصد باشد. یعنی از هر ۱۰۰۰ وات تابش خورشیدی که به هر مترمربع بام می رسد، حدود ۸۵۰ تا ۹۵۰ وات آن جذب سطح می شود.

اگر مقدار جذب ایزوگام را به طور محافظه کارانه برابر ۹۰ درصد در نظر بگیریم:

$$\alpha_{\text{isogam}} = 0.90$$

مقدار انرژی جذب شده در هر مترمربع برابر است با:

$$q_{\text{absorbed, isogam}} = G \times \alpha$$

$$q_{\text{absorbed, isogam}} = 1000 \times 0.90 = 900 \text{ W/m}^2$$

برای کل بام ۱۶۰ مترمربعی:

$$Q_{\text{absorbed, isogam}} = 900 \times 160 = 144000 \text{ W}$$

$$Q_{\text{absorbed, isogam}} = 144 \text{ kW}$$

یعنی در ساعت اوج تابش، سطح ایزوگامی بام می تواند حدود ۱۴۴ کیلووات انرژی خورشیدی را جذب کند. البته تمام این انرژی مستقیماً وارد فضای داخل نمی شود، اما بخش قابل توجهی از آن باعث افزایش دمای سطح، گرم شدن جرم سقف، انتقال حرارت به فضای زیرین و افزایش بار سرمایشی می شود.

۴.۲. پوشش سفید سیلیکونی و بازتاب بالای تابش خورشید

بازتاب پذیری پوشش سیلیکونی حدود ۸۵ تا ۹۵ طبق جدول ۱، برای محاسبات، مقدار میانی زیر در نظر گرفته می شود:

$$\rho_{\text{silicone}} = 0.90$$

بنابراین ضریب جذب آن برابر است با:

$$\alpha_{\text{silicone}} = 1 - \rho$$

$$\alpha_{\text{silicone}} = 1 - 0.90 = 0.10$$

پس مقدار انرژی جذب شده در هر مترمربع:

$$Q_{\text{absorbed, silicone}} = 1000 \times 0.10 = 100 \text{ W/m}^2$$

برای کل بام ۱۶۰ مترمربعی:

$$Q_{\text{absorbed, silicone}} = 100 \times 160 = 16000 \text{ W}$$

$$Q_{\text{absorbed, silicone}} = 16 \text{ kW}$$

بنابراین مقایسه جذب انرژی خورشیدی بین دو حالت چنین است:

نوع سطح بام	جذب تقریبی تابش خورشید در هر مترمربع	جذب کل برای بام ۱۶۰ مترمربعی
ایزوگام تیره	۹۰۰ وات بر مترمربع	۱۴۴ کیلووات
پوشش سفید سیلیکونی	۱۰۰ وات بر مترمربع	۱۶ کیلووات

اختلاف جذب انرژی خورشیدی:

$$144 - 16 = 128 \text{ kW}$$

$$128 \text{ kW}$$

این عدد به این معناست که در ساعت اوج تابش، پوشش سفید سیلیکونی می تواند از جذب حدود ۱۲۸ کیلووات انرژی خورشیدی توسط بام جلوگیری کند. این انرژی، در حالت ایزوگام، عمدتاً باعث گرم شدن سطح بام و افزایش بار حرارتی ساختمان می شود.

۵. محاسبه اختلاف دما یا ΔT

برای بررسی انتقال حرارت از سقف به داخل ساختمان، اختلاف دمای بین سطح خارجی سقف و دمای داخل اهمیت زیادی دارد. فرمول کلی اختلاف دما:

$$\Delta T = T_{\text{surface}} - T_{\text{in}}$$

در این گزارش، دمای آسایش داخل ساختمان برابر در نظر گرفته شده است با:

$$T_{\text{in}} = 24^\circ\text{C}$$

۵.۱. حالت اول: بام دارای ایزوگام

بر اساس داده ها، دمای سطح بام در تابستان می تواند به بیش از ۷۰ درجه سانتی گراد برسد. برای محاسبه، دمای سطح ایزوگام برابر ۷۲ درجه سانتی گراد در نظر گرفته می شود:

$$T_{\text{surface, isoga}} = 72^\circ\text{C}$$

پس:

$$\Delta T_{\text{isoga}} = 72 - 24 = 48^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{isoga}} = 48^\circ\text{C}$$

