نشریه علمی-تخصصی
پژوهش های نوین علوم مهندسی
ISSN: 2538-3809
سال هشتم، شماره ۲ (پیاپی: ۴۳)، تابستان ۱۴۰۲

# شیشه‌های هوشمند گامی نو در علوم مهندسی در جهت توسعه بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان

**فاطمه مظفری قادیکلائی[۱]، عالمه صالحی بالادهی[۲*]، صابر حسین پور بهنمیری[۳]**

*تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴*
*تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰*
*کد مقاله: ۲۶۶۱۶*

## چکـیده

یکی ازاصول معماری پایدار، کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌هاست. ازآنجاکه تقریبا نیمی ازانرژی مصـرفی بـرای ایجـاد آسایش درساختمانها ازطریق پنجره ها هدر میرود، مطالعات بسیاری با هدف دستیابی به راهکارهای ذخیرهٔ انرژی و کنترل تابش خورشید انجام شده است. یکی از این راهکارها استفاده از شیشهٔ هوشمنداست.برای انتخاب بهینهٔ مصالح،ارزیـابی میـزان تـأثیرو کارایی این شیشه‌ها مقاله حاضر با معرفی و مقایسه انواع شیشه‌های هوشمند الکتروکرومیک، ترموکرومیک به عنوان سامانه فعال و ایستا به سنجش میزان تاثیر سامانه ها بر انرژی مصرفی در ساختمان های مسکونی پرداخته است. در این مقاله سعی بر آن شده تا به معرفی این شیشه ها و شناسایی انواع آن پرداخته و همچنین مزایا و معایب آنان بررسی و با یکدیگر مقایسه شود، تا امکان انتخاب گزینه برتر در شرایط گوناگون فراهم آید. روش تحقیق از نوع توصیفی-تحلیلی بوده و بر پایه نتایج و مقالات منتشره از مطالعات آزمایشگاهی است.

**واژگـان کلـیدی:** شیشه های هوشمند، کنترل مصرف انرژی، شیشه الکتروکرومیک، شیشه ترموکرومیک

۱- فاطمه مظفری قادیکلائی، استادیارگروه معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران
۲- عالمه صالحی بالادهی، دانشجوی دکتری معماری، عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان ،دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران
*Asalehi13@yahoo.com*
۳- صابر حسین پور بهنمیری، دانشجوی دکترای معماری، گروه معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

## ۱- مقدمه

در عصر حاضر تحولات و پیشرفت‌های اخیر باعث به وجود آمدن آسیبهای زیست محیطی و افزایش چشمگیر مصرف انرژی گردیده است؛ که به عنوان مسئله ای اساسی در زندگی بشر مطرح میباشد. معماری نیز از این پدیده مهم مستثنا نبوده است، چراکه میزان مصرف انرژی در ساختمانها تاثیر بسیار زیادی بر روی محیط زیست دارد. در این میان،منافذ ساختمان( پنجره ها) از اهمیت زیادی در بهره وری انرژی و جلوگیری از اتلاف انرژی برخوردار است؛ هدف از این پژوهش بررسی شیشه های الکتروکرومیک و تروکرومیک و معرفی موثرین نوع شیشه هوشمند که قادر خواهد بود مصرف انرژی در ساختمان را کاهش دهد و شرایط آسایش کاربران را نیز فراهم سازد. این تحقیق در پی پاسخ به این سؤال است که چگونه میتوان از بررسی این دو نوع شیشه ی هوشمند ازلحاظ عملکرد، به بهترین گزینه ازنظرکارکرد و صرفه جویی در مصرف انرژی در راستای پاسخگویی به معماری پایدار دستیافت و آیا شیشه های هوشمند میتوانند در بهبود مصرف انرژی ساختمانهای مسکونی موثر واقع شوند؟

با توجه به بیان اهمیت تحقیق و با استفاده از یک روش تحقیق مشخص، روند این تحقیق برای رسیدن اهداف خاصی دنبال میشود. نتایج این تحقیق میتواند در درجه اول به اهداف کلان کشور در زمینه صرفه جویی مصرف انرژی کمک کند و هزینه های تولید انرژی کشور را کاهش دهد و از طرفی دیگر نیز وابستگی به منابع تجدیدناپذیر را کاهش دهد.

