نقش شیشه (پنجره) در رفتار حرارتی ساختمان

علی نمازیان *، یحیی سپهری **

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۰۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۲۷

چکیده

پنجره‌ها و بازشوها از مهم‌ترین بخش‌های هر بنا است. تاریخ پنجره و مصالح پوششی آن، قدمتی به بلندای تاریخ معماری دارد. در فرهنگ‌های مختلف قبل از اختراع جام شیشه، از پوست حیوانات گرفته تا کاغذهای روغنی برای پوشش پنجره‌ها استفاده می‌شد. پس از وقوع انقلاب صنعتی در غرب و به مدد مصالح نوین و پیشرفت تکنولوژی، استفاده از شیشه در بنا رشد چشمگیری یافت. هرچه جام‌های شیشه‌ای بزرگتری تولید شد، پنجره‌ها هم بزرگتر شدند. بزرگی جام‌ها به جایی رسید که حتی در مواردی نمای ساختمان‌ها به‌صورت تمام شیشه ساخته می‌شد. این موضوع معنای پنجره را تغییر داد و پنجره‌ها دیگر تنها روزنه یا حفره‌ای درون دیوارها نبودند. این رویه در قالب سبک بین‌المللی به دیگر کشورها راه یافت. با اینکه این سبک هم‌آهنگ با اقلیم و معماری بومی ایران نبود امّا در ایران هم گسترش پیدا کرد. با وقوع بحران انرژی، پژوهشگران صنعت شیشه و پنجره بر آن شدند تا راهکارهای نوینی در جهت بهبود رفتار حرارتی شیشه و پنجره ارائه کنند. این نوشتار با مروری کوتاه بر سیر تاریخی تحوّل شیشه در معماری، راهکارهای بهبود رفتار حرارتی آن‌را مورد بررسی قرار داده است. این راهکارها در دو بخش ارائه شده‌اند: در بخش نخست عوامل خارجی و شرایط فیزیکی مؤثر در رفتار حرارتی شیشه و پنجره بررسی شده است. این بخش شامل بررسی تأثیر محیط پیرامون بر رفتار حرارتی پنجره، موقعیت و جهت‌گیری پنجره و نقاب سایه است. در بخش دوم، پنجره‌ها از نظر اجزا و مواد و مصالح تشکیل دهندهٔ آن‌ها بررسی شده‌اند. در این بخش انواع شیشه‌ها و قاب‌های پنجره معرفی و از نظر میزان اتلاف انرژی و شاخص‌های دیگر با هم مقایسه شده‌اند.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

واژگان کلیدی: جام شیشه، پنجره، اتلاف انرژی، رفتار حرارتی، قاب پنجره.

* دانشیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی. A-namazian@sbu.ac.ir
**دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی.

مقدمه

گرچه تاریخ کشف شیشه به حدود ۴۰۰۰ سال قبل باز می‌گردد امّا استفاده از آن در بناها به این اندازه قدمت ندارد. این که همزمان بتوان نور طبیعی و هوای گرم را داخل بنا حفظ نمود، همواره از آرزوهای بشر بوده است. نیاز به مصالحی که مانع ورود یا خروج گرما از بنا شود، از ورود گرد و غبار و حشرات جلوگیری کند و همزمان نور طبیعی مورد نیاز ساختمان را تأمین کند، همواره در سکونت‌گاه‌های بشر، چه شهری و چه روستایی، احساس می‌شد. قبل از دستیابی به جام شیشه، این نیاز با مصالح شفاف دیگر پاسخ داده می‌شد. استفاده از ورق‌های نازک سنگ مرمر، میکا و پوست حیوانات در روم باستان، کاغذ برنج در چین و ژاپن، سنگ‌های شفاف رنگی در مصر و سوریه و... نمونه‌ای از تلاش‌ها برای پاسخ به این نیاز است.

استفاده از شیشه در رم باستان رایج نبود اما اوّلین استفاده از شیشه در معماری به رم نسبت داده می‌شود. تا پیش از پایان قرن دوم میلادی، شیشه در برخی خانه‌های اشراف و ویلا های امپراطوری مشاهده می‌شد. پس از سقوط رم و تا اواسط قرن ۱۲ شیشه در اروپا استفاده نشد تا این که شیشه‌این بار در پنجره‌های کلیساهای دورهٔ گوتیک پدیدار گشت. با پیشرفت‌هایی که در روش‌های ساخت و ساز صورت گرفت، در قرون وسطی جنبه‌های تزیینی شیشه مورد توجه واقع شد. استفاده از ستون های سنگی به‌همراه پشت بند، بکارگیری پنجره‌های بزرگ در بنا را ممکن ساخت و این در حالی بود که این حجم استفادهٔ گسترده از شیشه در بناها در این مقیاس، در جهان کاملاً بی‌پیشینه بود. سپس شیشه‌های رنگی و پرکار (Stained Glass) در پنجره‌های مدور موسوم به Rose window متداول شد که با حرکت خورشید، بازی با نور و ایجاد حالات مختلف رنگ و نور در طول ساعات مختلف روز عرضه می‌داشت. استفاده زیاد از شیشه در معماری گوتیک را می‌توان نتیجهٔ تمایل معماران آن عصر به شفافیت، روشنایی و بی‌وزنی دانست.

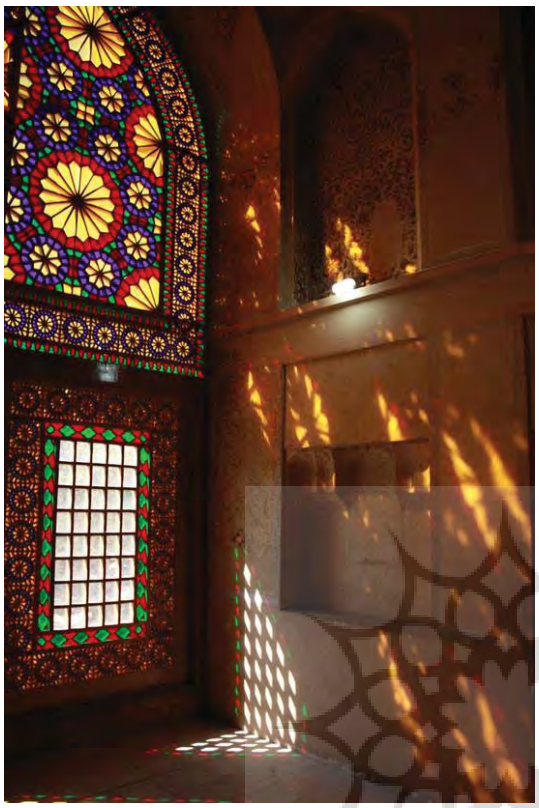
ت۱. Rose window.

در طول تاریخ معماری ایران نیز پنجره به‌صورت‌های مختلفی وجود داشته است. در-پنجره، روزن، شباک، جام‌خانه و ارسی نمونه‌های مختلف این صورت‌ها است. شاید کهن‌ترین نمونه‌های در و پنجره در معماری ایران را بتوان در قلعه‌های مادی یافت که دو لته دارند و اغلب از چوب ساخته شده‌اند. متأسفانه نمونه‌های اندکی از انواع پنجره، قبل از دوره قاجار باقی است. این موضوع قضاوت را در مورد ویژگی‌های پنجره‌ها در طول تاریخ معماری ایران دشوار می‌کند. پنجره‌های ارسی را می‌توان نقطهٔ اوج پنجره‌سازی در معماری ایران دانست. ظاهراً پیدایش این پنجره‌ها به دوران صفویه باز می‌گردد اما اوج استفاده از آن در دورهٔ قاجار بوده است. ارسی پنجره‌ای کشویی است که مشبک‌های چوبی با نقوش هندسی دارد. درون این مشبک‌ها، شیشه‌های رنگی کار گذاشته می‌شود. نمونه‌های گوناگون گره‌چینی و طرح‌ها و نقش‌های بدیعی در این گونه از پنجره در شهرهای

مختلف ایران موجود است. کاربردهای فراوانی از جمله کاهش تابش نور و گرما، حفظ محرمیت، دور کردن حشرات مزاحم و... برای این پنجره‌ها ذکر شده است. اما قابل توجه است که پنجره نیز مانند دیگر عناصر معماری ایرانی، مطابق با نیاز، خواست و خیال ایرانی و آیینهٔ فرهنگ و جهان‌بینیِ او بوده است.

