

تأثیر شیشه‌های هوشمند بر بهره‌خوردگی و بار سرمایش در یک ساختمان اداری در اقلیم گرم و مرطوب بوشهر

شیشه‌های هوشمند یکی از انواع مصالح نوینی است که امروزه با هدف جلوگیری از اتلاف انرژی ساختمانها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقاله حاضر با معرفی و مقایسه انواع شیشه‌های هوشمند الکتروکرومیک، کریستال مایع، گازکرومیک، ترموکرومیک و SPD، به سنجش میزان تاثیر این مصالح بر انرژی مصرفی یک ساختمان اداری در بوشهر با استفاده از نرم افزار دیزاین بیلدر پرداخته است. نتایج پژوهش مزایای کاربرد شیشه‌های هوشمند را در کاهش بهره‌خوردگی و بار سرمایشی ساختمان نشان می‌دهد. بر اساس نتایج در این ساختمان، شیشه‌های SPD بهترین عملکرد را در کاهش بار سرمایشی داشته و پس از آن به ترتیب شیشه‌های گازوکرومیک، الکتروکرومیک و ترموکرومیک قرار دارند. میانگین سالانه بهره‌خوردگی با استفاده از شیشه‌های SPD کمترین مقدار بوده و شیشه‌های گازوکرومیک، ترموکرومیک و الکتروکرومیک در مرحله بعد هستند. استفاده از شیشه‌های SPD، گازوکرومیک، الکتروکرومیک و ترموکرومیک در مقایسه با شیشه ساده به ترتیب سبب کاهش ۴۸/۳٪، ۴۵/۸٪، ۳۴/۱٪ و ۱۷/۲۳٪ در بار سرمایشی می‌شود. به این ترتیب کاربرد انواع شیشه‌های هوشمند در اقلیم گرم و مرطوب مشابه بوشهر می‌تواند سبب کاهش بهره‌خوردگی و در نتیجه کاهش میزان بار سرمایشی ساختمان شود.

جلیل شاعری^۱

کارشناسی ارشد

رزا وکیلی نژاد^۲

استادیار

واژه‌های راهنما: شیشه هوشمند، اقلیم گرم و مرطوب، بوشهر، نرم افزار دیزاین بیلدر، SPD.

۱- مقدمه

امروزه جهت تامین آسایش حرارتی ساختمان‌ها، انرژی بسیاری صرف سرمایش و گرمایش محیط‌های داخلی شده و بخش ساختمان ۴۰٪ تا ۵۰٪ کربن منتشر شده را به خود اختصاص می‌دهد [۱]. وجود ۳۰۰ روز آفتابی در بسیاری از مناطق ایران، ضرورت استفاده از روش‌های نوین سرمایش ساختمان را همزمان با کاهش مصرف انرژی و افزایش شرایط کیفی ضروری ساخته است. استفاده مناسب از روشنایی روز، طراحی مطلوب محل پنجره‌ها، کاهش بار سرمایش و گرمایش ساختمان با هدف کاهش مصرف انرژی و بهبود همزمان آسایش انسان اهمیت بسیار دارد [۲].

^۱ نویسنده مسئول، کارشناسی ارشد، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه شیراز shaer.jalil@gmail.com

^۲ استادیار، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه شیراز arch.rv@shirazu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۰۶، تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۴/۲۶

در ساختمان‌های متداول حدود نیمی از انرژی از طریق پنجره‌ها هدر می‌رود، بنابراین راهکارهایی مانند استفاده از سایبان، پرده و پنجره‌های چند جداره برای جلوگیری از هدر رفتن انرژی موثر است. به این ترتیب انتخاب نوعی شیشه که بتواند مقدار شدت نور عبوری، گرما و دما را کنترل کرده و در زمان دلخواه تغییر رنگ دهد مطلوب می‌باشد [۳]. شیشه‌های هوشمند یکی از انواع مصالح نوین ساختمانی است که می‌تواند جهت کاهش مصرف انرژی مورد استفاده قرار گیرد. مهم‌ترین ویژگی شیشه‌های هوشمند قابلیت تغییر میزان شفافیت و رنگ، جهت کنترل نور و کاهش اتلاف انرژی است.

شیشه‌های هوشمند در انواع مختلف ویژگی‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند. شیشه هوشمند الکتروکرومیک قابلیت‌های فراوانی جهت کاهش مصرف انرژی، CO₂ تولیدی و کنترل بهره خورشیدی داشته و کاربرد آن‌ها در مناطق با آب و هوای مختلف جهت انواع کاربری‌های ساختمانی پیشنهاد شده است. تاواریس و همکاران [۴] در پژوهشی با استفاده از نرم افزار ESP-R به بررسی تاثیر شیشه‌های الکتروکرومیک (EC) بر مصرف انرژی در آب و هوای مدیترانه‌ای پرداخته‌اند. بر اساس نتایج استفاده از شیشه الکتروکرومیک در مقایسه با شیشه یک جداره و دو جداره تاثیر زیادی بر کاهش بار سرمایش دارد و استفاده از آن در جبهه شرقی و غربی برخلاف جبهه جنوبی، بسیار مناسب است. پژوهشی دیگر تاثیر شیشه‌های الکتروکرومیک را بر بار سرمایش و گرمایش ساختمان‌های غیر مسکونی در سه شهر ایتالیا بررسی کرده است [۵].

نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در اقلیم گرم، استفاده از شیشه‌های الکتروکرومیک در نمای جنوبی سبب کاهش مصرف انرژی می‌گردد [۶]. با توجه به قابلیت‌های شیشه الکتروکرومیک در کنترل خواص نوری [۷]، کاربرد آن در جبهه جنوبی ساختمان‌های اداری سبب کاهش ناراحتی ناشی از تابش خیره کننده می‌شود [۸]. این شیشه‌ها باعث کاهش بار سرمایش و گرمایش و روشنایی شده و رضایت ساکنین در ساختمان‌های مسکونی را افزایش می‌دهند [۹]. نتایج بررسی این شیشه‌ها در ۱۶ منطقه آب و هوایی آمریکا، کاهش مصرف انرژی تا ۵۰٪ و نیز CO₂ تولیدی ساختمان‌ها را نشان می‌دهد. برخی پژوهش‌ها بهترین عملکرد شیشه الکتروکرومیک را در ساختمان‌های اداری آب و هوای شمالی آمریکا ذکر کرده‌اند [۱۰]. شیشه الکتروکرومیک می‌تواند گزینه‌ای مناسب جهت آسایش بصری بوده و تنظیمات آن به صورت اتوماتیک یا دستی متناسب با نیازهای کاربران انجام شود [۱۱]. این شیشه‌ها در کاهش حساسیت نوری^۱ عملکرد بهتری نسبت به پنجره با کرکره دستی داشته و می‌تواند نور مرئی بین ۳٪ تا ۶۰٪ از خود عبور دهد [۱۲].

در رابطه با شیشه‌های ترموکرومیک نیز پژوهش‌های بسیاری انجام شده است. شیشه‌های ترموکرومیک قادر به تعدیل میزان انتقال هر دو نور مرئی و مادون قرمز هستند و در نتیجه تغییر دما، میزان بهره خورشیدی و نیاز انرژی سرمایشی را در تابستان کاهش می‌دهند.

بر اساس نتایج پژوهشی مرتبط، کاربرد این نوع شیشه‌ها در مقایسه با شیشه شفاف معمولی حدود ۵ درصد در اقلیم سرد و ۲۰ درصد در اقلیم‌های گرم کاهش انرژی به دنبال داشته اما مطلوبیت نور روز را تضمین نمی‌کند و دمای بهینه جهت تغییر حالت شیشه نیز به اقلیم بستگی ندارد [۱۳]. در پژوهشی شبیه سازی انرژی پلاس برای یک ساختمان اداری بزرگ، کل انرژی سرمایش و گرمایش و نور روز و تهویه را در اقلیم مختلط گرم و سرد و گرم و مرطوب در آمریکا برآورد کرده است.

¹ Discomfort glare

این نتایج کاهش در مصرف انرژی سالانه کلی را حدود ۱۴ درصد برای شیشه‌های بزرگ تا متوسط (بیش از ۳۰ درصد نسبت شیشه به دیوار) در شیکاگو و ۱۰ تا ۱۷ درصد در هوستون با شیشه بزرگتر از ۴۵ درصد در جهات جنوب، شرق و غرب نشان می‌دهد [۱۴]. برخی پژوهش‌ها به بررسی جنس و ضخامت فیلم‌های نانوکامپوزیت با ویژگی‌های ترموکرومیک پرداخته و کاربرد آن‌ها را با ضخامت و ترکیبات متفاوت برای استفاده در شیشه‌های هوشمند جهت ذخیره انرژی بررسی کرده‌اند [۱۵]. در پژوهشی از لایه‌های مختلف ترکیب مواد ترموکرومیک روی شیشه، جهت بهبود وضعیت نوری بام در یک باغ زمستانی استفاده شده و کاهش بسیاری را در میزان انتقال انرژی نشان داده است [۱۶]. استفاده از ترموکرومیک الاستومتری در پوشش بام‌ها با شیب کم سبب تغییر ۲۲ تا ۲۵ درصد در میزان انعکاس نور خورشید و حداکثر بازتاب خورشیدی ۷۰ درصد در حالت بدون رنگ شده است.

