فصلنامه علمی تخصصی معماری سبز
سال پنجم، شماره ۱ (پیاپی: ۱۴)، بهـــار ، ۱۳۹۸، جلد یک
ISSN: 2476-5368

مدل‌سازی رفتار حرارتی شیشه‌های ترموکرومیک و ارزیابی میزان کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های اقلیم ایران با استفاده از نرم‌افزار Design Builder

مهدی شیخی [۱*]، شهناز پورناصری [۲]، اسماعیل ضرغامی [۳]، حسان ملاجعفری [۴]

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۱/۱۶
تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۲/۲۲
کد مقاله: ۱۷۰۴۵

چکـــیده

کاهش میزان انرژی مصرفی برای تأمین آسایش حرارتی مطلوب در ساختمان‌ها، همواره یکی از چالش‌های طراحان است. در پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی عملکرد شیشه‌های ترموکرومیک در برخی از اقلیم‌های خارج از ایران، با شرایط آب و هوایی متفاوت، مشخص شده است که این فناوری در جلوگیری از افزایش دمای محیط داخلی از طریق تابش خورشید و کاهش مصرف انرژی تأثیرگذار است. با این انگیزه در این پژوهش به‌منظور بررسی چگونگی عملکرد شیشه‌های ترموکرومیک، شبیه‌سازی ساختمانی فرضی توسط نرم‌افزار «دیزاین بیلدر» در اقلیم‌های گوناگون ایران در شهرهای تهران، تبریز، یزد و بندرعباس، انجام گرفته است تا میزان دقیق انرژی مصرف شده در صورت استفاده از شیشه‌های ترموکرومیک و شیشه‌های معمولی در پنجره‌ی این ساختمان اندازه‌گیری گردد. اطلاعات بدست آمده مؤید آنست که هر چهار نوع شیشه‌ی ترموکرومیک نسبت به شیشه‌ی معمولی در کاهش مصرف انرژی جهت سرمایش، برتری دارند. در نتیجه‌ی محاسبات مشخص شد که میزان کاهش مصرف انرژی در صورت نصب این نوع شیشه‌ها در اقلیم‌های گوناگون ایران از ۶٪ تا ۳۱٪ خواهد بود. همچنین بیشترین راندمان متعلق به شیشه‌ی ترموکرومیک وانادیم دی‌اکسید فرآوری شده با واکنشگر مستقیم و در شهر تبریز بوده است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

واژگـان کلـیدی: مدل‌سازی، ترموکرومیک، ایران، انرژی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه شهید رجایی تهران (*Mehdisheikhi1994@gmail.com*)
۲- استادیار دانشگاه شهید رجایی تهران
۳- استاد دانشگاه شهید رجایی تهران
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه شهید رجایی تهران

۱- مقدمه

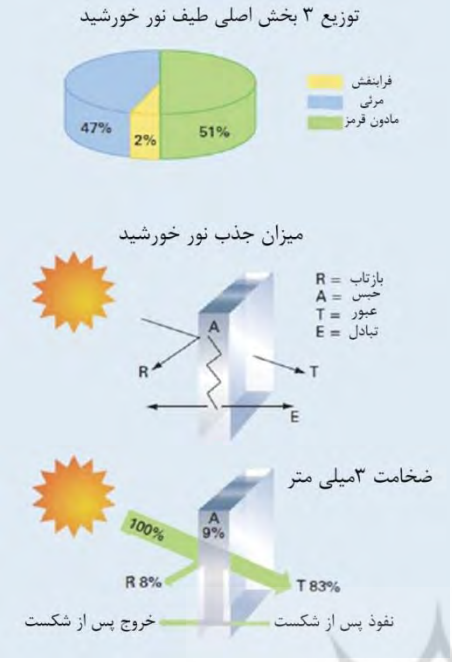
در عصر حاضر، بشر با درک برهم‌کنش زنجیره‌های محیط زیست و تأثیرات زندگی انسان بر کره‌ی زمین، زنگ خطر جدی طبیعت را لمس کرده است. از این رو تکاپو برای رفع چالش‌های جوامع تبدیل به نیروی محرکه‌ای برای تحقیق و توسعه‌ی فناوری‌های ناجی محیط زیست شده است. مطابق تحقیقات، غلظت دی اکسید کربن در جو تا پایان دهه‌ی ۵۰ میلادی ppm315، و در حال حاضر 400 ppm اندازه‌گیری شده است (۱). عامل اصلی افزایش این میزان دی اکسید کربن سوزاندن بی‌رویه‌ی ذغال سنگ، نفت و گاز می‌باشد و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۱۰۰ میلادی این میزان از غلظت CO_2 تا ۵۰٪ رشد داشته باشد و این اتفاق سبب گرم‌تر شدن زمین و بالا آمدن سطح آب‌های آزاد است (۲). جمعیت جهان نیز تا سال ۲۱۰۰ میلادی به میزان ۵۰٪ افزایش خواهد یافت (۳). بدین ترتیب پیش‌بینی می‌شود که ۷۰٪ جمعیت مردم به زندگی در شهرها و حاشیه‌ی آن روی آورند و به همین سبب با مصرف حجم عظیمی از انرژی‌های گوناگون در شهرها، جزیره‌های گرمایی عظیمی به وسعت شهرهای مختلف پدید آید (۴). این جزیره‌های گرمایی به گونه‌ای هستند که حتی ممکن است دمای داخل آن‌ها با دمای بیرون شهر چندین درجه‌ی سانتیگراد تفاوت داشته باشد (۵).