وقوع انقلاب صنعتی در غرب زمینه‌ساز تحولات اساسی در صنعت شیشه و ساختمان شد. تحولاتی که بعدها منجر به تغییراتی اساسی در معماری غرب و بعد از آن بسیاری از کشورها از جمله ایران شد. پیشرفت سریع صنعت و تکنولوژی از نتایج انقلاب صنعتی بود. تولید کارگاه‌های کوچک در مقیاس خرد، جای خود را به تولید انبوه در کارخانه‌ها، با استفاده از قدرت ماشین و انرژی داد و همزمان صنایع مربوط به ساختمان نیز به سرعت پیشرفت کرد. صنعت شیشه‌سازی در نیمهٔ دوم قرن هجده بسیار گسترش یافت و در سال ۱۸۰۶ جام‌های شیشه به ابعاد ۲/۵ × ۱/۷ متر تولید شد. در سال ۱۸۳٤ رابرت لوکاس چانس[1] شیوه جدیدی برای تولید شیشه ابداع کرد. در این روش شیشه مذاب با دمیدن به شکل استوانه در آمده و پس از برش، باز می‌شد. این روش زمینه‌ساز ساخت بنای عظیم کریستال پالاس[2] در سال ۱۸۵۱ شد. جوزف پاکستون[3] طراح کریستال پالاس، بزرگترین ورق شیشه‌ای ممکن را از کارخانه شیشه سازی برادران چانس درخواست کرده بود. در ساخت کریستال پالاس از چهارصد تن شیشه استفاده شده بود و این میزان شیشه، معادل یک سوم تولید شیشه در ده سال قبل انگلستان بود. کریستال پالاس بیش از شش میلیون بازدید کننده داشت. این خود تبلیغ بسیار بزرگی برای استفاده از شیشه درمعماری بود. پاکستون برای ساخت این بنا مورد تقدیر ملکه ویکتوریا واقع شد. این بنا پایه‌گذار پیشرفت‌های بعدی در زمینهٔ شیشه و در ساختمان شد.

تحول و توسعه در مصالح ساختمانی، به‌خصوص فولاد تعریف جدیدی از شیشه در ساختمان ارائه می داد.



ت۲. پنجره ارسی.

ت ۳. کریستال پالاس.

در اواخر قرن ۱۹ تغییراتی بنیادین در معماری پدید آمد. به تدریج تکنولوژی‌های نوین و مصالح جدید مانند

آهن، فولاد و بتن، تحول چشم‌گیری در صنعت ساختمان پدیـــد آورد. بـــا رواج مکتـــب شـــیکاگو در امریکـــا، ساختمان‌های آجری با دیوارهای باربر، جای خـود را بـه سازه‌های فلـزی داد. در ایـن بناهـا دیگـر شیشـه، صـرفاً حفره‌ای درون بنا نبود، بلکه می‌توانست از کف تا سـقف فضاها ادامه داشته باشد و تمام دیوار خارجی را بپوشاند. معماران این مکتب عقیده داشتند که ساختار بنـا بایـد در نمای ساختمان نمایش داده شود.

از ابتدای قرن بیستم رفته رفتـه اندیشـه‌هـای جدیـدی پدیدار گشت. تفکر غالب در این اندیشه‌ها، فـرم را تـابع عملکرد می‌دانست و بـر شـفافیت و خلـوص بنـا تأکیـد داشت. برای نیل به این هدف، شیشـه از بهتـرین مصـالح بـود. سـاختمان کارخانـهٔ کفـش فـاگوس[۴] اثـر والتـر گروپیوس[۵] نمونه بارز این نگرش اسـت. در ایـن بنـا بـه یمن استفاده از تیر و ستون، شیشه به‌صورت پوسته‌ای بـر روی نما قرار گرفته است. استفاده از نمای شیشـه‌ای[۶] در ساختمان مدرسه باهاوس[۷] هم دنباله همین تفکر است.

ت٤. کارخانه کفش فاگوس.

آثار میس وندرو[۸] از دیگر پیشگامان معماری مدرن نیـز عرصهٔ تجلی این نظریـه‌هـای جدیـد در معمـاری اسـت. شیشه در آثار میس وندرو جایگاه خاصـی دارد. در بنـای فارنز ورث[۹] مشاهده می‌شود که دیوار ها کاملاً به‌صـورت شیشه‌ای در آمدند. در دیگر اثر این معمار، آسمان‌خـراش سیگرام[۱۰]، نهایت استفاده از شیشه در معماری، به نمـایش گذارده شد. اختراع شیشهٔ فلوت و همچنین شیشهٔ ایمنی، معماران را در رسیدن به هدف بکارگیری وسیع شیشه در طراحی بناها یاری نمود. استفاده از شیشه در معماری، در ایـن برهـه از زمـان بـه اوج خـود رسـید و در آن زمـان آسمان‌خراش‌هـا تبـدیل بـه مکعـب‌هـای شیشـه‌ای (کـه اصطلاحاً به آن‌ها جعبه کفش می‌گویند) شـدند. اسـتفاده بی‌رویه و بی‌منطق از شیشه در این دوره، نوعی اعتیاد بـه استفاده نامعقول از شیشه در معمـاری ایجـاد کـرد. رواج سبکی بین‌المللی بر طراحی سـاختمان‌هـا بـدون توجـه بـه مکـان و اقلـیم تأکیـد مـی‌کـرد. (تـأثیر ایـن تفکـر در ساختمان‌های مسکونی کـه در ایـران حـدود ۳۰- ٤۰ سـال پیش ساخته شده‌اند، قابل مشاهده است. در این ساختمان‌ها دیوار شمالی یا جنوبی بنا، به‌صـورت تمـام شیشـه‌ای اجـرا شده است). امّا ظرفیت سیستم‌های گرمایشـی و سرمایشـی این مکعب‌های شیشه‌ای بسیار بیشتر از آن چیزی است کـه باید باشد. این مطلـب تـا قبـل از وقـوع بحـران انـرژی در ابتدای دههٔ هفتاد میلادی، مورد توجه نبود و استفاده مبالغه آمیز از شیشه، بدون توجه به اقلـیم و موقعیـت جغرافیـاییِ محل احداثِ بنا، استفادهٔ بیشاز حد انرژی برای سرد و گرم کردن این بناها را به‌دنبال داشت. متاسفانه این رویـه هنـوز هم ادامه دارد. شایان توجه است که در سـال ۱۹۵۰ مقـدار الکتریسیته تولید شده در ایالات متحده امریکا ۳۸۹ میلیـارد کیلووات ساعت بود و سپس در سال ۱۹۷۰ یعنـی فقـط در مدت بیست سال، به استناد گزارش وزارت اقتصاد امریکـا، این رقم به ۱٦۳۸ میلیارد کیلووات ساعت افزایش پیدا کـرد. شیشه با ضریب انتقال حرارت[۱۱] بالای خود نقش اول را در اتلاف انرژی در ساختمان داراست. از این رو، این موضـوع پژوهشگران را بـر آن داشـته اسـت تـا راهکارهـایی بـرای کاهش اتلاف انرژی از این طریق در ساختمان ارائـه کننـد؛ راهکارهایی که همزمان بتـوان کیفیـت معمـاری حاصـل از

شیشه را حفظ کـرد و هـم بـه شـرایط محیطـی مطلـوب و مصرف انرژی معقول در ساختمان دست یافت.

ت۵. ساختمان سیگرام، نیویورک.

ت٦. ساختمان بانک مرکزی، تهران.

در این نوشتار راهکارهای بهبود رفتار حرارتی شیشه و پنجره از دو منظر مورد بررسـی قـرار مـی‌گیـرد. نخسـت عوامل خارجی و شرایط فیزیکـی مـؤثر بـر بهبـود رفتـار حرارتی پنجره بررسی می‌شود و سپس به اجزای تشـکیل دهندهٔ پنجره و مواد و مصالح آن پرداخته می‌شود.

شرایط فیزیکی و عوامل خارجی

موقعیت و جهت‌گیری پنجره

مهم‌ترین بخش حرارتی بنا بـه‌منظـور دریافـت انـرژی خورشـید، پنجـره اسـت کـه ورق‌هـای شیشـه در ابعـاد گوناگون در آن جای می‌گیرد. رفتار پنجره در برابر تـابش خورشـید بـه انـدازه و مکـان قرارگیـری آن در جهـات گوناگون بنا بستگی دارد.