در حال حاضر با توجه به طول عمر کم این مواد و کاهش کم انرژی، استفاده از آن‌ها در پوشش‌های بام از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست [۱۷]. آزمایش شیشه‌ها با سطح بزرگ و پوشش ترموکرومیک در مقیاس واقعی، تغییرات آن‌ها را در نتیجه زاویه تابش اشعه و دمای هوای خارجی نشان داده است. شبیه‌سازی‌ها به دو صورت عددی و نیز با استفاده از انرژی پلاس انجام شده و نشان می‌دهد که دمای ایده‌آل برای تغییر حالت باید بر اساس تعادل حرارتی فضا باشد و نه دمای هوای خارج. همچنین با توجه به زوایای مختلف تابش امکان استفاده از نور طبیعی و ارتقا شرایط محیط داخلی وجود دارد [۱۸].

در بررسی عملکرد شیشه‌های کریستال مایع در برابر نور روز، تاثیر آن‌ها با نسبت سطح شیشه ۱:۹ برای جبهه جنوبی سنجدیده شده و ضرایب خیرگی در دو حالت مات و شفاف محاسبه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شیشه‌های کریستال مایع با شفافیت ۲۷ تا ۷۱ درصد می‌تواند خیرگی ناشی از نور خورشید را کنترل نماید [۱۹]. در پژوهشی تاثیر شیشه‌های گازوکرومیک بر مصرف انرژی ساختمان اداری تجاری با استفاده از نرم افزار E-quest شبیه‌سازی و با شیشه‌های الکتروکرومیک مقایسه شده است.

براساس این نتایج، مناطق با تابستان گرم و زمستان سرد مناسب‌ترین مناطق برای کاربرد شیشه‌های هوشمند هستند که کاهش بار ۲۸/۴ درصد برای عملکرد تهویه مطبوع را دنبال دارد و نیازی به تغییر ساعتی ویژگی‌های شیشه نیست [۲۰]. بهترین مقادیر انتقال نور زمانی است که واحد با شیشه دوجداره با لایه ای با ضخامت متوسط (۵۶۰ میلی‌متر) پوشیده شده باشد [۲۱].

واژه Suspended particle device (SPD) به معنی وسیله‌ای با ذرات معلق بوده و منظور از آن شیشه‌ای است که در صورت وجود جریان برق متناوب می‌تواند ویژگی انتقال نوری خود را از حالت مات به شفاف تغییر دهد. از این شیشه‌ها جهت کنترل دماهای داخلی ساختمان می‌توان بهره گرفت. گاوش و همکاران [۲۲] به اندازه‌گیری مقادیر انتقال حرارت سطحی برای این نوع شیشه‌ها و مقایسه آن با واحدهای شیشه دوجداره پرداخته‌اند. براساس نتایج آن‌ها افزودن یک لایه شیشه SPD به واحد شیشه دوجداره سبب کاهش مقادیر انتقال حرارت سطحی می‌شود. در پژوهشی جدید رفتار حرارتی این شیشه‌ها در یک اتاقک آزمایشی سنجدیده شده و میزان کاهش بار سرمایشی محاسبه شده است. در حالتی که قابلیت تغییر میزان شفافیت شیشه‌ها از ۵ تا ۵۵ درصد باشد، حداکثر دمای هوا بین ۱۱ تا ۱۵ درصد کاهش را در مقایسه با شیشه دوجداره نشان می‌دهد. البته میزان این کاهش و در نتیجه کارایی شیشه‌ها در طول روز متغیر است [۲۳].

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که رابطه مستقیم بین میزان انتقال حرارت شیشه و ضریب شفافیت آسمان وجود دارد. برای ضریب شفافیت کمتر از ۰/۵ در جداره جنوبی میزان انتقال شیشه در دو حالت شفاف و مات مساوی ۱۷ و ۱/۱ درصد بوده است.

برای ضریب بالاتر از ۰/۵ انتقال نور مستقیم غالب بوده و رابطه خطی بین این ضریب و ضریب انتقال شیشه وجود دارد [۲۴]. این شیشه‌ها قابلیت تغییر از رنگ سیاه به خاکستری شفاف را دارند. در برخی پژوهش‌ها ضخامت لایه و ضریب جذب لایه فعال دربرگیرنده ذرات تغییر داده شده و میزان انتقال مستقیم و پراکنده و انعکاسی و کلی همزمان با تغییر رنگ و شفافیت به عنوان عاملی از ضخامت لایه محاسبه شده است. با اندازه‌گیری طیفی نور برای طیف اشعه‌های انتقالی و پراکنده، ضخامت بهینه لایه (در مقیاس نانومتر) را مشخص می‌کند [۲۵ و ۲۶].

به این ترتیب شیشه‌های هوشمند قابلیت فراوانی در کاهش مصرف انرژی و کنترل تابش خورشید داشته و می‌تواند در مناطق مختلف با اقلیم‌ها و کاربری‌های گوناگون کاربرد داشته باشد. علیرغم وجود اقلیم‌های مختلف در ایران تاکنون به بررسی میزان کارایی شیشه‌های هوشمند در ساختمان‌ها پرداخته نشده است. با توجه به ضرورت کاهش مصرف انرژی، هدف از پژوهش حاضر بررسی انواع شیشه‌های هوشمند (ترموکرومیک، گازکرومیک، الکتروکرومیک و اس پی دی) و تحلیل عملکرد آن‌ها بر میزان بهره خورشید و بار سرمایش در ساختمانی اداری در شهر بوشهر است.

۲- شیشه‌های هوشمند^۱

منظور از شیشه‌های هوشمند، انواع شیشه‌هایی است که با ممانعت از عبور بخش مشخصی از پرتو نور خورشید سبب کاهش اتلاف حرارت در ساختمان‌ها می‌شوند. با استفاده از این نوع شیشه‌ها میزان مصرف انرژی با افزایش بازده گرمایی در هوای سرد و کاهش آن در هوای گرم بهبود می‌یابد [۲۷]. در یک دسته بندی کلی می‌توان انواع شیشه‌های هوشمند را به شیشه‌های ترموکرومیک، کریستال مایع، الکتروکرومیک، گازکرومیک و SPD تقسیم بندی نمود. شیشه‌های ترموکرومیک^۲، شیشه‌هایی با رنگ متغیر نسبت به تغییرات دمایی هستند [۲۰]. لایه‌های نازک ترموکرومیک در دماهای پایین (دمای اتاق) با ساختار مونوکلینیک، رفتار نیمه هادی داشته و دارای انعکاس اندک است.

با افزایش دما و تغییر ساختار ماده ترموکرومیک به ساختار روتایل (حالت گرم)، مانند یک شبه فلز عمل کرده و طیف وسیعی از پرتو خورشید را بازتاب می‌دهد. این شیشه از شیشه‌های غیر فعال بوده و بدون جریان الکتریسته کار می‌کند. رنگ آبی شیشه را می‌توان با اضافه کردن فلئور به آن به قهوه‌ای تغییر داد [۲۷]. شیشه‌های گازکرومیک^۳ از دو پانل شیشه، یک لایه گاز میانی و لایه پوششی روی شیشه خارجی تشکیل شده‌اند. با برقراری جریان الکتریسته و عبور نور، واکنش شیمیایی در مواد گازکرومیک موجب تغییر رنگ شیشه و کاهش میزان نور تابشی از خورشید می‌شود.

¹ Smart Glass

² Thermochromic

³ Gasochromic

مدت زمان لازم برای تغییر رنگ شیشه‌ها ۲۰ ثانیه است. با وجود عملکرد مناسب در کنترل نور و انرژی دریافتی از خورشید و نیز سرمایه‌گذاری‌های بسیار در این زمینه، به دلیل دشواری و پیچیدگی تزریق گاز بین شیشه‌ها تاکنون در مقیاس تجاری تولید نشده‌اند [۲۰].

در شیشه‌های الکتروکرومیک^۱ عبور جریان الکتریسته با ایجاد واکنش شیمیایی سبب تغییر خصوصیات نوری مواد شده و ویژگی‌های جذب و انعکاس نور را تغییر می‌دهد [۲۸]. شیشه‌های الکتروکرومیک در حالت روشن (عبور جریان الکتریسته) کدر بوده و در حالت خاموش شفاف هستند. شیشه‌های الکتروکرومیک از دو لایه رسانای در طرفین، یک لایه یون مثبت، لایه رسانای الکترومیک و لایه منفی در قسمت‌های میانی تشکیل شده‌اند. لایه یون مثبت جهت ذخیره‌سازی لیتیوم بی‌رنگ بوده و لایه منفی الکترو از اکسید تنگستن و رنگی است [۲۹]. شیشه‌های کریستال مایع^۲، با عبور جریان الکتریسته شفاف شده و با قطع جریان به دلیل جهت‌گیری تصادفی کریستال‌ها و پخش نور، شیشه مات می‌شود [۳۱]. جهت ساخت این شیشه‌ها از دولایه شفاف قلع به عنوان الکترو و لایه‌ای از کریستال مایع بین آن‌ها استفاده شده است. از ویژگی‌های شیشه‌ی کریستال مایع می‌توان مصرف کم الکتریسته، ایجاد فضای محفوظ و حفظ حریم، سهولت تفکیک و تجمع فضا، هزینه تعمیر و نگهداری کم، دوام و طول عمر بالا، قابلیت تولید در ابعاد وسیع، توانایی کاهش میزان خیرگی نور را نام برد [۳۲]. با وجود این شیشه‌های کریستال مایع در جهت کاهش حرارت و کنترل تابش خورشید محدودیت‌هایی دارند و جریان گرما با عبور از طریق شیشه تغییر چندانی نمی‌کند [۳۳].

