

## 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 به صورت 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 اما 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 تحول 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 دهنده 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.

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

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

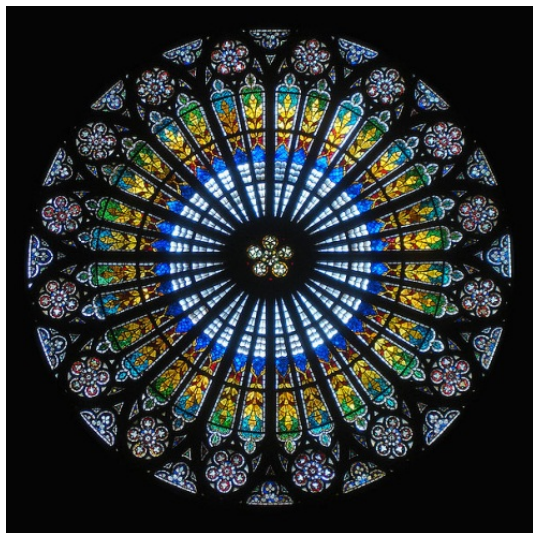
\*\* دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی.

## مقدمه

گرچه تاریخ کشف شیشه به حدود ۴۰۰۰ سال قبل باز می‌گردد اما 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 اولین استفاده از شیشه در معماری به رم نسبت داده می‌شود. تا پیش از پایان قرن دوم میلادی، شیشه در برخی خانه‌های اشراف و ویلاهای 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 دوره گوتیک پدیدار گشت. با پیشرفت‌هایی که در روش‌های ساخت و ساز صورت گرفت، در قرون وسطی جنبه‌های تزئینی شیشه مورد توجه واقع شد. استفاده از ستون‌های سنگی به همراه پشت بند، بکارگیری پنجره‌های بزرگ در بنا را ممکن ساخت و این در حالی بود که این حجم استفاده 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 نتیجه تمایل معماران آن عصر به شفافیت، روشنایی و بی‌وزنی دانست.



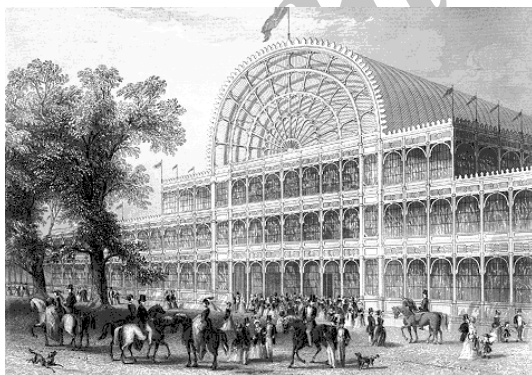
ت ۱. Rose window.

در طول تاریخ معماری ایران نیز پنجره به صورت‌های مختلفی وجود داشته است. در-پنجره، روزن، شبک، 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 نقطه اوج پنجره‌سازی در معماری ایران دانست. ظاهراً پیدایش این پنجره‌ها به دوران صفویه باز می‌گردد اما اوج استفاده از آن در دوره 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

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



ت ۲. پنجره ارسی.



ت ۳. کریستال پالاس.

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

مختلف ایران موجود است. کاربردهای فراوانی از جمله  
کاهش تابش نور و گرما، حفظ حریمیت، 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 آیین  
فرهنگ و جهان‌بینی 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 نیمه دوم  
قرن هجده بسیار گسترش یافت و در سال ۱۸۰۶ جام‌های  
شیشه به ابعاد  $2/5 \times 1/7$  متر تولید شد. در سال ۱۸۳۴  
رابرت لوکاس چانس<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> در سال  
۱۸۵۱ شد. جوزف پاکستون<sup>۳</sup> طراح کریستال پالاس،  
بزرگترین ورق شیشه‌ای ممکن را از کارخانه شیشه‌سازی  
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 در معماری بود. پاکستون برای ساخت این بنا مورد  
تقدیر ملکه ویکتوریا واقع شد. این بنا پایه‌گذار  
پیشرفت‌های بعدی در زمینه شیشه و در ساختمان شد.

آهن، فولاد و بتن، تحول چشم‌گیری در صنعت ساختمان پدید آورد. با رواج مکتب شیکاگو در امریکا، ساختمان‌های آجری با دیوارهای باربر، جای خود را به سازه‌های فلزی داد. در این بناها دیگر شیشه، صرفاً حفره‌ای درون بنا نبود، بلکه می‌توانست از کف تا سقف فضاها ادامه داشته باشد و تمام دیوار خارجی را بپوشاند. معماران این مکتب عقیده داشتند که ساختار بنا باید در نمای ساختمان نمایش داده شود.

از ابتدای قرن بیستم رفته رفته اندیشه‌های جدیدی پدیدار گشت. تفکر غالب در این اندیشه‌ها، فرم را تابع عملکرد می‌دانست و بر شفافیت و خلوص بنا تأکید داشت. برای نیل به این هدف، شیشه از بهترین مصالح بود. ساختمان کارخانه کفش فاگوس<sup>۴</sup> اثر والتر گروپیوس<sup>۵</sup> نمونه بارز این نگرش است. در این بنا به یمن استفاده از تیر و ستون، شیشه به صورت پوسته‌ای بر روی نما قرار گرفته است. استفاده از نمای شیشه‌ای<sup>۶</sup> در ساختمان مدرسه باهوس<sup>۷</sup> هم دنباله همین تفکر است.



ت ۴. کارخانه کفش فاگوس.

آثار میس و ندررو<sup>۸</sup> از دیگر پیشگامان معماری مدرن نیز عرصه تجلی این نظریه‌های جدید در معماری است. شیشه در آثار میس و ندررو جایگاه خاصی دارد. در بنای فارنز ورت<sup>۹</sup> مشاهده می‌شود که دیوارها کاملاً به صورت شیشه‌ای در آمدند. در دیگر اثر این معمار، آسمان‌خراش

سیگرا<sup>۱۰</sup>، نهایت استفاده از شیشه در معماری، به نمایش گذارده شد. اختراع شیشه فلو<sup>۱۱</sup> و همچنین شیشه ایمنی، معماران را در رسیدن به هدف بکارگیری وسیع شیشه در طراحی بناها یاری نمود. استفاده از شیشه در معماری، در این برهه از زمان به اوج خود رسید و در آن زمان آسمان‌خراش‌ها تبدیل به مکعب‌های شیشه‌ای (که اصطلاحاً به آن‌ها جعبه کفش می‌گویند) شدند. استفاده بی‌رویه و بی‌منطق از شیشه در این دوره، نوعی اعتیاد به استفاده نامعقول از شیشه در معماری ایجاد کرد. رواج سبکی بین‌المللی بر طراحی ساختمان‌ها بدون توجه به مکان و اقلیم تأکید می‌کرد. (تأثیر این تفکر در ساختمان‌های مسکونی که در ایران حدود ۳۰-۴۰ سال پیش ساخته شده‌اند، قابل مشاهده است. در این ساختمان‌ها دیوار شمالی یا جنوبی بنا، به صورت تمام شیشه‌ای اجرا شده است). اما ظرفیت سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی این مکعب‌های شیشه‌ای بسیار بیشتر از آن چیزی است که باید باشد. این مطلب تا قبل از وقوع بحران انرژی در ابتدای دهه هفتاد میلادی، مورد توجه نبود و استفاده مبالغه آمیز از شیشه، بدون توجه به اقلیم و موقعیت جغرافیایی محل احداث بنا، استفاده بیش از حد انرژی برای سرد و گرم کردن این بناها را به دنبال داشت. متأسفانه این رویه هنوز هم ادامه دارد. شایان توجه است که در سال ۱۹۵۰ مقدار الکتریسیته تولید شده در ایالات متحده امریکا ۳۸۹ میلیارد کیلووات ساعت بود و سپس در سال ۱۹۷۰ یعنی فقط در مدت بیست سال، به استناد گزارش وزارت اقتصاد امریکا، این رقم به ۱۶۳۸ میلیارد کیلووات ساعت افزایش پیدا کرد. شیشه با ضریب انتقال حرارت<sup>۱۱</sup> بالای خود نقش اول را در اتلاف انرژی در ساختمان داراست. از این رو، این موضوع پژوهشگران را بر آن داشته است تا راهکارهایی برای کاهش اتلاف انرژی از این طریق در ساختمان ارائه کنند؛ راهکارهایی که همزمان بتوان کیفیت معماری حاصل از

در این نوشتار راهکارهای بهبود رفتار حرارتی شیشه و پنجره از دو منظر مورد بررسی قرار می‌گیرد. نخست عوامل خارجی و شرایط فیزیکی مؤثر بر بهبود رفتار حرارتی پنجره بررسی می‌شود و سپس به اجزای تشکیل دهنده پنجره و مواد و مصالح آن پرداخته می‌شود.

### شرایط فیزیکی و عوامل خارجی

#### موقعیت و جهت‌گیری پنجره

مهم‌ترین بخش حرارتی بنا به‌منظور دریافت انرژی خورشید، پنجره است که ورق‌های شیشه در ابعاد گوناگون در آن جای می‌گیرد. رفتار پنجره در برابر تابش خورشید به اندازه و مکان قرارگیری آن در جهات گوناگون بنا بستگی دارد.

هر پنجره بدون در نظر گرفتن جهت آن، انرژی گرمایی را به‌صورت جابه‌جایی، تشعشع و هدایت انتقال می‌دهد. نفوذ تابش خورشید به داخل بنا در زمستان و جلوگیری از انتقال انرژی گرمایی از داخل به خارج، نقش مؤثری در گرم کردن بنا دارد. از طرفی نفوذ گرمای خارج در تابستان به داخل بنا آزاردهنده است. مقدار تابش خورشید وارد شده از پنجره به داخل بنا به زاویه ورود و طول تابش خورشید در طول روز بستگی دارد.

در تابستان از آنجا که مسیر حرکت خورشید با افق ارتفاع زیادی دارد و خورشید از شمال شرق طلوع و در شمال غرب غروب می‌کند، ضلع جنوبی بنا هنگام طلوع و غروب تابش مستقیم دریافت نمی‌کند. در طول روز نیز تابش، با زاویه بزرگ، به پنجره ضلع جنوبی برخورد می‌کند که در این حالت سطح مؤثر پنجره کم است و مقدار زیادی از اشعه منعکس می‌شود. بنابراین به سادگی می‌توان با یک پیش‌آمدگی کم عمق در جبهه جنوبی، مانع از ورود تابش مستقیم خورشید شد. ضمن این‌که این پیش‌آمدگی برای ورود شعاع‌های خورشید در زمستان مشکلی ایجاد نمی‌کند.

شیشه را حفظ کرد و هم به شرایط محیطی مطلوب و مصرف انرژی معقول در ساختمان دست یافت.



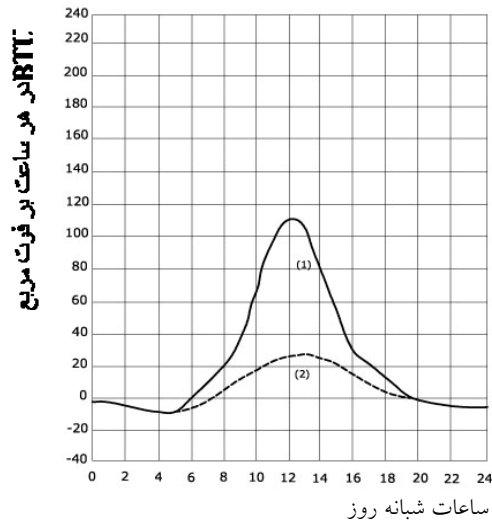
ت ۵. ساختمان سیگرام، نیویورک.



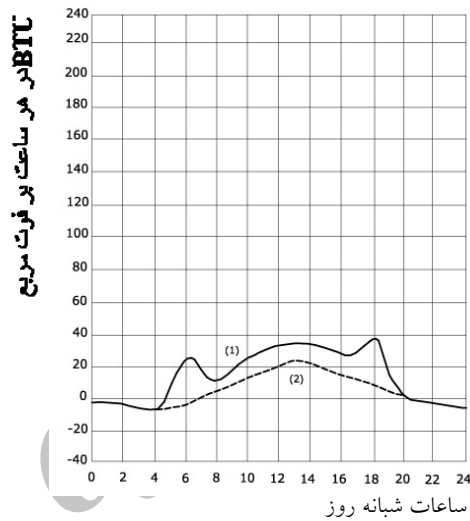
ت ۶. ساختمان بانک مرکزی، تهران.

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.

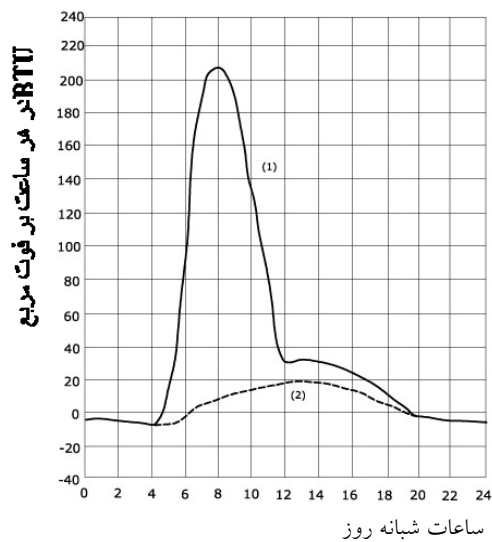
از آنجا که دریافت تابش خورشید از شرق و غرب بنا در زمان طولانی تر و با زاویه ورود کوچک‌تری انجام می‌شود حفاظت از آن مشکل است. بنابراین وجود پنجره در این دو جبهه باید کمتر از ضلع جنوبی بنا باشد. در ضلع شمالی نیز هنگام طلوع و غروب خورشید در تابستان، تابش مستقیم خورشید به صورت مایل و به مدت



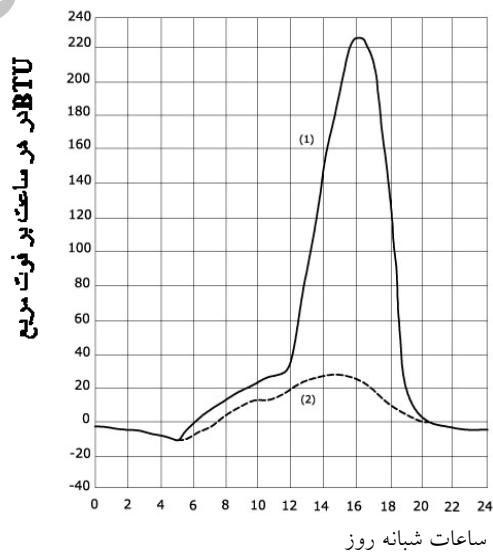
نمای جنوبی



نمای شمالی



نمای شرقی



نمای غربی

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

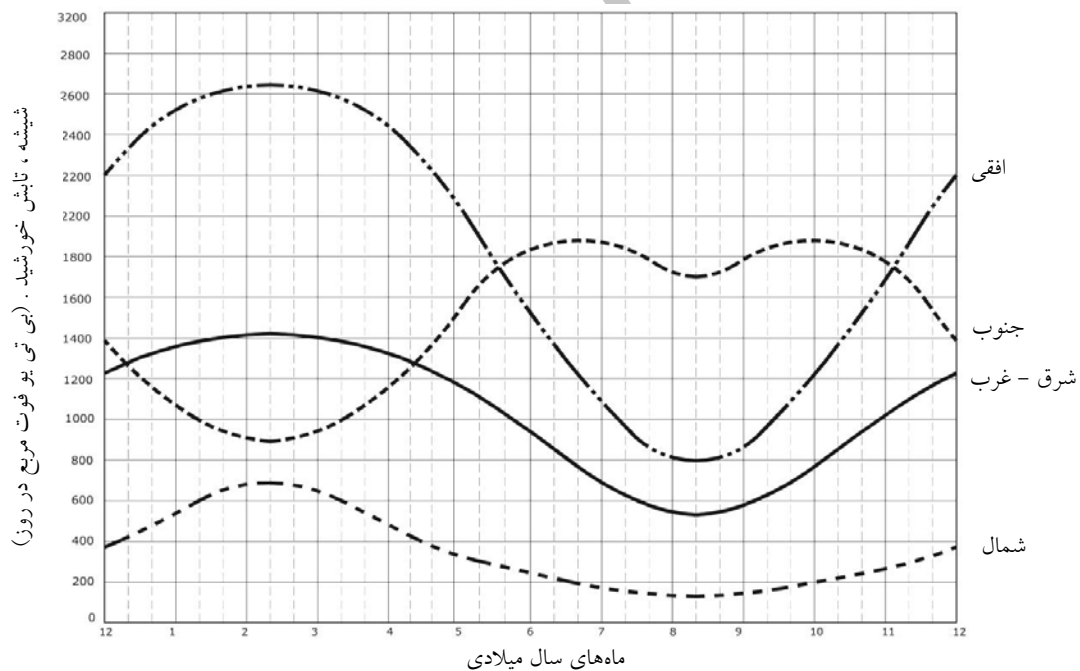
در زمستان، به دلیل زاویه کوچک خورشید با صفحه افق، تابش خورشید در ضلع جنوبی بنا در زمان طلوع و غروب مایل و در هنگام ظهر تقریباً عمودی است. تابش خورشید، به ضلع شرقی و غربی بنا، در کمتر از نصف روز و به صورت مایل است. در زمستان در ضلع شمالی، تابش مستقیم خورشید وجود ندارد؛ به همین دلیل انتقال انرژی گرمایی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

در زمستان، به دلیل 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 به صورت 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. به طور کلی رابطه حرکت خورشید را با جهت جنوبی بنا می توان به طور کامل کنترل کرد، در صورتی که در سایر جهات چنین امکانی وجود ندارد.

آنچه گفته شد در نمودار ۲ قابل مشاهده است. با توجه به این نمودار می توان دریافت که پنجره جنوبی بهترین رفتار حرارتی در ماه های مختلف سال دارد. بدین ترتیب پنجره مناسب را شاید بتوان به صورت 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.

طول زمان تابش مستقیم خورشید بر پنجره های جنوبی در زمستان بیشتر از تابستان است. از آن جا که در زمستان، زاویه ورود شعاع تابش خورشید با سطح پنجره



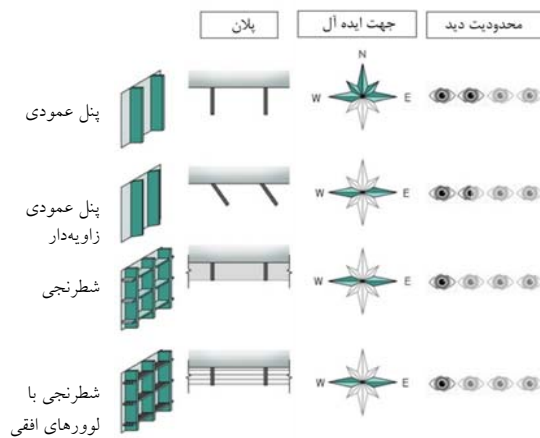
ن ۲. مقایسه میزان شدت تابش خورشید در ارتباط با موقعیت پنجره در چهار جهت جغرافیایی در یک روز آفتابی (عرض جغرافیایی ۴۰ درجه شمالی).

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.

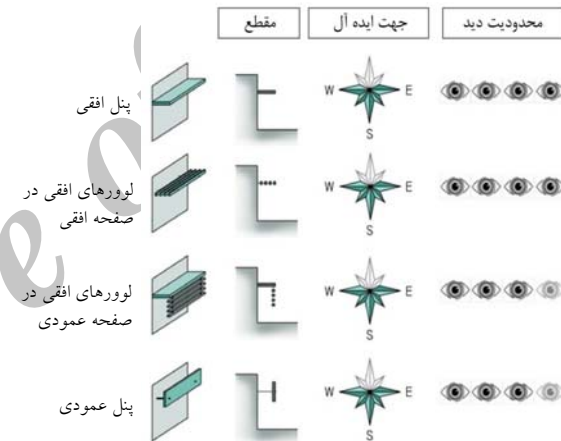
## سایبان

سایبان یا نقاب سایه می‌تواند نقش مؤثری در بهبود رفتار حرارتی پنجره ایفا کند. به‌منظور کاهش ورود تابش خورشید از طریق شیشه 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 الگی (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

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 نیمکره 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.



ت ۷. انواع سایبان افقی.

می‌توان استفاده نمود. استفاده از درختان پهن برگ در جبهه 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 طبقه 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

## سایت و محیط پیرامون

سایت مورد نظر و محیط پیرامون 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



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	۷۴
برف کهنه	۶۴
بتن	۵۵
سنگ مرمر سفید	۴۵
سنگ گرانیت	۴۰
آجر معمولی	۴۸
آجر قرمز	۳۰
چمن یا علف	۲۵
آسفالت	۱۸

ج ۱. درصد تابش انعکاسی پوشش‌های متفاوت.

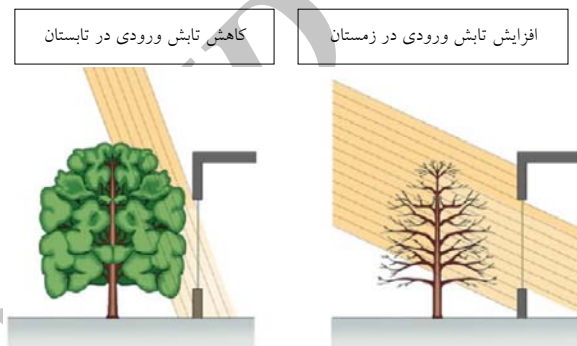
### مصالح و اجزای پنجره

#### ویژگی‌های فیزیکی شیشه پنجره

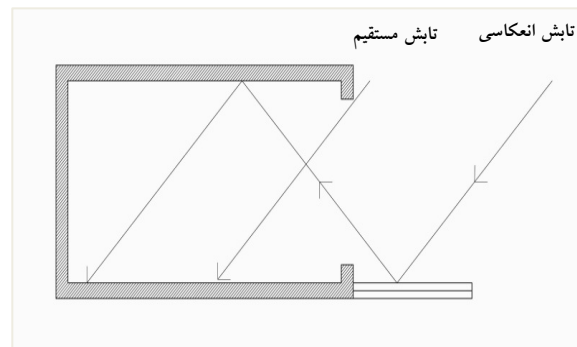
یکی از خصوصیات مهم شیشه، توانایی عبور<sup>۱۲</sup> تابش خورشید با طول موج کوچک است. طیف تابش خورشید در سطح کره زمین (سطح دریا) شامل تقریباً پنج درصد قسمت ماوراء بنفش با طول موج کمتر از  $0/38$  میکرون (یک میکرون برابر با یک هزارم میلی متر) است. بیشتر شیشه‌ها تقریباً پنجاه درصد از انرژی ماوراء بنفش خورشید را از خود عبور می‌دهند و این امر اثر منفی بر خود شیشه نمی‌گذارد ولی با گذشت زمان باعث خراب

سطح مقابل پنجره طبقه همکف روشن باشد مقدار تابش بیشتر خواهد بود.

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



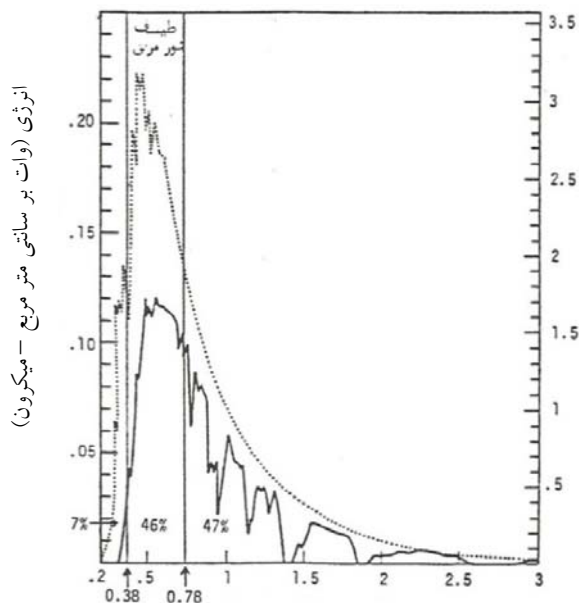
ت ۹. کنترل تابش پنجره‌های جنوبی با استفاده از درختان برگ ریز.



ت ۱۰. تابش انعکاسی در پنجره 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

وقتی شعاع تابش خورشید به سطح شیشه شفاف با زاویه ورود  $\theta$  برخورد می کند درصد کمی منعکس می شود و زاویه انعکاس در صورت صیقلی بودن سطح شیشه دقیقاً برابر با زاویه ورود  $\theta$  خواهد بود. درصد انعکاس تابش بستگی به اندازه زاویه ورود دارد. برای زوایای ورود کوچکتر از  $30^\circ$  درجه، مقداری که از سطح هوا و شیشه منعکس می شود تقریباً برابر با ۴ درصد می باشد.



طول موج، میکرون

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

بقیه تابش که ۹۶ درصد است از شیشه عبور کرده و تا حدی به سمت خط عمود بر شیشه شکسته می شود که آن را شعاع بازتاب یا انکسار<sup>۱۳</sup> می نامند. زاویه های ورود و بازتاب  $i$  و  $i'$  در تصویر مشاهده می شود. رابطه این دو زاویه نسبت به یکدیگر با ضریب بازتاب یا ضریب انکسار<sup>۱۴</sup> ( $n'$ ) مشخص می شود.

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

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

قسمت دیگر تابش خورشید نور مرئی یا نور سفید می باشد که شامل ۴۷ درصد تابش خورشید بوده و این قسمت از طول موج ۰/۳۸ میکرون تا ۰/۷۸ میکرون را در بر می گیرد. در طیف تابش خورشید بیشترین انرژی با طول موج ۰/۴۸ میکرون است که در قسمت نور سبز و آبی قرار دارد و چشم انسان بیشتر از طول موج های دیگر به آن حساس است. قسمت مادون قرمز که طول موج های از ۰/۷۸ تا ۳ میکرون را در بر می گیرد شامل ۴۸ درصد بقیه تابش خورشید می باشد. این قسمت قابل رویت نبوده و به صورت انرژی گرمایی احساس می شود. قسمت بین ۰/۷۸ تا یک میکرون باعث رشد گیاهان بوده و اغلب شیشه ها این قسمت از تابش خورشید را از خود عبور می دهند. 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 نمی کند (نمودار ۳).

شیشه های بازتابی و کنترل کننده انرژی که در ادامه معرفی خواهند شد مقدار کمتری از تابش خورشید را از خود عبور می دهند.

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. به طور کلی توانایی شیشه های 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 همان گونه که در تصویر ۱۱ مشاهده می شود،

## انواع شیشه شیشه معمولی

طی سالیان متمادی از شیشه ساده یک جداره به عنوان پوشش در بازشوهای ساختمان استفاده می شد. 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 شیشه تک جداره معمولی  $6 \text{ w/m}^2\text{c}^\circ$  است. این رقم بسیار بالایی است. شیشه تک جداره معمولی تقریباً ۱۰ برابر یک دیوار عایق کاری شده هم اندازه خود اتلاف انرژی دارد. در واقع پنجره با یک جداره شیشه به علت عدم کارایی مطلوب در معماری دنیای امروز تقریباً منسوخ شده است.

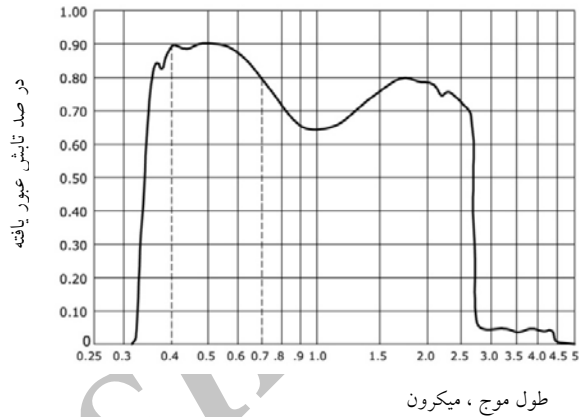
### شیشه های بازتابی<sup>۱۵</sup>

در این نوع شیشه ها، سطح شیشه با یک لایه فلز یا اکسید فلزی پوشانده می شود. این سطح نور خورشید را بازتاب می دهد و باعث می شود که شیشه از یک سمت مانند آینه به نظر برسد. این شیشه ها در کیفیت نور ورودی تغییر ایجاد می کنند و استفاده از آن ها در پنجره های جنوبی توصیه نمی شود. بهتر است این نوع شیشه ها در پنجره های شرقی و غربی، جهت کنترل تابش مزاحم مورد استفاده قرار گیرند.

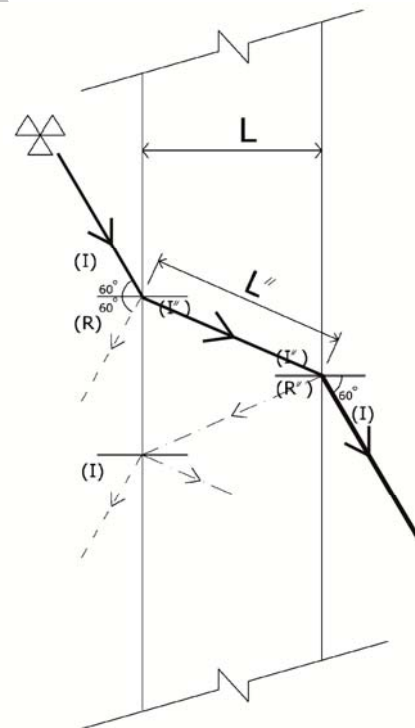
### شیشه های کنترل کننده انرژی<sup>۱۶</sup>

شیشه های کنترل کننده انرژی یا Low-Emissivity که در فارسی به شیشه های کم گسیل ترجمه می شوند، شیشه هایی هستند که انتقال حرارت کمتری نسبت به شیشه های معمولی دارند و مانند یک عایق حرارتی عمل می کنند. این نوع شیشه ها اجازه عبور بخش مرئی طیف نور خورشید را می دهند اما طیف حرارتی (امواج مادون قرمز) و امواج مضر (امواج ماوراء بنفش) را منعکس یا فیلتر می کنند. ضریب انتقال حرارت یک شیشه دوجداره، حاوی یک جداره شیشه Low-e حدود  $1/1$  الی  $1/3$

وقتی زاویه ورود حدود  $30^\circ$  درجه یا کمتر باشد عدد ضریب انکسار برای شیشه های معمولی برابر با  $1/526$  و برای آب تمیز برابر  $1/33$  می باشد.



ن ۴. نمودار عبور تابش خورشید از شیشه معمولی.



ت ۱۱. عبور شعاع تابش خورشید از شیشه معمولی.

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 فتوکرومیک به نور پاسخ‌گو هستند و با افزایش تابش نور تیره می‌شوند. در شیشه‌های کریستال مایع<sup>۱۹</sup>، 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 جداکننده‌های داخلی مانند پارتیشن‌ها هم کاربرد دارند و کیفیت‌های مختلفی برای فضا ایجاد می‌کنند. البته این شیشه‌ها از نظر اقتصادی هنوز به صورتی 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 به همراه یک لایه هوای ساکن در میان آن‌ها استفاده کرد. با این کار ضریب انتقال حرارت شیشه<sup>۲۰</sup> از  $6 \text{ w/m}^2\text{c}^\circ$  به حدود  $3/2 \text{ w/m}^2\text{c}^\circ$  کاهش می‌یابد. به طور کلی ضریب انتقال حرارت شیشه به فاصله بین دولایه شیشه، نوع هوا یا گاز میانی و ضخامت

$\text{w/m}^2\text{c}^\circ$  است. این رقم در مقایسه با شیشه تک جداره معمولی رقم قابل توجهی به حساب می‌آید. 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<sup>۱۷</sup> نرمال آن‌ها ( $\epsilon_n$ ) بستگی دارد و هرچه این ضریب کمتر باشد امواج مادون قرمز کمتری از خود عبور می‌دهند. ضریب انتشار نرمال شیشه معمولی حدود  $0/89$  است و این در حالی است که این ضریب برای شیشه‌های low-e بین  $0/05$  تا  $0/2$  است.



ت ۱۲. مکانیزم شیشه low-e.

### شیشه‌های هوشمند<sup>۱۸</sup>

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،

جداره‌ها، ضریب انتقال حرارت را حدود ده درصد کاهش می‌دهد. از انواع شیشه‌هایی که معرفی شد می‌توان به صورت ترکیبی در شیشه‌های دو جداره استفاده کرد. مثلاً پنجره دو جداره با جداره داخلی از نوع شیشه low-e برای مناطق سردسیر و شیشه دو جداره با لایه خارجی از نوع بازتابی برای مناطق گرمسیر مناسب است. شیشه‌ها در انواع بیش از دو جداره هم تولید می‌شوند اما به دلیل 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 ۱۴ جهت مناسب برای استفاده از انواع مختلف شیشه پیشنهاد شده است.

لایه‌های داخلی و خارجی شیشه بستگی دارد. به طوری کلی هر چه فاصله بین دو جداره شیشه بیشتر شود انتقال حرارت کمتر خواهد شد؛ اما اگر فاصله دو جداره شیشه شیشه بیش از ۴ اینچ (حدود ۱۶mm) شود، به دلیل تشکیل جریان همرفت بین لایه‌ها، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین اگر فاصله بین دو جداره کمتر از ۴ اینچ (حدود ۸mm) شود در کاهش انتقال حرارت بی تأثیر خواهد بود. نوع گازی که بین دو جداره شیشه قرار می‌گیرد نیز در میزان انتقال حرارت مؤثر است. استفاده از گازهای بی اثر مانند کریپتون و آرگون در بین

ضریب انتقال حرارت برای پنجره با فریم ترمال بریک 4mm (w/m <sup>2</sup> c°)			
فاصله بین جداره‌ها			نوع شیشه
16mm و بیشتر	12mm	6mm	
	۵.۷		تک جداره
۳.۳	۳.۴	۳.۷	دو جداره (پرشده با هوا)
۲.۶	۲.۸	۳.۳	دو جداره (low-E, εn = 0.2)
۲.۵	۲.۶	۳.۲	دو جداره (low-E, εn = 0.1)
۲.۳	۲.۵	۳.۱	دو جداره (low-E, εn = 0.05)
۳.۲	۳.۳	۳.۵	دو جداره (پرشده با آرگون)
۲.۵	۲.۶	۳.۱	دو جداره (low-E, εn = 0.2 ، پرشده با آرگون)
۲.۳	۲.۴	۲.۹	دو جداره (low-E, εn = 0.1 ، پرشده با آرگون)
۲.۱	۲.۳	۲.۸	دو جداره (low-E, εn = 0.05 ، پرشده با آرگون)
۲.۵	۲.۶	۲.۹	سه جداره

ضریب انتقال حرارت برای پنجره با فریم UPVC (w/m <sup>2</sup> c°)			
فاصله بین جداره‌ها			نوع شیشه
16mm و بیشتر	12mm	6mm	
	۴.۸		تک جداره
۲.۷	۲.۸	۳.۱	دو جداره (پرشده با هوا)
۲.۱	۲.۳	۲.۷	دو جداره (low-E, εn = 0.2)
۱.۹	۲.۱	۲.۶	دو جداره (low-E, εn = 0.1)
۱.۸	۲	۲.۶	دو جداره (low-E, εn = 0.05)
۲.۶	۲.۷	۲.۹	دو جداره (پرشده با آرگون)
۲.۰	۲.۱	۲.۵	دو جداره (low-E, εn = 0.2 ، پرشده با آرگون)
۱.۸	۱.۹	۲.۳	دو جداره (low-E, εn = 0.1 ، پرشده با آرگون)
۱.۷	۱.۸	۲.۳	دو جداره (low-E, εn = 0.05 ، پرشده با آرگون)
۲.۰	۲.۱	۲.۴	سه جداره

ج ۲. مقایسه ضریب انتقال حرارت شیشه‌ها به همراه قاب‌های مختلف.

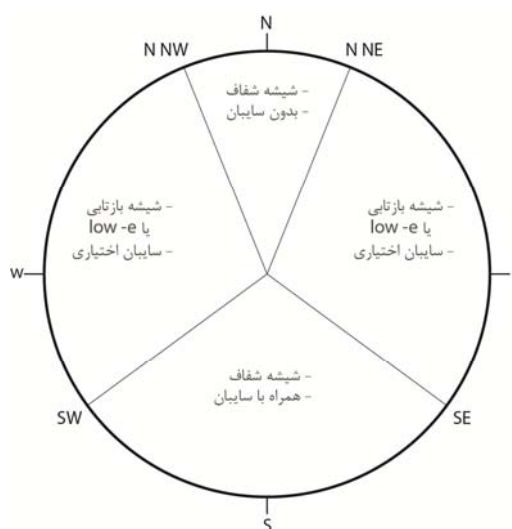
امروزه بسیار پرکاربرد هستند و مزایای فراوانی نسبت به دیگر انواع قاب‌ها دارند. در ادامه به بررسی این دو نوع قاب خواهیم پرداخت.

### قاب‌های UPVC<sup>۲۲</sup>

UPVC ماده‌ای متشکل از مشتقات اصلی نفت خام و نمک طعام است و از پلیمریزاسیون منومر وینیل کلراید تشکیل می‌گردد. UPVC هم اکنون از پر مصرف‌ترین و مطمئن‌ترین مواد در ساخت 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<sup>۲۳</sup> 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 نشست 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 آلومینیومی

قبل از رواج پنجره‌های UPVC، پنجره‌های آلومینیومی بسیار پرکاربرد بودند. مشکل اصلی آلومینیم، رسانا بودن آن است. به‌عنوان مثال رادیاتورهای سیستم گرمایش مرکزی را از آلومینیم می‌سازند. برای حل این مشکل قاب‌های ترمال بریک<sup>۲۴</sup> معرفی شدند. پروفیل‌های سیستم ترمال بریک، از دو مقطع 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.



ت ۱۴. جهت‌های پیشنهادی برای انواع شیشه‌ها.

### قاب پنجره<sup>۲۱</sup>

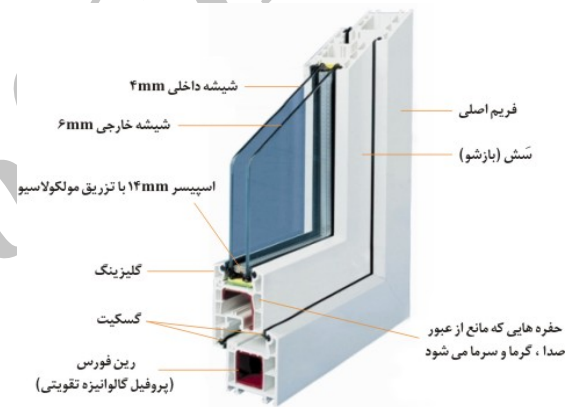
معمولاً در ساخت قاب از مواد مختلفی استفاده می‌شود. در این میان قاب‌های چوبی، آهنی، آلومینیومی و UPVC پر کاربردترند. چوب به‌عنوان ماده‌ای رایج در طبیعت، از اولین موادی بود که در ساخت درب و پنجره به کار گرفته شد. از مزایای چوب می‌توان به ضریب انتقال حرارتی پایین آن اشاره کرد. در مقابل این امتیاز چوب به دلیل خاصیت ذاتی خود، افت می‌کند، می‌پوسد و متورم می‌شود. در هنگام آتش سوزی نیز چوب عاملی برای گسترش آتش است. پنجره‌های چوبی هزینه 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. اما دو نوع UPVC و آلومینیومی،

## نتیجه

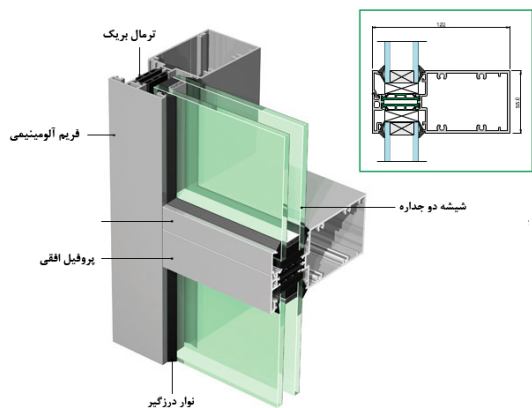
نقش شیشه در معماری امروز قابل توجه است. درصد استفاده از شیشه در ساختمان‌های مسکونی، غیر مسکونی، روستایی و همچنین ساختمان‌های بلند مرتبه امروزی بسیار بالاست. کیفیتی که شیشه در معماری ایجاد می‌کند در مصالح دیگر قابل دستیابی نیست. دستیابی به منظر مناسب، ورود نور کافی به محیط زندگی و کار، ایجاد شور و نشاط در ساکنان بنا و ایجاد زیبایی بصری در نمای ساختمان، همه مواردی است که به کمک استفاده از شیشه در بنا محقق می‌شود. اما همان طور که ذکر شد با توجه به میزان ذخایر انرژی و بهای بالای امروزه 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 اما معقول از نظر مصرف انرژی دست یافت.

شیشه‌های کنترل کننده انرژی، شیشه‌های هوشمند و شیشه‌های چند جداره به همراه 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

قاب‌های آلومینیمی و UPVC، از نظر اتلاف انرژی در سطح مطلوبی قرار دارند. آلومینیم در مقایسه با UPVC استحکام و مقاومت خمشی بیشتری دارد، اما استفاده از نوار ترمال بریک باعث می‌شود یکپارچگی قاب از بین برود. در مقابل برای افزایش استحکام پروفیل‌های UPVC از پروفیل‌های تقویتی گالوانیزه استفاده می‌کنند. پنجره‌های آلومینیمی در مقابل آتش سوزی مقاوم‌تر هستند. آلومینیم یک کالای سرمایه‌ای است و قابل بازیافت است، این در حالی است که UPVC این قابلیت را ندارد. در جدول شماره ۲ مقایسه ضریب انتقال حرارت این قاب‌ها به همراه انواع شیشه‌ها آورده شده است.



ت ۱۵. نمونه‌ای از یک قاب UPVC.



ت ۱۶. نمونه‌ای از یک قاب آلومینیمی ترمال بریک.

### فهرست منابع

- مانیگولامپونینی، 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. (پاییز ۱۳۸۶)، «معرفی نورگیرهای گره چینی در معماری سنتی ایران»، در هنر و معماری، ش ۱۱، ص ۵۰-۵۵.
- 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/window\\_extra4.asp](http://www.ifco.ir/building/build/window_extra4.asp)
- <http://www.upvccenter.com>

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 به دلیل اندک بودن بودجه 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