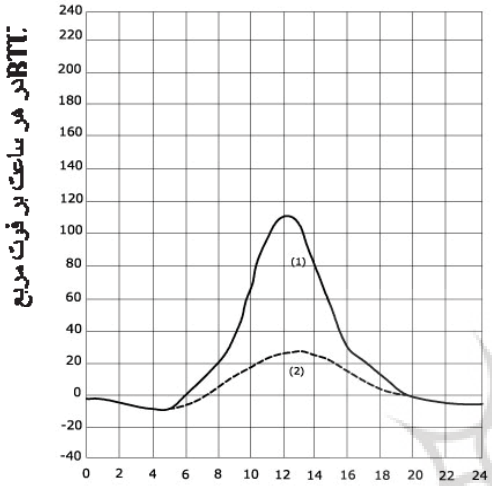
هر پنجره بدون در نظر گرفتن جهت آن، انرژی گرمایی را به‌صورت جابه‌جایی، تشعشع و هدایت انتقال می دهد. نفوذ تابش خورشید به داخل بنا در زمستان و جلـوگیری از انتقال انرژی گرمایی از داخل به خارج، نقـش مـؤثری در گرم کردن بنا دارد. از طرفی نفـوذ گرمـای خـارج در تابسـتان بـه داخـل بنـا آزاردهنـده اسـت. مقـدار تـابش خورشید وارد شده از پنجره به داخل بنا به زاویهٔ ورود و طول تابش خورشید در طول روز بستگی دارد.

در تابستان از آنجا که مسیر حرکـت خورشـید بـا افـق ارتفاع زیادی دارد و خورشید از شمال شرق طلـوع و در شمال غرب غروب می‌کند، ضلع جنوبی بنا هنگام طلـوع و غروب تابش مستقیم دریافت نمی‌کند. در طول روز نیز تابش، با زاویهٔ بزرگ، بـه پنجـره ضـلع جنـوبی برخـورد می‌کند که در این حالت سطح مـؤثر پنجـره کـم اسـت و مقدار زیادی از اشعه منعکس می‌شود. بنابراین به سادگی می‌توان با یک پیش آمدگی کم عمـق در جبهـه جنـوبی، مانع از ورود تابش مستقیم خورشید شد. ضمن ایـن کـه این پـیش آمـدگی بـرای ورود شـعاع‌هـای خورشـید در زمستان مشکلی ایجاد نمی‌کند.

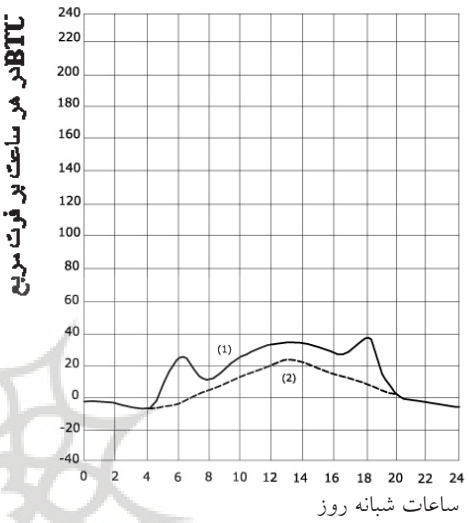
از آنجا که دریافت تابش خورشید از شرق و غرب بنا در زمان طولانی تر و با زاویه ورود کوچک‌تری انجام می‌شود حفاظت از آن مشکل است. بنابراین وجود پنجره در این دو جبهه باید کمتر از ضلع جنوبی بنا باشد.

در ضلع شمالی نیز هنگام طلوع و غروب خورشید در تابستان، تابش مستقیم خورشید به‌صورت مایل و به مدت کوتاهی وجود دارد که چون در ابتدا و انتهای روز است تأثیر منفی آن محسوس نیست.

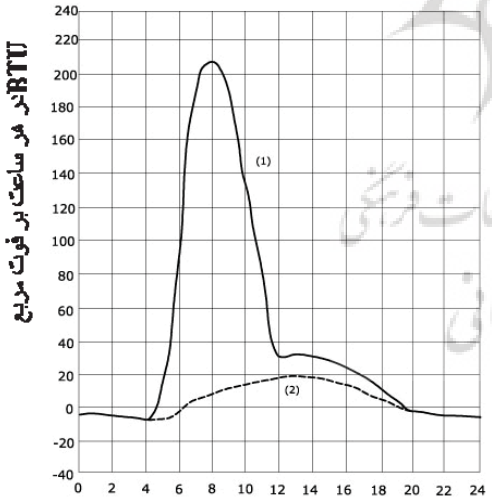
در نمودار ۱ میزان انتقال انرژی گرمایی خورشید از شیشه پنجره در چهار نمای ساختمان در یک روز تابستان مقایسه شده است. همچنین تأثیر سایبان در هر کدام از نماها مشخص شده است.



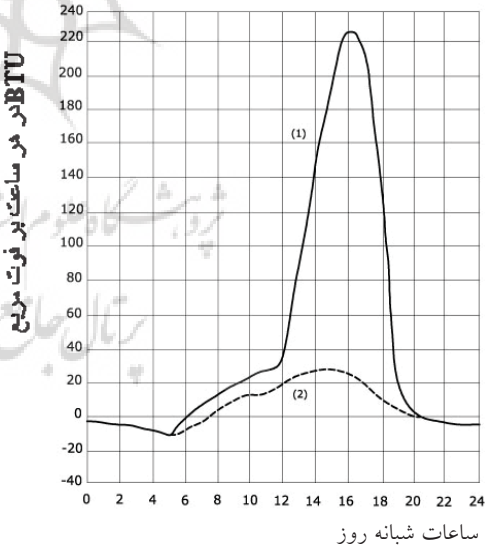
نمای جنوبی



نمای شمالی



نمای شرقی



نمای غربی

ن ۱. نمودارهای میزان انتقال انرژی گرمائی خورشید از شیشه پنجره در چهار جهت جغرافیایی در یک روز تابستان.

در زمستان، به‌دلیل زاویه کوچک خورشید با صفحه افق، تابش خورشید در ضلع جنوبی بنا در زمان طلوع و غروب مایل و در هنگام ظهر تقریباً عمودی است. تابش خورشید، به ضلع شرقی و غربی بنا، در کمتر از نصف روز و به‌صورت مایل است. در زمستان در ضلع شمالی، تابش مستقیم خورشید وجود ندارد؛ به همین دلیل انتقال انرژی گرمایی فقط از طریق هدایت به خارج و به میزان ناچیزی هم از طریق انعکاس صورت می گیرد. به‌طور کلی رابطهٔ حرکت خورشید را با جهت جنوبی بنا می‌توان به‌طور کامل کنترل کرد، در صورتی که در سایر جهات چنین امکانی وجود ندارد.

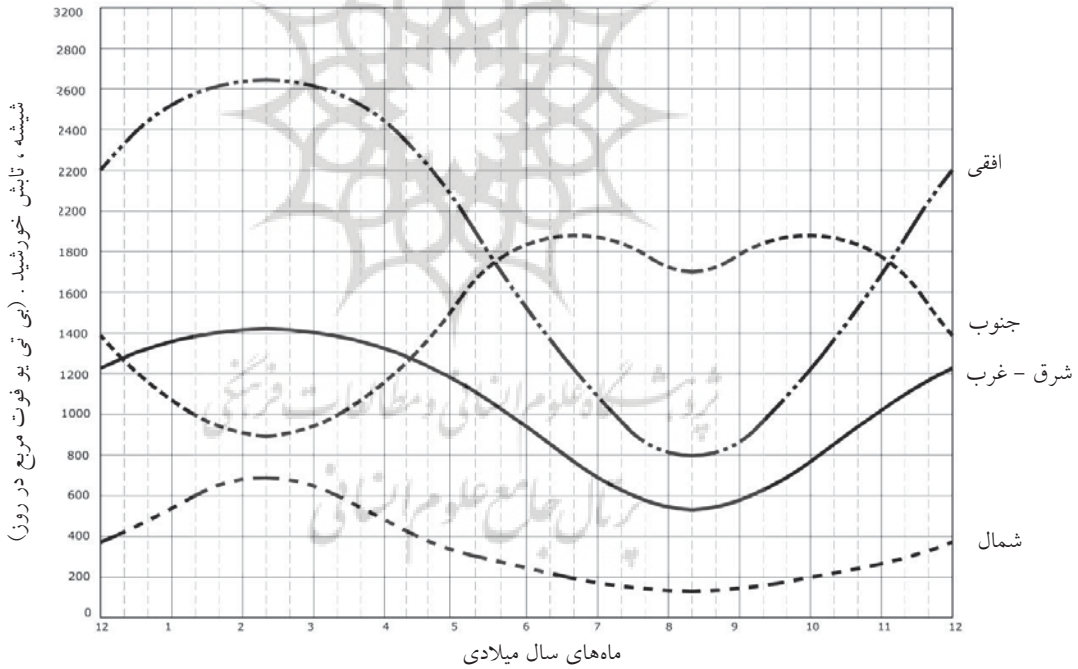
طول زمان تابش مستقیم خورشید بر پنجره‌های جنوبی در زمستان بیشتر از تابستان است. از آن جا که در زمستان، زاویه ورود شعاع تابش خورشید با سطح پنجره ضلع جنوبی به عمود نزدیک‌تر است تابش بیشتری وارد فضا می‌شود.