در شیشه‌های SPD استفاده از فناوری ذرات معلق در این شیشه‌ها باعث ممانعت از عبور نور UV به میزان ۹۹٪، عمر طولانی بیش از ۱۰۰,۰۰۰ ساعت، کنترل میزان نور دریافتی [۳۴]، کنترل انرژی و حرارت می‌شود. با قطع جریان الکتریسته، به علت نامنظم بودن و تداخل ذرات معلق، شیشه کدر شده و با ایجاد جریان، ساختار منظم ذرات در راستای دو قطب، سبب عبور نور از شیشه و شفافیت آن می‌شود [۳۵]. این شیشه‌ها در صنایع ساخت هواپیما و خودرو نیز به کار می‌روند. شیشه‌های هوشمند علاوه بر تفاوت در ویژگی‌های نوری مانند بازتاب خورشیدی^۳، بازتاب مرئی^۴، انتقال حرارت خورشیدی^۵ و انتقال حرارت مرئی^۶، در میزان شفافیت، رنگ، نحوه کنترل و مدت زمان تغییر نیز متفاوت هستند. در جدول (۱) شیشه‌های هوشمند به ترتیب از نظر لایه‌های تشکیل دهنده و عملکرد در مقابل نور و جریان الکتریسته با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

¹ Electrochromic

² Liquid Cristal


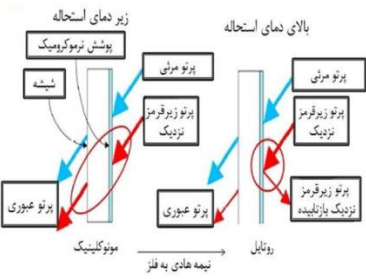
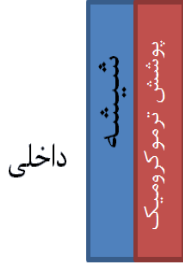

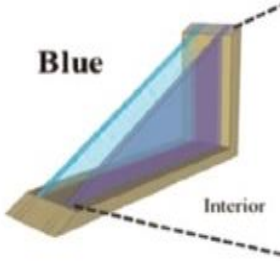


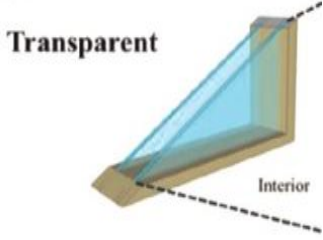


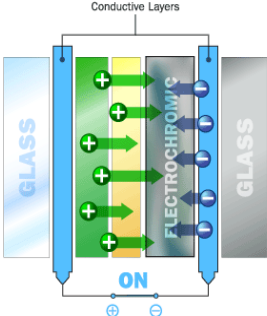
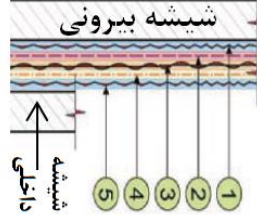
³ Solar Reflectance


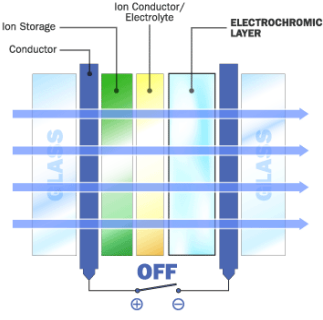

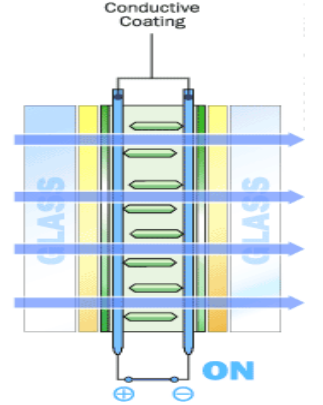

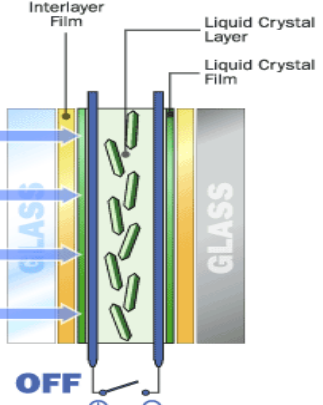

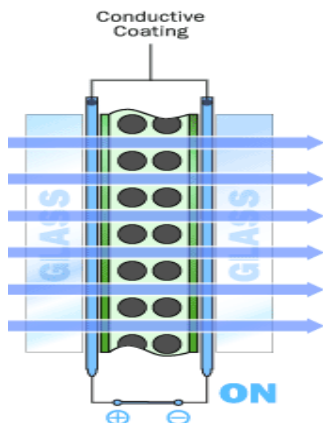
⁴ Visible Reflectance

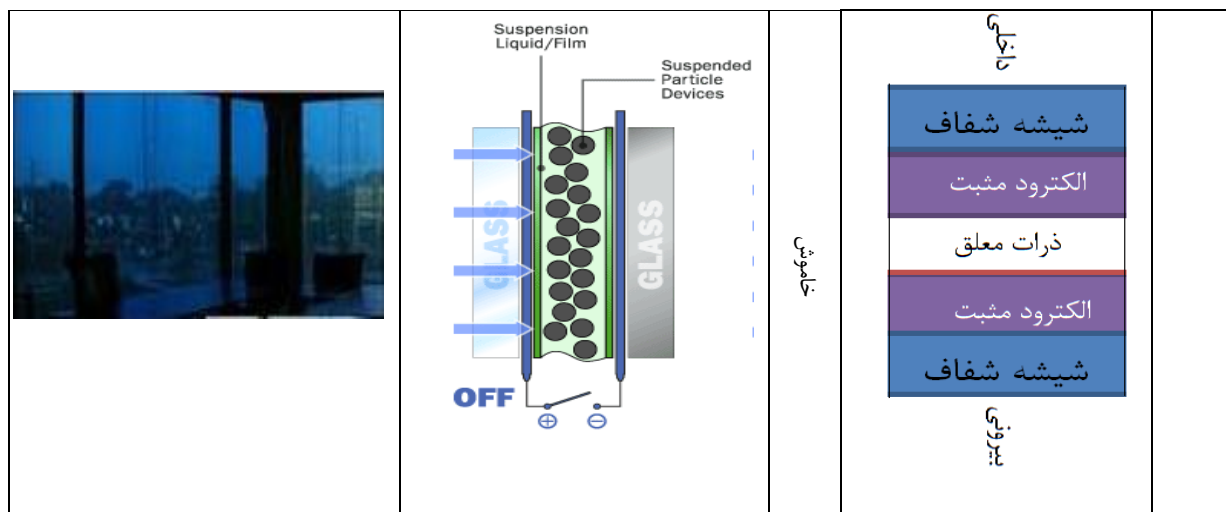
⁵ Solar Transmission

⁶ Visible Transmission

جدول ۱- انواع شیشه‌های هوشمند و ویژگی‌های آن‌ها

نمونه	عملکرد	لایه‌های تشکیل دهنده	انواع شیشه
			نروم کرومیک
		<p>روشن</p> 	گاز کرومیک
		<p>خاموش</p> 	گاز کرومیک
		<p>روشن</p> 	الکترو کرومیک

		<p>خاموش</p>	<p>۱. لایه رسانا ۲. لایه یون مثبت ذخیره سازی لیتیوم بی رنگ اکسید فلزی ۳. هادی / لایه الکترومیک ۴. لایه منفی الکترو ر نگی اکسید تنگستن ۵. لایه رسانا</p>	
		<p>روشن</p>	<p>داخلی</p> <p>شیشه شفاف</p> <p>الکترو د منفی</p> <p>لایه کریستال مایع</p> <p>الکترو د مثبت</p> <p>شیشه شفاف</p> <p>بیرونی</p>	<p>کریستال مایع</p>
		<p>خاموش</p>		
		<p>روشن</p>		<p>اس بی دی</p>



۳- اقلیم بوشهر

شهر بوشهر با عرض جغرافیایی ۲۸/۹۶ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۲/۸۳ درجه شرقی در نواحی ساحلی خلیج فارس قرار دارد. بوشهر با ارتفاع ۸ متر از سطح دریا دارای آب و هوای گرم و مرطوب با متوسط دمای سالانه 25°C است. جهت باد غالب شمال غرب بوده و متوسط سرعت سالانه آن $2/5\text{ m/s}$ می‌باشد. متوسط تابش خورشیدی افقی پراکنده^۱ سالانه $73/3\text{ kWh/m}^2$ و متوسط تابش مستقیم خورشید^۲ معادل $95/8\text{ kWh/m}^2$ است. به این ترتیب نیاز غالب سالانه بوشهر بار سرمایشی است. جدول (۲) میانگین ماهانه آب و هوای بوشهر را نشان می‌دهد.