## ۲- پیشینه تحقیق

بحران انرژی در دهه های اخیر سبب نگرانی جامعه جهانی شده و پژوهشهای مختلفی در عرصه های مختلف علمی تلاش کرده اند تا با استفاده از راهکارهای مختلفی این نگرانی را تا حدودی برطرف کنند. از طرفی، معماری به عنوان رشته ای که در ارتباط مستقیم با طراحی و ساخت ساختمان است نقش مهمی در بهینه سازی مصرف انرژی ساختمانها بر عهده دارد. یکی از بخشهای ساختمان که توجه به آن در فرآیند طراحی اهمیت فراوانی دارد منافذ یا همان پنجره های ساختمان است که مرز بین فضای داخل و خارج ساختمان است و بهینه سازی این بخش اهمیت فراوانی در بهینه سازی مصرف انرژی کل ساختمان دارد. این تحقیق تلاش میکند تا تاثیر پنجره های هوشمند را بر مصرف انرژی ساختمان مسکونی پیدا کند (فتحی پیرکاشانی، ۱۳۹۹،ص ۵)

در سال ۲۰۰۵ پرز و همکارانش در پژوهشی به بررسی عملکرد شیشه های مختلف در نمای دو پوسته ساختمان پرداختند. آنها تاثیر شدت تابش خورشید بر حرارت جذب شده، دبی جرمی و تغییرات دمای هوای بین دو پوسته را برای ۱۰نوع شیشه ی مختلف مورد بررسی قرار دادند. در سال۲۰۱۲ ایگناتویچ و همکارانش تاثیر پنجره های دو و سه جداره low-e و بازتابنده با گازهای مختلف را در نمای دو پوسته ساختمان مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که برای کشور صربستان استفاده همزمان از شیشه ی سه جداره low-e با گاز کریپتون و شیشه ی دو جداره بازتابنده با گاز آرگون بهترین عملکرد را در فصل تابستان خواهد داشت. در سال۲۰۱۳ پیتالوگا به بررسی عملکرد دیوار ترومب با استفاده از شیشه های الکتروکرومیک پرداخت. ایشان نشان داد که استفاده از شیشه های هوشمند الکتروکرومیک در دیوار ترومب میتواند مصرف انرژی ساختمان را نسبت به دیوار ترومب با شیشه ی معمولی تا ۲۹,۵٪ کاهش دهد. در سال۲۰۱۴ اسکاف و همکارانش عملکرد تابستانه ی پنجره های تهویه شونده با شیشه های جاذب و هوشمند الکتروکرومیک را بررسی کردند. آنها نشان دادند که با انتخاب لایه ی مناسب low-e حرارت جذب شده توسط پنجره های تهویه شونده نسبت به پنجره های معمولی تا ۵۵٪ کاهش مییابد(سعادتی نسب و همکاران، ۱۳۹۵،ص۹۷).

## ۳- بدنه تحقیق

در طبیعت موجودات زنده با تغییرات صورت پذیرفته در محیط اطراف، سازگار شده و طی یکسری تغییرات درونی، هماهنگ با ارگانیسم طبیعی تغییر می یابند. این تغییرات با مصرف حداقل انرژی و در سازگاری کامل با محیط اطراف خود صورت می پذیرد. کاهش مصرف انرژی با استفاده از روش ها و فناوری های جدید، با هدف انطباق با محیط زیست( طراحی ساختمان صفر انرژی) از دغدغه های معماران و غایت طراحی در دهه ای گذشته تا کنون می باشد. در این راستا منافذ ساختمان بالاخص پنجره ها از بخش های مهم در تولید و حفظ انرژی و دستیابی به آسایش در ساختمان نقش بسزایی را ایفا می کند( باقری گرجی، ۱۳۹۹، ص۶). یکی از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار برانرژی مصرفی در ساختمان، شیشه ها یا پنجره های ساختمان است. شیشه های هوشمند و متحرک با سازگار کردن خود با محیط اطراف میتوانند نقش به سزایی در بهینه سازی مصرف انرژی داشته باشند. بااین وجود، ضعف این سیستمها، هزینه های بالای نصب آنها میباشد. هدف ما تشویق به در نظر گرفتن این نوع سیستمهاست. چراکه در حال حاضر شیشه های هوشمند حتی در فرایند توسعه طراحی نیز در نظر گرفته نمیشوند، درحالیکه بسته به مقیاس، محل و مفهوم پروژه شیشه های هوشمند میتوانند گزینه ی مناسبی در طراحی باشند و عملکرد ساختمان را به میزان چشمگیری بهبود بخشند(نامدارپور،گل افشان، ۱۳۹۵).صنعت ساختمان مصرف کننده بخش بزرگی از انرژی مصرفی در جهـان بوده و ۳۰٪ تا ۴۰٪

مصرف انرژی جهانی مربوط به سـرمایش، گرمـایش و روشنایی است. در ایران نیز حـدود ۴۰٪ مصـرف انـرژی مربـوط بـه بخش ساختمان است(Nasrollahi, F. 2013)