انرژی پراکنده تابش خورشید در هوا (به‌علت ابری بودن آسمان در مواقع مختلف) در زمستان بیشتر از تابستان است و شدت تابش در زمستان و تابستان تقریباً یکسان است.

آنچه گفته شد در نمودار ۲ قابل مشاهده است. با توجه به این نمودار می‌توان دریافت که پنجره جنوبی بهترین رفتار حرارتی در ماه‌های مختلف سال دارد.

بدین ترتیب پنجره مناسب را شاید بتوان به‌صورت زیر تعریف کرد:

انرژی دریافتی پنجره در زمستان باید بیشتر از مجموع انرژی گرمایی از دست رفته در زمستان و انرژی گرمایی انتقال یافته از آن پنجره به داخل در تابستان باشد.

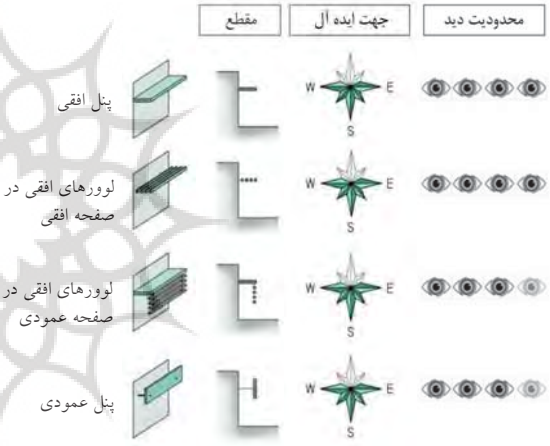


ن ۲. مقایسه میزان شدت تابش خورشید در ارتباط با موقعیت پنجره در چهار جهت جغرافیایی در یک روز آفتابی (عرض جغرافیایی ٤٠ درجه شمالی).

نکته: در نمودارهای فوق، منحنی (۱) پنجره، بدون مانع (داخلی و خارجی) تابش خورشید است. و منحنی(۲) پنجره، با مانع (داخلی و خارجی) تابش خورشید است.

سایبان

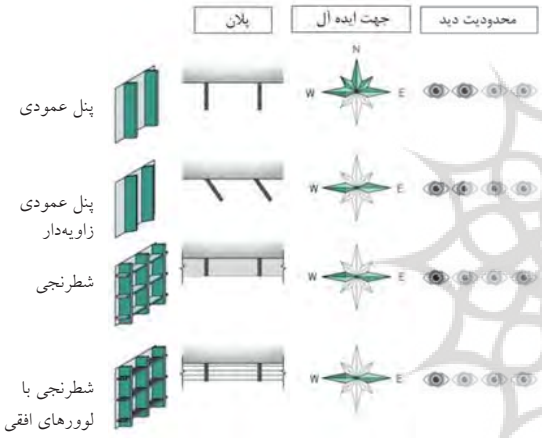
سایبان یا نقاب سایه می‌تواند نقش مؤثری در بهبود رفتار حرارتی پنجره ایفا کند. به‌منظور کاهش ورود تابش خورشید از طریق شیشهٔ پنجره به درون بنا در فصول گرم سال از سایبان یا نقاب سایه استفاده می‌شود. البته لزوماً در همه مناطق اقلیمی به‌وجود سایبان نیاز نخواهد بود. معروف‌ترین روش طراحی سایبان پنجره، روش نقاب سایه اُلگی(Olgyay) است. با استفاده از این روش می‌توان سایبان مناسب برای هر پنجره را با توجه به موقعیت و جهت آن تعیین کرد. سایبان طراحی شده می‌تواند افقی یا قائم، ثابت یا متحرک باشد. امکان در



ت ۷. انواع سایبان افقی.

سایت و محیط پیرامون

سایت مورد نظر و محیط پیرامونِ بنا نیز در رفتار حرارتی پنجره‌ها مؤثر است. به‌عنوان مثال بنای منفردی که در زمین وسیعی قرار دارد می‌تواند در معرض بادهای مزاحم و تابش نامطلوب خورشید باشد. وزش بادهای مزاحم و نامطلوب به سطوح پنجره‌ها در اتلاف انرژی مؤثر است. استفاده از بادشکن و پوشش گیاهی در مسیر بادهای مزاحم می‌تواند این اتلاف را کاهش دهد. از پوشش گیاهی برای کنترل تابش به سطح پنجره‌ها هم نظر گرفتن سایر ملاحظات طراحی، مثل مصالح، امکانات اجرایی، هزینه، زیبایی، همخوانی با نماهای بیرون و سایر پارامترهای اقلیمی مثل انتقال حرارت، کوران هوا و نورپردازی طبیعی نیز در این روش وجود دارد. منظور از سایبان مناسب، سایبانی است که در اوقات گرم سال از ورود تابش خورشید به داخل بنا ممانعت به‌عمل آورد و در اوقات سرد امکان استفاده از تابش خورشید در داخل بنا فراهم شود. در نیمکرهٔ شمالی زمین، معمولاً سایبان‌های افقی برای جبهه جنوبی بنا و سایبان‌های قائم برای جبهه‌های شرقی و غربی مناسب هستند. در تصاویر ۷ و ۸ ویژگی‌های انواع سایبان‌های افقی و قائم بررسی شده است.



ت ۸. انواع سایبان عمودی.

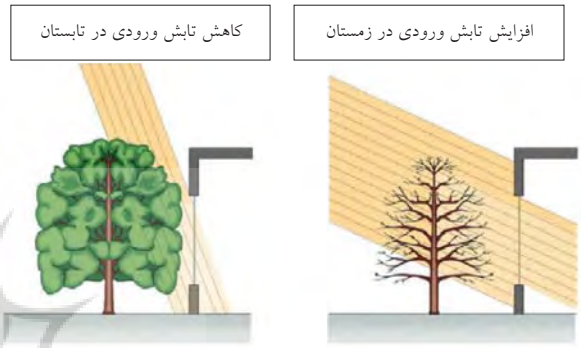
می‌توان استفاده نمود. استفاده از درختان پهن برگ در جبههٔ جنوبی، شرقی و غربی بنا در اصلاح تبادل حرارتی پنجره‌ها مفید است(تصویر ۹). فضای سبز و سطوح چمن‌کاری شده در اطراف بنا نیز می‌تواند به کنترل تابش انعکاسی و تعدیل دمای هوای فضای داخلی طبقهٔ همکف کمک کند.

نوری که با انعکاس از یک پنجره جنوبی در طبقه همکف وارد فضا می‌شود با ده تا پانزده درصد کل تابشی که در طول روز وارد فضا می‌شود برابر است. اگر رنگ

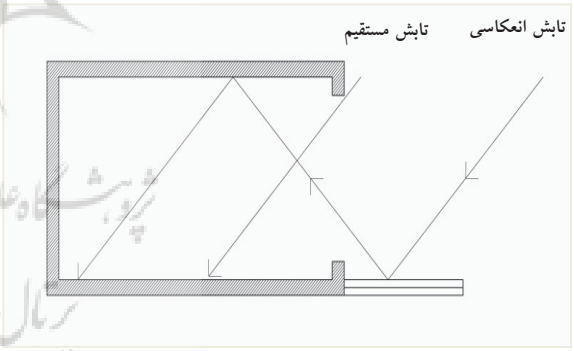
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

سطح مقابل پنجرهٔ طبقهٔ همکف روشن باشد مقدار تابش بیشتر خواهد بود.

تابش خورشید منعکس شده از سطح جلوی پنجرهٔ طبقه همکف، پس از عبور از شیشه پنجره، با سقف فضا برخورد کرده در نهایت در عمق بیشتری به کف فضا برخورد می‌کند در صورتی‌که شعاع تابش مستقیم خورشید پس از عبور از شیشه پنجره همان‌گونه که در تصویر ۱۰ مشاهده می‌شود در عمق کمتری در فضا برخورد می‌کند.



ت ۹. کنترل تابش پنجره های جنوبی با استفاده از درختان برگ ریز.



ت ۱۰. تابش انعکاسی در پنجرهٔ همکف.

تابش انعکاسی به تابشی که بطور مستقیم از پنجره در زمستان وارد فضا شده اضافه می‌شود، در واقع نور اضافه به گرمای اضافه تبدیل می‌گردد(جدول شماره ۱). پوشش‌های با رنگ تیره بیشتر انرژی گرمایی را جذب می‌کنند تا پوشش‌های با رنگ روشن ، از این جهت این پوشش‌ها وقتی در مقابل تابش خورشید قرار می‌گیرند گرمتر می‌شوند. پنجره طبقه همکف یک بنا نسبت به پنجره طبقات دیگر در زمستان انرژی گرمایی کمتری را به خارج منتقل می‌کند چون پوشش جلوی پنجره همکف بر اثر تابش خورشید گرم شده و به تبع آن هوای جلوی پنجره گرم می‌شود ، در نهایت کاهش اختلاف دمای هوای داخل و خارج باعث کاهش انتقال گرما به خارج می‌شود.

نوع پوشش	در صد تابش انعکاسی
رنگ سفید تازه	۷۵
رنگ سفید کهنه	۵۵
برف تازه	۷٤
برف کهنه	٦٤
بتن	۵۵
سنگ مرمر سفید	٤۵
سنگ گرانیت	٤۰
آجر معمولی	٤۸
آجر قرمز	۳۰
چمن یا علف	۲۵
آسفالت	۱۸

ج ۱. درصد تابش انعکاسی پوشش‌های متفاوت.

مصالح و اجزای پنجره

ویژگی‌های فیزیکی شیشهٔ پنجره

یکی از خصوصیات مهم شیشه، توانایی عبور[۱۲] تابش خورشید با طول موج کوچک است. طیف تابش خورشید در سطح کره زمین (سطح دریا) شامل تقریباً پنج درصد قسمت ماوراء بنفش با طول موج کمتر از ۰/۳۸ میکرون (یک میکرون برابر با یک هزارم میلی متر) است. بیشتر شیشه‌ها تقریباً پنجاه درصد از انرژی ماوراء بنفش خورشید را از خود عبور می دهند و این امر اثر منفی بر خود شیشه نمی‌گذارد ولی با گذشت زمان باعث خراب

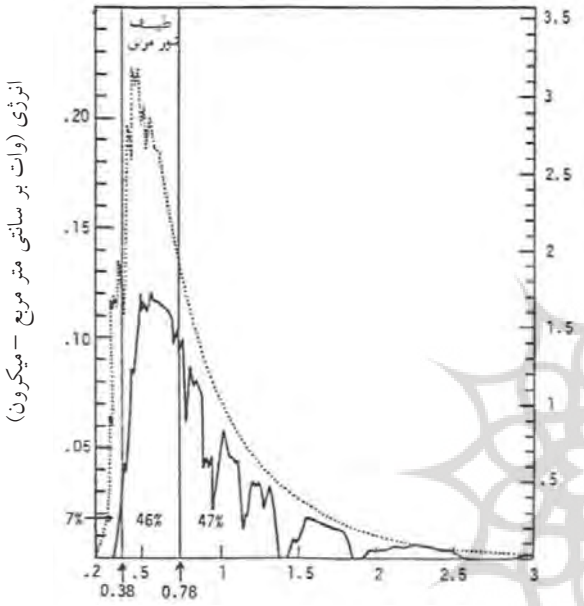
شدن رنگ پرده ، فرش و غیره که در پشت شیشه قرار دارند، می‌شود. هم چنین تابش مستقیم خورشید، باعث خراب شدن رنگ اتومبیل‌ها ، برنزه شدن پوست و در مواقعی سرطان پوست می‌شود.

قسمت دیگر تابش خورشید نور مرئی یا نور سفید می‌باشد که شامل ٤٧ درصد تابش خورشید بوده و این قسمت از طول موج ۰/۳۸ میکرون تا ۰/۷۸ میکرون را در بر می‌گیرد. در طیف تابش خورشید بیشترین انرژی با طول موج ۰/٤٨ میکرون است که در قسمت نور سبز و آبی قرار دارد و چشم انسان بیشتر از طول موج‌های دیگر به آن حساس است. قسمت مادون قرمز که طول موج‌های از ۰/۷۸ تا ۳ میکرون را در بر می‌گیرد شامل ٤٨ درصد بقیه تابش خورشید می‌باشد. این قسمت قابل رویت نبوده و به‌صورت انرژی گرمایی احساس می‌شود. قسمت بین ۰/۷۸ تا یک میکرون باعث رشد گیاهان بوده و اغلب شیشه ها این قسمت از تابش خورشید را از خود عبور می‌دهند. اغلب شیشه های معمولی طول موج کمتر از ۰/۳ میکرون را از خود عبور نمی دهند. هم چنین امواج انرژی گرمایی قسمت مادون قرمز بزرگتر از ۳ میکرون هم از شیشه معمولی عبور نمی‌کند (نمودار۳).

شیشه‌های بازتابی و کنترل کنندهٔ انرژی که در ادامه معرفی خواهند شد مقدار کمتری از تابش خورشید را از خود عبور می‌دهند.

شدت عبور نور از شیشه به زاویه ورود شعاع تابش نیز بستگی دارد. هر چه زاویه ورود صفحه شیشه کوچک‌تر باشد شدت عبور تابش خورشید از آن بیشتر خواهد بود.

به‌طور کلی توانایی شیشه‌های متداول ساختمانی برای عبور ، جذب و انعکاس تابش خورشید به پنج عامل بستگی دارد: ترکیب شیمیایی شیشه ، ضخامت شیشه ، کیفیت سطح شیشه ، طول موج تابش و زاویه ورود تابش نسبت به سطح شیشه همان‌گونه که در تصویر ۱۱ مشاهده می‌شود، وقتی شعاع تابش خورشید به سطح شیشهٔ شفاف با زاویه ورود θ برخورد می‌کند درصد کمی منعکس می‌شود و زاویه انعکاس در صورت صیقلی بودن سطح شیشه دقیقاً برابر با زاویه ورود θ خواهد بود. درصد انعکاس تابش بستگی به اندازه زاویه ورود دارد. برای زوایای ورود کوچک‌تر از ۳۰ درجه، مقداری که از سطح هوا و شیشه منعکس می‌شود تقریباً برابر با ٤ درصد می‌باشد.

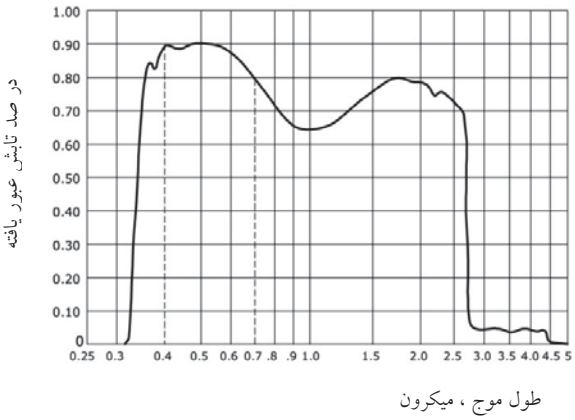


ن ۳. طیف تابش خورشید در سطح کره زمین وقتی خورشید مستقیم بالای سر باشد (در سطح دریا).

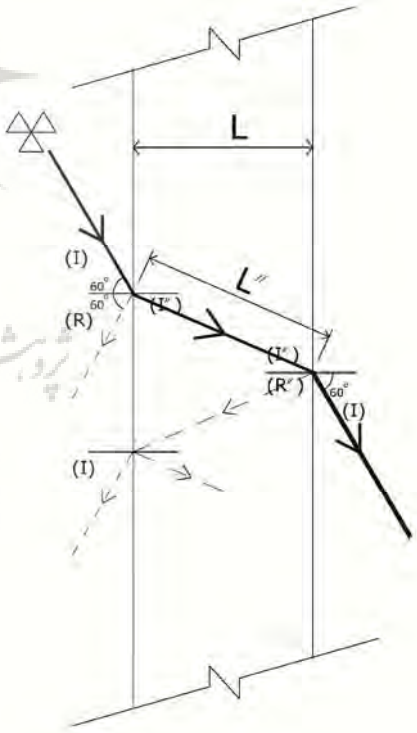
بقیهٔ تابش که ۹٦ درصد است از شیشه عبور کرده و تا حدی به سمت خط عمود بر شیشه شکسته می‌شود که آنرا شعاع بازتاب یا انکسار[۱۳] می‌نامند. زاویه های ورود و بازتاب i و i' در تصویر مشاهده می‌شود. رابطهٔ این دو زاویه نسبت به یکدیگر با ضریب بازتاب یا ضریب انکسار[۱٤] (n') مشخص می‌شود.

$$n' = \frac{\sin\ i}{\sin\ i'}$$

وقتی زاویه ورود حدود ۳۰ درجه یا کمتر باشد عدد ضریب انکسار برای شیشه های معمولی برابر با ۱/۵۲۶ و برای آب تمیز برابر ۱/۳۳ می‌باشد.



ن ٤. نمودار عبور تابش خورشید از شیشه معمولی.



ت ۱۱. عبور شعاع تابش خورشید از شیشه معمولی.

انواع شیشه

شیشه معمولی

طی سالیان متمادی از شیشهٔ سادهٔ یک جداره به‌عنوان پوشش در بازشوهای ساختمان استفاده می‌شد. اما با افزایش روزافزون بهای انرژی و اهمیت یافتن صرفه جویی انرژی در ساختمان، استفاده از نوع شیشه ساختمانی محدود شد. ضریب انتقال حرارت برای شیشهٔ تک جدارهٔ معمولی ٦ w/m2c° است. این رقمِ بسیار بالایی است. شیشه تک جداره معمولی تقریباً ۱۰ برابر یک دیوار عایق کاری شدهٔ هم اندازه خود اتلاف انرژی دارد. در واقع پنجره با یک جداره شیشه به‌علت عدم کارایی مطلوب در معماری دنیای امروز تقریباً منسوخ شده است.

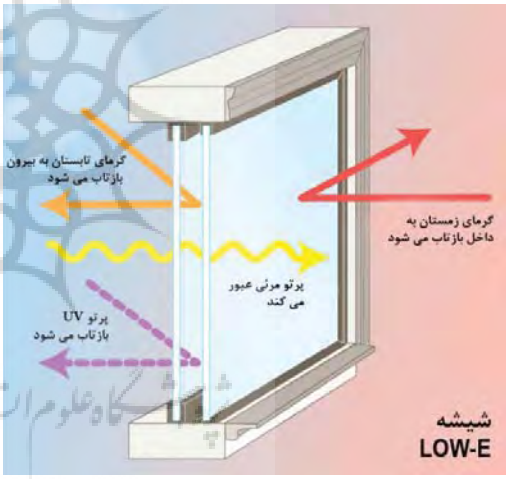
شیشه‌های بازتابی[۱۵]

در این نوع شیشه‌ها، سطح شیشه با یک لایه فلز یا اکسید فلزی پوشانده می‌شود. این سطح نور خورشید را بازتاب می دهد و باعث می‌شود که شیشه از یک سمت مانند آیینه به نظر برسد. این شیشه‌ها در کیفیت نور ورودی تغییر ایجاد می‌کنند و استفاده از آن‌ها در پنجره‌های جنوبی توصیه نمی‌شود. بهتر است این نوع شیشه‌ها در پنجره‌های شرقی و غربی، جهت کنترل تابش مزاحم مورد استفاده قرار گیرند.

شیشه‌های کنترل کنندهٔ انرژی[۱۶]

شیشه‌های کنترل کنندهٔ انرژی یا Low-Emissivity که در فارسی به شیشه‌های کم گسیل ترجمه می‌شوند، شیشه‌هایی هستند که انتقال حرارت کمتری نسبت به شیشه‌های معمولی دارند و مانند یک عایق حرارتی عمل می‌کنند. این نوع شیشه‌ها اجازه عبور بخش مرئی طیف نور خورشید را می‌دهند امّا طیف حرارتی (امواج مادون قرمز) و امواج مضر (امواج ماوراء بنفش) را منعکس یا فیلتر می‌کنند. ضریب انتقال حرارت یک شیشهٔ دوجداره، حاوی یک جداره شیشهٔ low-e حدود ۱/۱ الی ۱/۳

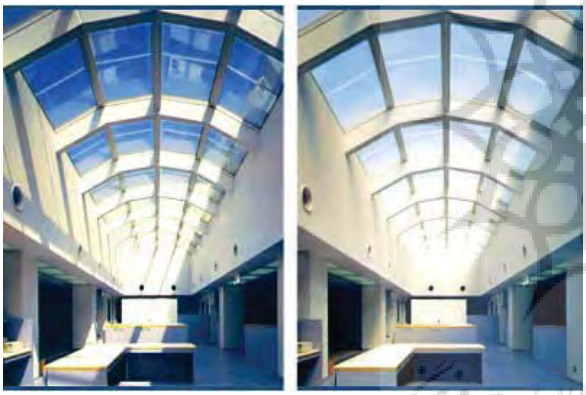
$w/m2c^{\circ}$ است. این رقم در مقایسه با شیشهٔ تک جدارهٔ معمولی رقم قابل توجهی به حساب می آید. انواع مختلف این شیشه برای اقلیم‌های مختلف، موجود است. در اقلیم‌های گرم، لایه low-e در سطح خارجی نصب می‌شود تا از ورود انرژی گرمایی خورشید به درون جلوگیری کند؛ اما در اقلیم‌های سرد این لایه در سطح داخلی نصب می‌شود تا از خروج انرژی گرمایی از داخل به بیرون جلوگیری کند. همچنین این شیشه‌ها تغییری در کیفیت نور ورودی ایجاد نمی‌کنند. کارایی این شیشه‌ها به ضریب انتشار[۱۷] نرمال آن‌ها (εn) بستگی دارد و هرچه این ضریب کمتر باشد امواج مادون قرمز کمتری از خود عبور می‌دهند. ضریب انتشار نرمال شیشه معمولی حدود ۰/۸۹ است و این در حالی است که این ضریب برای شیشه‌های low-e بین ۰/۰۵ تا ۰/۲ است.



ت ۱۲. مکانیزم شیشهٔ low-e.

شیشه‌های هوشمند[۱۸]

نسل جدید شیشه‌ها که امروزه بسیار مورد توجه پژوهشگران است، شیشه‌های هوشمند است. این شیشه‌ها به محرک‌هایی مانند نور یا نیروی الکتریکی عکس العمل نشان می‌دهند و کیفیت آن‌ها تغییر می‌کند. از این قبیل شیشه‌ها می‌توان شیشه‌های الکتروکرومیک، فتوکرومیک، ترمو کرومیک و کریستال مایع را نام برد. شیشه‌های الکتروکرومیک با دریافت جریان برق اندک، تغییر رنگ داده و تیره می‌شوند. این شیشه‌ها قابلیت کنترل دارند. شیشه‌های ترموکرومیک به گرما حساس هستند و با گرم شدن تیره‌تر می‌شوند. شیشه‌های فتو کرومیک به نور پاسخ‌گو هستند و با افزایش تابش نور تیره می‌شوند. در شیشه‌های کریستال مایع[۱۹]، یک لایه کریستال مایع بین دو صفحه شیشه‌ای قرار گرفته است. هنگامی که جریان برق متصل نیست این شیشه‌ها نور را از خود عبور نمی‌دهند و با برقراری جریان برق امکان عبور نور فراهم می‌شود. این شیشه‌ها، علاوه بر استفاده در جداره خارجی بنا، در جدا کننده‌های داخلی مانند پارتیشن‌ها هم کاربرد دارند و کیفیت‌های مختلفی برای فضا ایجاد می‌کنند. البته این شیشه‌ها از نظر اقتصادی هنوز به‌صورتی نیست که در اختیار همگان قرار گیرد.



ت ۱۳. کنترل تابش با شیشه‌های هوشمند.

شیشه‌های چند جداره

برای کاستن از مشکلات پنجره‌های تک جداره می‌توان از دو جداره شیشه به‌همراه یک لایه هوای ساکن در میان آن‌ها استفاده کرد. با این کار ضریب انتقال حرارت شیشه[۲۰] از $w/m2c^{\circ}$٦ به حدود $w/m2c^{\circ}$ ۳/۲ کاهش می‌یابد. به‌طور کلی ضریب انتقال حرارت شیشه به فاصله بین دولایه شیشه، نوع هوا یا گاز میانی و ضخامت

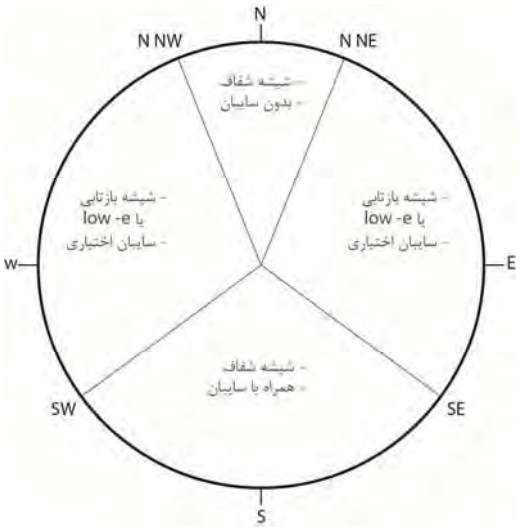
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

لایه‌های داخلی و خارجی شیشه بستگی دارد. به‌طوری کلی هر چه فاصله بین دو جدارهٔ شیشه بیشتر شود انتقال حرارت کمتر خواهد شد؛ اما اگر فاصله دو جداره شیشه شیشه بیش از $\frac{3}{8}$ اینچ (حدود ۱۶mm) شود، به‌دلیل تشکیل جریان همرفت بین لایه‌ها، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین اگر فاصله بین دو جداره کمتر از $\frac{3}{16}$ اینچ (حدود ٤mm) شود در کاهش انتقال حرارت بی‌تأثیر خواهد بود. نوع گازی که بین دو جداره شیشه قرار می‌گیرد نیز در میزان انتقال حرارت مؤثر است. استفاده از گازهای بی‌اثر مانند کریپتون و آرگون در بین جداره‌ها، ضریب انتقال حرارت را حدود ده درصد کاهش می‌دهد. از انواع شیشه‌هایی که معرفی شد می‌توان به‌صورت ترکیبی در شیشه‌های دو جداره استفاده کرد. مثلاً پنجره دو جداره با جداره داخلی از نوع شیشه low-e برای مناطق سردسیر و شیشهٔ دو جداره با لایه خارجی از نوع بازتابی برای مناطق گرمسیر مناسب است. شیشه‌ها در انواع بیش از دو جداره هم تولید می‌شوند اما به‌دلیل وزن زیاد، سختی نصب و همچنین هزینه زیاد کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در جدول شماره ۲ ضریب انتقال حرارت برای انواع شیشه‌ها و قاب‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. در تصویر ١٤ جهت مناسب برای استفاده از انواع مختلف شیشه پیشنهاد شده است.

ضریب انتقال حرارت برای پنجره با فریم ترمال بریک 4mm (w/m2c°)			
نوع شیشه	فاصله بین جداره ها		
	6mm	12mm	16mm و بیشتر
تک جداره		٥.٧	
دو جداره (پرشده با هوا)	٣.٧	٣.٤	٣.٣
دو جداره (low-E, εn = 0.2)	٣.٣	٢.٨	٢.٦
دو جداره (low-E, εn = 0.1)	٣.٢	٢.٦	٢.٥
دو جداره (low-E, εn = 0.05)	٣.١	٢.٥	٢.٣
دو جداره (پرشده با آرگون)	٣.٥	٣.٣	٣.٢
دو جداره (low-E, εn = 0.2 ، پرشده با آرگون)	٣.١	٢.٦	٢.٥
دو جداره (low-E, εn = 0.1 ، پرشده با آرگون)	٢.٩	٢.٤	٢.٣
دو جداره (low-E, εn = 0.05 ، پرشده با آرگون)	٢.٨	٢.٣	٢.١
سه جداره	٢.٩	٢.٦	٢.٥

ضریب انتقال حرارت برای پنجره با فریم UPVC (w/m2c°)			
نوع شیشه	فاصله بین جداره ها		
	6mm	12mm	16mmو بیشتر
تک جداره		٤.٨	
دو جداره (پرشده با هوا)	٣.١	٢.٨	٢.٧
دو جداره (low-E, εn = 0.2)	٢.٧	٢.٣	٢.١
دو جداره (low-E, εn = 0.1)	٢.٦	٢.١	١.٩
دو جداره (low-E, εn = 0.05)	٢.٦	٢	١.٨
دو جداره (پرشده با آرگون)	٢.٩	٢.٧	٢.٦
دو جداره(low-E, εn = 0.2 ، پرشده با آرگون)	٢.٥	٢.١	٢.٠
دو جداره (low-E, εn = 0.1 ، پرشده با آرگون)	٢.٣	١.٩	١.٨
دو جداره(low-E, εn = 0.05 ، پرشده با آرگون)	٢.٣	١.٨	١.٧
سه جداره	٢.٤	٢.١	٢.٠

ج ۲. مقایسه ضریب انتقال حرارت شیشه‌ها به‌همراه قاب‌های مختلف.



ت ۱۴. جهت‌های پیشنهادی برای انواع شیشه‌ها.

قاب پنجره[۲۱]

معمولاً در ساخت قاب از مواد مختلفی استفاده می‌شود. در این میان قاب‌های چوبی، آهنی، آلومینیمی و UPVC پر کاربردترند. چوب به‌عنوان ماده ای رایج در طبیعت، از اوّلین موادی بود که در ساخت درب و پنجره به کار گرفته شد. از مزایای چوب می‌توان به ضریب انتقال حرارتی پایین آن اشاره کرد. در مقابل این امتیاز چوب به‌دلیل خاصیت ذاتی خود، افت می‌کند، می‌پوسد و متورم می‌شود. در هنگام آتش سوزی نیز چوب عاملی برای گسترش آتش است. پنجره‌های چوبی هزینهٔ بالایی دارند و در ایران با توجه به کمبود منابع جنگلی، استفاده از این نوع پنجره‌ها با محدودیت روبروست.

پنجره‌های آهنی در دهه‌های گذشته پر کاربرد بودند. این نوع پنجره استحکام بالایی دارد ولی در برابر زنگ زدن و خوردگی مقاوم نیست. مهم‌ترین اشکال این پنجره‌ها اتلاف حرارتی بالای آن‌هاست. این مسئله باعث کاهش استفاده از این نوع قاب‌ها در ساختمان‌های امروزی شده است. امّا دو نوع UPVC و آلومینیمی، امروزه بسیار پرکاربرد هستند و مزایای فراوانی نسبت به دیگر انواع قاب‌ها دارند. در ادامه به بررسی این دو نوع قاب خواهیم پرداخت.