۴- روش تحقیق

در این پژوهش به منظور مقایسه عملکرد شیشه‌های هوشمند در ساختمان‌های اداری، ساختمانی یک طبقه به عنوان نمونه به ابعاد $20\text{ m} * 10\text{ m}$ و ارتفاع ۴ متر با کشیدگی شرقی- غربی برای شبیه سازی انتخاب شده است. مطابق شکل (۱) این ساختمان به عنوان نمونه‌ای از ساختمان اداری کوچک شامل فضاهای کار، اتاق مدیر، بایگانی، فضای انتظار و توالی می‌باشد. شبیه سازی‌ها با استفاده از نرم افزار دیزاین بیلدر^۳ [۳۷] به عنوان ابزاری قدرتمند با موتور تحلیل انرژی پلاس^۴ جهت شبیه سازی انرژی ساختمان انجام شده است. شکل (۲) مدل ساختمان شبیه سازی شده در این نرم افزار را نشان می‌دهد.

¹ Diffuse horizontal solar radiation

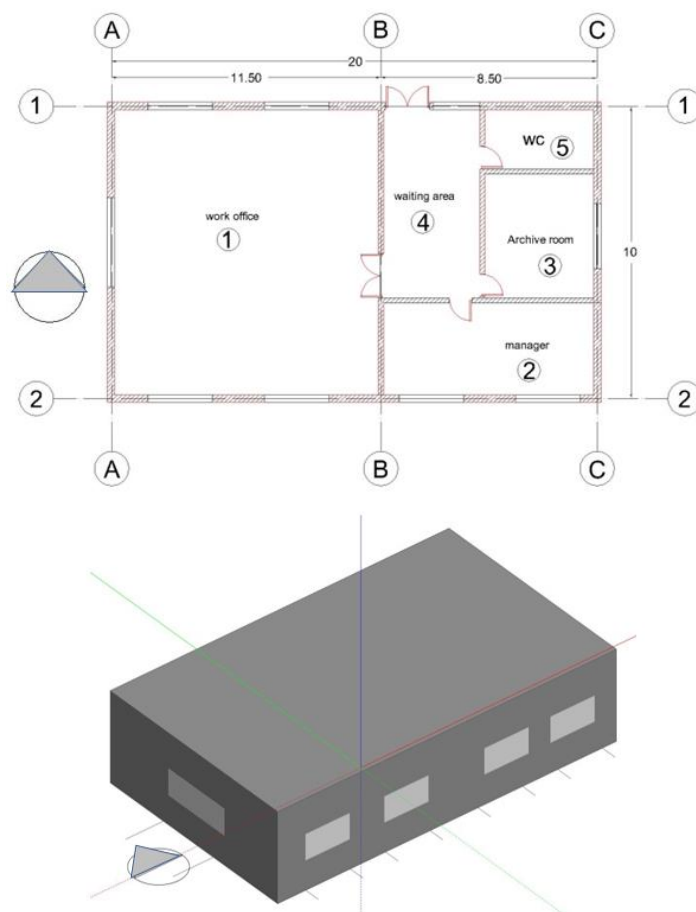
² Direct normal solar radiation

³ DesignBuilder

⁴ EnergyPlus

جدول ۲- شرایط اقلیمی شهر بوشهر از سال ۱۳۸۵-۱۳۹۵ [۳۶]

متوسط دمای خشک هوا (°C)	کم‌ترین دمای خشک هوا (°C)	بیشترین دمای خشک هوا (°C)	متوسط رطوبت نسبی (%)	سرعت جریان باد (m/s)	
۱۴/۹	۸	۲۲/۲	۷۴/۱	۴	Jan
۱۶/۵	۱۰/۶	۲۳/۹	۷۲/۴	۴/۵	Feb
۱۹/۹	۱۳	۲۹/۳	۶۸/۹	۴/۲	Mar
۲۴/۲	۱۷/۴	۳۴	۶۵/۸	۴/۳	Apr
۲۹/۳	۲۲/۹	۳۶/۵	۵۹/۴	۴/۵	May
۳۱	۲۶/۷	۳۷/۸	۶۵/۵	۴/۱	Jun
۳۳/۱	۲۷/۷	۳۸/۸	۶۷/۲	۳/۹	Jul
۳۳/۷	۲۸/۸	۳۸/۴	۷۱/۵	۳/۸	Aug
۳۱/۳	۲۶/۲	۳۷/۵	۷۰/۲	۳/۵	Sep
۲۸/۴	۲۲	۳۵/۲	۶۷/۹	۳/۲	Oct
۲۲	۱۳	۳۱/۶	۶۴/۶	۳/۸	Nov
۱۷/۱	۹/۵	۲۶/۵	۷۴/۵	۳/۷	Dec



شکل ۱- پلان ساختمان اداری جهت شبیه‌سازی / شکل ۲- ساختمان شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار دیزاین بیلدر

۴-۱- شرایط شبیه سازی

جهت انجام شبیه سازی طبق استاندارد اشری^۱، نقاط تنظیمی گرمایش^۲ و سرمایش^۳ به ترتیب ۲۲ و ۲۴ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد. مصالح و لایه‌های تشکیل دهنده‌ی دیوار بیرونی، دیوار داخلی و سقف در همه حالت‌های شبیه سازی یکسان و مطابق با جدول (۳) است.

جدول (۴) مشخصات فنی و فیزیکی شیشه‌های مدلسازی شده را نشان می‌دهد. مطابق جدول شیشه‌های شبیه سازی شده در مقادیر بازتاب خورشیدی^۴، بازتاب مرئی^۵، انتقال حرارت خورشیدی^۶ و انتقال حرارت مرئی^۷ متفاوت هستند. تفاوت میان این مقادیر سبب ایجاد عملکرد حرارتی متفاوت در طول زمستان و تابستان و تاثیر بر بار سرمایش و گرمایش و نیز مصرف انرژی ساختمان می‌شود.

جدول ۳- مشخصات مصالح ساختمان شبیه سازی شده در نرم افزار دیزاین بیلدر

R _c -value (m ² K)/W	U-value W/(m ² K)	ضخامت لایه (mm)	لایه تشکیل دهنده	
۲/۸۵	۰/۳۵	۱۰۰	آجرکار بیرونی ^۸	دیوار بیرونی
		۱۰۰	عایق پلی استایرن اکس پی اس ^۹	
		۱۰۰	بلوک بتنی ^{۱۰}	
		۱۰	پلاستر گچ ^{۱۱}	
۰/۶۱	۱/۶۳	۲۰	صفحه برد گچ ^{۱۲}	دیوار داخلی
		۱۰	هوا	
		۲۰	صفحه برد گچ	
۲/۰۹	۰/۴۷	۱۰	آسفالت	پشت بام
		۱۰	صفحه فیبر برد	
		۴۰	عایق پلی استایرن اکس پی اس ^{۱۳}	
		۱۰	بتن	
		۱۵	پلاستر گچ	

¹ ASHRAE

² Heating setpoint

³ Cooling setpoint

⁴ Solar Reflectance

⁵ Visible Reflectance

⁶ Solar Transmission

⁷ Visible Transmission

⁸ Brickwork Outer Leaf

⁹ EPS Expanded Polystyrene

¹⁰ Concrete Block

¹¹ Gypsum Plastering

¹² Gypsum plasterboard

¹³ XPS Extruded Polystyrene

ویژگی‌های مربوط به هر شیشه در نرم افزار شبیه سازی لحاظ گردید. نرم افزار دیزاین بیلدر قابلیت شبیه سازی شیشه‌های هوشمند را دارا است. ویژگی‌های هر شیشه مورد مطالعه برای نرم افزار تعریف شده است که می‌تواند بهره‌خوشیدی و بار سرمایش ساختمان را با توجه به ویژگی هر شیشه هوشمند مورد تحلیل و محاسبه قرار دهد.

مدت زمان شبیه سازی یک سال نمونه بوده و ساعات اداری کار فعال ساختمان از در نظر گرفته شده است. میزان بار حرارتی داخلی در فضاهای اداری و حداقل سطح روشنایی لازم منظور شده است. لازم به ذکر است که این مقادیر در همه حالت‌های شبیه سازی یکسان بوده و تنها متغیر مورد استفاده، شیشه‌های مختلف مورد استفاده است. پس از انجام شبیه سازی‌ها، بار سرمایشی و میزان بهره‌خوشیدی در حالت‌های مختلف در مقایسه با ساختمان با شیشه معمولی سه میلی متری قرار گرفته است.