برای کاهش مصرف انرژی و بهبود کیفیت فضای داخلی، تحقیقات را بر بهبود پوشش خارجی ساختمان متمرکز کرده اند. در این رابطه راه حل های گوناگونی پیشنهادشده است، ازجمله: تلفیق سبزینگی در سطوح و دیگری توسعه ی فناوری های نمای هوشمند برای کنترل تابشهای خورشیدی و... . راه حل دوم ایجاد رابطه ای دوطرفه با محیط بیرون از طریق توسعه ی فناوری های مربوط به منافذ نمای ساختمان است. این دستگاه ها «شیشه های هوشمند» نامیده میشوند که میتوانند با شرایط محیطی مختلف سازگار شوند تا مصرف انرژی و آسایش محیط داخلی را به حالت بهینه ای برسانند.

امروزه، بحران های زیست محیطی و انرژی به عنوان مسئله ای اساسی در زندگی بشر مطرح شده است. معماری نیز از این پدیده مهم مستثنا نبوده است، زیرا میزان مصرف انرژی در ساختمان ها تاثیر بسیار زیادی بر روی محیط زیست دارد. از سوی دیگر با افزایش استفاده از نماهای شیشه ای، لزوم استفاده از روشی کارآمد برای کنترل شرایط محیطی در ساختمان ها ضروری است. نماهای شیشه ای با توجه به مقادیر کم خاصیت عایقی خود، بسیار ناکارامد است( باقری گرجی، ۱۳۹۹، ص ۳۰).

تأثیر پوشش ساختمان بر مصرف انرژی را نباید دست کم گرفت: در سطح جهانی، گرمایش و سرمایش فضا بیش از حد است. به طور کلی، ساختمان‌ها مسئول مصرف بیش از یک سوم انرژی جهانی هستند. طراحی و ساخت اجزای پوششی ساختمان نیز بر راحتی و بهره وری سرنشینان تأثیر می گذارد. مشکلات رایج در بسیاری از کشورها عبارتند از ضعف پنجره ها با سطوح داخلی سرد که باعث کشش، تابش خیره کننده از جهت نامناسب یا بدون سایه پنجره ها و افزایش گرمای بیش از حد از پنجره های رو به شرق یا غرب می شود. دیوارها و سقف‌های بدون عایق زمانی منجر به هزینه‌های بالای انرژی و شرایط ناخوشایند می‌شوند که تجهیزات گرمایشی یا سرمایشی قادر به حفظ دمای مطلوب داخلی نیستند.

در حالی که طرفداران بهره وری انرژی، صرفه جویی در انرژی را به عنوان اولویت اصلی در بررسی طراحی پوشش ساختمان می دانند، هدف اولیه پوشش ساختمان محافظت از ساکنان و ایجاد سرپناه اولیه است. پوشش ساختمان عملکردهای مختلفی را انجام می دهد که امنیت، حفاظت در برابر آتش، حریم خصوصی، راحتی و سرپناه در برابر آب و هوا و همچنین مزایایی مانند زیبایی شناسی، تهویه و دید به بیرون را ارائه می دهد. چالش کلیدی بهینه سازی طراحی کلی ساختمان و پوشش ساختمان برای رفع نیازهای ساکنین و در عین حال کاهش مصرف انرژی است.

به حداکثر رساندن مزایای نور خورشید برای کاهش نیازهای گرمایشی و روشنایی عنصر اصلی طراحی های یکپارچه است. به طور مشابه، انرژی مورد نیاز برای خنک کردن را می توان با به حداقل رساندن افزایش گرما در تابستان با استفاده از جرم حرارتی، لعاب کارآمد، عایق، سایه، سطوح بازتابنده و تهویه طبیعی کاهش داد. نوآوری اخیر در فناوری شیشه های هوشمند می تواند گرمایش غیرفعال بیشتری را در زمستان و سایه اندازی را در تابستان، امکان پذیر کند.

بسیاری از این عناصر طراحی را می توان با هزینه کمی اضافی در هنگام ساخت یک ساختمان جدید اجرا کرد. ساختمان های پیشرفته با انرژی نزدیک به صفر در بسیاری از مناطق جهان در حال ساخت هستند و چندین کشور اتحادیه اروپا (EU) سیاست هایی را برای الزام ساختمان های با انرژی صفر اتخاذ کرده اند.