۵.۳. میزان کاهش اختلاف دما

$$\Delta T = 48 - 30 = 18^\circ\text{C}$$

درصد کاهش اختلاف دما:

$$\frac{18}{48} \times 100 = 37.5\%$$

بنابراین، پوشش سفید سیلیکونی می تواند اختلاف دمای مؤثر بین سطح بام و فضای داخلی را حدود:

$$37.5\%$$

کاهش دهد.

این کاهش ΔT ، از نظر انتقال حرارت بسیار مهم است، زیرا در قانون انتقال حرارت هدایتی، شار حرارتی تقریباً متناسب با اختلاف دما است:

$$Q = U \times A \times \Delta T$$

در این رابطه:

نماد	مفهوم
Q	نرخ انتقال حرارت، وات
U	ضریب کلی انتقال حرارت سقف، وات بر مترمربع کلونین
A	مساحت سقف، مترمربع
ΔT	اختلاف دمای دو طرف سقف، درجه سانتیگراد یا کلونین

بنابراین وقتی ΔT کاهش می یابد، انتقال حرارت از سقف به داخل نیز کاهش پیدا می کند.

۶. محاسبه تقریبی کاهش شار حرارتی عبوری از سقف

جهت ارزیابی میزان اثربخشی پوشش سفید سیلیکونی در کاهش نفوذ حرارت از سقف ساختمان اداری، رفتار حرارتی پوسته در حالت پایدار مورد تحلیل قرار می گیرد. نرخ انتقال حرارت هدایتی و جابه جایی عبوری از سقف ساختمان تابع قانون فوریه و مقاومت های حرارتی متوالی است که به صورت ضریب انتقال حرارت کلی (U) تعریف می شود.. (Incropera et al, 2011) بر این اساس، شار حرارتی عبوری از سقف (q'') بر حسب وات بر مترمربع از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$q'' = U \cdot \Delta T = U \cdot (T_{\text{surface}} - T_{\text{in}})$$

که در آن T_{surface} دمای سطح خارجی سقف (تحت تأثیر تابش خورشید)، T_{in} دمای طرح داخل ساختمان (معمولاً ۲۴ درجه سانتیگراد بر اساس شرایط آسایش حرارتی) و U ضریب انتقال حرارت کلی سقف است (ASHRAE, 2021).

با جایگزینی پوشش ایزوگام گام اول (با بازتابندگی خورشیدی پایین و جذب بالا) با پوشش سفید سیلیکونی (با بازتابندگی خورشیدی بالا طبق استاندارد ASTM C1549)، دمای سطح خارجی بام از $T_{\text{surface,black}}$ به $T_{\text{surface,white}}$ کاهش می یابد (ASTM, 2016). میزان کاهش شار حرارتی عبوری از سقف ($\Delta q''$) از رابطه تفاضلی زیر به دست می آید:

$$\Delta q'' = U \cdot (T_{\text{surface,black}} - T_{\text{surface,white}})$$

در نهایت، نرخ کل کاهش انتقال حرارت (Q) برای کل مساحت سقف (A) به منظور تخمین کاهش بار سرمایشی از رابطه زیر محاسبه می شود: (Incropera et al., 2011)

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

این کاهش بار حرارتی مستقیماً باعث کاهش زمان کارکرد کمپرسورها، مصرف برق سیستم های سرمایشی و بهبود آسایش حرارتی ساکنان ساختمان در ساعات اوج تابش می گردد.