بنابراین اثرات تخریب کننده‌ی دی اکسید کربن در تغییرات آب‌وهوایی عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی است و ساختمان‌ها به عنوان محل فعالیت‌های انسانی ۳۰٪ تا ۴۰٪ در تولید این گاز گلخانه‌ای سهم دارند (۶). به طور میانگین مردم۸۰٪ تا ۹۰٪ وقت خود را داخل ساختمان‌ها می‌گذرانند (۷). بنابراین، یکی از فرصت‌های کاهش تولید CO_2، استفاده از فناوری‌های نوین ساختمانی در جهت ایجاد بهره‌وری بالاتر در مصرف انرژی می‌باشد (۸). گرمایش، سرمایش و روشنایی بخش عمده‌ی مصرف انرژی را با نسبت ۶۰٪ به خود اختصاص داده و مطابق آمار جهانی، انرژی مصرفی جهت سرمایش ساختمان‌ها در سال‌های اخیر ۱۷٪ رشد داشته است. به طوریکه در بعضی اقلیم‌های خاص مانند ایتالیا، انرژی مصرفی تا ۳۰٪ رشد یافته است (۹). در ایران نیز بخش خانگی و تجاری در طی دوره مورد بررسی روند روبه رشدی داشته و در سال۱۳۹۱ معادل ۱۱۱/۶۸ میلیون تن بوده است که این رقم برابر با سهم ۲۲/۴ درصدی از کل انتشار کشور می باشد (۱۰).در بین تمام مصالح ساختمانی شیشه به دلیل خاصیت عبور نور، می‌تواند فضاهای معماری داخل را با خارج پیوند دهد و همچنین نور طبیعی مورد نیاز را وارد فضا کند. بنابراین این عنصر در پنجره‌ها و درب‌ها نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند اما ضعف بزرگ آن در اعمال بار گرمایشی و سرمایشی بیشتر بر ساختمان می‌باشد (۱۱). با خلق تکنیک‌های جدید در استفاده از شیشه‌های ساختمانی عملکرد این مصالح تا حد زیادی می‌تواند نیازها را در حوزه‌ی انرژی مرتفع کند. یکی از این فناوری‌ها که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است، «شیشه‌های ترموکرومیک۱» می‌باشد و با علامت اختصاری «TC» نمایش داده می‌شود (۱۲). انتقال حرارت در این نوع شیشه وابسته به دما می‌باشد، به گونه‌ای که در دماهای پایین میزان مشخصی از تابش خورشید را جذب می‌کند و با افزایش دما از یک حد مشخص، شیشه تغییر حال داده و از شفافیت آن کاسته می‌شود تا میزان اشعه‌ی قابل نفوذ خورشید به حداقل برسد (۱۳). شیشه‌ی ترموکرومیک در گروه شیشه‌های هوشمند طبقه‌بندی می‌شود. به طور کلی شیشه‌های هوشمند به دو سیستم فعال و غیر فعال دسته‌بندی می‌شوند که شیشه‌های ترموکرومیک بدون نیاز به سازوکار فعال کننده و نیاز به انرژی محرک، و به صورت خودکار فعال می‌شود (۱۴). شیشه‌های ترموکرومیک شیشه‌هایی هستند که رنگ آن‌ها با تغییرات دمایی تغییر می‌کند. و با تغییر رنگ و کدر شدن از نفوذ نور خورشید در دماهای بالاتر می‌کاهد. فرآیند این تغییر حالت بدین صورت است که ماده ترموکرومیک پس از دریافت نور خورشید و گرم شدن محیط و گذر از ناحیه‌ی بحرانی از حالت مونوکلینیک به ساختار روتایل۲ تبدیل می‌شود که همانند یک شبه فلز عمل می‌کند و مقدار بسیار زیادی را بازتاب می‌کند و بدین ترتیب از دریافت غیر ضروری اشعه حاوی انرژی در مواقع لازم جلوگیری به عمل می‌آورد (۱۵).

دستیابی به معماری پایدار در گرو توجه به محیط‌زیست و بهره‌وری اقتصادی طرح‌ها می‌باشد. انتخاب مصالح ساختمانی پایدار و مناسب، باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود وسلامتی بیشتر محیط زیست را تأمین می‌کند. فناوری این نوع شیشه‌ها و به دنبال آن کاربرد پنجره‌های هوشمند در چند سال اخیر توسعه خیره کننده‌ای داشته است. با توجه به نیاز روزافزون بشر به انرژی و بالا رفتن هزینه‌های آن که در نتیجه‌ی استفاده بی‌رویه از انرژی‌های فسیلی (به ویژه در ایران) اتفاق می‌افتد، تجهیز ساختمان‌ها به فناوری‌های جدید و در عین حال کارآمد از ضرورت‌های توسعه‌ی پایدار می‌باشد. همان‌گونه که بیان شد، فناوری شیشه‌های ترموکرومیک می‌تواند در روزهای گرم تابستان که نور آفتاب به داخل ساختمان‌ها وارد می‌شود و نیاز به استفاده از دستگاههای خنک کننده و تهویه کننده هوا را افزایش می‌دهد به صورت هوشمند نور رو بازتاب داده و در عوض در فصول سرد سال دوباره به حالت اول بازگردد و شفاف شود. این فناوری، به جهت تابش فراوان در اقلیم فلات ایران، تاثیر خیره‌کننده‌ای بر مدیریت مصرف انرژی ساختمان‌ها خواهد داشت.

۲- پیشینه‌ی تحقیق

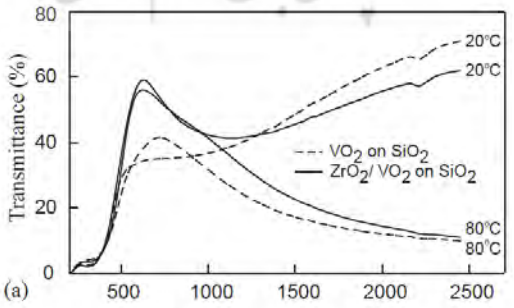
به طور کلی تابش خورشید در محدوده‌ی امواج الکترومغناطیسی دسته‌بندی می‌شود. این نور به ۳ قسمت فرابنفش، مرئی و مادون قرمز تقسیم می‌شود. این نور شامل طیف طول موج m ۳ $< \lambda <$ ۰/۳ m می‌باشد. تقریباً ۵۰٪ انرژی موجود در اشعه‌ی خورشید در طیف طول موج مرئی یعنی ۰/۷ m $< \lambda <$ ۰/۴ m قرار گرفته است. پرتوی فرا بنفش انرژی بسیار اندکی دارد بنابراین تقریباً ۵۰٪ دیگر انرژی در پرتوی مادون قرمز در طیف m ۳ $< \lambda <$ ۰/۸ m وجود دارد. بنابراین می‌تواند نقش بسیار با ارزشی در تنظیم شرایط محیطی ساختمان داشته باشد (۱۶). همان‌گونه که در شکل۱ دیده می‌شود، ۴۷٪ از نور خورشید برای انسان قابل تشخیص است. به عبارت دیگر میزان نور و انرژی محدوده‌ی خارج از مرئی برای انسان قابل لمس نیست اما تأثیرات آن در محیط پابرجاست. نور خورشید هنگام ورود به شیشه یک سوم سرعت خود را از دست داده و انرژی آن حبس می‌شود بنابراین دمای شیشه را بالا می‌برد همچنین مقداری از آن به فضا وارد شده و باقی آن بازتاب می‌شود(۱۷).



شکل۱- جذب نور در شیشه‌ی معمولی (۱۸).

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، بخش بسیار زیادی از انرژی گرمایی رسیده به کره‌ی زمین در ناحیه‌ی مادون قرمز واقع است. در اقلیم گرم، شیشه‌های ترموکرومیک امواج مادون قرمز را بازتاب کرده و در اقلیم سرد از انرژی این امواج استفاده می‌کند تا محیط گرم‌تر شود. این پدیده در اثر استحاله‌ی نوار نازک نانو از جنس وانادیم دی اکسید (VO_2) می‌باشد.