در بسیاری از نقاط جهان، ساختمان‌ها مدت‌هاست که با استفاده از مصالح محلی برای به حداکثر رساندن راحتی با توجه به آب و هوای محلی ساخته می‌شوند. بنابراین، سقف ها و دیوارهای بسیار انعکاسی قرن ها پیش در آب و هوای گرم معمول بودند، در حالی که سقف های کاهگلی ضخیم ویژگی های عایق را در آب و هوای سرد ارائه می دادند. استفاده از تهویه طبیعی نیز بسیار رایج بود. سازه های با جرم حرارتی بالا برای مدت بسیار طولانی رایج بوده اند و هنوز در بسیاری از مناطق بکار می روند، اما استفاده از آنها در برخی مناطق برای کاهش هزینه متوقف شده است. نیاز به تکنیک‌های ساخت‌وساز سریع‌تر و رویکردهای مقرون‌به‌صرفه‌تر شده است که در بسیاری از موارد منجر به سازه‌های کارآمدتر نسبت به تکنیک‌های قدیمی می‌شود.

در حالی که همه "منافذ"در نشت هوا تاثیر می گذارند، پنجره ها به توجه ویژه ای نیاز دارند، به ویژه در هنگام نصب یا تعویض. پنجره هایی که می توانند باز و بسته شوند – پنجره های قابل اجرا – نیز در معرض نشت هوا در اطراف ارسی هستند. پنجره های جدید تمایل به نرخ نشتی کمتری دارند که در معیارهای عملکرد پنجره مشخص شده یا باید مشخص شوند. نشت هوا از پنجره های قدیمی را می توان با استفاده از درزگیرها، واشرها و پانل های پنجره اضافی (داخلی یا بیرونی) کاهش داد. (Drumheller et al., 2007).

پنجره ها عملکردهای مختلفی دارند، از جمله دسترسی به ساختمان، ایجاد چشم انداز، اجازه دادن به نور روز و ارائه خروج ایمنی. در بیشتر موارد، پنجره ها باید تا حد امکان نور را وارد کنند، اما افزایش گرما باید در تابستان به حداقل برسد و در زمستان به حداکثر .انتخاب مناسب اندازه، جهت و لعاب برای متعادل کردن جریان گرما و نور طبیعی ضروری است. جریان گرما (یا تعادل انرژی) به فصل، نوع ساختمان و عملکرد ساختمان بستگی دارد. اگر ساختمان گرم می شود و دمای بیرون سرد است، پنجره باید گرما را حفظ کند (مقدار U کم)، تلفات را به حداقل برساند و تا آنجا که ممکن است تابش خورشیدی را وارد کند. از سوی دیگر،

اگر دمای داخل ساختمان بیش از حد بالا باشد و نیاز به سرمایش باشد امکان خروج گرما از ساختمان را فراهم کنند( Zhivov et al., 2012).

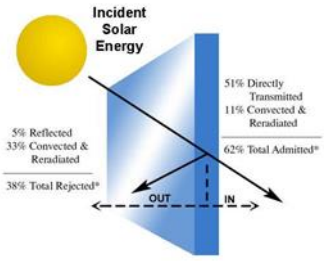
در تعیین عملکرد پنجره برای یک منطقه خاص، لازم است هر دو بار گرمایش و سرمایش برای به حداکثر رساندن عملکرد و دستیابی به کمترین تأثیر انرژی سالانه کل در نظر گرفته شود. بهترین تعادل انرژی در برخی از آب و هواها، تعادل انرژی مثبت – یا افزایش انرژی – را می توان با استفاده از شیشه های استاتیک پیشرفته همراه با سیستم های پنجره ای عایق کاری شده و سایه های معماری بهینه شده برای اثرات فصلی (مانند شیشه سه جداره) به دست آورد. برای آب و هوای سرد خیلی مهم است اما در آب و هوای گرم نیز مورد نیاز است(Interconnection, 2013).

بهره وری انرژی پنجره ها به شدت به طراحی کل پنجره بستگی دارد، از جمله اینکه آیا ثابت است یا می تواند برای تهویه طبیعی باز و بسته شود. عناصر پنجره شامل قاب، شیشه‌ها، پوشش‌ها، جداکننده‌های بین شیشه‌ها و گازهای بی‌اثر با رسانایی حرارتی کم برای کاهش انتقال حرارت در داخل حفره‌ها، شکستگی‌های حرارتی و سخت‌افزارهای عملیاتی است ( IEA, 2010b).

## ۳-۱- شیشه های هوشمند

در یک ساختمان معمولی، فقط حدود ۵تا ۱۰درصد ساختمان از شیشه تشکیل می گردد، درحالیکه حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد اتلاف انرژی از این حجم کم صورت می گیرد (بیگلری و علیزاده اسلامی،۱۳۹۴، ص۲) با افزایش تعداد پنجره ها در ساختمان میزان حرارت وارده و خارجه بیشتر و در نتیجه میزان آسایش ساکنین کمتر خواهد شد .لازم به ذکر است که انتقال حرارت در شیشه ها مانند سایر مواد، از سه طریق تابش، همرفت و هدایت گرمایی اتفاق می افتد. با روشهای موجود تنها می توان جلوی ۱/۳ اتلاف انرژی را که از دو راه همرفت و هدایت می باشد، متوقف سازیم و نمی توان جلوی ۲/۳ اتلاف از طریق تشعشع را گرفت که در تصاویر ۱و ۲ مشاهده می کنید(حسینی ایمنی،۱۳۹۴،ص۱).