جدول ۴- مشخصات شیشه‌های هوشمند شبیه سازی شده

انتقال حرارت مرئی	انتقال حرارت خوشیدی	بازتاب مرئی	بازتاب خوشیدی	ترموکرومیک نمونه دما (°C)
۰/۷۳	۰/۴۴	۰/۱۳	۰/۲۱	۲۰
۰/۶۰	۰/۳۷	۰/۲۰	۰/۲۴	۳۰
۰/۲۷	۰/۱۸	۰/۵۲	۰/۳۷	۴۰
۰/۲۱	۰/۱۳	۰/۵۹	۰/۴۱	۵۰
گاز کرومیک				
۰/۶۴	۰/۴۳	۰/۱۸	۰/۳۴	شفاف
۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۸	کدر
الکتروکرومیک				
۰/۵۰	۰/۳۵	۰/۱۲		شفاف
۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۰۹	-	کدر
SPD				
۰/۴۴۵	۰/۳۴۴	۰/۱۰۸	۰/۱۵۷	شفاف
۰/۰۰۴	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۱۱	کدر

۴-۲- معادلات حاکم بر تحلیل‌ها

محاسبات بهره خورشیدی و بار سرمایش در نرم افزار دیزاین بیلدر بر اساس قوانین و استانداردهای اشری می‌باشد که مرتبط با عوامل تاثیر گذار بسیاری می‌باشد. در این نرم افزار جهت محاسبه بهره خورشیدی از معادله (۱) استفاده شده است. در این معادله α میزان جذب خورشیدی سطح^۱ است. همچنین θ زاویه برخورد اشعه‌های خورشید، S مساحت سطح، S_s مساحت سطحی که خورشید به آن می‌تابد. I_b شدت تابش مستقیم، I_s میزان شدت تابش پراکنده خورشید، I_g میزان شدت تابش بازتاب از زمین، F_{ss} زاویه بین سطح و آسمان و F_{sg} زاویه بین سطح و زمین می‌باشد.

$$Q_{so} = \alpha \cdot \left(I_b \cdot \cos \theta \cdot \frac{S_s}{S} + I_s \cdot F_{ss} + I_g \cdot F_{sg} \right) \quad (1)$$

$$Q_{\dot{T}} = A_{\dot{T}} \cdot (N_{\dot{T}} \cdot N_A \cdot I_{SRG} \cdot Z + k_{\dot{T}} \cdot (t_e - t_i)) \quad (2)$$

همچنین با استفاده از معادله (۲) می‌توان میزان بار سرمایش ساختمان را محاسبه نمود. که در این معادله $Q_{\dot{T}}$ میزان بار سرمایش می‌باشد که بر حس و ات محاسبه می‌گردد.

در معادله (۲)، $A_{\dot{T}}$ مساحت پنجره‌ها بر حسب m^2 ، $N_{\dot{T}}$ ضریب شیشه^۲، N_A ضریب سایه^۳، I_{SRG} شدت تابش خورشید^۴ بر حسب W/m^2 ، Z میزان ضریب کاهش^۵، $k_{\dot{T}}$ میزان انتقال حرارتی از شیشه بر حسب $\frac{W}{m^2K}$ ، t_e دمای بیرون بر حسب $^{\circ}C$ و t_i دمای داخل بر حسب $^{\circ}C$ است.

۵- تحلیل داده‌ها و نتایج

پس از انجام شبیه سازی‌ها و استخراج نتایج، عملکرد حرارتی ساختمان‌ها، میزان بهره خورشیدی و بار سرمایشی ساختمان در طول سال به عنوان پارامترهای مورد بررسی انتخاب شده است. ذکر این نکته ضروری است که در شهر بوشهر با توجه به اقلیم بسیار گرم، ساختمان‌ها در طول کل سال (حتی در زمستان) در ساعاتی از روز نیازمند سرمایش هستند. به این ترتیب نیاز به سرمایش بسیار بیشتر از گرمایش بوده و در بازه‌هایی از زمستان نیز استفاده از تجهیزات سرمایشی جهت تامین آسایش حرارتی ضروری است. ضمن آنکه در ساختمان‌های با کاربری اداری، بالا بودن میزان بار حرارتی داخلی سبب تشدید این امر می‌شود. در شکل (۳) بر اساس نتایج شبیه سازی‌ها، بهره خورشیدی ساختمان در حالت‌های مختلف در طول ماه‌های سال نشان داده شده است. مطابق شکل، میزان بهره خورشیدی شیشه‌ی شفاف ساده در همه‌ی ماه‌های سال نسبت به سایر شیشه‌ها بالاتر می‌باشد. این مساله با توجه به آن که در شیشه‌های متداول دریافت

¹ Solar absorptance of the surface

² Glazing factor

³ Shading factor

⁴ Intensity of solar radiant gain

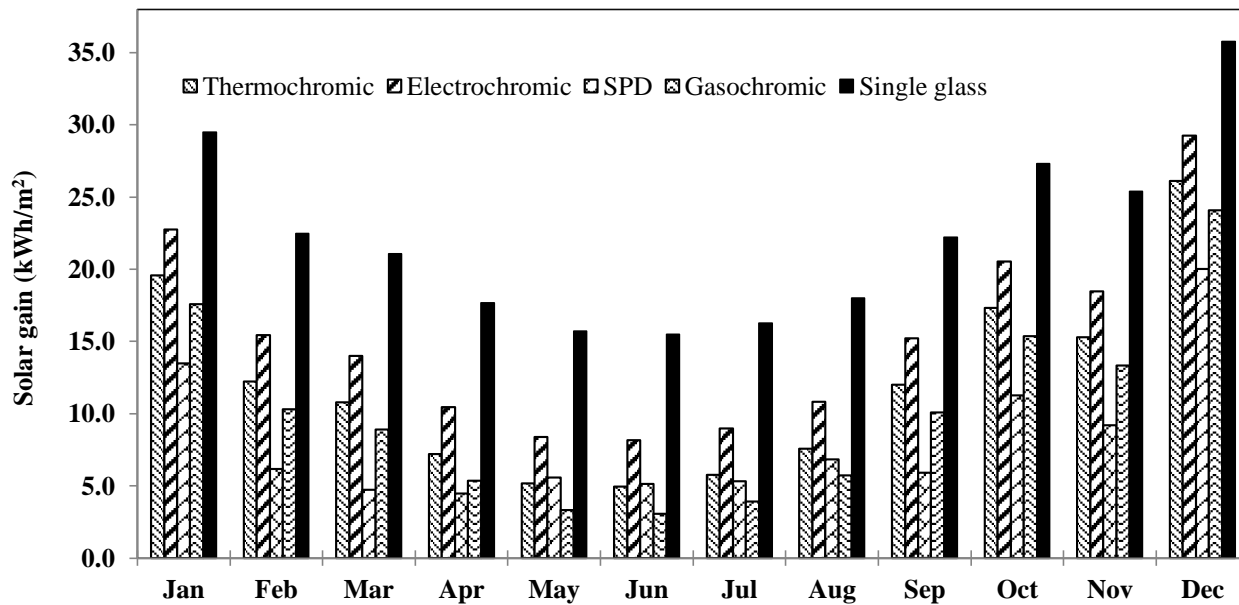
⁵ Reduction factor

نور روز بر اساس طیف انتخابی انجام نشده و کنترل شده نیست، منطقی می‌باشد. با توجه به آن که بار غالب حرارتی در شهر بوشهر، بار سرمایشی است و نیز با توجه به میزان بسیار بیشتر آن در مقایسه با بار گرمایشی و هزینه‌های تامین آن، اولویت در کاهش بار سرمایش ساختمان است.