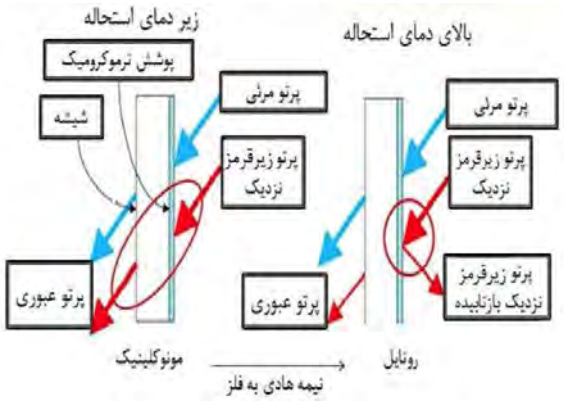
به طور کلی به موادی که رنگ آن‌ها به صورت برگشت‌پذیر با دما تغییر می‌کند ترموکرومیک گفته می‌شود. تغییرات در شفافیت و رنگ این مواد به سبب یک واکنش شیمیایی برگشت‌پذیر که با تغییرات دما تغییر می‌کند انجام می‌شود. مهم‌ترین و کارآمدترین نوع از نانو مواد ترموکرومیک، VO_2 می‌باشد. دلیل این امر نزدیکی دمای استحاله‌ی این ماده به دمای آسایش انسان یعنی ۲۵ درجه‌ی سانتیگراد است. این ماده در دمای ۶۸ درجه‌ی سانتیگراد تغییر حال می‌دهد و از ساختار مونوکلینیک به ساختار روتایل می‌رسد. نکته‌ی مثبت این فرآیند در سرعت انجام آن است که در پیکو ثانیه اتفاق می‌افتد بنابراین به محض رسیدن به دمای بحرانی واکنش نشان می‌دهد و از ورود انرژی بیش از حد جلوگیری می‌کند، بدون اینکه از میزان نور مرئی کم شود و فضا به هیچ عنوان تاریک نمی‌شود. اما نکته‌ی منفی فرآیند استحاله در دی اکسید وانادیم بالا بودن دمای استحاله‌ی آن است که در ۶۸ درجه‌ی سانتیگراد اتفاق می‌افتد. بدیهی است که رسیدن دمای فضای داخلی به این نقطه‌ی بحرانی غیر ممکن بوده و عملاً بی-استفاده است. اما این عیب با اضافه کردن افزودنی‌هایی به ماده‌ی اصلی، قابل جبران است (۱۷).



شکل ۲- نمودار تغییر درصد عبور نور در دماهای گوناگون در شیشه های ترموکرومیک (۱۹).

از هنگامی که خواص دی اکسید وانادیم شناسایی شد، تلاش‌های بسیاری برای ارتقاء بهره‌وری این ماده انجام شد. از آن جمله می‌توان به استفاده از افزودنی‌های گوناگون در جهت کاستن دمای استحاله اشاره کرد. مؤثرترین ماده‌ی شناخته شده در

کاهش دمای استحاله، تنگستن می‌باشد. مطالعات بسیاری ثابت کرده‌اند که اضافه کردن ۲/۵٪ تا ۱/۵٪ وزنی تنگستن به لایه‌های نازک VO_2، موجب کاهش دمای استحاله تا ۲۰ درجه‌ی سانتیگراد می‌شود(۲۰). همچنین به موازات کاسته شدن از دمای استحاله، مقاومت الکتریکی و میزان عبور کاهش، و میزان انعکاس امواج مادون قرمز افزایش می‌یابد. البته مواد دیگری نیز قابلیت استفاده به عنوان افزودنی را دارند. مانند نایوبیم (+Nb5) و مولبیدن (+Mo6)، که دمای استحاله را تا حدود ۳۲ الی ۳۴ درجه‌ی سانتیگراد می‌رسانند (۲۱).



شکل۳- عملکرد شیشه‌ی ترموکرومیک در برابر نور خورشید (۱٤).

۳- پرسش‌های تحقیق

- دریافت انرژی از طریق نور خورشید در ساختمان‌های ایران تا چه میزان بر بار سرمایشی و گرمایشی تأثیرگذار است؟
- میزان بهره‌وری شیشه‌های ترموکرومیک در ایران تا چه میزان می‌باشد؟
- با توجه به گستردگی اقلیمی در ایران، بهره‌وری این فناوری در کدام شهرها بالاتر است؟

۴- روش بررسی

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و روش تحقیق در آن از نوع شبیه‌سازی می‌باشد. به منظور ارزیابی و مقایسه‌ی رفتار حرارتی و چگونگی عملکرد شیشه‌های ترموکرومیک و شیشه‌ی معمولی مورد استفاده در پنجره‌ی ساختمان‌ها، یک سالن نشیمن به ابعاد ۶ در ۷ متر در آپارتمانی فرضی و رو به جنوب در چهار شهر تهران، تبریز، یزد و بندرعباس در نظر گرفته شده است. این آپارتمان مسکونی دیوارهایی از جنس مصالح بنایی داشته که جزئیات مصالح (ضریب انتقال حرارتی، اینرسی حرارتی، ضخامت لایه‌های مصالح، نوع ملات و...) با دقت بالایی توسط نرم‌افزار رویت آرکیتکچرال[۳] در سیستم BIM[۴] مدل‌سازی شده و اطلاعات به نرم‌افزار دیزاین بیلدر وارد شده است.

برای شبیه‌سازی در این پژوهش از نرم‌افزار دیزاین بیلدر استفاده گردید چراکه، این نرم افزار برای مدل‌سازی جنبه‌های مختلف ساختمان مانند فیزیک ساختمان (فرم و متریال)، معماری، سیستم‌های گرمایش و خنک‌کننده، سیستم‌های نورپردازی و غیره استفاده طراحی شده است. این نرم‌افزارتقریباً توانایی شبیه‌سازی تمام جنبه‌های ساخت را دارد و به عنوان یک شبیه‌ساز پویا، می‌تواند مصرف انرژی‌های مختلف از جمله مصرف انرژی برای گرمایش، خنک‌کننده‌ها، روشنایی، لوازم خانگی، آب گرم خانگی و غیره را در ساختمان شبیه‌سازی کند. همچنین دیزاین بیلدر قادر به محاسبه‌ی نرخ نور نیز می‌باشد و توانایی مدل‌سازی CFD[۶] را نیز داراست. نرم افزار دیزاین بیلدر می‌تواند با استفاده از فایل‌های هواشناسی، با توجه به شرایط آب و هوایی محل ساختمان، به طور دقیق، انواع مصرف انرژی را محاسبه کند. علاوه بر این، این نرم‌افزار رابط گرافیکی خوبی دارد (GUI[۷]) و نیازی به برنامه‌ی رایانه‌ای دیگری برای مدل‌سازی ۳ بعدی ندارد. مضاف بر این مطالب، سهولت استفاده یکی دیگر از دلایل انتخاب این نرم افزار بود(۲۲،۲۳).