قاب‌های UPVC[۲۲]

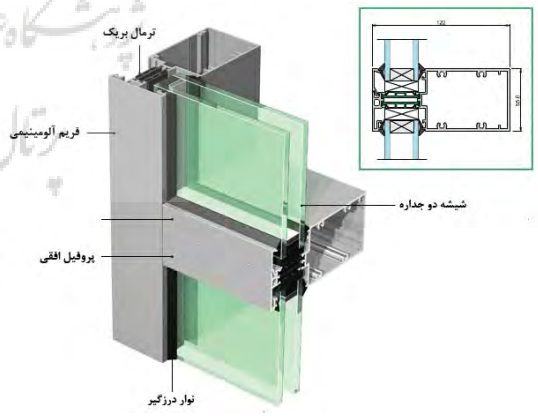
UPVC ماده ای متشکل از مشتقات اصلی نفت خام و نمک طعام است و از پلیمریزاسیون منومرِ وینیل کلراید تشکیل می‌گردد. UPVC هم اکنون از پر مصرف‌ترین و مطمئن‌ترین مواد در ساختِ در و پنجره است. امروزه در کشورهای اروپایی بیش از ۷۰ درصد سهم بازار در اختیار این نوع پنجره‌هاست. مهم‌ترین ویژگی این نوع پنجره، پایین بودن اتلاف حرارتی آن است. UPVC به‌طور طبیعی رسانای گرما نیست. نوع چند حفره‌ای[۲۳] پروفیل‌های UPVC اتلاف انرژی را به حداقل می‌رساند. در این نوع از پنجره‌ها، هوا که خود ماده‌ای عایق است مابین حفره‌ها قرار گرفته و مانع از انتقال حرارت می‌شود. همچنین درزبندی مناسب این نوع قاب‌ها، از نشت هوا جلوگیری می‌کند. این درزبندی مناسب در کاهش آلودگی صوتی نیز مؤثر است. تنوع یراق آلات عرضه شده برای این نوع قاب‌ها، انتخاب را برای معماران آسان‌تر می‌کند.

قاب‌های آلومینیمی

قبل از رواج پنجره‌های UPVC، پنجره‌های آلومینیمی بسیار پرکاربرد بودند. مشکل اصلی آلومینیم، رسانا بودن آن است. به‌عنوان مثال رادیاتورهای سیستم گرمایش مرکزی را از آلومینیم می سازند. برای حل این مشکل قاب‌های ترمال بریک[۲۴] معرفی شدند. پروفیل‌های سیستم ترمال بریک، از دو مقطعِ پروفیل آلومینیومی مجزا تشکیل شده که به‌وسیله تیغه‌های پلی آمید به هم متصل می‌گردند. تیغه‌های پلی آمید مانع انتقال حرارت از سطحی به سطح دیگر می‌شود و از ایجاد پل حرارتی و هدر رفت انرژی جلوگیری می‌کند.

قاب‌های آلومینیمی و UPVC، از نظر اتلاف انـرژی در سطح مطلوبی قرار دارند. آلومینیم در مقایسـه بـا UPVC استحکام و مقاومت خمشی بیشـتری دارد، امّـا اسـتفاده از نوار ترمال بریک باعث می‌شود یکپـارچگی قـاب از بـین برود. در مقابل برای افزایش استحکام پروفیل‌های UPVC از پروفیل‌های تقویتی گالوانیزه استفاده می‌کنند. پنجره‌های آلومینیمی در مقابل آتش سوزی مقاوم‌تر هسـتند. آلـومینیم یک کالای سرمایه‌ای است و قابل بازیافت اسـت، ایـن در حالی است که UPVC ایـن قابلیـت را نـدارد. در جـدول شماره ۲ مقایسهٔ ضریب انتقال حرارت این قاب‌ها به‌همراه انواع شیشه‌ها آورده شده است.

ت ۱۵. نمونه‌ای از یک قاب UPVC.



ت ۱۶. نمونه‌ای از یک قاب آلومینیمی ترمال بریک.

نتیجه

نقش شیشه در معماری امروز قابل توجه است. درصد استفاده از شیشه در ساختمان‌های مسکونی، غیر مسکونی، روستایی و همچنین ساختمان‌های بلند مرتبه امروزی بسیار بالاست. کیفیتی که شیشه در معماری ایجاد می‌کند در مصالح دیگر قابل دستیابی نیست. دستیابی به منظر مناسب، ورود نور کافی به محیط زندگی و کار، ایجاد شور و نشاط در ساکنان بنا و ایجاد زیبایی بصری در نمای ساختمان، همه مواردی است که به کمک استفاده از شیشه در بنا محقق می‌شود. امّا همان طور که ذکر شد با توجه به میزان ذخایر انرژی و بهای بالای امروزهٔ آن، استفاده از شیشه باید همراه با راهکارهای نوین کاهش مصرف انرژی باشد. با استفاده از این راهکارها، می‌توان همزمان به ساختمان‌هایی با نماهای شیشه‌ای بزرگ و کیفیت حاصل از آن امّا معقول از نظر مصرف انرژی دست یافت.

شیشه‌های کنترل کننده انرژی، شیشه‌های هوشمند و شیشه‌های چند جداره به‌همراه قاب‌های UPVC و ترمال بریک، نمونه‌ای از فناوری‌های نوین صنعت شیشه و پنجره بود که در راستای کاهش اتلاف انرژی معرفی شدند. اگرچه بعضی از این فناوری‌ها امروزه قیمت بالایی دارند اما به مرور زمان و با افزایش تولید، از قیمت آن‌ها کاسته خواهد شد؛ همچنین کاهش هزینه‌های مصرف انرژی ساختمان، تا حدودی این هزینه‌ها را جبران خواهد کرد. همان طور که در این نوشتار اشاره شد، ابتدا باید با طراحی صحیح و جهت گیری مناسب ساختمان و پنجره‌ها و نیز بکارگیری عناصری چون سایبان اتلاف

انرژی ساختمان را کاهش داد و سپس در مرحله بعد تکنولوژی‌های معرفی شده را بکار بست.

لزوم بکارگیری موارد یاد شده نه تنها در معماری شهری، بلکه در معماری روستایی نیز احساس می‌شود؛ چرا که با از دست رفتن هویت معماری روستاها، معماری روستایی تقلیدی از معماری شهر است و به‌دلیل اندک بودن بودجهٔ روستاییان و نبود نظارت در روستاها، وضع معماری روستایی به مراتب وخیم‌تر است.

امید است با بکارگیری این راهکارها گامی در جهت بهبود کیفیت معماری و اصلاح مصرف انرژی برداشته شود. لازم به ذکر است که راه‌حل‌های ارائه شده در این نوشتار بخشی از راهکارها و پژوهش‌ها در این زمینه بوده و پژوهش در صنعت شیشه و پنجره کماکان ادامه دارد.

پی نوشت

1. Robert Lucas Chance
2. Crystal Palace
3. Joseph Paxton
4. Fagus Factory
5. Walter Gropius
6. Curtain wall
7. School of Bauhaus
8. Mies van der Rohe
9. Farnsworth
10. Seagram
11. U-value
12. Transmission
13. Refraction
14. $n' = \frac{\sin i}{\sin i'}$
15. Reflective glass
16 . Low-e
17. Normal emissivity
18. Smart glass
19. LC
20. U-value
21. Window frame
22. Unplasticized Poly vinyl Chloride (UPVC)
23. Multi Chambered
24. Thermal break

فهرست منابع

– مانیاگولامپونیانی، ویتوریو. (۱۳۸۸)، معماری و شهر سازی در قرن بیستم، ترجمه: دکتر لادن اعتضادی، تهران: دانشگاه شهید بهشتی.

– نمازیان، علی.(۱۳۸۹)، اصول استفاده از تابش خورشید در طراحی معماری، تهران :دانشگاه شهید بهشتی.

– دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان(۱۳۸۰)، نشر توسعه ایران.

– تهرانی، معصومه.(پاییز۱۳۸٦)، «معرفی نورگیرهای گره چینی در معماری سنتی ایران»، در هنر و معماری، ش۱۱ ، ص۵۰-۵۵.

-U.S. Department of commerce, Windows Design Strategies To Conserve Energy, Fredonia Books, (2005)

-Watson, Donald, and Kenneth Labs, Climatic design energy efficient buildings principles and practices, McGraw-Hill book co (1983)

-Hudson, Lloyd Gary, and Jeff Markell, Solar technology, Reston publishing Co. Inc. (1985)

-Vale, Brenda and Robert, The new autonomous house, Thames and Hudson Ltd (2000)

-Givone B., Man, Climate and Architecture, Elsevier publication Co. Ltd (1969)

-Anderson, Bruse, and Michael Riordan, The solar home book, Cheshire books Harrisville (1976)

-Yellott, John I., Fenestration and Heat Flow Through Windows, Energy Conservation through Building Design (1979)

-Great Britain Stationery Office, Conservation of fuel and power in New Dwellings, NBS, (2010)

-http://www.articledashboard.com/Article/The-History-of-Glass-in-Architecture

-http://www.glazette.com/Glass-Knowledge-Bank-93/Smart-Glass.html

http://www.greenwala.com/channels/other/blog/612-How-Smart-Is-Smart-Glass

-http://www.ifco.ir/building/build/win-dow_extra4.asp

-http://www.upvccenter.com