**تصویر ۱: نسبت اتلاف حرارت از طریق پنجره ها(ماخذ: نگارندگان)**




**تصویر ۲: نسبت اشعه های دریافتی از خورشید (ماخذ: حسینی ایمنی،۱۳۹٤)**

امروزه شیشه هایی که با تکنولوژی پیشرفته تولید می شوند، علاوه بر تامین روشنایی روز، دارای کیفیات دیگری همچون کنترل خورشیدی، آسایش و راحتی از نظر دما (محافظت از گرمای تابستان و سرمای زمستان) محافظت از اشعه های مضر خورشید و... نیز هستند. انواع پنجره های ساخته شده از این شیشه ها عبارتند از: پنجره های کم انرژی – پنجره های کم انرژی حاوی آرگون – پنجره های منعکس کننده گرما – پنجره های برتر – پنجره های هوشمند.

پنجره ها یک عنصر مهم ساختمانی در ساختمان های امروزی هستند. آنها نور روز و دید بیرون را برای ساکنان ساختمان فراهم می کنند که برای رفاه انسان مهم است. در عین حال، پنجره ها اغلب به عنوان یک پل حرارتی بزرگ در پوشش ساختمان با تلفات حرارتی بالا در نظر گرفته می شوند. علاوه بر این، پنجره ها می توانند منبع گرمای بیش از حد و مشکلات خیره کننده باشند. در سال های اخیر، عملکرد پنجره به طور قابل توجهی از طریق فن آوری های مختلف پنجره و شیشه بهبود یافته است، مانند شیشه های چند لایه (به عنوان مثال دو یا سه جداره) و استفاده از چندین نوع پوشش، که به طور کلی باعث صرفه جویی در مصرف انرژی پنجره ها می شود (B.P. Jelle et al،2012) پنجره‌های سنتی معمولاً جزء ساختمان‌های استاتیک هستند، در حالی که آب و هوا و دما و تابش خورشید در حال تغییرات مداوم است. از این رو، اجازه دادن ورود نور روز واستفاده از نمای بیرون، در حالی که از تابش خیره کننده و گرمای بیش از حد جلوگیری شود، چالشی بحث برانگیز است. سایه بان خورشیدی مانند پرده اغلی به عنوان وسایل جانبی استفاده شده پنجره با فنآوری های پیشرفته مانند پنجره های پویا، به دلیل توانایی هایشان در پاسخ به

نیازهای کاربر در حال توسعه سریع هستند.این پنجره‌ها اغلب «پنجره‌های هوشمند» نامیده می‌شوند و می‌توانند به دسته‌های مختلفی تقسیم شوند، یعنی پنجره‌های کرومیک (ترموکرومیک، فتوکرومیک و الکتروکرومیک)، کریستال‌های مایع و دستگاه‌های ذرات معلق(R. Baetens et al ،2010).

منظور از شیشه های هوشمند، انواع شیشه هایی است که با ممانعت از عبور بخش مشخصی از پرتو نور خورشید سبب کاهش اتلاف حرارت در ساختمانها میشوند. با استفاده از این نوع شیشه ها میزان مصرف انرژی با افزایش بازده گرمایی در هوای سرد و کاهش آن در هوای گرم بهبود می یابد(Iraqi, H.2013) در یک دسته بندی کلی میتوان انواع شیشه های هوشمند را به شیشه های ترموکرومیک ،الکتروکرومیک تقسیم بندی نمود. شیشه های ترموکرومیک ،شیشه هایی با رنگ متغیر نسبت به تغییرات دمایی هستند(Feng, W et al،2016).