مقایسه‌ی عملکرد شیشه‌های ترموکرومیک و شیشه‌ی معمولی در محوطه‌ی نشیمن رو به جنوب، مطابق شکل ۴، با دو پنجره به ابعاد ۱/۵ در ۲/۵ متر و جمعاً با مساحت ۷/۵ متر مربع انجام گردیده که ۴۰٪ از سطح شیشه‌خور دیوار رو به جنوب را تشکیل می‌دهد. بنابراین تمامی ویژگی‌های کالبدی و ساختاری این آپارتمان مسکونی ثابت فرض شده است و به منظور ارزیابی رفتار حرارتی شیشه‌های مذکور، میزان اثرگذاری پارامترهای مورد نظر پژوهش در تنظیم شرایط محیطی اتاق نشیمن، در چهار نوع (تیپ) از شیشه‌های ترموکرومیک در مقایسه با شیشه معمولی اندازه‌گیری شده‌اند. این چهار نوع شیشه‌ی ترموکرومیک، به ترتیب شامل لایه‌های: وانادیم دی‌اکسید خالص، وانادیم دی‌اکسید با نانوذرات طلا، وانادیم دی‌اکسید فرآوری شده با واکنشگر مستقیم و

همچنین وانادیم دی‌اکسید فرآوری شده با نانوذرات طلا و واکنشگر مستقیم، می‌باشد. خصوصیات فیزیکی نوارهای ترموکرومیک استفاده شده در شیشه‌های ترموکرومیک از پژوهش‌های پیشین در زمینه‌ی تولید و استفاده از نوارهای ترموکرومیک استخراج شده است (۲۴،۲۵،۲۶). همچنین در این شبیه‌سازی تمامی شیشه‌های ترموکرومیک به صورت یک نوار نازک ترموکرومیک بر روی شیشه‌ی معمولی به ضخامت ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین همه‌ی شیشه‌های استفاده شده به صورت تکجداره و با ضخامت ۶ میلی‌متر بوده و تنها تفاوت شیشه‌ها در لایه‌ی ترموکرومیک استفاده شده بر روی آن‌ها می‌باشد.

جدول ۱- بخشی از مشخصات فنی شیشه‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی-منبع: (۲٤)

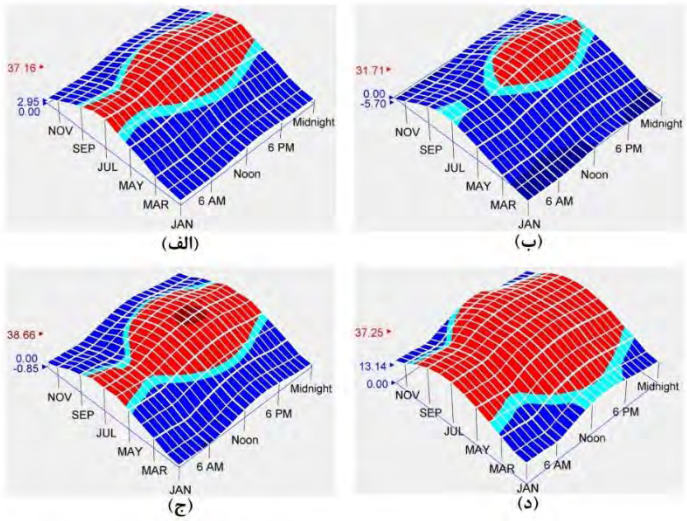
نوع شیشه	دمای استحاله‌ی کامل	درصد عبور نور در دماهای پایین‌تر از استحاله	درصد عبور نور در دماهای بالاتر از استحاله	گسیلندگی دما بین فضای داخل و خارج	گسیلندگی در دماهای بالاتر از استحاله
معمولی	-	٪۹۲	٪۹۲	۰,۸۳۷	۰,۸۳۷
Thermochromic 1 (VO2)	۵۹	٪۷۸	٪۷۴	۰,۸۲۵	۰,۷۹۵
Thermochromic 2 (VO2 + gold)	۴۳	٪۵۶	٪۴۸	۰,۸۰۰	۰,۷۵۲
Thermochromic 3 (VO2 + TOAB)	۳۸,۵	٪۶۱	٪۵۱	۰,۸۲۷	۰,۷۸۹
Thermochromic 4 (VO2 + gold + TOAB)	۴۵,۵	٪۷۷	٪۴۹	۰,۸۲۸	۰,۷۹۷

آپارتمان مورد نظر، در طبقه‌ی وسط ساختمان بوده و به گونه‌ای در نظر گرفته شده جبهه‌ی جنوبی آن (که پنجره ها در آن واقع شده‌اند) با محیط بیرونی (نور خورشید، باد، هوای پیرامون ساختمان، رطوبت و...) در تماس قرار بگیرد. بنابراین این آپارتمان از دمای زمین تأثیر نخواهد پذیرفت. همچنین شرایط محیطی داخل نشیمن توسط تجهیزات تهویه مطبوع در دمایی بین ۱۸ الی ۲۴ درجه‌ی سیلیسیوس در نظر گرفته شده و ضریب گردش هوا ۰,۰۲۵ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.

شکل۴- نما-برش سه بعدی نشیمن آپارتمان مورد مطالعه- نگارندگان

برای انتخاب شهرهای مناسب جهت انجام شبیه‌سازی، ابتدا چند شهر از کشور ایران بر مبنای ۳ فاکتور: ۱- پوشش طیف وسیعی از اقلیم‌های گوناگون کشور، ۲- میزان دریافت نور خورشید هر شهر، ۳- میزان اهمیت و جمعیت هر شهر، انتخاب شدند. سپس با مراجعه به آخرین اصلاحیه از طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گیجر[۸] (۲۷)، چهار شهر از شهرهای مذکور انتخاب شدند. در نهایت اطلاعات اقلیمی چهار شهر برگزیده یعنی، تهران، تبریز، یزد و بندرعباس، با استفاده از نرم‌افزار « کلایمیت کانزالتنت[۹]»، مورد ارزیابی قرار گرفت. در این بررسی مشخص شد که خصوصیات اقلیمی این چهار شهر، در طیف مورد نظر قرار می‌گیرد. نمودارهای خروجی این نرم‌افزار در زمینه‌ی گستره‌ی دمایی و میانگین بیشینه و میانگین کمینه‌ی دما و همچنین چگونگی توزیع دما در ساعات شبانه‌روز در ماه‌های سال در شکل ۵ مشخص گردیده است.

از آنجایی که در حدود دمای ۳۰ درجه‌ی سانتیگراد، بار سرمایشی بر فضای نشیمن وارد خواهد گشت، بنابراین تمام ماه‌های سال که میانگین دمای هوا در آن‌ها به بیش از ۳۰ درجه‌ی سانتیگراد می‌رسد، مشخص گردید و در هر کدام از شهرها محاسبات به صورت جداگانه انجام گردیده است. شهر تهران در ۵ ماه، تبریز در ۴ ماه، یزد در ۷ ماه و بندرعباس در ۹ ماه از سال میانگین دمایی بیش از ۳۰ درجه‌ی سانتیگراد را تجربه می‌کنند.