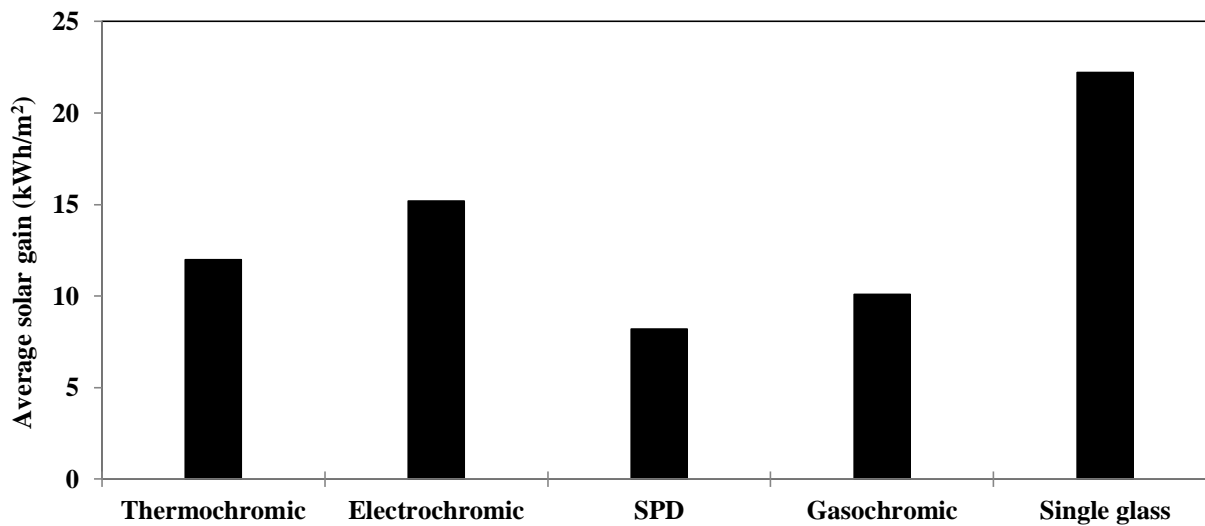
طبق شکل (۳) شیشه هوشمند گازکرومیک در اکثر ماه‌های سال دارای کم‌ترین بهره‌خوردگی است و پس از آن به ترتیب شیشه‌های SPD، ترموکرومیک و الکتروکرومیک قرار دارند. با توجه به قابلیت شیشه‌های هوشمند در کنترل تابش خورشید، اختلاف میزان بهره‌خوردگی بین شیشه ساده و شیشه‌های هوشمند در ماه‌های گرم قابل توجه است. گرچه شیشه هوشمند SPD در اکثر ماه‌های سال کم‌ترین میزان بهره‌خوردگی را دارد اما در ماه‌های گرم مانند ژوئیه و اوت، شیشه گازکرومیک کم‌ترین بهره‌خوردگی در میان انواع شیشه‌ها را داراست. مطابق شکل (۳) میزان بهره‌خوردگی شیشه گازکرومیک در ماه ژوئیه (از ماه‌های گرم سال) برای بوشهر $3/9 \text{ kWh/m}^2$ و برای شیشه ساده $16/3 \text{ kWh/m}^2$ می‌باشد. همچنین میزان بهره‌خوردگی شیشه SPD در ماه ژوئیه $5/3 \text{ kWh/m}^2$ بوده و برای شیشه ترموکرومیک و الکتروکرومیک به ترتیب $5/8 \text{ kWh/m}^2$ و 9 kWh/m^2 است. از طرفی اختلاف بین میزان بهره‌خوردگی شیشه ساده و شیشه‌های هوشمند در ماه‌های سرد سال کم‌تر از ماه‌های گرم می‌باشد زیرا شیشه‌های هوشمند با عبور تابش خورشید در زمستان به گرمایش فضا در این ماه‌ها کمک می‌کنند.

در شکل (۴) متوسط بهره‌خوردگی شیشه‌های مورد مطالعه در بوشهر نشان داده شده است. مطابق شکل، شیشه SPD کم‌ترین بهره‌خوردگی را داشته و بعد از آن به ترتیب شیشه‌های گازکرومیک، ترموکرومیک و الکتروکرومیک می‌باشد. میزان متوسط بهره‌خوردگی شیشه SPD در سال برای بوشهر $8/2 \text{ kWh/m}^2$ و به میزان 14 kWh/m^2 کم‌تر از شیشه ساده است.

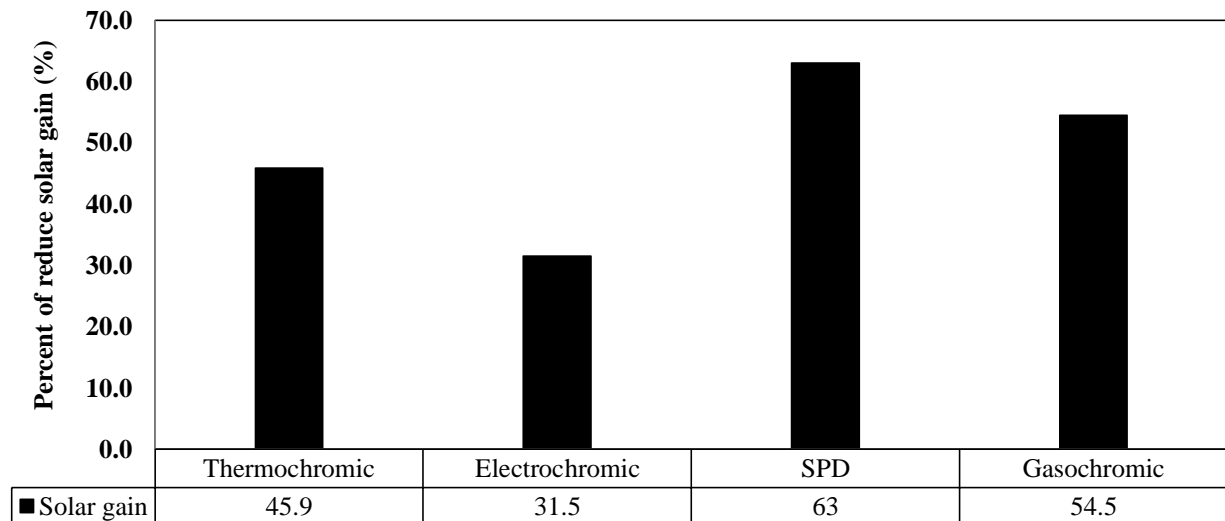
بهره‌خوردگی برای شیشه گازکرومیک به میزان $12/1 \text{ kWh/m}^2$ کم‌تر از شیشه ساده است. شکل (۵) تفاوت میزان بهره‌خوردگی شیشه‌های هوشمند مورد مطالعه را در مقایسه با شیشه ساده نشان می‌دهد. به این ترتیب میزان کاهش بهره‌خوردگی در شیشه‌های SPD، مساوی 63% ، در شیشه گازکرومیک $54/5\%$ و در شیشه‌های ترموکرومیک و الکتروکرومیک به ترتیب $45/9\%$ و $31/5\%$ است.



شکل ۳- مقایسه‌ی بهره‌ی خورشیدی شیشه‌های مورد مطالعه در ماه‌های مختلف سال در بوشهر

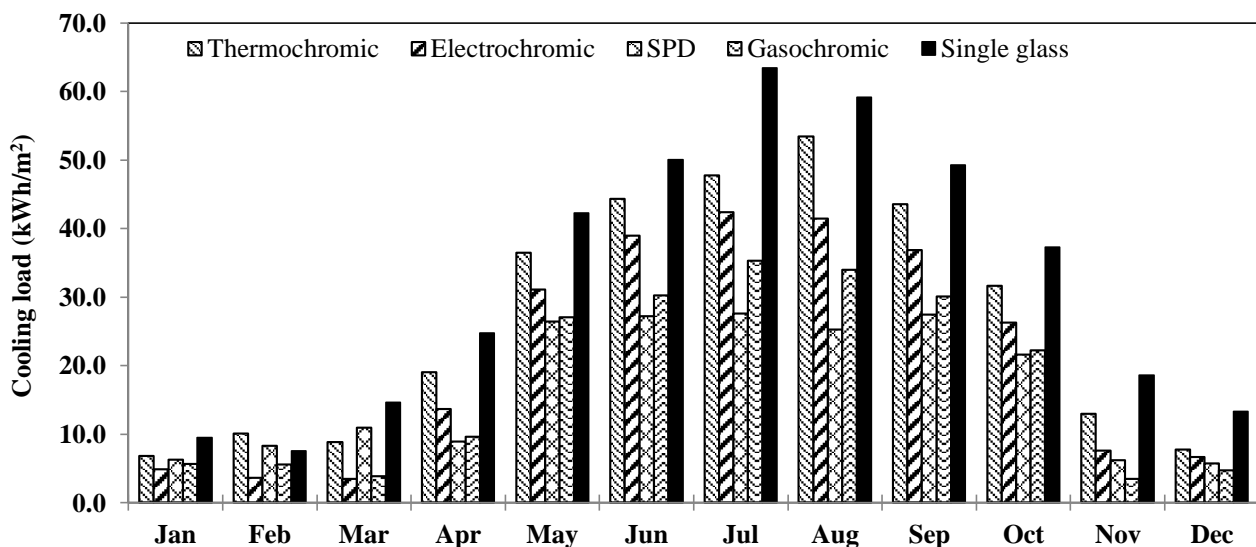


شکل ۴- متوسط بهره‌ی خورشیدی شیشه‌های مورد مطالعه در کل سال برای بوشهر



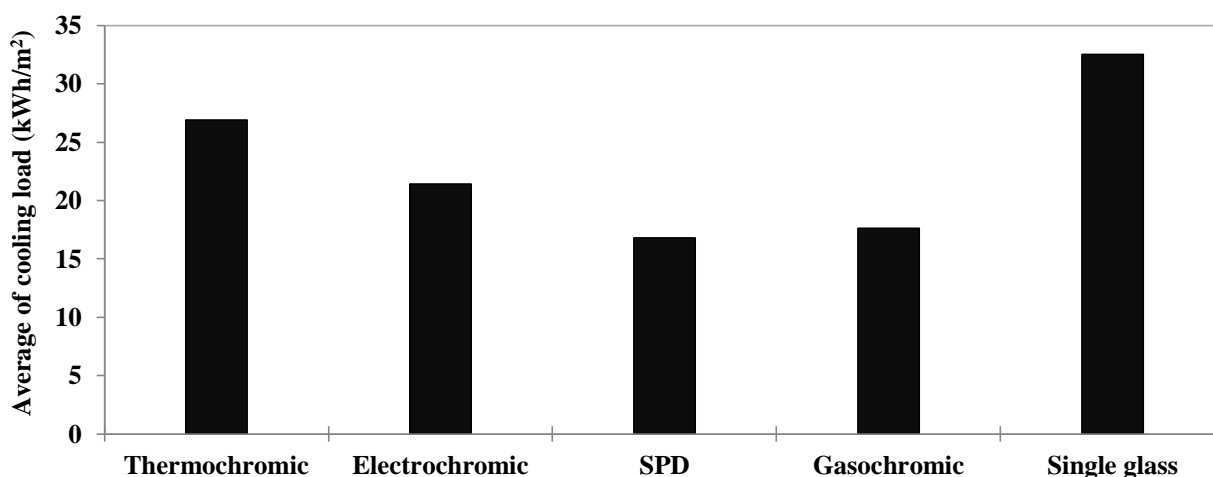
شکل ۵- درصد کاهش بهره‌خوردگی شیشه‌های هوشمند نسبت به شیشه ساده در بوشهر