### ۳-۱-۱- پنجره ترموکرومیک

پنجره هایی که بوسیه غشاهای ترموکرومیک درون شیشه های خود، انرژی مورد نیاز برای غلبه بر گرمای بدست آمده از خورشید را کاهش می دهند. هنگامی که هوا خنک است، غشا های ترمو کرومیک ۹۰ درصد اشعه خورشید را از خود عبور می دهند. بنابراین هیچ تاثیری بر مصرف انرژی ندارند. شیشه های ترموکرومیک احتمالا کم هزینه ترین شیشه های تغییر پذیر هستند .پنجره های ترموکرومیک از محلول آب و پلیمری خاص که بین پوسته ای الکترونیکی قرار گرفته است، تشکیل شده اند. با خنک شدن هوا، مولکول های پلیمری داخل پوسته منقبض شده و قطر مولکول کمتر از طول موج نور خورشید می گردند و در نتیجه نور خورشید آزادانه از میان پوسته رد می شود. ولی هرگاه پوسته تا حدود دمای ۷۵درجه گرم می شود، قطر مولکول های پلیمری بزرگتر از طول موج نور خورشید گشته و در نتیجه به یکدیگر متصل شده و نور خورشید را باز می تابانند. و رنگ پوسته ترموکرومیک میان شیشه، به رنگ سفید شیری (مات) در می آید و تنها اجازه عبور ۲۰درصد از نور خورشید را می دهد، در تصویر ۳ لایه های تشکیل دهنده ی این نوع پنجره را مشاهده می فرمایید(هدایتی، ف و رازقی، ف،۱۳۹۶).

**تصویر۳: ساختار پنجره هوشمند با قابلیت ذخیره‌سازی انرژی بالا(Wu, S., et al،2023)**

از مزایای این نوع پنجره ها نسبت به پنجره های دیگر می توان به موارد زیر اشاره کرد:

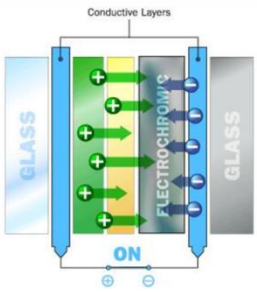
- صرفه جویی در انرژی
- ارزان ترین نوع شیشه های تغییر پذیر پس از شیشه های فوتوکرومیک
- هیچ انرژی الکتریک مصرف نمی کنند
- بدون فرمان استفاده کننده کار می کنند.
- جلوگیری از عبور اشعه های مضر خورشید
- بنا بر اعلام شرکت تولید کننده این نوع شیشه، دوستدار محیط زیست محسوب می شود.
- علاوه بر مزایای ذکر شده دارای معایبی می باشد که به اختصار به آن اشاره می شود:
- عدم کنترل شفافیت و کدری پس از نصب به طوری که تنها دمای محیط عامل تغییر وضعیت آن است.
- عدم وجود درجات متنوع شفافیت و کدری

### ۳-۱-۲- پنجره الکتروکرومیک

پنجره های الکتروکرومیک از دو قطعه شیشه ای با چندین لایه فشرده در میان آن تشکیل شده است. در این شیشه ها، بوسیله اعمال ولتاژ الکتریکی پایینی پوشش میکروسکوپی روی سطح شیشه ها شارژ شده و موجب تغییر رنگ از روشن به تیره می گردد. مقدار جریان الکتریکی می تواند بوسیله حسگرهایی که به نور خورشید واکنش نشان می دهند تعیین شود .برای ساختن یک

پنجره الکتروکرومیکی، یک مجموعه باریک چند لایه لابه لای قطعات شیشه های معمولی قرار داده شده اند. دو لایه بیرونی مجموعه، هادی الکترونیکی شفاف هستند و لایه های بعدی مجموعه، شامل یک لایه الکترود منفی و یک لایه الکتروکرومیک است، که یک لایه هادی یونی ما بین آنها قرار گرفته است. هنگامی که ولتاژ کمی به هادی ها اعمال می شود، حرکت یون ها از الکترود منفی به لایه الکتروکرومیک، موجب تغییر رنگ مجموعه می شود. برعکس، هنگامی که ولتاژ منفی اعمال می شود، یون ها از لایه الکتروکرومیک به طرف لایه الکترود منفی باز می گردند. در نتیجه، دستگاه به وضعیت پیشین خود بازمی گردد. این امکان وجود دارد که دستگاه برای جذب تنها بخشی از طیف نوری مانند اشعه مادون قرمز خورشید طراحی شود(هدایتی، ف و رازقی، ف،۱۳۹۶). از سال ۲۰۰۰ با استفاده ی بیشتر از شیشه های الکتروکرومیک در ساختمانها به مزایای این شیشه پی بردند که از جمله آن می توان به صرفه جویی تا ۶۰٪ از نیاز به نور مصنوعی، کاهش بار خنک کننده تا ۲۰٪ و استقبال خوب کاربران از این تکنولوژی به دلیل کاهش تابش خیره کننده، انعکاس و ناراحتی در نزدیکی پنجره ها اشاره داشت(Casini, M.2018).

مواد الکتروکرومیک متعلق به دسته مواد هوشمند تغییر دهنده خواص هستند و می توانند به طور مستقل و برگشت پذیر رنگ خود را در اثر واکنش های اکسیداسیون به عنوان پاسخ به یک محرک الکتریکی خارجی تغییر دهند. که در تصویر شماره ۴ نوع عملکرد این نوع شیشه ها بصورت شماتیک نشان داده شده است.