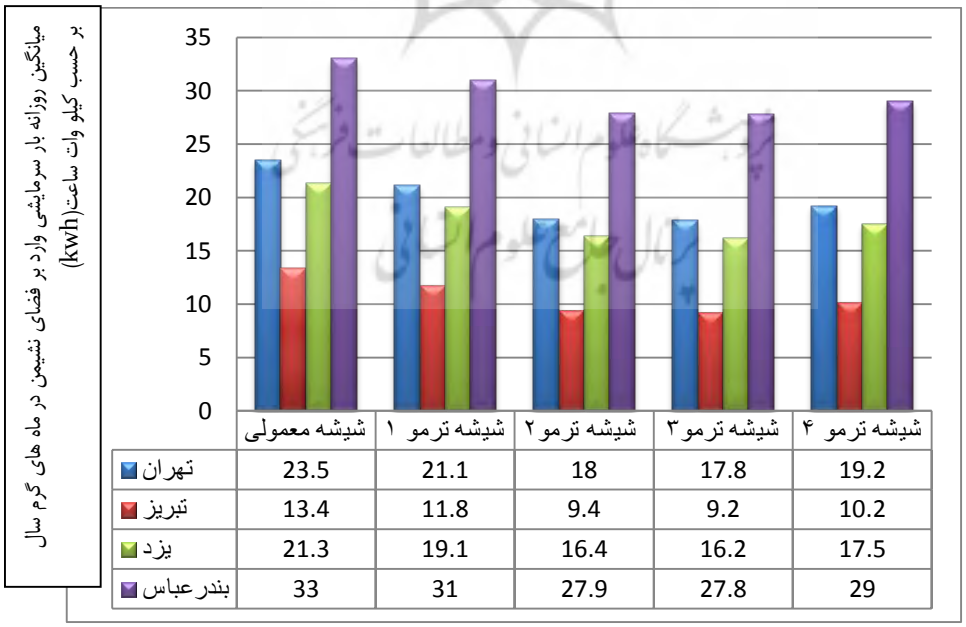


شکل۵- نمودار توزیع دمای چهار شهر در طول سال-(الف) تهران، (ب) تبریز، (ج) یزد، (د) بندرعباس-نگارندگان

۵- یافته‌ها

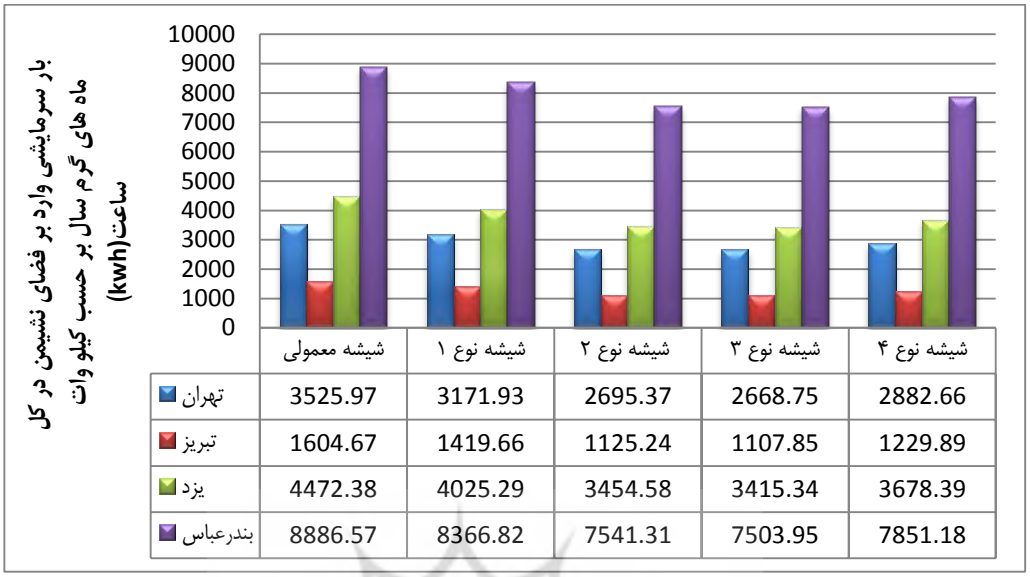
۵-۱- مقایسه‌ی عملکرد شیشه‌ها

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، با استفاده از شیشه‌ی ترموکرومیک با دمای استحاله‌ای در حدود ۲۵ درجه‌ی سانتیگراد، انتظار می‌رود تا بخش عمده‌ی طیف مرئی خورشید یعنی از طول موج ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر، از شیشه‌ی ترموکرومیک عبور کرده و برای روشنایی وارد فضا گردد و در مقابل، به نسبت دمای هوای موجود به میزان ۴۰٪ تا ۸۰٪ طیف مادون قرمز که حاوی انرژی گرمایی می‌باشد، بازتاب گردد. شکل شماره‌ی 5، میانگینی از روزهای گرم (روزهای بالای ۳۰ درجه‌ی سانتیگراد) را در ماه‌های گرم سال در هر شهر را به صورت جداگانه بیان می‌کند. به منظور مقایسه‌ی بهتر عملکرد شیشه‌ی ترموکرومیک با شیشه‌ی معمولی و همچنین مقایسه‌ی این عملکرد در هر چهار شهر، میانگین روزانه‌ی بار سرمایشی وارد بر فضای نشیمن در نمودار ۱ به تصویر درآمده است:



نمودار ۱- مقایسه‌ی عملکرد شیشه‌ی معمولی و ترموکرومیک در طول ماه‌های گرم سال در هر اقلیم-نگارندگان

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، تعداد ماه‌های گرم برای شهرها متفاوت می‌باشد بنابراین میزان کلی انرژی مصرفی جهت سرمایش فضای نشیمن در شهرهای بندرعباس و یزد اندازه‌ی بزرگ‌تری دارد. البته به جز تعداد ماه‌های گرم، عوامل اقلیمی دیگری مانند عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، میزان رطوبت و باد نیز در تفاوت انرژی وارد بر ساختمان در هر کدام از شهرها نقش دارند. به منظور درک تفاوت اندازه‌ی بار سرمایشی در شهرها با یکدیگر، نمودار ۲، کل بار سرمایشی در طول ماه‌های گرم را نشان می‌دهد:

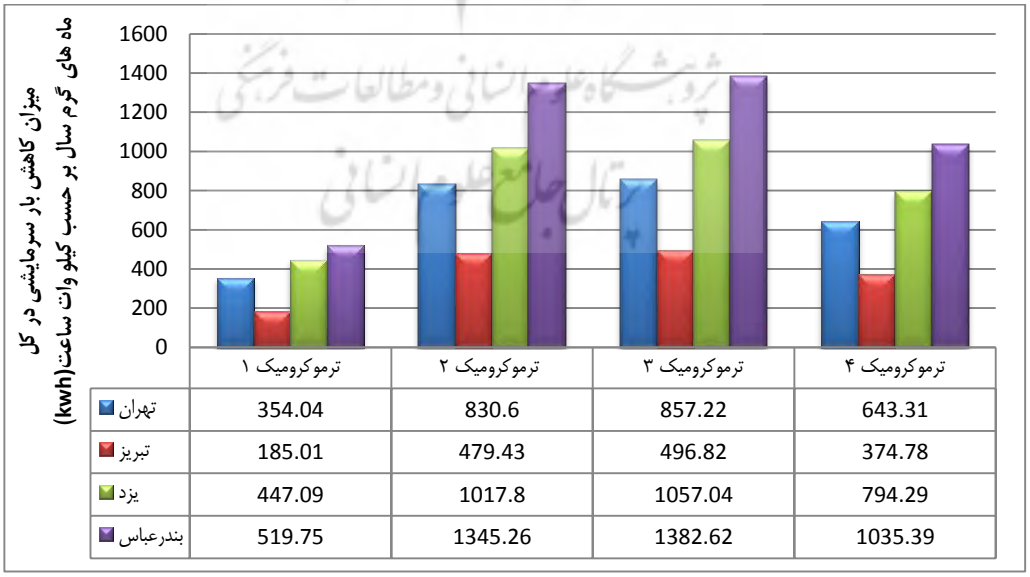


	شیشه معمولی	شیشه نوع ۱	شیشه نوع ۲	شیشه نوع ۳	شیشه نوع ۴
تهران	3525.97	3171.93	2695.37	2668.75	2882.66
تبریز	1604.67	1419.66	1125.24	1107.85	1229.89
یزد	4472.38	4025.29	3454.58	3415.34	3678.39
بندرعباس	8886.57	8366.82	7541.31	7503.95	7851.18