در شکل (۶) میزان بار برودتی ساختمان‌های نمونه با شیشه‌های هوشمند در مقایسه با شیشه‌ی شفاف ساده نشان داده شده است. مطابق شکل، شیشه‌ی ساده در کل ماه‌های سال دارای بیشترین بار برودتی است. کم‌ترین میزان بار سرمایش در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس در ساختمان با شیشه الکتروکرومیک و در ماه‌های آوریل، مه، ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر در ساختمان با شیشه SPD و پس از آن در ساختمان با شیشه گازکرومیک دیده می‌شود. در ماه ژوئیه، ساختمان با شیشه SPD به میزان $27/6 \text{ kWh/m}^2$ کم‌ترین میزان بار سرمایش را دارا است و بعد از آن به ترتیب شیشه گازکرومیک با $35/3 \text{ kWh/m}^2$ ، الکتروکرومیک با $42/4 \text{ kWh/m}^2$ و ترموکرومیک با $47/7 \text{ kWh/m}^2$ کم‌ترین بار سرمایش را داشته‌اند.

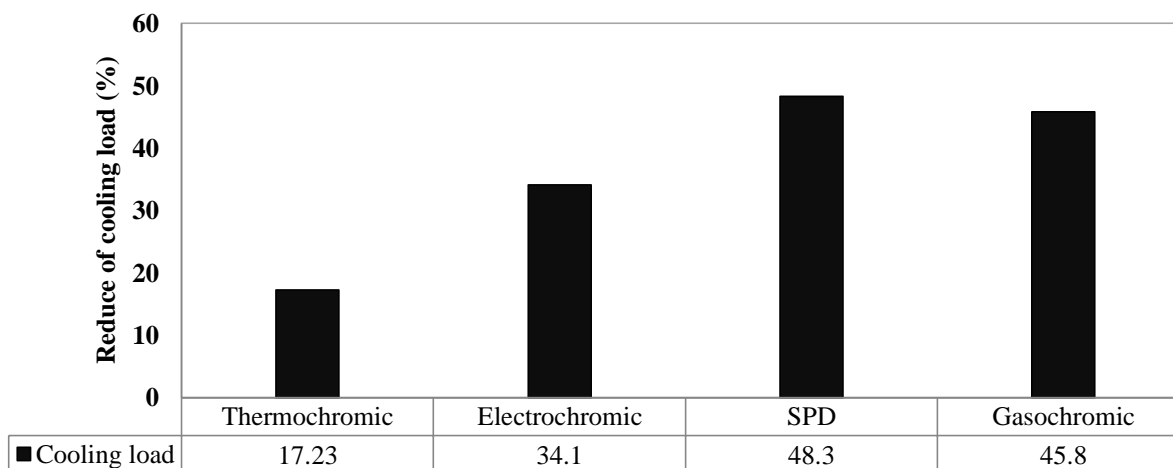


شکل ۶- مقایسه‌ی بار برودتی اتاق دارای پنجره با شیشه‌های هوشمند و شیشه‌ی شفاف ساده در ماه‌های سال برای بوشهر

متوسط میزان بار برودتی ساختمان با شیشه‌های مختلف در طی سال در شکل (۷) نشان داده شده است. شیشه SPD با $16/8 \text{ kWh/m}^2$ کم‌ترین میزان بار سرمایش بین شیشه‌های مورد مطالعه را دارا است و بعد از آن به ترتیب شیشه‌های گازکرومیک، الکتروکرومیک و ترموکرومیک می‌باشند. شیشه هوشمند SPD علاوه بر کنترل تابش خورشید در ماه‌های سال و کاهش بهره خورشیدی (طبق شکل (۴) و (۵))، شیشه‌ای مناسب از نظر عایق حرارتی بوده و به این ترتیب کم‌ترین بار سرمایش را دارا است. در شکل (۸) میزان کاهش بار سرمایش ساختمان با شیشه‌های هوشمند مورد مطالعه در مقایسه با شیشه ساده نشان داده شده است. در ساختمان با شیشه SPD، کاهش بار سرمایش $48/3\%$ بوده و استفاده از شیشه گازوکرومیک سبب کاهش $45/8\%$ بار سرمایش نسبت به شیشه ساده گردیده است. طبق شکل، کاربرد شیشه‌های الکتروکرومیک و ترموکرومیک به ترتیب سبب کاهش $34/1\%$ و $17/23\%$ در بار سرمایش می‌گردد.



شکل ۷- میانگین بار برودتی در سال برای پوشهر



شکل ۸- درصد کاهش بار سرمایش شیشه‌های هوشمند در مقایسه با شیشه ساده در پوشهر

۶- نتیجه گیری

شیشه‌های هوشمند از جمله مصالح نوین جهت کاهش میزان مصرف انرژی ساختمان‌ها هستند. انواع این شیشه‌ها شامل شیشه‌های الکتروکرومیک، کریستال مایع، گاز کرومیک، ترموکرومیک و SPD می‌باشند. مقاله حاضر به مقایسه نحوه عملکرد و بررسی میزان تاثیر این شیشه‌ها بر انرژی مصرفی ساختمان در اقلیم گرم و مرطوب شهر بوشهر پرداخته است. به این منظور یک ساختمان نمونه اداری در حالت‌های مختلف با استفاده از شیشه متداول و انواع شیشه‌های هوشمند با استفاده از نرم افزار دیزان بیلدر شبیه سازی شده و مورد سنجش قرار گرفته است. پس از انجام شبیه سازی‌ها، پارامترهای مورد مقایسه، عملکرد حرارتی، میزان بهره‌خوردگی و بار سرمایشی ساختمان است.

با توجه به اقلیم بسیار گرم بوشهر، در طول سال نیاز سرمایشی بسیار بیشتر از نیاز گرمایش بوده به گونه‌ای که حتی در بازه زمستان نیز ایجاد سرمایش جهت تامین آسایش حرارتی ضروری است. ضمن آن که کاربری اداری ساختمان نیز در افزایش بار حرارتی داخلی و نیاز به سرمایش موثر می‌باشد. بر اساس نتایج کاربرد شیشه‌های هوشمند سبب کاهش بهره‌خوردگی و بار سرمایشی ساختمان می‌شود. به این ترتیب برای ساختمان اداری مورد سنجش واقع در شهر بوشهر شیشه‌های SPD با هدف کاهش بار سرمایشی بهترین عملکرد را داشته و پس از آن به ترتیب شیشه‌های گازوکرومیک، الکتروکرومیک و ترموکرومیک قرار دارند. در حالی که میزان بهره‌خوردگی توسط شیشه‌ها در ماه‌های مختلف سال متفاوت است اما میانگین سالانه آن با استفاده از شیشه‌های SPD کمترین مقدار را داشته و شیشه‌های گازوکرومیک، ترموکرومیک و الکتروکرومیک در مرحله بعد هستند. کاهش بار سرمایش ساختمان با شیشه‌ی SPD، ۳/۴۸٪ است.

همچنین استفاده از شیشه گازوکرومیک باعث کاهش ۸/۴۵٪ بار سرمایش نسبت به شیشه ساده گردیده است و شیشه‌های الکتروکرومیک و ترموکرومیک به ترتیب ۱/۳۴٪ و ۲۳/۱۷٪ باعث کاهش بار سرمایش می‌گردد. به این ترتیب در اقلیم‌های مشابه بوشهر با شرایط گرم و مرطوب که هدف کاهش میزان دریافت بهره‌خوردگی و نیز کاهش بار سرمایشی ساختمان است، کاربرد انواع شیشه‌های هوشمند خاصه در ساختمان‌های اداری بسیار مطلوب بوده و سبب کاهش میزان کل انرژی مصرفی و هزینه‌های حرارتی ساختمان می‌شود.

مراجع

- [1] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., and Pout, C., "A Review on Buildings Energy Consumption Information", *Energy Build.*, Vol. 40, No. 3, pp. 394–398, (2008).
- [2] Glabchi, M., "*Nano Technology in Architecture and Building Engineering*", Tehran University, (2011).
- [3] Addington, D.M., and Schodek, D.L., "*Smart Materials and New Technologies: for the Architecture and Design Professions*", Routledge, London, England, (2005).
- [4] Tavares, P., Bernardo, H., Gaspar, A., and Martins, A., "Control Criteria of Electrochromic Glasses for Energy Savings in Mediterranean Buildings Refurbishment", *Sol. Energy*, Vol. 134, pp. 236–250, (2016).
- [5] Gugliemetti, F., and Bisegna, F., "Visual and Energy Management of Electrochromic Windows in Mediterranean Climate", *Build. Environ.*, Vol. 38, pp. 479–492, (2003).

- [6] Nilsson, A.M., and Roos, A., "Evaluation of Optical and Thermal Properties of Coatings for Energy Efficient Windows", *Thin Solid Films*, Vol. 517, No. 10, pp. 3173–3177, (2009).
- [7] Purushothaman, K.K., Antony, S.J., and Muralidharan, G., "Optical, Structural and Electrochromic Properties of Nickel Oxide Films Produced by Sol–gel Technique", *Sol. Energy*, Vol. 85, No. 5, pp. 978–984, (2011).
- [8] Piccolo, A., Pennisi, A., and Simone, F., "Daylighting Performance of an Electrochromic Window in a Small Scale Test-cell", *Sol. Energy*, Vol. 83, No. 6, pp. 832–844, (2009).
- [9] Deforest, N., Shehabi, A., Selkowitz, S., and Milliron, D.J., "A Comparative Energy Analysis of Three Electrochromic Glazing Technologies in Commercial and Residential Buildings", *Appl. Energy*, Vol. 192, pp. 95–109, (2017).
- [10] DeForest, N., Shehabi, A., O'Donnell, J., Garcia, G., Greenblatt, J., Lee, E.S., Selkowitz, S., and Milliron, D.J., "United States Energy and CO2 Savings Potential from Deployment of Near-infrared Electrochromic Window Glazings", *Build. Environ.*, Vol. 89, pp. 107–117, Jul (2015).
- [11] Zinzi, M., "Office Worker Preferences of Electrochromic Windows: A Pilot Study", *Build. Environ.*, Vol. 41, pp. 1262–1273, (2006).
- [12] Piccolo, A., and Simone, F., "Effect of Switchable Glazing on Discomfort Glare from Windows", *Build. Environ.*, Vol. 44, No. 6, pp. 1171–1180, (2009).
- [13] Lee, E.S., Pang, X., Hoffmann, S., Goudey, H., and Thanachareonkit, A., "An Empirical Study of a Full-scale Polymer Thermochromic Window and its Implications on Material Science Development Objectives", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 116, pp. 14–26, (2013).
- [14] Hoffmann, S., Lee, E.S., and Clavero, C., "Examination of the Technical Potential of Near-infrared Switching Thermochromic Windows for Commercial Building Applications", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 123, pp. 65–80, (2014).
- [15] Lu, Y., Xiao, X., Zhan, Y., Cao, Z., Cheng, H., and Huan, C., "Functional Transparent Nanocomposite Film with Thermochromic and Hydrophobic Properties Fabricated by Electrospinning and Hot-pressing approach," *Ceram. Int.*, Vol. 44, No. 1, pp. 1013–1018, (2018).
- [16] Chang, T., Cao, X., Dedon, L.R., Long, S., Huang, A., Shao, Z., Li, N., Luo, H., and Jin, P., "Optical Design and Stability Study for Ultrahigh-performance and Long-lived Vanadium Dioxide-based Thermochromic Coatings", *Nano Energy*, Vol. 44, pp. 256–264, Feb. (2018).
- [17] Sharma, M., Whaley, M., Chamberlain, J., Oswald, T., Schrodin, R., Graham, A., Barger, M., and Richey, B., "Evaluation of Thermochromic Elastomeric Roof Coatings for Low-slope Roofs", *Energy Build.*, Vol. 155, pp. 459–466, (2017).

- [18] Costanzo, V., Evola, G., and Marletta, L., "Thermal and Visual Performance of Real and Theoretical Thermochromic Glazing Solutions for Office Buildings", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 149, pp. 110–120, (2016).
- [19] Ghosh, A., Norton, B., and Mallick, T.K., "Daylight Characteristics of a Polymer Dispersed Liquid Crystal Switchable Glazing", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 174, pp. 572–576, (2018).
- [20] Feng, W., Zou, L., Gao, G., Wu, G., Shen, J., and Li, W., "Gasochromic Smart Windows: Optical and Thermal Properties, Energy Simulation and Feasibility Analysis", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 144, pp. 316–323, (2016).
- [21] Wittwer, V., Datz, M., Ell, J., Georg, A., Graf, W., and Walze, G., "Gasochromic Windows", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 84, pp. 305–314, (2004).
- [22] Ghosh, A., Norton, B., and Duffy, A., "Measured Overall Heat Transfer Coefficient of a Suspended Particle Device Switchable Glazing", *Appl. Energy*, Vol. 159, pp. 362–369, (2015).
- [23] Ghosh, A., Norton, B., and Duffy, A., "Behaviour of a SPD Switchable Glazing in an Outdoor Test Cell with Heat Removal under Varying Weather Conditions", *Appl. Energy*, Vol. 180, pp. 695–706, (2016).
- [24] Ghosh, A., Norton, B., and Duffy, A., "Effect of Atmospheric Transmittance on Performance of Adaptive SPD-vacuum Switchable Glazing", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 161, pp. 424–431, (2017).
- [25] Barrios, D., Vergaz, R., Sánchez-pena, J.M., García-cámara, B., Granqvist, C.G., and Niklasson, G.A., "Simulation of the Thickness Dependence of the Optical Properties of Suspended Particle Devices", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 143, pp. 613–622, (2015).
- [26] Barrios, D., Vergaz, R., Sanchez-pena, J.M., Granqvist, C.G., and Niklasson, G.A., "Toward a Quantitative Model for Suspended Particle Devices: Optical Scattering and Absorption Coefficients", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 111, pp. 115–122, (2013).
- [27] Iraqi, H., "Investigation of Properties of Thermochemical Coating of Vanadium Dioxide for Smart Glass", *Journal Word of Color*, Vol. 4, (2013).
- [28] Agnihotry, S.A., Singh, P., Joshi, A.G., Singh, D.P., Sood, K.N., and Shivaprasad, S.M., "Electrodeposited Prussian Blue Films: Annealing Effect", *Electrochim. Acta*, Vol. 51, No. 20, pp. 4291–4301, (2006).
- [29] Avendano, A., Azens, A., Niklasson, G.A., and Granqvist, C.G., "Sputter Deposited Electrochromic Films and Devices Based on These: Progress on Nickel-oxide-based Films", *Mater. Sci. Eng. B*, Vol. 138, No. 2, pp. 112–117, (2007).
- [30] "Smart Glass Windows," [Online]. Available: <http://www.glassapps.com/products/smart-glass-windows/>. [Accessed: 05-Mar-2017], (2017).

- [31] Makhlof, A.S.H., and Tiginyanu, I., "Nanocoatings and Ultra-thin Films: Technologies and Applications", Elsevier, (2011).
- [32] Kutz, M., "Handbook of Materials Selection", Wiley Online Library, (2002).
- [33] Evins, R., "A Review of Computational Optimisation Methods Applied to Sustainable Building Design", Renew. Sustain. Energy Rev., Vol. 22, pp. 230–245, (2013).
- [34] Baetens, R., Jelle, B.P., and Gustavsen, A., "Properties, Requirements and Possibilities of Smart Windows for Dynamic Daylight and Solar Energy Control in Buildings: A State-of-the-art Review", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 94, No. 2, pp. 87–105, (2010).
- [35] Murakami, K., Nakajima, K., and Kaneko, S., "Initial Growth of SnO₂ Thin Film on the Glass Substrate Deposited by the Spray Pyrolysis Technique", Thin Solid Films, Vol. 515, No. 24, pp. 8632–8636, (2007).
- [36] Shaeri, J., Yaghoubi, M., Aliabadi, M., and Vakilinazhad, R., "Analysis of using Nano Aerogel Glazing on Solar Heat Gain and Cooling Load in an Office at Hot and Dry, Hot and Humid and Cold Climates of Iran", J. Solid Fluid Mech., Vol. 7, No. 4, pp. 209–221, (2017).
- [37] "Designbuilder," [Online]. Available: <https://www.designbuilder.co.uk/>. [Accessed: 16-Apr-2017], (2017).

Abstract

Smart glasses are among new materials designed to prevent energy loss through windows which could be categorized as Electrochromic glasses, liquid crystals, Gasochromics, Thermochromics and SPDs. In this article introducing various types of smart glasses, their characteristics and thermal performance had been compared. In order to evaluate the impact of smart glasses on energy consumption of building, a small office in Bushehr, Iran has been studied using Designbuilder simulation software. According to the results, SPD glass has the best performance reducing cooling load of building. Gasochromic, Electrochromic and Thermochromics glasses would also reduce the cooling load respectively.

While the amount of solar heat gain varies in different months of the year, the average annual solar heat gain is the lowest using SPD glasses. Application of SPD glass would result in 48.3% reduction in buildings cooling load compare to ordinary glass. The amount of reduction for Gasochromic, Electrochromic and Thermochromics glasses would be 45.8%, 34.1% and 17.23% respectively. So application of smart glasses in hot and humid climate of Bushehr can reduce solar heat gain and thus cooling load of buildings.