**تصویر٤: تصویر شبیه سازی شده از شیشه های الکتروکرومیک- انواع ذخیره سازهای یونی (شاعری و وکیلی نژاد۱۳۹۷)**

از مزایای این نوع پنجره ها نسبت به پنجره های دیگر می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- صرفه جویی در مصرف انرژی
- این نوع شیشه ها تنها با ولتاژ ۱ تا ۳ ولت کار می کنند.
- این نوع شیشه ها تنها برای تغییر درجه کدری نیاز به جریان الکتریکی دارند نه برای باقی ماندن در وضعیتی خاص
- درجات متنوع انتقال نور از تیره به روشن

همچنین دارای معایب زیر می باشند:

- سرعت واکنش شیشه های الکترومیک پایین است.
- مواد مصرفی این شیشه ها وارد چرخه زندگی نشده و به عنوان ضایعات تجزیه ناپذیر به محیط زیست آسیب می زنند.
- هنگام تغییر رنگ در لبه بیرونی پنجره به سمت مرکز شیشه، تاثیر نامطلوبی بر روی چشم ها می گذارد.
- قیمت بسیار بالای آنها.
- فن آوری بسیار بالا و پیچیده آنها.

با توجه به مطالب بیان شده می توان اینگونه گفت که براساس قانون اول ترمودینامیک، مقدار کل انرژی تغییر نمیکند. هرگاه انرژی در یک حالت ناپدید شود باید همزمان به اشکال دیگری پدیدار شود. از این وضعیت میتوان برای بهره بردن از نیروهای محیطی استفاده نمود و اگر پنجره( شیشه ها)، یک لایه ی مرزی واسط در نظر گرفته شود، از آن میتوان برای تبدیل انرژ ی ها در جهت بهبود اهداف بهره برد که پاسخگویی به تقاضای رو به رشد آسایش محیطی و نیاز فوری به بهبود بهره وری انرژی ساختمان های جدید و موجود و بررسی عمیق از ویژگی ها و الزامات پنجره های هوشمند ساختمان که می تواند در کنار یک حداکثر عایق حرارتی، امکان تنظیم ورود نور خورشید و همچنین تولید انرژی الکتریکی را به همراه داشته باشد، میتواند یکی از اهداف مدنظر باشد و همچنین با پیشرفت بزرگ در زمینه علم مواد، متریال های جدیدی عمدتاً با بهره‌گیری نانومواد یا مواد هوشمند وارد بازار شدند. در میان این فناوری‌های جدید، متریال دینامیک فعال با تعدیل میزان ورود تشعشعات مادون قرمز و نور مرئی، امکان صرفه‌جویی قابل توجهی در انرژی و همچنین تضمین آسایش حرارتی و بصری بیشتر را برای سرنشینان فراهم می‌کند.

## ۸- نتیجه‌گیری

امروزه پیدا کردن بهترین راه حل برای بهینه سازی مصرف انرژی ساختمان برای رسیدن به اهداف ساختمانهای نزدیک به صفر انرژی یک ضرورت محسوب میشود. ساختمانهای مسکونی نیاز سرمایشی و الکتریکی بیشتری نسبت به نیاز گرمایشی دارند و این امر نقش ابزارهای بهینه سازی مصرف انرژی را در کاهش بار سرمایشی و الکتریکی برجسته میکند تا بتوانند مصرف انرژی این دو بخش را کاهش دهند و در صورت امکان بار گرمایشی ساختمان را نیز کاهش دهند. بنابراین، پیدا کردن بهترین پاسخ برای کاهش انتقال گرما از طریق پنجره و کاهش بار سرمایشی تا حد ممکن ضروری است.این تحقیق تلاش کرده تا تاثیر شیشه های هوشمند را بر مصرف انرژی ساختمان مسکونی با استفاده از ورودیهای کنترل خاصی بررسی کند.

ساختمان‌های با انرژی صفر، که امروزه تنها یک بازار خاص در برخی کشورها را نشان می‌دهند، باید در سرتاسر جهان معمول شوند. برای دستیابی به این هدف، توسعه محصول و بازار برای افزایش دسترسی به مصالح ساختمانی پیشرفته مقرون به صرفه مورد نیاز است. فناوری جدید باید توسعه یابد، با معیارهای عملکرد پشتیبانی شودو اجزای ساختمانی پیشرفته باید به گونه ای تطبیق داده شوند که در بازارهای جدید قابل دوام باشند. بسیاری از تولیدکنندگان مصالح ساختمانی به دلیل ماهیت کالایی مصالح و محصولات ساختمانی، چرخه طولانی تغییر به فناوری جدید و حاشیه سود نسبتاً کم، درآمد کمتری را نسبت به سایر بخش‌های اقتصاد صرف تحقیقات می‌کنند. بنابراین، دولت ها باید از تحقیق و توسعه حمایت کنند که ریسک سرمایه گذاری در فناوری های پیشرفته را کاهش دهد. اولویت های تحقیق و توسعه دولت باید با مشورت با مسئولان صنعت بخش خصوصی تعیین شود.این پژوهش با تحلیل و بررسی دو نوع از پنجره های هوشمند به بررسی رفتار حرارتی هر یک از آنها پرداخته و تاثیر هر یک را بر میزان کاهش مصرف انرژی در ساختمان مورد واکاوی قرار داده است.