نمودار ۲- مقایسه‌ی عملکرد شیشه‌ی معمولی و ترموکرومیک در طول ماه‌های گرم سال در هر اقلیم با احتساب کل بار سرمایشی وارد بر فضای نشیمن-نگارندگان

۵-۲- مقایسه‌ی بهره‌وری شیشه‌ی ترموکرومیک در هر اقلیم

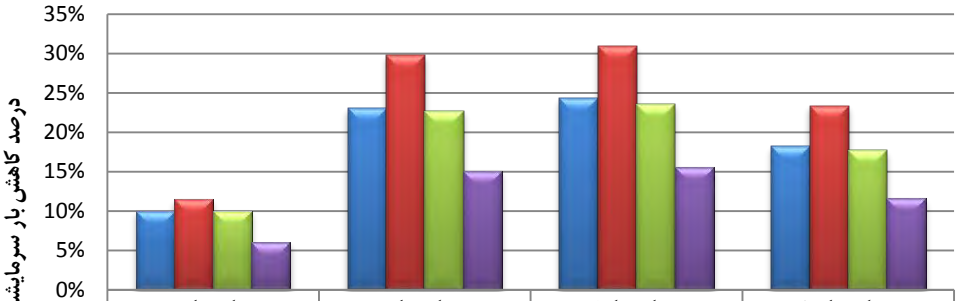
اکنون با توجه به مشخص شدن میزان تأثیرگذاری شیشه‌های ترموکرومیک در کاهش بار سرمایشی در ماه‌های گرم سال، به مقایسه‌ی میزان صرفه‌جویی برای مشخص شدن کاربردی‌ترین و تأثیرگذارترین نوع شیشه در هرکدام از چهار شهر، پرداخته خواهد شد. نمودار ۳، میزان تفاوت در بار سرمایشی وارد بر فضای نشیمن آپارتمان را در صورت استفاده از هر کدام از چهار نوع شیشه را نشان می‌دهد:



	ترموکرومیک ۱	ترموکرومیک ۲	ترموکرومیک ۳	ترموکرومیک ۴
تهران	354.04	830.6	857.22	643.31
تبریز	185.01	479.43	496.82	374.78
یزد	447.09	1017.8	1057.04	794.29
بندرعباس	519.75	1345.26	1382.62	1035.39

نمودار ۳- مقایسه‌ی عملکرد شیشه‌ی معمولی و ترموکرومیک در طول ماه‌های گرم سال در هر اقلیم با احتساب کل بار سرمایشی وارد بر فضای نشیمن-نگارندگان

همان‌گونه که مشخص شد، شیشه‌های ترموکرومیک مقدار متفاوتی از بار سرمایشی را در هر شهر، با توجه به اقلیم آن شهر، می‌کاهند. به منظور تعیین دقیق‌تر بهره‌وری این شیشه در نمودار ۴، «میزان کاهش بار سرمایشی وارد بر فضای نشیمن آپارتمان» را در صورت استفاده از هر یک از چهار شیشه، به نسبت «کل بار وارده» سنجیده شده است تا درصد صرفه‌جویی انرژی مشخص شود:



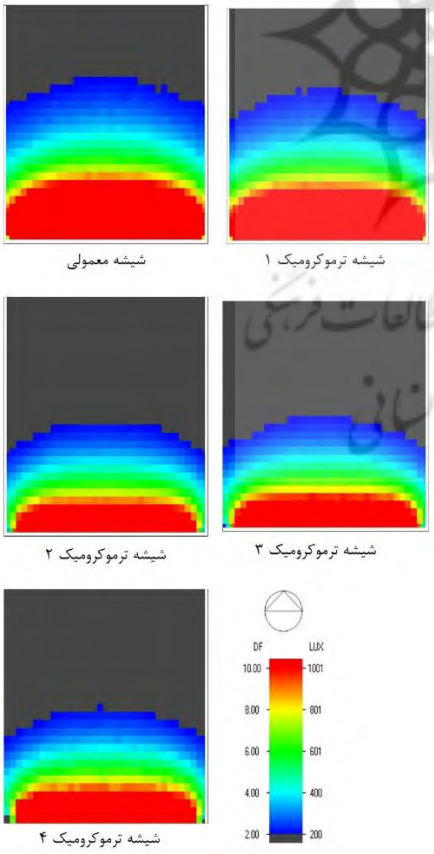
	ترموکرومیک ۱	ترموکرومیک۲	ترموکرومیک۳	ترموکرومیک ۴
تهران	10%	23%	24.30%	18.20%
تبریز	11.50%	29.80%	30.90%	23.35%
یزد	10%	22.70%	23.60%	17.70%
بندرعباس	6%	15.10%	15.50%	11.60%

نمودار ۴- مقایسه‌ی عملکرد شیشه‌ی معمولی و ترموکرومیک در طول ماه‌های گرم سال در هر اقلیم با احتساب کل بار سرمایشی وارد بر فضای نشیمن-نگارندگان