برای محاسبه تقریبی، اگر ضریب کلی انتقال حرارت سقف را برابر مقدار محافظه کارانه زیر در نظر بگیریم:

$$U = 1.5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

و مساحت سقف:

$$A = 160 \text{ m}^2$$

۶.۱. انتقال حرارت از سقف در حالت ایزوگام

$$Q_{\text{isogam}} = U \times A \times \Delta T$$

$$Q_{\text{isogam}} = 1.5 \times 160 \times 48$$

$$Q_{\text{isogam}} = 11520 \text{ W}$$

$$Q_{\text{isogam}} = 11.52 \text{ kW}$$

۶.۲. انتقال حرارت از سقف در حالت پوشش سیلیکونی

$$Q_{\text{silicone}} = 1.5 \times 160 \times 30$$

$$Q_{\text{silicone}} = 7200 \text{ W}$$

$$Q_{\text{silicone}} = 7.20 \text{ kW}$$

۰.۳ کاهش بار حرارتی عبوری از سقف

$$\Delta Q = 11.52 - 7.20 = 4.32 \text{ kW}$$

$$\Delta Q = 4.32 \text{ kW}$$

بنابراین، فقط از مسیر انتقال حرارت سقف، پوشش سفید سیلیکونی می تواند حدود ۰.۳ کیلووات از بار حرارتی ورودی به ساختمان را در شرایط اوج تابش کاهش دهد.

برای تبدیل به BTU/hr :

$$1 \text{ kW} = 3412 \text{ BTU/hr}$$

$$4.32 \times 3412 = 14739 \text{ BTU/hr}$$

حدود 14700 BTU/hr

یعنی این پوشش می تواند فقط از مسیر سقف، معادل حدود نصف ظرفیت یک اسپلیت ۳۰ هزار، بار حرارتی لحظه ای ساختمان را کاهش دهد. البته اثر واقعی آن، به دلیل کاهش ذخیره حرارتی سقف و کاهش دمای تابشی داخل، از این عدد نیز فراتر احساس می شود.

۷. تأثیر پوشش بر عملکرد کولرهای اسپلیت

ضریب عملکرد (COP) مهم ترین شاخص ارزیابی راندمان انرژی سیستم های تهویه مطبوع است. طبق تعریف استاندارد ASHRAE، ضریب عملکرد عبارت است از نسبت نرخ خالص خروجی سرمایشی به توان الکتریکی کل ورودی در شرایط رتبه بندی مشخص (ASHRAE, 2021) به عبارت دیگر، ضریب عملکرد سیستم سرمایشی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$COP = \frac{Q_{\text{cooling}}}{W_{\text{input}}}$$

که در آن Q_{cooling} ظرفیت سرمایشی دستگاه (برحسب وات یا کیلووات) و W_{input} توان الکتریکی ورودی به کمپرسور است. تعریف مشابهی در استاندارد بین المللی ISO 16358-1 نیز ارائه شده است که در آن COP به عنوان نسبت ظرفیت سرمایشی کل به توان مؤثر ورودی در شرایط رتبه بندی مشخص تعریف می شود (ISO, 2013). کاهش بار سرمایشی ناشی از اجرای پوشش سفید سیلیکونی بر روی سقف، به طور مستقیم بر عملکرد کولرهای اسپلیت ساختمان تأثیر می گذارد. با فرض ثابت ماندن ضریب عملکرد دستگاه در شرایط رتبه بندی، رابطه بین کاهش بار سرمایشی و توان مصرفی به صورت زیر است (AHRI, 2023):

$$W_{\text{input}} = \frac{Q_{\text{cooling}}}{COP}$$

بر این اساس، با کاهش بار سرمایشی سقف، توان الکتریکی مصرفی کمپرسورهای اسپلیت به طور متناسب کاهش می یابد. به عبارت دیگر، هرچه بار حرارتی وارده به فضای داخلی کمتر باشد، کمپرسور در مدت زمان کوتاه تری به دمای تنظیم شده دست می یابد، چرخه های کاری (Duty Cycle) آن کوتاه تر شده و در نتیجه مصرف انرژی کل ساختمان کاهش می یابد. که در ساختمان مورد بررسی قرار گرفت، که هشت دستگاه اسپلیت ۳۰ هزار در حال کار هستند.

ظرفیت کل سرمایشی:

$$8 \times 30000 = 240000 \text{ BTU/hr}$$

$$240000 \text{ BTU/hr} = 70.3 \text{ kW}$$

طبق جدول کاهش مصرف انرژی سرمایشی در اثر استفاده از پوشش سفید سیلیکونی می تواند در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد. اگر مقدار میانی ۲۵ درصد در نظر گرفته شود:

$$70.3 \times 0.25 = \text{صرفه جویی سرمایشی}$$

$$17.57 \text{ kW} = \text{صرفه جویی سرمایشی}$$

اما باید توجه داشت که این عدد بیانگر کاهش بار سرمایشی معادل است، نه الزاماً کاهش مستقیم برق مصرفی. برای تبدیل به توان برق مصرفی، باید ضریب عملکرد سیستم سرمایشی یا COP در نظر گرفته شود.

اگر COP اسپلیت ها در شرایط بسیار گرم خوزستان حدود ۲,۵ تا ۳ در نظر گرفته شود، کاهش مصرف برق لحظه ای به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{کاهش برق} = \frac{17.57}{COP}$$

برای COP برابر ۳:

$$\frac{17.57}{3} = 5.86 \text{ Kw}$$

برای COP برابر ۲,۵:

$$\frac{17.57}{2.5} = 7.03 \text{ kW}$$

بنابراین، کاهش توان برق مصرفی در ساعت اوج می تواند حدود:

$$5.8 \text{ تا } 7 \text{ kW}$$

باشد.

این عدد از نظر مدیریت انرژی بسیار مهم است، زیرا کاهش مصرف در ساعات اوج بار، به ویژه در صنایع بزرگ مانند پتروشیمی، به کاهش فشار بر شبکه برق داخلی، کاهش ناترازی انرژی و کاهش استهلاك تجهیزات سرمایشی کمک می کند.

۸. تحلیل اثر ایزوگام بر ناترازی انرژی

ایزوگام به دلیل دارا بودن لایه قیری، در برابر تابش شدید خورشید رفتار نامطلوبی دارد. قیر، ماده ای تیره رنگ و جاذب حرارت است. در دمای هوای حدود ۵۰ درجه سانتی گراد و تابش مستقیم حدود ۱۰۰۰ وات بر مترمربع، سطح ایزوگام به راحتی به دمای بالای ۷۰ درجه سانتی گراد می رسد.

این موضوع چند پیامد مهم دارد:

۱. افزایش شدید دمای سطح بام

بام از یک پوسته محافظ به یک منبع حرارتی فعال تبدیل می شود.

۲. ذخیره حرارت در جرم سقف

سقف بتنی یا مصالح زیر ایزوگام، در طول ساعات تابش، مقدار زیادی گرما ذخیره می کنند.

۳. انتقال حرارت به داخل ساختمان

گرمای ذخیره شده به تدریج به فضای داخلی منتقل می شود و باعث افزایش دمای اتاق ها می شود.

۴. افزایش زمان کارکرد کمپرسورها

کولرهای اسپلیت مجبور می شوند مدت بیشتری کار کنند تا دمای داخلی حفظ شود.

۵. افزایش مصرف برق در ساعات پیک

این مسئله در مقیاس چند ساختمان اداری و صنعتی، به ویژه در پتروشیمی، به ناترازی انرژی کمک می کند.

۶. کاهش عمر تجهیزات سرمایشی

کارکرد طولانی کمپرسورها در دمای بیرونی بالا، باعث استهلاک بیشتر، افزایش خرابی و افزایش هزینه تعمیرات می شود. در نتیجه، ایزوگام معمولی در اقلیم بسیار گرم خوزستان، از نظر آب بندی ممکن است عملکرد قابل قبول داشته باشد، اما از نظر انرژی و آسایش حرارتی، رفتار مناسبی ندارد.

۹. رفتار ساختمان پس از خاموش شدن کولرها در ساعت ۱۴

یکی از پرسش های مهم در این پژوهش این است که پس از پایان زمان کاری و خاموش شدن کولرها در ساعت ۱۴، آیا پوشش سفید سیلیکونی می تواند باعث حفظ سرمای داخل اتاق ها شود یا خیر.

پاسخ دقیق این است:

پوشش سفید سیلیکونی، عایق حرارتی ضخیم به معنای کلاسیک نیست، یعنی مانند پشم سنگ یا پلی یورتان، مقاومت حرارتی بالایی ایجاد نمی کند. اما با کاهش شدید جذب تابش خورشید و کاهش دمای سطح بام، باعث می شود سقف در طول روز گرمای بسیار کمتری ذخیره کند. به همین دلیل، پس از خاموش شدن کولرها، روند افزایش دمای داخل ساختمان کندتر می شود.

حالت اول: بام ایزوگامی

در حالت ایزوگام، سقف در ساعت ۱۴ هنوز بسیار گرم است. حتی اگر کولرها خاموش شوند، سقف مانند یک جرم داغ، گرمای ذخیره شده را به فضای داخلی منتقل می کند. در نتیجه:

- دمای داخل اتاق ها سریع تر افزایش می یابد.
- آسایش حرارتی سریع تر از بین می رود.
- اگر افراد بعد از ساعت کاری در ساختمان حضور داشته باشند، احساس گرما شدیدتر خواهد بود.
- روشن کردن مجدد کولرها نیازمند انرژی بیشتری خواهد بود.

حالت دوم: بام دارای پوشش سفید سیلیکونی

در حالت پوشش سفید سیلیکونی، سطح بام حدود ۱۵ تا ۲۰ درجه خنک تر است. بنابراین جرم سقف نیز گرمای کمتری در خود ذخیره می کند. در نتیجه:

- سرمای داخل اتاق ها دیرتر از دست می رود.
- دمای داخلی با شیب کمتری افزایش می یابد.
- آسایش حرارتی برای مدت طولانی تری حفظ می شود.
- نیاز به روشن شدن مجدد کولرها کاهش می یابد.
- پیک مصرف برق در ساعات بعدازظهر کمتر می شود.

بنابراین، پوشش سفید سیلیکونی به صورت غیرمستقیم اما مؤثر، به حفظ سرمای داخل ساختمان پس از خاموش شدن کولرها کمک می کند.

۱۰. برآورد کیفی تغییر دمای داخل اتاق ها

اثر پوشش سفید سیلیکونی بر دمای داخل اتاق ها به عوامل مختلفی بستگی دارد، از جمله:

۱. جنس و ضخامت سقف
۲. وجود یا نبود عایق حرارتی در سقف
۳. میزان نفوذ هوا
۴. جهت گیری ساختمان
۵. تعداد پنجره ها

۶. کیفیت شیشه ها

۷. دمای تنظیمی اسپلیت ها

۸. ساعات کارکرد کولرها

۹. رطوبت هوا

۱۰. سرعت باد

۱۱. سایه اندازی اطراف ساختمان

با این حال، بر اساس کاهش ۱۵ تا ۲۰ درجه ای دمای سطح بام و کاهش ۲۰ تا ۳۰ درصدی مصرف انرژی سرمایشی که در این پژوهش ذکر شده، می توان انتظار داشت در اتاق های زیر بام، دمای محسوس داخل یا دمای تابشی میانگین کاهش قابل توجهی داشته باشد.

در حالت عملی، این کاهش می تواند به یکی از شکل های زیر ظاهر شود:

وضعیت	اثر قابل انتظار
کولرها روشن باشند	رسیدن سریع تر به دمای تنظیمی
کولرها روشن باشند	کاهش زمان کار کمپرسور
کولرها خاموش شوند	افزایش کندتر دمای داخل
اتاق زیر بام باشد	کاهش محسوس گرمای تابشی از سقف
ساعت اوج تابش باشد	کاهش فشار حرارتی روی سقف
ساختمان اداری باشد	کاهش نارضایتی حرارتی کاربران

۱۱. نتیجه گیری نهایی

جدول جمع بندی محاسبات اصلی

شاخص	ایزوگام معمولی	پوشش سفید سیلیکونی	نتیجه
شدت تابش خورشید	1000 W/m ²	1000 W/m ²	شرایط یکسان
National Aeronautics and Space Administration. (n.d.). NASA POWER project: Prediction of worldwide energy resources. https://power.larc.nasa.gov/			
ضریب بازتاب	حدود ۱۰٪	۸۵ تا ۹۵٪	برتری سیلیکونی
ASTM International. (2016). ASTM C1549-16: Standard test method for determination of solar reflectance near ambient temperature using a portable solar reflectometer. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C1549-16			
ضریب جذب	حدود ۹۰٪	حدود ۱۰٪	کاهش جذب حرارت
ASTM International. (2016). ASTM C1549-16: Standard test method for determination of solar reflectance near ambient temperature using a portable solar reflectometer. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C1549-16			
انرژی جذب شده در هر مترمربع	900 W/m ²	100 W/m ²	کاهش ۸۰۰ وات بر مترمربع

ASTM International. (2016). ASTM C1549-16: Standard test method for determination of solar reflectance near ambient temperature using a portable solar reflectometer. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C1549-16			
انرژی جذب شده کل بام	۱۴۴ کیلووات	۱۶ کیلووات	کاهش حدود ۱۲۸ کیلووات جذب تابشی
Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer (7th ed.). John Wiley & Sons.			
دمای سطح بام	حدود ۷۲ درجه	حدود ۵۴ درجه	کاهش حدود ۱۸ درجه
American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2021). 2021 ASHRAE handbook: Fundamentals. ASHRAE.			
اختلاف دما با داخل	۴۸ درجه	۳۰ درجه	کاهش ۳۷,۵ درصد
Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer (7th ed.). John Wiley & Sons.			
شار حرارتی عبوری از سقف	۱۱,۵۲ کیلووات	۷,۲۰ کیلووات	کاهش ۴,۳۲ کیلووات
Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer (12th ed.).			
کاهش مصرف سرمایشی	مبنا	۲۰ تا ۳۰ درصد	مطابق پژوهش
کاهش برق لحظه ای تخمینی	مبنا	۵,۸ تا ۷ کیلووات	در ساعت اوج
اثر بر آسایش داخل	نامطلوب	مطلوب تر	کاهش گرمای تابشی سقف
اثر پس از خاموشی کولر	افزایش سریع دما	افزایش کندتر دما	حفظ بهتر سرمای داخل

با توجه به محاسبات انجام شده، و داده های فنی موجود در این فایل و شرایط اقلیمی خوزستان، می توان نتیجه گرفت که پوشش سفید بام سیلیکونی اثر قابل توجهی بر کاهش دمای سطح بام، کاهش انتقال حرارت به فضای داخلی، کاهش بار سرمایشی و بهبود آسایش حرارتی اتاق ها دارد.

در ساختمان مورد بررسی با زیربنای تقریبی ۱۶۰ مترمربع، و سطح بام ایزوگامی در ساعت اوج تابش می تواند حدود ۱۴۴ کیلووات انرژی خورشیدی جذب کند. در مقابل، در صورت استفاده از پوشش سفید سیلیکونی، جذب انرژی تابشی به حدود ۱۶ کیلووات کاهش می یابد. این یعنی پوشش سیلیکونی می تواند از جذب حدود ۱۲۸ کیلووات انرژی خورشیدی توسط بام جلوگیری کند. همچنین با کاهش دمای سطح بام از حدود ۷۲ درجه سانتی گراد به حدود ۵۴ درجه سانتی گراد، اختلاف دمای مؤثر بین سطح بام و فضای داخل از ۴۸ درجه به ۳۰ درجه کاهش می یابد. این کاهش حدود ۳۷,۵ درصدی در اختلاف دما، موجب کاهش محسوس انتقال حرارت از سقف به داخل ساختمان می شود.

از نظر بار سرمایشی، محاسبات نشان می دهد که فقط از مسیر سقف، حدود ۴,۳ کیلووات از بار حرارتی ورودی به ساختمان کاهش می یابد. از سوی دیگر، با توجه به ادعای پژوهش مبنی بر کاهش ۲۰ تا ۳۰ درصدی مصرف انرژی سرمایشی، کاهش توان برق مصرفی در ساعت اوج می تواند حدود ۵,۸ تا ۷ کیلووات برآورد شود.

همچنین به صورت تقریبی، در اتاق های زیر سقف، پوشش سفید سیلیکونی می تواند دمای محسوس داخلی را حدود: ۱,۵ تا ۳,۵ درجه سانتیگراد، بهبود دهد. این مقدار ممکن است در ساختمان هایی که سقف عایق حرارتی مناسبی ندارند، بیشتر نیز احساس

شود. نکته مهم این است که حتی اگر دماسنج داخل اتاق فقط ۲ درجه کاهش نشان دهد، احساس آسایش افراد می تواند بسیار بیشتر بهبود یابد؛ زیرا دمای تابشی سقف کاهش پیدا می کند و بدن انسان گرمای کمتری از سقف دریافت می کند.

در پاسخ مستقیم به سؤال اصلی پژوهش باید گفت:

پوشش سفید بام سیلیکونی بر دمای داخل اتاق ها اثر مثبت، قابل اندازه گیری و قابل دفاع دارد. این پوشش به دلیل بازتاب بسیار بالای تابش خورشیدی و گسیلندگی حرارتی مناسب، مانع از داغ شدن بیش از حد بام می شود. در نتیجه، سقف حرارت کمتری ذخیره می کند، گرمای کمتری به داخل منتقل می شود، کولرهای اسپلیت با فشار کمتری کار می کنند و پس از خاموش شدن سیستم سرمایشی در ساعت ۱۴، دمای داخل اتاق ها با سرعت کمتری افزایش می یابد. بنابراین، اجرای پوشش سفید سیلیکونی برای بام ساختمان های اداری، ویلایی و خدماتی صنایع پتروشیمی در اقلیم گرم و مرطوب خوزستان، از نظر کاهش ناترازی انرژی، کاهش مصرف برق، افزایش عمر تجهیزات سرمایشی، بهبود آسایش حرارتی و کاهش دمای داخل فضاها، اقدامی فنی، اقتصادی و قابل توصیه است. از این رو اجرای پوشش سفید سیلیکونی در سایر ساختمان های اداری پتروشیمی فن آوران کاملاً قابل دفاع خواهد بود.

منبع و مآخذ:

1. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2021a). ASHRAE handbook: Fundamentals. ASHRAE.
2. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2021b). ANSI/ASHRAE Standard 169-2021: Climatic data for building design standards. ASHRAE.
3. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). Fundamentals of heat and mass transfer (7th ed.). John Wiley & Sons.
4. NASA POWER Project. (2026). NASA POWER daily meteorology and solar energy data for Bandar Mahshahr, Iran. NASA Langley Research Center. <https://power.larc.nasa.gov/>
5. Heat and Mass Transfer, Incropera, 7th Edition (2011)
6. Fundamentals of Heat and Mass Transfer Radiation Properties 12 th Edition Incropera et al, 2011
7. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2021). ASHRAE handbook: Fundamentals (SI Edition). Atlanta, GA: ASHRAE.
8. ASTM International. (2016). ASTM C1549-16: Standard test method for determination of solar reflectance near ambient temperature using a portable solar reflectometer. West Conshohocken, PA: ASTM International.
9. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer (7th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
10. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2021). ASHRAE handbook: Fundamentals (SI Edition). Atlanta, GA: ASHRAE.
11. ASTM International. (2016). ASTM C1549-16: Standard test method for determination of solar reflectance near ambient temperature using a portable solar reflectometer. West Conshohocken, PA: ASTM International.
12. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer (7th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
13. Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute (AHRI). (2023). AHRI Standard 210/240: Performance rating of unitary air-conditioning and air-source heat pump equipment. Arlington, VA: AHRI.

14. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2021). ASHRAE handbook: Fundamentals (SI Edition). Atlanta, GA: ASHRAE.
15. International Organization for Standardization (ISO). (2013). ISO 16358-1:2013: Air-cooled air conditioners and air-to-air heat pumps — Testing and calculating methods for seasonal performance factors — Part 1: Cooling seasonal performance factor. Geneva, Switzerland: ISO.