

تأثیر شیشه هوشمند الکتروکرومیک بر بار سرمایش ساختمان‌های اداری در اقلیم گرم و مرطوب، گرم و خشک و سرد ایران

جلیل شاعری^{۱*}، محمود یعقوبی^۲، رزا وکیلی‌نژاد^۳

^۱ دانشجوی دکتری معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

shaer.jalil@gmail.com

^۲ استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

yaghoubi@shirazu.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

arch.rv@gmail.com

چکیده: یکی از اصول معماری پایدار، کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌هاست. از آنجا که تقریباً نیمی از انرژی مصرفی برای ایجاد آسایش در ساختمان‌ها از طریق پنجره‌ها هدر می‌رود، مطالعات بسیاری با هدف دستیابی به راهکارهای ذخیره انرژی و کنترل تابش خورشید انجام شده است. یکی از این راهکارها استفاده از شیشه هوشمند الکتروکرومیک است. برای انتخاب بهینه مصالح، ارزیابی میزان تأثیر و کارایی این شیشه‌ها، در اقلیم‌های مختلف ایران ضروری بوده و تاکنون پژوهشی در این مورد انجام نشده است. در پژوهش حاضر، تأثیر استفاده از شیشه هوشمند الکتروکرومیک بر بار سرمایشی ساختمان اداری در سه شهر بوشهر با اقلیم گرم و مرطوب، شیراز با اقلیم گرم و خشک و تبریز با اقلیم سرد بررسی شده است. به این منظور، ساختمان اداری سه طبقه برای نمونه در نرم‌افزار دیزاین بیلدر شبیه‌سازی شده و بار سرمایش سالانه ساختمان در سه حالت با شیشه ساده شش میلی‌متری، شیشه دوجداره و شیشه هوشمند الکتروکرومیک محاسبه شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از شیشه الکتروکرومیک در شهرهای بوشهر، شیراز و تبریز مناسب بوده و تأثیر قابل توجهی بر کاهش بار سرمایش دارد. در بوشهر با استفاده از شیشه الکتروکرومیک بار سرمایش ۱۹٪ نسبت به شیشه معمولی و ۸٪ نسبت به شیشه دوجداره کاهش یافته است. در شیراز و تبریز نیز سبب کاهش ۲۸٪ نسبت به شیشه معمولی و ۱۰٪ نسبت به شیشه دوجداره شده است. به این ترتیب، کارایی شیشه‌های الکتروکرومیک در اقلیم گرم و خشک و سرد بیشتر از اقلیم گرم و مرطوب است.

واژه‌های کلیدی: الکتروکرومیک، بار سرمایش، ساختمان اداری، گرم و خشک، گرم و مرطوب، سرد.

۱. مقدمه

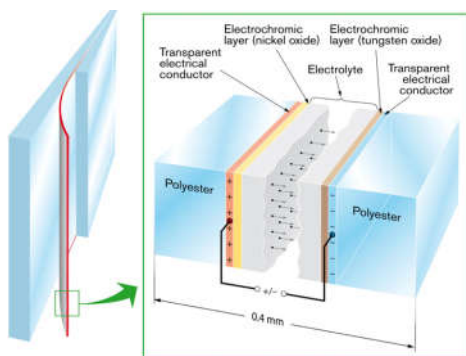
انتقال می‌یابد. ضریب انتقال حرارت U نشان می‌دهد که پنجره تا چه میزان حرارت از دست می‌دهد و از اختلاف درجه حرارت داخل و خارج به دست می‌آید [۵]. در جدول (۱) خصوصیات پنجره پیشنهادی برای سه اقلیم گرم، سرد و معتدل را نشان داده شده است.

جدول (۱): خصوصیات پنجره پیشنهادی برای اقلیم‌های مختلف [۶]

| اقلیم | T_v | SHGC | $U (Wm^{-2}k^{-1})$ |
|-------|--------|--------|---------------------|
| سرد | >0.7 | >0.6 | <2 |
| معتدل | >0.7 | >0.5 | <2.5 |
| گرم | >0.6 | <0.4 | <4 |

شیشه‌های الکتروکرومیک از شیشه‌های هوشمندی هستند که نور خورشید وارد شده را مناسب با خواسته انسان کنترل می‌کنند که از طریق ولتاژ الکتریکی کنترل می‌شوند. از عوامل مؤثر برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان استفاده از شیشه هوشمند به خصوص شیشه الکتروکرومیک است [۷].

چندین نوع شیشه الکتروکرومیک وجود دارد، اما پنجره هوشمند الکتروکرومیکی که در ساختمان‌سازی استفاده می‌شوند، در شکل (۲) نشان داده شده است. این شیشه از یک الکترولیت شفاف می‌باشد که به صورت پلیمر یا یک فیلم نازک است و در دو طرف آن دو لایه الکترولیت اکسید نیکل و اکسید تنگستن قرار دارد. بعد از لایه‌های الکتروکرومیک، لایه‌های هادی الکتریکی شفاف قرار دارد که از اکسیدهایی چون لایه‌های الکتروکرومیک، لایه‌های هادی الکتریکی شفاف قرار دارد که از اکسیدهایی چون $SnO_2:F$ و $In_2O_3:Sn$ (ITO) یا $ZnO:Al$ ساخته شده‌اند. استفاده از فیلم‌های Ni oxide و W oxide خصوصیات پنجره‌های الکتروکرومیک را بهبود می‌بخشد و اضافه کردن تانتالوم به W oxide به شدت خواص آن را بهبود می‌بخشد [۷].



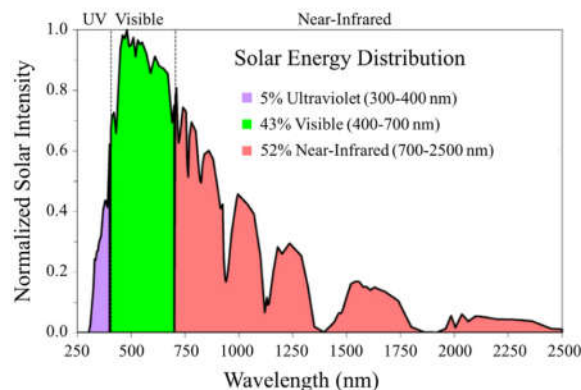
شکل (۲): لایه‌های تشکیل دهنده شیشه الکتروکرومیک [۸]

تاواریس و همکاران [۹] در پژوهشی با استفاده از نرم‌افزار ESP-R به بررسی تأثیر شیشه‌های الکتروکرومیک (EC) و صرفه‌جویی انرژی در آب‌وهوای مدیترانه‌ای پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از شیشه الکتروکرومیک تأثیر زیادی بر کاهش بار سرمایش داشته و استفاده

صنعت ساختمان مصرف‌کننده بخش بزرگی از انرژی مصرفی در جهان بوده و ۳۰٪ تا ۴۰٪ مصرف انرژی جهانی مربوط به سرمایش، گرمایش و روشنایی است. در ایران نیز حدود ۴۰٪ مصرف انرژی مربوط به بخش ساختمان است [۱].

استفاده از زغال‌سنگ، نفت و گاز برای تأمین انرژی منجر به انتشار CO_2 ، تغییر اقلیم و بحران‌های زیست‌محیطی می‌شود [۲]. به‌رغم اتلاف بسیار انرژی در بخش ساختمان، ظرفیت بسیاری برای صرفه‌جویی انرژی در این بخش وجود دارد. حدود نیمی از انرژی ساختمان از طریق شیشه‌ها به هدر می‌رود [۳]. علاوه بر آن، تابش خورشیدی وارد شده از طریق پنجره‌ها به داخل فضا موجب افزایش بار سرمایش ساختمان می‌شود.

نور خورشید از نور مرئی و نامرئی تشکیل شده و طیف گسترده طول موج آن مطابق شکل (۱)، توزیع انرژی خورشیدی متفاوتی دارد [۴]. طیف نامرئی خورشید بیش از ۵۰٪ از انرژی خورشید را تشکیل داده و کنترل آن با استفاده از پوشش‌های شیشه‌ای مختلف، نقش مهمی در صرفه‌جویی انرژی ایفا می‌کند.

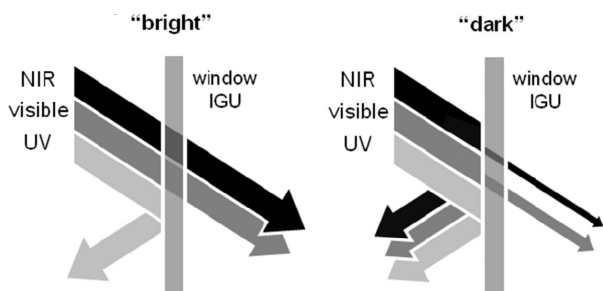


شکل (۱): توزیع انرژی خورشیدی [۴]

سه پارامتر کلیدی برای ارزیابی عملکرد و ویژگی‌های پوشش شیشه‌ای و پنجره ضریب انتقال حرارت (U)، میزان انتقال نور مرئی (T_v) و ضریب افزایش گرمای خورشیدی ($SHGC$) است. T_v میزان شفافیت شیشه را نشان داده و شامل بخشی از نور مرئی است که از شیشه عبور می‌کند. ضریب افزایش گرمای خورشیدی، میزان انرژی خورشیدی را که به صورت مستقیم و غیرمستقیم توسط شیشه به داخل انتقال می‌یابد، نشان می‌دهد و عددی بین ۰ و ۱ است و هرچه این مقدار بیشتر باشد، به این معناست که حرارت بیشتری از خورشید به داخل

1. Visible Transmittance
2. Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)

سرمایش و گرمایش، کاهش روشنایی مصنوعی و بهبود رضایت ساکنان در ساختمان‌های مسکونی می‌شود. همچنین دفورست و همکاران [۵] در پژوهشی دیگر به بررسی شیشه‌های EC در ساختمان‌ها در ۱۶ منطقه آب‌وهوایی آمریکا پرداخته شد. نتایج حاکی از آن بود که استفاده از این شیشه می‌تواند میزان مصرف انرژی را تا ۵۰٪ کاهش دهد. به گفته آن‌ها بهترین عملکرد شیشه الکتروکرومیک در ساختمان با کاربری اداری و بهترین عملکرد این شیشه‌ها مربوط به آب‌وهوای شمالی آمریکاست.



شکل (۴): گذر نور فروسرخ (NIR)، نور مرئی (Visible) و فرابنفش (UV) در شیشه الکتروکرومیک (EC) در دو حالت شفاف و کدر [۱۵]



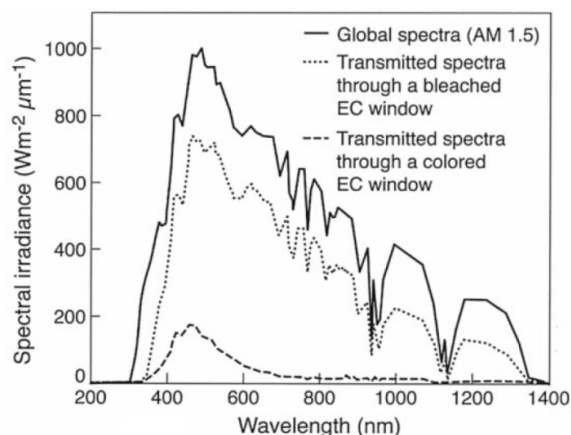
شکل (۵): شیشه الکتروکرومیک در دو حالت شفاف و کدر در ساختمان‌های اداری [۱۶]

در پژوهشی دیگر دو حالت تنظیم دستی و اتوماتیک شیشه‌های الکتروکرومیک و رضایت افراد در ساختمان‌های اداری با یکدیگر مقایسه شده است. طبق نتایج شیشه الکتروکرومیک می‌تواند یک گزینه

از آن در جهت شرقی و غربی بسیار مناسب بوده ولی در جهت جنوبی مزیتی ندارد. در پژوهشی دیگر، تأثیر شیشه‌های الکتروکرومیک بر بار سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها در سه شهر ایتالیا بررسی شد و ملاحظه گردید که این شیشه‌ها باعث کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های غیرمسکونی می‌شود و رضایت افراد از محیط داخلی بسیار بیشتر از شیشه معمولی است [۱۰]. در اقلیم گرم، شیشه‌های الکتروکرومیک در نمای جنوبی می‌تواند جایگزین خوبی برای شیشه‌های معمولی باشد و منجر به کاهش مصرف انرژی گردد [۱۱].

بررسی‌ها نشان می‌دهد که شیشه الکتروکرومیک در کنترل خواص نوری بسیار مناسب است [۱۲]. پیکولو و همکاران [۱۳] در پژوهشی به صورت تجربی به بررسی کارایی شیشه‌های الکتروکرومیک بر نور روز در جبهه‌های مختلف ساختمان پرداختند. استفاده از این شیشه در جهت جنوب می‌تواند به کاهش ناراحتی ناشی از تابش خیره‌کننده به خصوص در ساختمان‌های اداری کمک کند.

در شکل (۳)، ویژگی خطی طیف نوری شیشه الکتروکرومیک در دو حالت شفاف و کدر نشان داده شده است. شیشه الکتروکرومیک در حالت کدر دارای کمترین گذر طیف نوری است. همچنین در شکل (۴) گذر نور مرئی، فروسرخ و فرابنفش از شیشه الکتروکرومیک در دو حالت شفاف و کدر نشان داده شده است.



شکل (۳): ویژگی خطی طیف نوری شیشه الکتروکرومیک در دو حالت [۱۴]

مطالعات فوق نشان می‌دهد که شیشه الکتروکرومیک علاوه بر کاهش مصرف انرژی ساختمان، موجب افزایش بهره‌وری و در محیط کار در ساختمان‌های اداری و رضایت شغل می‌شود. در شکل (۵) شیشه الکتروکرومیک در دو حالت کدر و شفاف نشان داده شده است.

دفورست و همکاران [۱۵] به بررسی تأثیر شیشه الکتروکرومیک بر انرژی مصرفی ساختمان‌های تجاری و مسکونی در اقلیم آمریکا پرداختند. طبق نتایج استفاده از شیشه الکتروکرومیک باعث کاهش بار

این پژوهش، بررسی تأثیر شیشه الکتروکرومیک در مقایسه با شیشه ساده و دوجداره بر بار سرمایش ساختمان اداری در سه اقلیم ایران است تا میزان کارایی آن مشخص شود.

۲. شیشه‌های هوشمند و عملکرد شیشه الکتروکرومیک

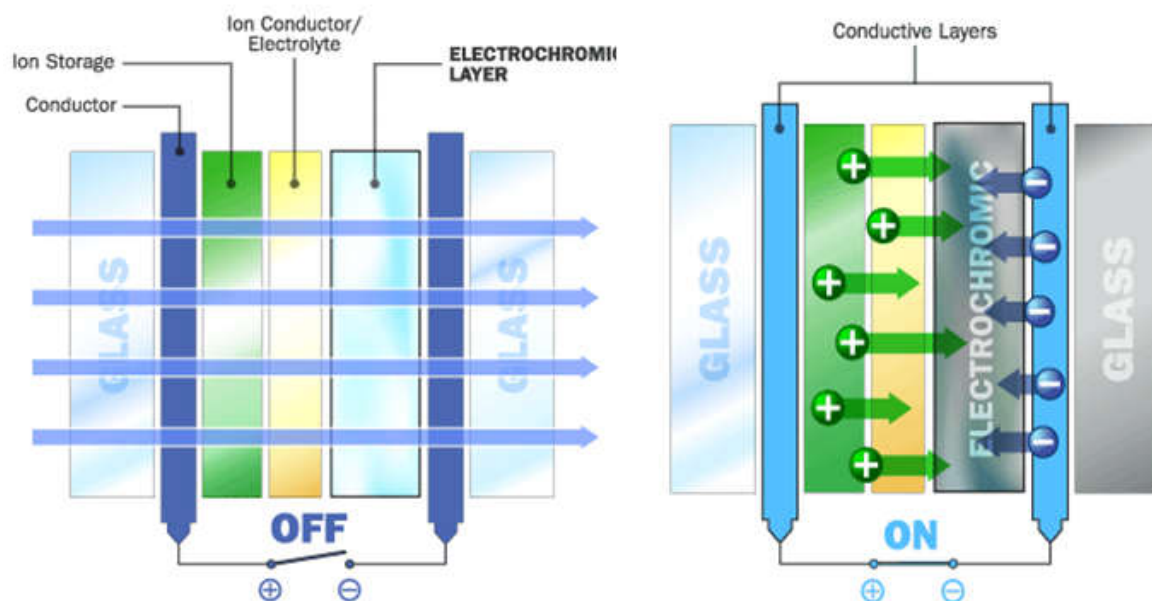
شیشه‌های هوشمند مانع عبور بخش مشخصی از پرتو خورشید شده و به ساختمان‌ها برای حفظ انرژی بیشتر کمک می‌کنند. میزان مصرف انرژی می‌تواند به وسیله افزایش بازده گرمایی در هوای سرد و کاهش آن در هوای گرم با استفاده از این گونه پنجره‌ها بهبود یابد [۱۹]. افزودن یک لایه جذب‌کننده قابل کنترل روی سطح شیشه می‌تواند خواص نوری شیشه را به وسیله کنترل تابع شار حرارتی خورشید تغییر دهد [۲۰].

شیشه‌های الکتروکرومیک دسته‌ای از شیشه‌های هوشمند هستند که از مواد الکتروکرومیک بهره می‌برند. الکترومیک‌ها موادی هستند که رنگ آن‌ها در اثر جریان الکتریکی تغییر می‌کنند. جریان الکتریسته با ایجاد قطب مثبت و منفی در لایه‌های هادی الکتریکی باعث می‌شود که یون‌ها از لایه ذخیره یونی به سمت لایه هدایت یونی حرکت کرده و به لایه الکتروکرومیک رجعت کنند و شیشه را شفاف کنند. با قطع الکتریسته، فرایند برعکس عمل کرده و شیشه دوباره تیره می‌شود. یکی از ویژگی مواد الکتروکرومیک قابلیت تنظیم آن‌هاست؛ به گونه‌ای که می‌توان شدت کدری آن‌ها را با تغییر مقدار جریان تنظیم کرد [۲۱]. نوع عملکرد این شیشه در شکل (۶) نشان داده شده است.

مناسب برای آسایش بصری باشد و با استفاده از تنظیم دستی رضایتمندی افراد افزایش یافته است [۱۷].

پیکولو و همکاران [۱۸] در پژوهشی نشان دادند شیشه الکتروکرومیک در کاهش حساسیت نوری^۱ مؤثر بوده و ناراحتی ناشی از تابش خیره‌کننده را کاهش می‌دهد. در صورت استفاده از آن‌ها در جهت شرق و غرب ساختمان نیازی به پرده برای کنترل تابش خیره‌کننده شرق و غرب وجود ندارد. در پژوهشی دیگر به صورت میدانی در ساختمان اداری، شیشه الکتروکرومیک و پنجره با کرکره دستی در کاهش حساسیت نوری مقایسه شد. نتایج نشان داد شیشه الکتروکرومیک عملکرد بهتری نسبت به پنجره با کرکره دستی داشته و می‌تواند میزان نور مرئی را بین ۳٪ تا ۶۰٪ از خود عبور دهد.

با بررسی پژوهش‌های ذکر شده قابلیت شیشه الکتروکرومیک در کاهش مصرف انرژی، CO₂ تولیدی و کنترل تابش خورشید مشخص می‌شود. همچنین استفاده از آن در کاربری‌های متفاوت و اقلیم‌های مختلف توصیه شده است؛ گرچه میزان کارایی آن در اقلیم‌ها و کاربری‌های گوناگون متفاوت است. برای انتخاب بهینه مصالح، ارزیابی میزان تأثیر و کارایی این شیشه‌ها، در اقلیم‌های مختلف ایران ضروری است. متأسفانه تاکنون مطالعه‌ای در زمینه شیشه‌های هوشمند به خصوص در اقلیم‌های ایران پرداخته نشده و چگونگی عملکرد و میزان کارایی این نوع شیشه در ساختمان‌های اداری در اقلیم ایران مشخص نیست. با توجه به عملکرد مناسب شیشه الکتروکرومیک و ضرورت کاهش مصرف انرژی در بخش ساختمان در ایران، هدف از



شکل (۶): شیشه الکتروکرومیک (EC) در دو حالت خاموش و روشن [۲۰]

۳. اقلیم ایران و شهرهای مورد بررسی

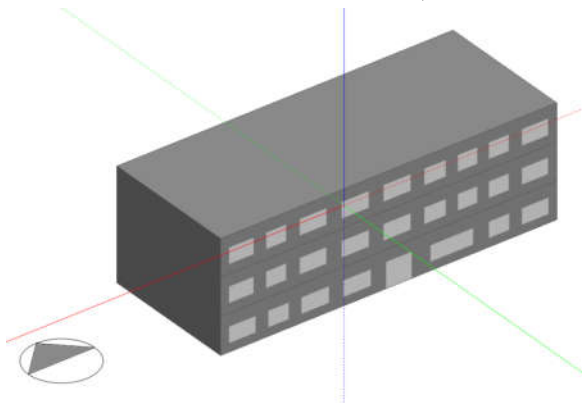
اولین گام برای طراحی معماری متناسب با محیط پیرامون، مطالعه عوامل اقلیمی مکان مورد نظر است. با توجه به تقسیم‌بندی اقلیمی کوپن، ایران دارای چهار اقلیم گرم و مرطوب، گرم و خشک، سرد و معتدل و مرطوب است [۱]. در این پژوهش، شهرهای شیراز با اقلیمی گرم و خشک، تبریز با اقلیمی سرد و بوشهر با اقلیم گرم و مرطوب به‌عنوان نمونه‌ای از

شهرهای ایران با اقلیم مشابه برای مطالعه انتخاب شده‌اند. در جدول (۲)، شرایط آب‌وهوایی شهرهای تبریز، بوشهر و شیراز در ماه‌های سال نشان داده شده است. تبریز در اکثر ماه‌های سال دارای آب و هوایی سرد می‌باشد و بوشهر در اثر ماه‌ها متوسط دمای آن بالاست و بین 15°C تا $33/7^{\circ}\text{C}$ قرار دارد و شیراز دارای حداقل دمای $5/8^{\circ}\text{C}$ در ژانویه و بیشترین دما $29/5^{\circ}\text{C}$ در جولای است.

جدول (۲): متوسط دمای ماهانه شهرهای شیراز، تبریز و بوشهر طی سال ۱۳۸۷-۱۳۹۷ (سازمان هواشناسی ایران)

| | Average Dry Bulb Temperature ($^{\circ}\text{C}$) | Min Dry Bulb Temperature ($^{\circ}\text{C}$) | Max Dry Bulb Temperature ($^{\circ}\text{C}$) | Average Relative humidity (%)-Hu | Wind Speed (m/s) |
|----------------|---|---|---|----------------------------------|------------------|
| Bushehr | | | | | |
| Jan | ۱۴/۹ | ۸ | ۲۲/۲ | ۷۴/۱ | ۴ |
| Feb | ۱۶/۵ | ۱۰/۶ | ۲۳/۹ | ۷۲/۴ | ۴/۵ |
| Mar | ۱۹/۹ | ۱۳ | ۲۹/۳ | ۶۸/۹ | ۴/۲ |
| Apr | ۲۴/۲ | ۱۷/۴ | ۳۴ | ۶۵/۸ | ۴/۳ |
| May | ۲۹/۳ | ۲۲/۹ | ۳۶/۵ | ۵۹/۴ | ۴/۵ |
| Jun | ۳۱ | ۲۶/۷ | ۳۷/۸ | ۶۵/۵ | ۴/۱ |
| Jul | ۳۳/۱ | ۲۷/۷ | ۳۸/۸ | ۶۷/۲ | ۳/۹ |
| Aug | ۳۳/۷ | ۲۸/۸ | ۳۸/۴ | ۷۱/۵ | ۳/۸ |
| Sep | ۳۱/۳ | ۲۶/۲ | ۳۷/۵ | ۷۰/۲ | ۳/۵ |
| Oct | ۲۸/۴ | ۲۲ | ۳۵/۲ | ۶۷/۹ | ۳/۲ |
| Nov | ۲۲ | ۱۳ | ۳۱/۶ | ۶۴/۶ | ۳/۸ |
| Dec | ۱۷/۱ | ۹/۵ | ۲۶/۵ | ۷۴/۵ | ۳/۷ |
| Shiraz | | | | | |
| Jan | ۵/۸ | -۳/۹ | ۱۷/۱ | ۶۲ | ۱/۳ |
| Feb | ۷/۲ | -۲/۳ | ۱۷/۶ | ۵۷/۲ | ۲/۲ |
| Mar | ۱۱/۶ | -۳ | ۲۳/۶ | ۴۸/۳ | ۲/۳ |
| Apr | ۱۷ | ۱/۷ | ۲۹/۶ | ۴۰/۴ | ۲/۸ |
| May | ۲۳/۲ | ۱۰/۳ | ۳۵/۷ | ۲۹/۱ | ۳/۳ |
| Jun | ۲۸ | ۱۶/۳ | ۳۷/۷ | ۱۹/۴ | ۲/۷ |
| Jul | ۲۹/۵ | ۱۶/۶ | ۳۹/۸ | ۲۲/۱ | ۲/۹ |
| Aug | ۲۹/۱ | ۱۷/۱ | ۳۸/۷ | ۲۴/۲ | ۲/۴ |
| Sep | ۲۴/۸ | ۱۱/۳ | ۳۷/۱ | ۲۲/۹ | ۱/۷ |
| Oct | ۱۸/۶ | ۵/۹ | ۳۱/۵ | ۳۱/۵ | ۱/۹ |
| Nov | ۱۲/۷ | -۱/۷ | ۲۵/۳ | ۴۰/۶ | ۱/۳ |
| Dec | ۶/۴ | -۴/۹ | ۲۰/۳ | ۶۱/۱ | ۱/۷ |
| Tabriz | | | | | |
| Jan | -۲/۸ | -۱۵ | ۱۳ | ۶۹/۳ | ۳ |
| Feb | -۰/۹ | -۱۳/۱ | ۱۱/۴ | ۶۹ | ۳/۴ |
| Mar | ۵/۲ | -۹/۸ | ۱۵/۱ | ۶۳/۲ | ۲/۴ |
| Apr | ۱۰/۷ | ۰/۳ | ۲۱/۶ | ۵۴ | ۳/۷ |
| May | ۱۶/۶ | ۶/۷ | ۲۹/۳ | ۴۸/۷ | ۳ |
| Jun | ۲۱/۴ | ۹ | ۳۳/۲ | ۴۲/۲ | ۳/۹ |
| Jul | ۲۵/۶ | ۱۳/۸ | ۳۷ | ۳۴/۸ | ۵ |
| Aug | ۲۵/۴ | ۱۴/۴ | ۳۶/۳ | ۳۳/۶ | ۲/۴ |
| Sep | ۲۱/۵ | ۱۱/۸ | ۳۲/۸ | ۳۵/۲ | ۲/۹ |
| Oct | ۱۴/۵ | ۳/۹ | ۲۷/۸ | ۵۰/۹ | ۲/۵ |
| Nov | ۶/۳ | -۷/۴ | ۱۸/۸ | ۶۶/۲ | ۱/۶ |
| Dec | -۰/۴ | -۱۰/۸ | ۱۱/۴ | ۷۶ | ۱/۹ |

پژوهش برای شبیه‌سازی ساختمان از نرم‌افزار دیزاین بیلدر نسخه ۴/۷/۰/۰۲۷ سال ۲۰۱۸ استفاده شده است. این نرم‌افزار دارای موتور تحلیل انرژی پلاس می‌باشد و قادر به شبیه‌سازی ساختمان و محاسبه بار سرمایش، گرمایش، نور و... را در طول سال دارد. ساختمان شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار دیزاین بیلدر شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸): ساختمان شبیه‌سازی شده در دیزاین بیلدر

ساختمان اداری مورد مطالعه، ساختمانی به ابعاد ۱۳م در ۳۲م در نظر گرفته شد که مساحت زیربنای هر طبقه $416m^2$ است و میزان روشنایی طبق استاندارد اشرفی $400Lux$ در نظر گرفته شد. مشخصات ساختمان از لحاظ جهت‌گیری، میزان ظرفیت اشغال و... در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳): مشخصات ساختمان مورد مطالعه

| مشخصات | عنوان |
|----------------------------|----------------------------|
| ساختمان اداری چندطبقه | نوع کاربری |
| بوشهر، شیراز، تبریز، ایران | موقعیت |
| ۴۱۶ هر طبقه مترمربع | مساحت زیربنا |
| ۳ | تعداد طبقات |
| ۳/۵ m | ارتفاع هر طبقه |
| (استاندارد ASHRAE) ۷ | ظرفیت اشغال (نفر/ m^2) |
| ۸ AM تا ۱۶ PM | ساعت کاری اداری |
| ٪۳۰ | نسبت پنجره به دیوار بیرونی |
| شمالی جنوبی | جهت‌گیری |
| ۴۰۰ lux | روشنایی |

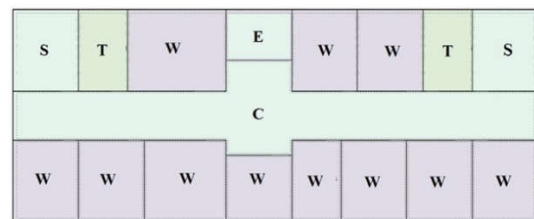
در موارد شبیه‌سازی طبق استاندارد اشرفی نقطه گرمایش $22^{\circ}C$ درجه سانتی‌گراد و نقطه سرمایش $24^{\circ}C$ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. همچنین مصالح به‌کاررفته در ساختمان شبیه‌سازی شده و لایه‌های تشکیل‌دهنده دیوارهای بیرونی، داخلی و سقف در جدول (۴) آورده شده است. همچنین نور خورشید، باد، ارتفاع شهرها از سطح دریا از

باد غالب در بوشهر شمال غرب است و متوسط سرعت باد در سال $2/5m/s$ می‌باشد و متوسط دمای بوشهر در سال $25^{\circ}C$ است. متوسط تابش خورشیدی افقی پخش‌شونده^۱ در سال برای بوشهر $73/3kWh/m^2$ و متوسط تابش مستقیم خورشید^۲ در سال برای بوشهر $95/8 kWh/m^2$ است. همچنین جهت باد غالب در تبریز غرب است و متوسط سرعت باد در سال $3m/s$ می‌باشد و متوسط دمای سالانه نیز $11/9^{\circ}C$ است که مشخص می‌کند گرمایش ساختمان امری مهم می‌باشد. متوسط تابش خورشیدی افقی پخش‌شونده در سال برای تبریز $76/2kWh/m^2$ است.

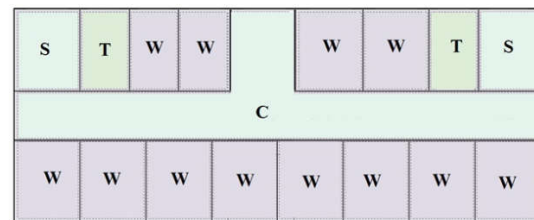
شهر شیراز که در منطقه گرم و خشک قرار گرفته و دارای دمای متوسط سالانه $17/8^{\circ}C$ است. جهت باد غالب در شیراز اغلب از شمال و شمال غرب است و متوسط سرعت باد سالانه $2/2m/s$ می‌باشد و متوسط تابش خورشیدی افقی پخش‌شونده در سال برای شیراز $110/2 kWh/m^2$ است.

۴. روش تحقیق

برای بررسی تأثیر شیشه هوشمند الکتروکرومیک (EC) بر بار سرمایش ساختمان‌های اداری، ابتدا ساختمانی سه‌طبقه برای نمونه در نظر گرفته شد که پلان آن در شکل (۷) نشان داده شده است.

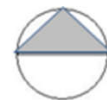


Ground floor



First and second floor

E : Enter
W : Office working area
C : Circulation area
S : Stair
T : Toilet



شکل (۷): پلان‌های طبقات ساختمان برای شبیه‌سازی

این ساختمان دارای کشیدگی شرقی غربی است که فضاهای اداری نور شمال و جنوب را از طریق پنجره‌ها دریافت می‌کنند. در این

3. ASHRAE
4. Heating Setpoint
5. Cooling Setpoint

1. Diffuse Horizontal Solar Radiation
2. Direct Normal Solar Radiation

جمله داده‌هایی است که در فایل آب‌وهوایی EPW مربوط به هر شهر به صورت داده ورودی به نرم‌افزار منظور شده است.

جدول (۴): جزئیات دیوار، سقف و شیشه در شبیه‌سازی و محاسبات

| R _e -value (m ² K)/W | U-value W/(m ² K) | لایه تشکیل دهنده |
|--|------------------------------|--|
| ۲/۸۵ | ۰/۳۵ | دیوار بیرونی: - آجرکار بیرونی ^۱ (۱۰۰mm) - عایق پلی استایرن اکس پی اس ^۲ (۱۰۰mm) - بلوک بتنی ^۳ (۱۰۰mm) - پلاستر گچ ^۴ (۱۰۰mm) |
| ۰/۶۱ | ۱/۶۳ | دیوار داخلی: - صفحه برد گچ ^۵ (۲۰mm) - هوا (۱۰mm) - صفحه برد گچ (۲۰mm) |
| ۲/۰۹ | ۰/۴۷ | پشت‌بام: - آسفالت (۱۰mm) - صفحه فیبر برد (۱۰mm) - عایق پلی استایرن اکس پی اس ^۶ (۴۰mm) - بتن (۱۰۰mm) - پلاستر گچ (۱۵mm) |

| | | |
|------|-----|--|
| ۰/۷۱ | ۱/۴ | سقف داخلی طبقات: - فلورینگ اسکرید ^۷ (۵۰mm) - بتن (۱۵۰mm) - عایق استاندارد (۳mm) - تایل سقف (۱۰mm) |
|------|-----|--|

۴.۱. شیشه‌های مورد مطالعه

انتخاب پنجره‌ها مطابق با نوع متداول پنجره‌های اداری و در سایر مدل‌های شبیه‌سازی یکسان در نظر گرفته شده است. بعد از شبیه‌سازی ساختمان اداری، سه نوع شیشه برای پنجره‌های بیرونی ساختمان در نظر گرفته شد. مواد درون پنجره‌ها مطابق با ویژگی مواد الکتروکرومیک در قسمت قبل بوده و ویژگی‌های حرارتی پنجره ساخته شده توسط آن‌ها در جدول (۵) بیان شده است. نوع اول، شیشه ساده با ضخامت ۶ mm می‌باشد و نوع دوم، شیشه دوجداره است و نوع سوم، شیشه هوشمند الکتروکرومیک می‌باشد.

جدول (۵): ویژگی‌های سه شیشه مورد مطالعه (شیشه ساده، شیشه دوجداره و شیشه الکتروکرومیک) [۲۰ و ۲۱]

| Glass type | Light transmission | Total solar transmission (SHGC) | U-value (W/m ² K) |
|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------|------------------------------|
| #Sgl Single clear (6mm) | ۰/۸۱ | ۰/۸۱۹ | ۵/۷ |
| # Dbl Double Grey (6mm)/(6mm Air) | ۰/۳۸۱ | ۰/۴۸۵ | ۳/۲ |
| # EC Electrochromic | Bleached | ۰/۵ | ۱/۸ |
| | Coloured | ۰/۱۵ | ۰/۰۹ |

۵. یافته‌ها و تحلیل

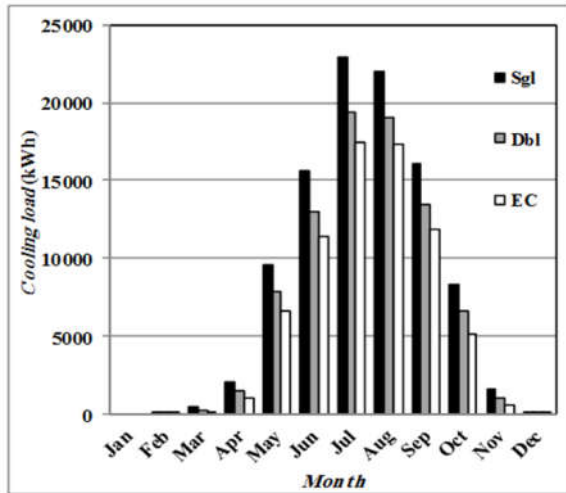
در شکل (۹)، میزان بار سرمایش ساختمان اداری در بوشهر در ماه‌های مختلف سال نشان داده شده است. طبق شکل (۹) در بیشتر ماه‌ها، بار سرمایش ساختمان با شیشه الکتروکرومیک کمتر از ساختمان با شیشه دوجداره و شیشه معمولی است. به گونه‌ای که در ماه آگوست میزان بار سرمایش ساختمان با شیشه‌های الکتروکرومیک ۲۱/۵٪ کمتر از ساختمان با شیشه ساده و ۸/۲٪ کمتر از ساختمان با شیشه دوجداره است. همچنین در ماه جولای شیشه الکتروکرومیک عملکرد بسیار مناسبی داشته و بار سرمایش را نسبت به ساختمان با شیشه معمولی ۲۰/۸٪ کاهش داده است.

از آنجا که در ساختمان‌های اداری، حرارت داخلی تولید شده در ساختمان به دلیل کاربرد تجهیزات الکترونیکی و روشنایی مصنوعی بالا بوده و در نتیجه عمده بار مصرفی این ساختمان‌ها بار سرمایشی است، در این پژوهش میزان تأثیر نوع شیشه‌ها بر این بار مورد بررسی قرار گرفته است.

1. Brickwork Outer Leaf
2. Eps Expanded Polystyrene
3. Concrete Block
4. Gypsum Plastering
5. Gypsum Plasterboard
6. Xps Extruded Polystyrene

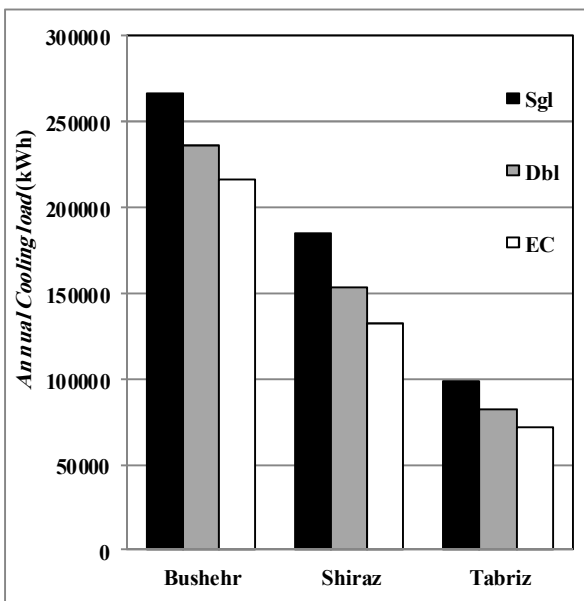
7. Flooring Screed

در شکل (۱۱)، میزان بار سرمایش ساختمان‌های شیشه‌سازی شده در ماه‌های سال برای تبریز نشان داده شده است. طبق شکل (۱۱)، بیشترین مصرف بار سرمایش در ماه‌های جولای و آگوست است. همچنین ساختمان با شیشه الکتروکرومیک با کنترل تابش خورشید و ممانعت از ورود امواج فرابنفش به محیط داخلی، کمترین میزان مصرف بار سرمایش را نسبت به شیشه ساده و دوجداره دارد. در ماه جولای، بار سرمایشی ساختمان با شیشه الکتروکرومیک ۲۳٪ نسبت به ساختمان با شیشه ساده و ۹/۸٪ نسبت به ساختمان با شیشه دوجداره کاهش یافته است.

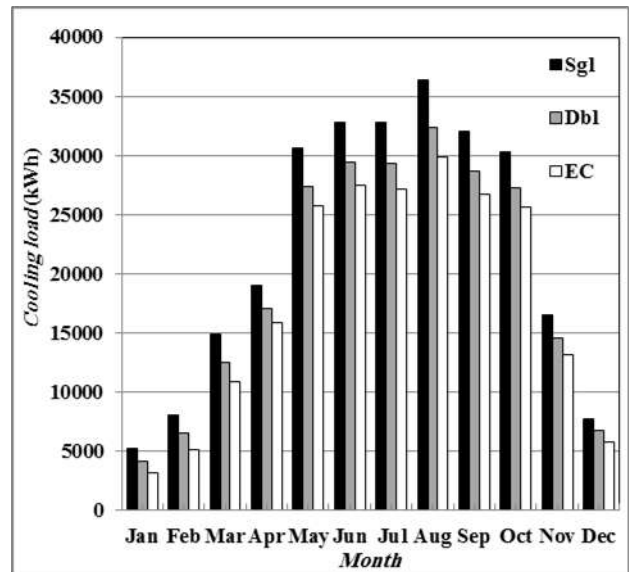


شکل (۱۱): بار سرمایش ساختمان اداری در ماه‌های سال در تبریز

در شکل (۱۲)، مجموع بار سرمایش ساختمان اداری در سه حالت شیشه‌سازی برای شهرهای مورد مطالعه بوشهر، شیراز و تبریز در طول سال نشان داده شده است. طبق شکل (۱۲)، بار سرمایشی ساختمان با شیشه الکتروکرومیک در هر سه شهر مورد مطالعه بوشهر، شیراز و تبریز کمتر از ساختمان با شیشه دوجداره و شیشه ساده است.

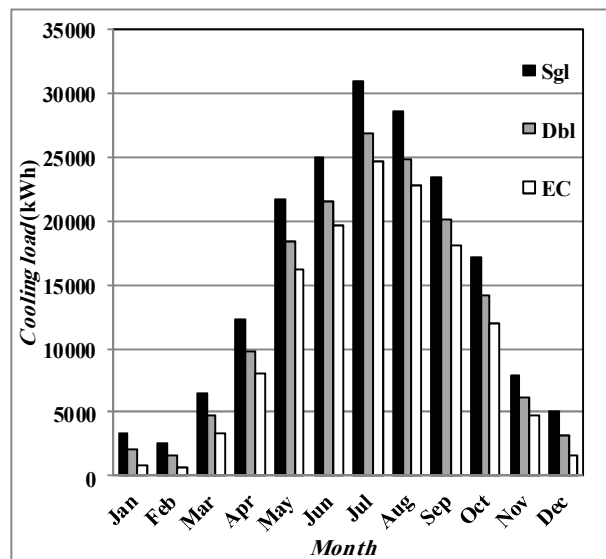


شکل (۱۲): متوسط سالانه بار سرمایش ساختمان اداری در سال برای بوشهر، شیراز و تبریز



شکل (۹): بار سرمایش ساختمان اداری در ماه‌های سال در بوشهر

در شکل (۱۰)، میزان بار سرمایش ساختمان اداری در شیراز در سه نوع شیشه مورد مطالعه در ماه‌های سال نشان داده شده است. طبق شکل (۱۰)، در همه ماه‌های سال بار سرمایش ساختمان با شیشه‌های الکتروکرومیک کمتر از دو نوع دیگر است. گرچه ساختمان با شیشه دوجداره عملکرد بسیار بهتری نسبت به شیشه ساده دارد، بار سرمایش بیشتری نسبت به ساختمان با شیشه الکتروکرومیک داراست. بیشترین بار سرمایش ساختمان در هر سه حالت شیشه‌سازی مربوط به ماه جولای بوده و در ساختمان با شیشه الکتروکرومیک ۲۰٪ کمتر از ساختمان با شیشه ساده و ۸٪ کمتر از ساختمان با شیشه دوجداره است. به این ترتیب، کنترل مطلوب تابش خورشید در شیشه الکتروکرومیک نسبت به دو نوع شیشه دیگر سبب عملکرد مناسب دما برای کنترل دما در فضای اداری است.



شکل (۱۰): بار سرمایش ساختمان اداری در ماه‌های سال در شیراز

۶. نتیجه گیری

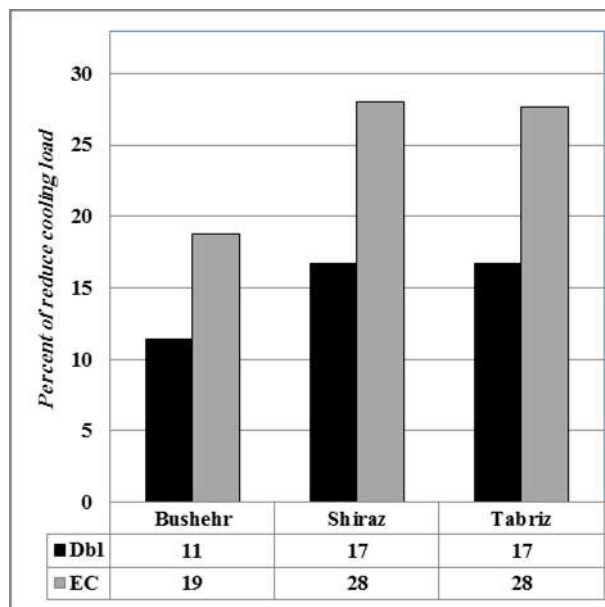
در این پژوهش، استفاده از شیشه‌های هوشمند الکتروکرومیک در جبهه بیرونی ساختمان‌های اداری مورد بررسی قرار گرفته و میزان تأثیر آن بر بار سرمایشی یک ساختمان سه طبقه در بوشهر با اقلیم گرم و مرطوب، شیراز با اقلیم گرم و خشک و تبریز با آب‌وهوای سرد مورد سنجش قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد:

۱. در بوشهر استفاده از شیشه الکتروکرومیک موجب کاهش بار سرمایش می‌شود. بار سرمایش ساختمان با شیشه هوشمند الکتروکرومیک ۱۹٪ کمتر از ساختمان با شیشه معمولی است و ۸٪ بیشتر از شیشه دوجداره باعث کاهش بار سرمایش می‌شود.
۲. شیشه الکتروکرومیک دارای عملکرد بسیار مناسب در شیراز با اقلیم گرم و خشک و تبریز با اقلیم سرد است. استفاده از آن در ساختمان اداری در شیراز و تبریز موجب کاهش ۲۸٪ بار سرمایش نسبت به ساختمان با شیشه ساده و کاهش ۱۰٪ نسبت به ساختمان با شیشه دوجداره می‌شود.

۳. از آنجا که در ساختمان‌های اداری، حرارت داخلی تولید شده در ساختمان به دلیل کاربرد تجهیزات الکترونیکی و روشنایی مصنوعی بالا بوده و در نتیجه عمده بار مصرفی این ساختمان‌ها بار سرمایشی است، در این پژوهش میزان تأثیر نوع شیشه‌ها بر بار سرمایشی مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال در تحلیلی جامع لازم است بار گرمایشی ساختمان نیز مورد توجه قرار گیرد.

هرچند میزان تأثیر کاهش بار سرمایش ساختمان با کاربرد شیشه‌های الکتروکرومیک در مقایسه با شیشه‌های دوجداره متداول بیشتر است، با توجه به شرایط متفاوت در هر پروژه ساختمانی، انتخاب بهینه مصالح ممکن است گزینه‌های مختلفی را شامل شود. بنابراین برای انتخاب گزینه بهینه بر اساس شرایط هر پروژه، لازم است مقایسه‌ای میان این نوع پنجره‌ها و پنجره‌های دوجداره متداول (با توجه به میزان مصرف الکتریسته و هزینه اولیه) انجام شود. گرچه با توجه به عملکرد مناسب شیشه هوشمند الکتروکرومیک در کاهش بار سرمایش ساختمان‌های اداری در اقلیم‌های گرم و مرطوب و گرم و خشک و سرد در نظر گرفتن مزایای این گونه شیشه‌ها برای استفاده در جبهه بیرونی ساختمان‌های اداری پیشنهاد می‌شود.

شکل (۱۳) میزان کاهش بار سرمایش ساختمان اداری با شیشه‌های الکتروکرومیک و شیشه دوجداره در مقایسه با ساختمان با شیشه ساده به صورت درصد، در شهرهای بوشهر، شیراز و تبریز نشان داده شده است. طبق شکل (۱۳)، استفاده از شیشه الکتروکرومیک به ترتیب در شهرهای بوشهر، شیراز و تبریز دارای بیشتر درصد کاهش بوده به گونه‌ای که در بوشهر، استفاده از شیشه هوشمند الکتروکرومیک موجب ۱۹٪ کاهش در بار سرمایش شده است. این در حالی است که استفاده از شیشه دوجداره در بوشهر ۱۱٪ بار سرمایش را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، شیشه الکتروکرومیک بهترین عملکرد را در شیراز با آب‌وهوای گرم و خشک و سپس تبریز با آب‌وهوای سرد دارد؛ به گونه‌ای که استفاده از شیشه الکتروکرومیک در شیراز موجب کاهش بار سرمایش به میزان ۲۸٪ درصد و شیشه دوجداره موجب کاهش ۱۷٪ در بار سرمایش شده است. همچنین استفاده از شیشه الکتروکرومیک در تبریز موجب کاهش ۲۸٪ بار سرمایش شده و شیشه دوجداره بار سرمایش را ۱۷٪ درصد کاهش می‌دهد.



شکل (۱۳): درصد کاهش بار سرمایش ساختمان اداری با شیشه دوجداره و الکتروکرومیک در بوشهر، شیراز و تبریز

منابع

- [1] Nasrollahi, F., *Green Office Buildings: Low Energy Demand Through Architectural Energy Efficiency*, Young Cities Research Paper series, Vol. 8, Berlin University, 2013.
- [2] Granqvist, C.G., "Electrochromics and Thermo-chromics: Towards a New Paradigm for Energy Efficient Buildings", *Materialstoday Proceeding*, pp. 2–11, 2016.
- [3] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. and Pout, C., "A Review on Buildings Energy Consumption Information", *Energy and Building*, Vol. 40, No. 3, pp. 394–398, 2008.
- [4] Daqiqeh, S., Shannigrahi, S. and Ramakrishna, S., "A Review of Conventional, Advanced, and Smart Glazing Technologies and Materials for Improving Indoor Environment", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol.

- 159, pp. 26–51, 2017.
- [5] 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", *Building and Environment*, Vol. 89, pp. 107–117, 2015.
- [6] Piccolo, A. and Simone, F., "Performance Requirements for Electrochromic Smart Window", *Journal of Building Energy*, Vol. 3, pp. 94–103, 2015.
- [7] Wen, R., Arvizu, M. A., Niklasson, G. A. and Granqvist, C. G., "Electrochromic for Energy Efficient Buildings: Towards Long-Term Durability and Materials Rejuvenation", *Surface Coating Technology*, Vol. 278, pp. 121–125, 2015.
- [8] Granqvist, C. G., "Recent Progress in Thermochromics and Electrochromics: A Brief Survey", *Thin Solid Films*, Vol. 614, pp. 90–96, 2016.
- [9] Tavares, P., Bernardo, H., Gaspar, A. and Martins, A., "Control Criteria of Electrochromic Glasses for Energy Savings in Mediterranean Buildings Refurbishment", *Solar Energy*, Vol. 134, pp. 236–250, 2016.
- [10] Gugliermetti, F. and Bisegna, F., "Visual and Energy Management of Electrochromic Windows in Mediterranean Climate", *Building and Environment*, Vol. 38, pp. 479–492, 2003.
- [11] 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.
- [12] Purushothaman, K. K., Antony, S. J. and Muralidharan, G., "Optical, Structural and Electrochromic Properties of Nickel Oxide Films Produced by Sol – Gel Technique", *Solar Energy*, Vol. 85, No. 5, pp. 978–984, 2011.
- [13] Piccolo, A., Pennisi, A. and Simone, F., "Daylighting Performance of an Electrochromic Window in A Small Scale Test-Cell", *Solar Energy*, Vol. 83, No. 6, pp. 832–844, 2009.
- [14] Deb, S. K., Lee, S., Tracy, C. E., Pitts, J. R., Gregg, B. A. and Branz, H. M., "Stand-Alone Photovoltaic-Powered Electrochromic Smart Window", *Electrochimica Acta*, Vol. 46, pp. 2125–2130, 2001.
- [15] DeForest, N., Shehabi, A., Selkowitz, S. and Milliron, D. J., "A Comparative Energy Analysis of Three Electrochromic Glazing Technologies in Commercial and Residential Buildings", *Applied Energy*, Vol. 192, pp. 95–109, 2017.
- [16] Granqvist, C. G., "Electrochromics for Smart Windows: Oxide-based Thin Films and Devices", *Thin Solid Films*, Vol. 564, pp. 1–38, 2014.
- [17] Zinzi, M., "Office Worker Preferences of Electrochromic Windows: A Pilot Study", *Building and Environment*, Vol. 41, pp. 1262–1273, 2006.
- [18] Piccolo, A. and Simone, F., "Effect of Switchable Glazing on Discomfort Glare From Windows", *Building and Environment*, Vol. 44, No. 6, pp. 1171–1180, 2009.
- [19] Sbar, N. L., Podbelski, L., Mo, H. and Pease, B., "Electrochromic Dynamic Windows for Office Buildings", *International Journal of Sustainable Built Environment*, Vol. 1, No. 1, pp. 125–139, 2012.
- [20] Shaeri, J. and Shaeri, Z., "The Use of Smart Glass in Building Design with a Sustainable Architecture Approach", *The 2nd National Conference on Architecture, Restoration, Urbanism and Sustainable Environment*, 2014. (in Persian)
- [21] Piccolo, A., "Thermal Performance of an *Electrochromic Smart Window Tested in an Environmental Test Cell*", *Energy and Building*, Vol. 42, No. 9, pp. 1409–1417, 2010.