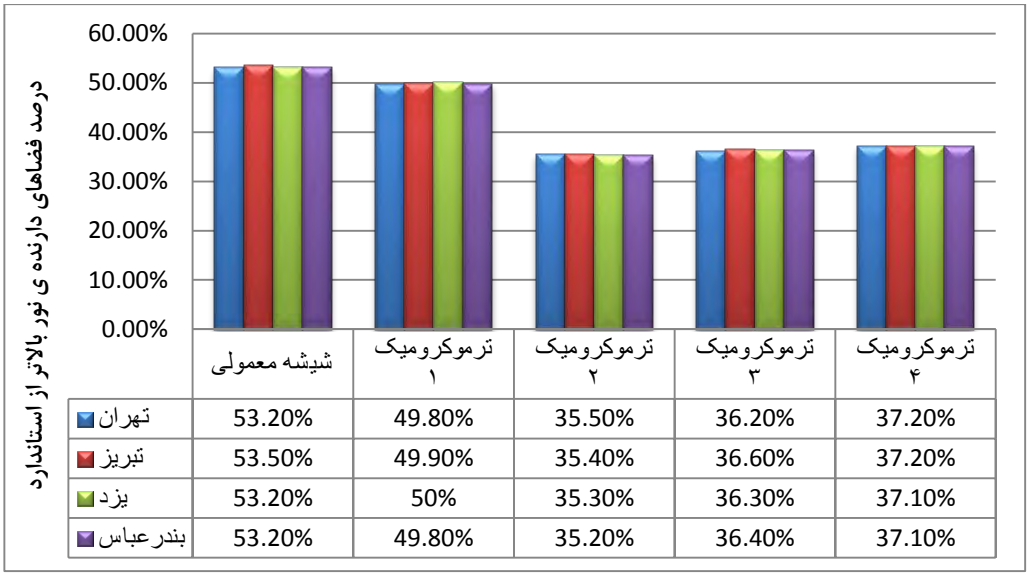
۵-۳- مقایسه‌ی میزان نفوذ نور

همان¬گونه که بیان شد، شیشه¬های ترموکرومیک بخشی از طیف نور مرئی خورشید را نیز بازتاب می¬کنند. بدین ترتیب مانع ورود مقداری از نور شده و سبب افت روشنایی فضای داخلی در روز می¬گردند. بدیهی است که در صورتی که افت روشنایی به حدی برسد که نیاز به استفاده از نورهای مصنوعی در داخل ایجاد شود، برای تأمین این میزان نور باید انرژی مضاعفی مصرف شود. برای مشخص شدن مقدار دقیق کاهش نور ورودی به فضای نشیمن، و میزان انرژی مورد نیاز برای تأمین نور استاندارد، شبیه¬سازی دیگری در نرم¬افزار دیزاین بیلدر انجام شد تا میزان تأثیر منفی شیشه¬های ترموکرومیک در افت روشنایی به صورت دقیق مشخص شود.

در شکل ۶، تصاویر شماتیک میزان نفوذ نور در فضای نشیمن به عنوان نمونه آورده شده است، تا تفاوت رفتار هر کدام از شیشه‌های ترموکرومیک در مقایسه با شیشه‌ی معمولی درک شود. همان‌گونه که در این نمودار مشخص شده است، شیشه-ی ترموکرومیک نوع ۱، کمترین بازتاب نور و شیشه‌ی ترموکرومیک نوع ۲، بیشترین بازتاب نور را در بین هر کدام از چهار نوع شیشه دارا هستند. در همین راستا، میزان دقیق کاهش میزان نور ورودی، در صورت استفاده از شیشه‌های ترموکرومیک در نمودار ۵ بیان شده است:



شکل۶- مقایسه‌ی میزان نفوذ نور در شیشه‌های ترموکرومیک و معمولی در شهر تهران-نگارندگان



	شیشه معمولی	ترموکرومیک ۱	ترموکرومیک ۲	ترموکرومیک ۳	ترموکرومیک ۴
تهران	53.20%	49.80%	35.50%	36.20%	37.20%
تبریز	53.50%	49.90%	35.40%	36.60%	37.20%
یزد	53.20%	50%	35.30%	36.30%	37.10%
بندرعباس	53.20%	49.80%	35.20%	36.40%	37.10%

نمودار۵- مقایسه‌ی عملکرد شیشه‌های ترموکرومیک و معمولی در کاهش میزان نور ورودی به فضای نشیمن- نگارندگان

همان‌گونه که در نمودار ۵ مشخص می‌باشد، در صورت استفاده از شیشه‌ی ترموکرومیک نوع ۲، بیشترین میزان بازتاب حاصل خواهد شد و بنابراین مساحت فضای دارای نور بالاتر از استاندارد، به میزان ۱۵٪ کاهش می‌یابد و همچنین حداقل شدت روشنایی در فضای نشیمن در تمام شهرها حدود ۵۰ لوکس خواهد بود. از آنجایی که این میزان نور برای کارهای عادی روزمره کافی می‌باشد و با توجه به کاربری این فضا که نیازمند نور زیادی نیست، بنابراین در صورت استفاده از شیشه‌های ترموکرومیک، انرژی مورد نیاز جهت روشنایی را بر ساختمان تحمیل نخواهد کرد.

بحث و نتیجه‌گیری

در دهه‌های آینده تلاش جهانی به منظور ایجاد و توسعه پژوهش در زمینه‌ی پوشش‌های ترموکرومیک برای برنامه‌های کاربردی مرتبط با حوزه‌ی انرژی ادامه خواهد داشت. به علاوه با افزایش جمعیت جهان و کاهش منابع انرژی و همچنین آسیب‌های محیطزیستی، تقاضا برای فناوری‌های نوین در جهت جلوگیری از هدررفت انرژی نیز افزایش خواهد یافت. در همین راستا، استفاده از فناوری ترموکرومیک در ساختمان از مزایای ویژه‌ای در کاهش آسیب به محیطزیست خواهد داشت. به طور کلی مهم‌ترین مزایای استفاده از فناوری شیشه‌های ترموکرومیک در ساختمان‌ها، از دو جنبه قابل اهمیت است:

- در درجه‌ی اول، کاهش بار سرمایشی و در نتیجه کاهش مصرف انرژی و به حداقل رساندن آلودگی‌های زیست‌محیطی؛
- در درجه‌ی دوم، کاهش هزینه‌ها در نصب تجهیزات سرمایشی و کاهش بار فرسایشی بر آن‌ها.

در این پژوهش با توجه به یافته‌های پژوهش‌های پیشین، به ارزیابی شیشه‌های ترموکرومیک و مقایسه عملکرد آن‌ها با شیشه‌های معمولی پرداخته شد. پس از استخراج اطلاعات از نرم‌افزار شبیه‌ساز دیزاین بیلدر، با ارزیابی میزان تأثیرگذاری این شیشه‌ها در بهره‌وری حداکثر انرژی برای ایجاد دمای مطلوب آسایش مشخص شد که بیشترین راندمان در کاهش بار سرمایشی وارد بر فضای نشیمن فرضی به شیشه‌ی ترموکرومیک نوع ۳ اختصاص دارد. میزان بازدهی شیشه‌های ترموکرومیک در اقلیم‌های گوناگون، یکسان نخواهد بود و با بررسی عملکرد هر کدام از شیشه‌ها بیشترین بازدهی در اقلیم شهر تبریز، پس از آن یزد و تهران (تقریباً به یک میزان) و در آخر کمترین بازدهی مربوط به بندرعباس بوده است. همچنین، همان‌گونه که بیان شد، در بین شیشه‌های ترموکرومیک نیز، بیشترین بازدهی در اقلیم‌های مختلف کشور مربوط به شیشه‌ی ترموکرومیک نوع ۳، پس از آن نوع ۲، نوع ۴ و در آخر نوع ۱ می‌باشد. همچنین در این پژوهش مشخص شد که در صورت استفاده از شیشه‌های ترموکرومیک میزان نور ورودی به فضای داخلی از ۳٪ تا ۱۵٪ کاهش خواهد یافت. با بررسی و شبیه‌سازی شدت نور در نقاط مختلف فضای نشیمن، کمترین شدت نور ۵۰ لوکس به دست آمد که با توجه به عملکرد این فضا، نور مناسبی به حساب می‌آید بنابراین در صورت استفاده از این فناوری نیاز به تحمیل انرژی الکتریسیته جهت جبران نور، وجود نخواهد داشت. علاوه بر این، با مقایسه‌ی شیشه‌ی ترموکرومیک نوع ۳ با شیشه‌ی ترموکرومیک نوع ۲ مشخص شد که علی‌رغم راندمان بالاتر شیشه‌ی نوع ۳، این شیشه ۲٪ تا ۳٪

به روشن‌تر شدن فضای داخلی کمک می‌کند. بنابر این اطلاعات مناسب‌ترین شیشه‌ی ترموکرومیک به لحاظ میزان بهره‌وری، در اقلیم ایران و در بین این چهار نوع، شیشه‌ی نوع ۳ می‌باشد.