## منابع


۱. باقری گرجی ن، (۱۳۹۹). « طراحی پوسته تطبیق پذیر، به منظور ایجاد تهویه طبیعی، با استفاده از جذب رطوبت. نمونه موردی: نمایشگاه موقت در شهر بابلسر»، دانشکده هنر و معماری دانشگاه مازندران.

۲. سعادتی نسب، م، ذوالفقاری، ع، عنبرسوز، م و نوروزی جاجرم، ا. (۱۳۹۵). «بررسی رفتار حرارتی نمای دوپوسته دارای شیشه های هوشمند الکتروکرومیک و تاثیر آن بر کاهش مصرف انرژی» .کنفرانس بین المللی تهویه مطبوع و تاسیسات حرارتی و برودتی. SID. https://sid.ir/paper/879904/fa

۳. شاعری، ج، و وکیلی نژاد، ر،(۱۳۹۷).«تاثیر شیشه های هوشمند بر بهره خورشیدی و بار سرمایش در یک ساختمان اداری در اقلیم گرم و مرطوب بوشهر». نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران (فارسی)، ۲۰(۴ )، ۹۷-۱۱۷

۴. فتحی پیرکاشانی ،س، (۱۳۹۹). « طراحی ساختمان بلندمرتبه با هدف بهینه سازی مصرف انرژی از طریق پوسته های هوشمند»، پایان نامه ارشد، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه رازی.

۵. نامدارپور، ف و گل افشان، س،(۱۳۹۵).«رویکرد هوشمند سازی در نماهای متحرک سازگار با محیط».دومین کنفرانس بین المللی یافته های نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری ومدیریت شهری،تهران،https://civilica.com/doc/499364

۶. هدایتی، ف و رازقی، ف، (۱۳۹۶).« بررسی عملکرد انواع شیشه های هوشمند در معماری». چهارمین کنفرانس ملّی معماری و شهرسازی پایداری و تاب آوری از آرمان تا واقعیت ،قزوین،https://civilica.com/doc/632216

7. B.P. Jelle, A. Hynd, A. Gustavsen, D. Arasteh, H. Goudey, R. Hart, Fenestration of today and tomorrow: a state-of-the-art review and future research opportunities, Sol. Energy Mater. Sol. Cell. 96 (2012) 1–28.
8. 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).
9. R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: a stateof-the-art review, Sol. Energy Mater. Sol. Cell. 94 (2010) 87–105.
10. Casini, M. (2018). Active dynamic windows for buildings: A review. Renewable Energy, 119, 923-934.
11. Drumheller, S.C., C. Köhler and S. Minen (2007), "Field evaluation of Low-E Storm Windows", presented at Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X International Conference, Clearwater, Florida, 2-7 December.

12. IEA (2010a) Energy Performance Certification of Buildings, Policy Pathway, OECD/IEA, Paris.
13. Interconnection (2013), “Euro Crisis Strains the Western European Window Industry, No Recovery Before 2014”, May, www.interconnectionconsulting.com.
14. Nasrollahi, F., Green Office Buildings: Low Energy Demand Through Architectural Energy Efficiency, Young Cities Research Paper series, Vol. 8, Berlin University, 2013
15. Iraqi, H., “Investigation of Properties of Thermochemical Coating of Vanadium Dioxide for Smart Glass”, Journal Word of Color, Vol. 4, (2013)
15. Winbuild (2012), Energy Savings Potential of Building Envelope and Windows Technologies, for U.S. Department of Energy, sub-contract ORNL4000106215 of ORNL, Winbuild Inc., Fairfax, Virginia.
16. Wu, S., Sun, H., Duan, M., Mao, H., Wu, Y., Zhao, H., & Lin, B. (2023). Applications of thermochromic and electrochromic smart windows: Materials to buildings. Cell Reports Physical Science.
17. Zhivov, A., D. Herron, J.L. Durston and M. Heron (2012), “Achieving good air tightness in new and retrofitted US Army buildings”, presented at TightVent Europe Workshop, Brussels, 28-29 March.