پی‌نوشت

1. Thermochromic
2. Rutile
3. Revit Architectural
4. Building Information Modeling
5. Design Builder
6. Computational Fluid Dynamics
7. Graphical User Interface
8. köppen-Geiger
9. Climate Consultant

منابع

1. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Earthscan SystemResearch Laboratory, Global Monitoring Division. Available online: http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html (accessed on 14 November 2016).
2. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor .M.B., Allen S.K., Boschung J., auels A., Xia Y., Bex V. & Midgley P.M. (2013). The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report on the Intergovermental Panel on Climate Change; Cambridge University Press: New York,NY, USA.
3. United Nations. (2015). Department of Economic and Social Affairs. World Population Prospects: The 2015 Revision; United Nations: New York, NY, USA.
4. United Nations. (2014). Department of Economic and Social Affairs. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision; United Nations: New York, NY, USA.
5. Akbari H., Cartalis C., Kolokotsa D., Muscio A., Pisello A.L., Rossi F., Santamouris M., Synnefa A., Wong N.H., Zinzi M.(2016). Local climate change and urban heat island mitigation techniques, The state of the art. J. Civil Eng. Manag. 22, 1˚16.
6. United Nations. (2009). Environmental Programme. Buildings and Climate Change: Summary for Decision-Makers;UNDP Sustainable Buildings & Climate Initiative: Paris, France.
7. Leech J.A., Nelson W.C., Burnett R.T., Aaron S., Raizenne M.E. (2002). It s about time: A comparison of Canadianand American time˚activity patterns, J. Exposure Anal. Environm. Epidemiol, 12, 427˚432.
8. Richter B., Goldston D., Crabtree G., Glicksman L., Goldstein D., Greene D., Kammen D., Levine M., Lubell M. & Savitz M., (2008). How America can look within to achieve energy security and reduce global warming. Rev. Mod. Phys. 80, 1˚107.
9. Stern N. (2007). The Economics of Climate change: The Stern report, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
10. Alishiri, M., Mohammad Khanali, Sh., Mohammad Bagheri., 2017. Study of the factors affecting carbon dioxide emissions in the country (With modified Laspeyres analysis analysis approach), Journal of Environmental Science and Technology, vol 18, 52-62.(in Persian)
11. Altomonte S. (2008). Daylight for energy savings and psycho-physiological well-being in sustainable built environments. J. Sustain. Dev. 1, 3˚16.
12. Granqvist C.G. (1990). Chromogenic materials for transmittance control of large-area windows. Crit. Rev. Solid State Phys. Mater. Sci. 16, 291˚308.
13. Jorgenson G.V., Lee J.C. (1986). Doped vanadium oxide for optical switching films. Sol. Energy Mater. 14,205˚214.
14. Kamalisarvestani M., Saidur R., Mekhilef S. & Javadi F. S. (2013). Performance, materials and Coating technologies of Thermochromic thin Films on Smart windows", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26, 353-364.
15. Parkin I. P. & Manning T. D.(2006) Intelligent thermochromic windows. Journal of Chemical Education .83 (3), 393.
16. Granqvist C.G., Lansa ker P. C., Mlyuka N. R., Niklasson G. A. & Avendan E. (2009). Progress in Chromogenics: New results for Electrochromic and Thermochromic materials and Devices", Solar Energy Materials & Solar Cells 93, 2032-2039.
17. Kittler R., Kocifaj M., & Darula, S. (2011). Daylight Science and Daylighting Technology: Springer.
18. Al-Obaidi. M. Karam, Ismail .M, & Abdul Rahman .A. (2014). A Review of Skylight Glazing Materials in Architectural Designs for a Better Indoor Environment, Modern Applied Science, 8, 68-82.
19. Xu .G., Jin. P., Tazawa .M. & Yoshimura .K., (2004). Optimization of antireflection coating for VO2-based energy efficient window, Solar Energy Materials & Solar Cells, 83, 29-37.

20. Kang L. T., Gao Y. F., Zhang Z. T., Du J., Cao C. X., Chen Z. & Luo H. J. (2010). Solution-based fabrication of Vanadium dioxide on F:SnO2 substrates with Largely enhanced thermochromism and Lowemissivity for Energy-saving applications, J. Phys. Chem., 114, 1901-1911.
21. Batista C., Ribeiro R. M. & Teixeira V. (2011). Synthesis and Characterization of VO2 based thermochromic thin Films for(Energy-efficient windows, Nanoscale Research Letters, 6:301.
22. DesignBuilder version 1.9.0.003BETA. Last accessed February 2009. www.designbuildersoftware.com
23. Eisabegloo A., Haghshenas M. & Borzoui A. (2016). Comparing the results of thermal simulation of rasoulian house in Yazd by design builder software, with experimental data, Journal of Architect. Eng. Urban Plan, 26(2): 121-130.
24. Saeli, M., Binions, R., Piccirillo, C., Hyett, G. & Parkin, IP. (2009). Templated growth of smart nanocomposite thin films: Hybrid aerosol assisted and atmospheric pressure chemical vapour deposition of vanadyl acetylacetonate, auric acid and tetraoctyl ammonium bromide. **Polyhedron**, 28 (11) 2233 - 2239.
25. Saeli, M., Binions, R., Piccirillo, & Parkin, IP. (2009). Templated growth of smart coatings: Hybrid chemical vapour deposition of vanadyl acetylacetonate with tetraoctyl ammonium bromide, Applied Surface Science, 255, 7291-7295.
26. Binions R., Hyett G., Piccirillo C. & Parkin I.P. (2007). Doped and un-doped vanadium dioxide thin films prepared by atmospheric pressure chemical vapour deposition from vanadyl acetylacetonate and tungsten hexachloride: the effects of thickness and crystallographic orientation on thermochromic properties, Journal of Materials Chemistry, 4652-4660.
27. Kottek. M., Grieser. J., Beck. C., Rudolf. B. & Rubel. F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, Meteorologische Zeitschrift, 15(3), 259-263.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Modeling of thermal behavior of four commercial types of thermochromic glazing in buildings located in climate of iran using "Design Builder" software

Abstract

Reducing energy consumption to provide optimal thermal comfort in buildings is always one of the challenges for designers. thermochromic Glas**ses** have the ability to reduce the energy consumption of buildings by allowing the daylight visible and reducing the unwanted energy of the sun in cooling season, whilst gain solar energy in the heating season. In this study building simulation was used to estimate the performance of four types of thermochromic Glas**ses** compared to common glasses in a specific space in different climates .The result indicate that thermochromic glass have Significant influence on the energy consumption of the building compared to common glasses. As a result of calculations, it was found that the reduction in energy consumption in case of installation of this type of glass in various climates of Iran will be from 6% to 31%. Also, the most efficient thermochemic glass was pure vanadium dioxide grown with a growth directing surfactant in Tabriz.

Keywords: Modeling, ThemoChromic, Iran, Energy

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی