Archive of SID
نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی ● دوره ۲۴ ● شماره ۳ ● پاییز ۱۳۹۸

نمای خورشیدی مدولار با مقاومت حرارتی بالا*

شاهین حیدری **[۱]، بهروز محمد کاری[۲]، احمد عسکری انارکی[۳]**

[۱] استاد دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
[۲] دانشیار فیزیک ساختمان، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران.
[۳] کارشناس ارشد انرژی و معماری، پردیس هنرهای زیبا ، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
(تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۰۴/۰۲، تاریخ پذیرش نهایی: ۹۸/۰۸/۱۹)

چکیده

پیشگیری از اتلاف حرارت و استفاده از ظرفیت‌های محیط، دو راهبرد اصولی در طراحی ساختمان با رویکرد صرفه‌جویی در مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر است. با افزایش تراکم ساختمانی و کاهش نسبت سطوح بام و محوطه به سطح زیربنای ساختمان، امکان استحصال انرژی خورشیدی با روش‌های متداول محدود شده است؛ درحالی‌که مساحت نما، متناسب با سطح زیربنا و به تبع آن تقاضای انرژی است. ضمن آن‌که نصب تجهیزات خورشیدی روی سطوح افقی با ظرفیت عملکردی بالا، مداخله‌ای نامطلوب در معماری محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر، تعبیه تیغه‌های آلومینیومی جاذب پرتوهای خورشید، به شکل یک سایه‌بان کرکره‌ای، درون یک محفظه‌ی شفافِ تحت خلأ با پوسته‌ی موج‌دار پیشنهاد می‌شود. خلأ، مقاومت حرارتی را تأمین می‌کند. پوسته‌ی موج‌دار، تحمل نیروهای ناشی از خلأ را ممکن می‌سازد و برخلاف فرم مسطح، وابستگی بازدهی گردآور را به زاویه‌ی ارتفاع خورشید می‌کاهد. انتقال حرارت با فناوری لوله‌گرمایی، از عبور سیال از داخل پانل نما جلوگیری و نیاز به مراقبت‌های تأسیساتی را برطرف می‌کند. جدار حاصل عایق حرارت بوده، امکان استحصال انرژی خورشیدی را در تمام سال برای گرمایش و سرمایش جذبی فراهم آورده و ضمن تأمین شفافیت نسبی و روشنایی یکنواخت، در تابستان سایه‌اندازی کامل دارد. ارزیابی با روش شبیه‌سازی نرم‌افزاری حاکی از کارایی مطلوب جدار پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی

تلفیق گردآور خورشیدی در ساختمان، گردآور لوله‌ای، نمای خورشیدی، عایق خلأ.

* این مقاله برگرفته از پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد نگارنده سوم با عنوان «بهینه‌سازی پوسته‌ی ساختمانی عایق‌بندی‌شده در برابر هدایت حرارتی با هدف بهره‌مندی از انرژی تابشی خورشید» به راهنمایی نگارنده اول و نگارنده دوم در دانشکده معماری پردیس هنرهای زیبای دانشگاه تهران می‌باشد.

** نویسنده مسئول: تلفکس: ۶۶۹۷۲۰۸۳-۰۲۱، E-mail: shheidari@ut.ac.ir .

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

پوسته‌ی ساختمان، به‌عنوان واسطه‌ای بین داخل و خارج، نقشی اساسی در کاهش تبادل حرارت ساختمان و نیز بهره‌گیری از ظرفیت‌های محیط دارد. از همین رو، آیین‌نامه‌های ساختمانی، به‌طور گسترده‌ای عایق‌بندی دیوارهای خارجی را با هدف کاهش اتلاف انرژی و حفظ سلامت ساختمان با پیشگیری از پدیده میعان، توصیه می‌کنند. عایق‌بندی، هرچند از هدررفت گرما یا سرما در ساختمان می‌کاهد، هم‌زمان، از آن‌جایی که عایق‌های متعارف، عمدتاً کدر هستند، امکان استفاده از روشنایی روز در طول سال و همچنین بهره‌برداری از گرمای آفتاب در زمستان، صرفاً منحصر به پنجره‌ها می‌شود و عایق، انرژی خورشیدی را دفع می‌کند. این تناقض، همواره در قالب نسبت مساحت پنجره‌ها به سطح خارجی، در معماری چالش‌برانگیز بوده است.

از سویی دیگر، با مترا کم‌تر شدن شهرها و افزایش ارتفاع ساختمان‌ها، سطوح عمودی متناسب با سطح زیربنای ساختمان، افزایش می‌یابد، این درحالیست که میزان مطلق سطوح افقی نظیر محوطه و یا بام، ثابت بوده و در ساختمان‌های بلندمرتبه، سهم هر طبقه از این سطوح کاهش می‌یابد. لذا به‌نظر می‌رسد دیوارهای خارجی، بیشترین ظرفیت را برای استفاده از انرژی خورشیدی در ساختمان‌های آینده خواهند داشت. با توجه به ارزش عملکردی و اقتصادی سطوح افقی و همچنین وسعت سطوح عمودی نما، که با افزایش ارتفاع، متناسب با زیربنا-وبالطبع تقاضای انرژی-افزایش می‌یابد، استفاده از بام و محوطه برای استحصال انرژی خورشیدی، چندان هوشمندانه به نظر نرسیده و راه‌حلی معمارانه به‌حساب نمی‌آید. حال آن‌که تلفیق تجهیزات خورشیدی با عناصر معماری، ضمن آن‌که تمامیت و یکپارچگی ساختمان و اجزای آن را حفظ می‌کند، می‌تواند صرفه اقتصادی نیز به همراه داشته باشد و کارایی و بهره‌وری ساختمان را ارتقا دهد. درنتیجه، دستیابی به راه‌حلی عملی، برای استفاده از انرژی خورشیدی در یک پوسته با مقاومت حرارتی بالا، می‌تواند گامی مهم در توسعه‌ی کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر، کاهش اتکا به سوخت‌های فسیلی و آهسته نمودن روند تخریب محیط زیست باشد.

تلاش برای طراحی پوسته‌های ساختمانی با ویژگی‌های خاص و بهبود عملکرد و کارایی آن‌ها، در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از چالش‌ها و در عین‌حال یکی از مهم‌ترین فرصت‌های پیشبرد معماری در دوران جدیدی است که فناوری، با شتابی بیش از همیشه، مرزهای محدودکننده‌ی معماری را درمی‌نوردد. پوسته‌ی ساختمان به‌مثابه مرزی میان فضای داخل و محیط پیرامون، عنصری کلیدی در دریافت و اتلاف انرژی محسوب می‌شود و در پژوهش‌های پیرامون مصرف انرژی در ساختمان، الهام‌بخش محققان بوده است. در پژوهش حاضر، هدف ارائه راهکاری برای طراحی یک پانل نمای مدولار با مقاومت حرارتی بالاست که به‌نحو مؤثری در جذب انرژی خورشیدی ایفای نقش کند. در ادامه به بررسی اجزا و چگونگی عملکرد راهکار پیشنهادی می‌پردازیم و کارایی آن را با استفاده از روش شبیه‌سازی نرم‌افزاری مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

۲. پیشینه تحقیق

موضوع این پژوهش، دربرگیرنده دو ویژگی اساسی مقاومت حرارتی بالا و بهره‌برداری از انرژی خورشیدی است. هریک از این دو ویژگی، توجه پژوهشگران را در حوزه‌های مختلف دانش مهندسی، به خود جلب کرده است.

تجمیع این دو ویژگی، پاسخ به یک نیاز در حوزه فنی معماری و ساخت است که به نظر می‌رسد کم‌تر مورد توجه پژوهشگران این حوزه قرار گرفته است و از آن‌جایی که چنین نیازی، اساساً یک چالش معماری محسوب می‌شود، کم‌تر پژوهشگری در سایر حوزه‌های دانش آن پرداخته است. لذا ایده‌پردازی برای رفع این محدویت، برعهده معماران است. بررسی ویژگی‌ها، نقاط ضعف و قوت راهبردهای گردآوری انرژی خورشیدی زمینه‌ی مناسبی را برای این ایده‌پردازی فراهم می‌آورد.

۱. ۱. نماهای خورشیدی غیرفعال

نماهای خورشیدی غیرفعال، انرژی خورشیدی را جذب و حرارت آن را به داخل منتقل می‌کنند. انواع کدر آن نظیر دیوار ترومب، گرمای حاصل را به‌طور غیرمستقیم وارد فضا می‌کنند (Quesada et al., 2012a, 2820). در حالی‌که انواع شفاف آن، نظیر نمای دوپوسته، بخش قابل توجهی از تابش را به‌صورت مستقیم به داخل ساختمان هدایت می‌کنند (Quesada et al., 2012b, 2643). این راهبردها، غالباً امکان مهار و کنترل جریان انرژی خورشیدی را نمی‌دهند و معمولاً به فضای مجاور خود سرویس می‌دهند. لذا، عمدتاً دارای کاربرد گرمایشی بوده و در تابستان مستلزم تمهیداتی برای غیرفعال‌سازی هستند، لذا به‌طور کلی در مناطق سردسیر کاربرد آنها معمول‌تر است.

۱. ۲. فوتوولتائیک یکپارچه با ساختمان

پانل‌های خورشیدی فوتوولتائیک، تجهیزاتی هستند که نور خورشید را به‌صورت مستقیم به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. سلول‌های خورشیدی، قطعات متحرک کمی دارند (اغلب ندارند)، مدولار بوده و امکان انطباق با مقادیر متفاوت نیازهای الکتریکی را دارند، قابل اتکا و با عمر طولانی هستند و به‌سادگی تولید می‌شوند (ASHRAE, 2008, 36.18). فوتوولتائیک‌ها، بازدهی اندکی (حدود ۱۸ درصد) دارند و با افزایش دما، بازدهی آنها کاهش می‌یابد، از همین رو، یک فاصله هوایی قابل تهویه، باید با نمای ساختمان داشته باشند. همچنین، این سلول‌ها عمدتاً غیرشفاف بوده و انواع نیمه‌شفاف یا شفاف آن بازدهی به‌مراتب کم‌تری دارد. تأمین مقاومت حرارتی جدار در این حالت، مستلزم در نظرگرفتن تدابیر مستقل دیگری است. در مناطق گسترده‌ای از کشور ایران، با

www.SID.ir

Archive of SID

آب‌وهوای عمدتاً گرم، بازدهی این سیستم تاحدی کاهش می‌یابد. سلول‌های خورشیدی یکپارچه با ساختمان، در حال حاضر توجیه اقتصادی ندارند (Thomas, 2012, 4-14).

۱. ۳. گردآورهای حرارتی خورشیدی

گردآورهای حرارتی، انرژی خورشیدی را به‌واسطه‌ی سطحی با ضریب جذب بالا، دریافت و به یک سیال با ظرفیت حرارتی بالا، نظیر آب، منتقل می‌کند. سیال گرم حاصل، می‌تواند برای تأمین آب گرم مصرفی، گرمایش فضاها و نیز راه‌اندازی خنک‌کن‌های جذبی مورد استفاده قرار گیرد. کاربرد اخیر (تغذیه خنک‌کن جذبی) مستلزم تولید سیال با دمای بالا است (IIED, 2010, 255-259).

استفاده از انرژی خورشیدی برای تأمین بارهای برودتی، کاربرد گردآور را از حالت فصلی، به دائمی تغییر می‌دهد و علاوه‌بر تولید آب‌گرم مصرفی،کاربردهای گرمایشی آن را از نظر اقتصادی کاملاً موجه و مقرون‌به‌صرفه می‌کند.

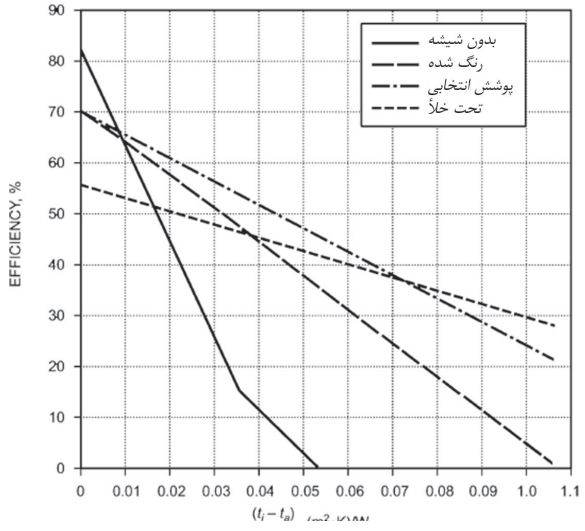
گردآورهای حرارتی، بازدهی حرارتی بالایی دارند. بازدهی گردآور، از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Beckman & Duffie, 1980: 303):

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{in}-T_{air})}{I_{solar}} \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن، η بازدهی گردآور، F_R ضریب تصحیح یا ضریب برداشت حرارتی گردآور که عددی کوچک‌تر از یک است، $\tau\alpha$ حاصل‌ضرب همه‌ی ضرایب عبور و جذب، U_Lضریب کلی تلفات حرارتی که ترکیبی از تابش، همرفت و رسانش است با واحد وات بر مترمربع کلوین، T_{in} و T_{air} به ترتیب دمای سیال ورودی و دمای هوا با واحد کلوین، می‌باشد. در ادامه، به تشریح عمده‌ترین عوامل مؤثر بر بازدهی گردآور می‌پردازیم:

ضریب جذب سطح جاذب: با استفاده از پوشش‌های ویژه با خصوصیت جذب بالای تابش خورشیدی و تشعشع اندک حرارت، دستیابی به بالاترین ضرایب جذب ممکن شده است.

ضریب انتقال حرارت گردآور: با عایق‌بندی دقیق سطح جاذب، میزان تلفات حرارتی آن کاهش و درنتیجه بازدهی آن افزایش می‌یابد. به همین منظور، معمولاً یک لایه عایق حرارتی مقاوم در برابر دمای بالا-عمدتاً از نوع معدنی- در سطح زیرین و اطراف جاذب استفاده می‌شود. سطح رو به آفتاب نیز، توسط یک لایه شیشه پوشانده می‌شود تا ضمن استفاده از خاصیت گلخانه‌ای، از اتلاف گرما کاسته شود و از سطح جاذب نیز حفاظت به عمل آید. (نمودار تصویر ۱)، بازدهی انواع گردآور خورشیدی با ضرایب انتقال حرارت مختلف را در ازای دماهای متفاوت نشان می‌دهد.

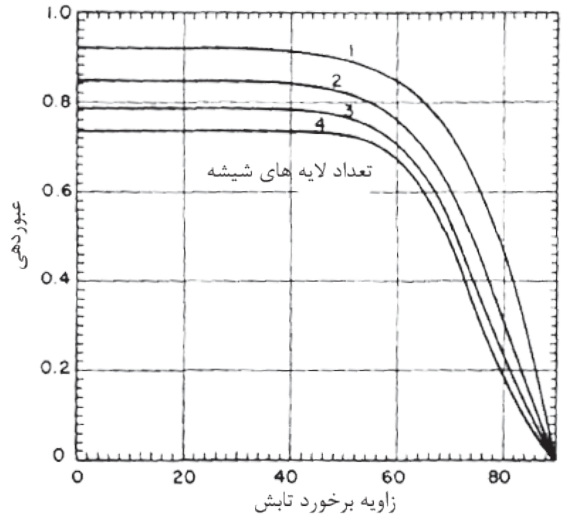


تصویر ۱- بازدهی انواع گردآور خورشیدی. مأخذ: (ASHRAE, 2008, 36.18).

اختلاف دما: با کاهش اختلاف دمای هوای بیرون با دمای سطح جاذب (که نزدیک به دمای سیال ناقل حرارت است)، میزان تلفات حرارتی کاهش و بازدهی آن افزایش می‌یابد. در صورت نیاز به سیال با دمای بالا (کاربردهای سرمایشی انرژی خورشیدی نظیر خنک‌کن‌های جذبی) یا دمای هوای بسیار پایین، بازدهی گردآور کاهش می‌یابد. لذا در اقلیم عمدتاً گرم ایران، کاربرد گردآورهای حرارتی خورشیدی کاملاً منطقی به نظر می‌رسد.

ضریب عبور شیشه محافظ: این پارامتر صرف‌نظر از جنس شیشه، بیش از هرچیز وابسته به زاویه تابش نسبت به بردار عمود بر سطح است. مطابق (نمودار تصویر ۲) در زوایای بیش از ۶۰ درجه، سهم بزرگی از تابش خورشید، از سطح شیشه بازتابیده می‌شود و امکان عبور از آن و جذب‌شدن توسط سطح جاذب را پیدا نمی‌کند. درنتیجه، با توجه به زاویه نزدیک به قائم تابش در تابستان، در صورت نصب گردآور تخت بر روی نما، سطح عمودی شیشه محافظ به دلیل اختلاف زیاد زاویه تابش با بردار عمود بر سطح، عمده تابش را منعکس می‌کند و انرژی استحصالی از آن، در فصل تابستان به حداقل می‌رسد. لازم به یادآوریست در شهر تهران، زاویه تابش آفتاب در تابستان به ۷۸ درجه می‌رسد. این میزان در شهرهای جنوبی‌تر نظیر اصفهان، شیراز و بندرعباس، از این مقدار فراتر می‌رود. لذا کاربرد این سامانه با پیکربندی متعارف، در نمای ساختمان، عملی به نظر نمی‌رسد.

گردآورهای خورشیدی با وجود برخورداری از یک لایه عایق



تصویر ۲- عبوردهی شیشه در زوایای مختلف تابش. مأخذ: (Beckman & Duffie, 1980: 220)

www.SID.ir

Archive of SID

حرارتی، در صورت نصب بر روی نما می‌توانند تا حدی به کاهش تبادل حرارت از جدار کمک کنند. عدم شفافیت، وجود سیستم‌های تأسیساتی در نمای ساختمان با دسترسی محدود، احتمال نشتی و خرابی گردآور و ظاهر نه‌چندان خوشایند، کاربرد آنها را در پوسته‌ی ساختمان محدود کرده است و کم‌تر به‌عنوان راه‌حلی معمارانه از آن یاد می‌شود.

۲. طراحی جدار پیشنهادی

در این بخش، به تشریح ایده‌های طراحی و معرفی ساختار پانل نمای مدولار خورشیدی با مقاومت حرارتی بالا می‌پردازیم.

مرحله‌ی اول؛ تیغه‌های جاذب: هر یک از مدول‌های سازنده این جدار، مشتمل بر تعدادی تیغه فلزی به‌عنوان سطح جاذب، با پوشش انتخابی است. این سطوح باریک، به‌صورت افقی و در فواصل ۹۵ میلی‌متر، در داخل پانل قرار داده شده و ساختاری مشابه یک سایه‌بان کرکره‌ای (لوور) را ایجاد می‌کند (مرحله اول از تصویر ۳). تابش خورشیدی، جذب این تیغه‌ها شده و حرارت آنها را بالا می‌برد. با انتقال حرارت این تیغه‌ها به یک سیال ناقل با ظرفیت حرارتی بالا-نظیر محلول آب و گلیکول- انرژی خورشیدی مهار شده و می‌توان در هر نقطه‌ای از ساختمان و با مقاصد مختلف از آن استفاده نمود. در بخش سوم این نوشتار، به بررسی فناوری پیشنهادی برای انتقال حرارت از تیغه‌ها به سیال و نقش مثبت آن در مراحل اجرا، بهره‌برداری و نگهداری از جدار پرداخته می‌شود.

مرحله‌ی دوم؛ محفظه‌ی شیشه‌ای: در ساختار پیشنهادی این پژوهش، به‌منظور جلوگیری از اتلاف حرارت تیغه‌های جاذب و افزایش بازدهی گردآور و نیز محافظت سطوح جاذب از عوامل آب و هوایی، تیغه‌های جاذب محبوس در میان دو لایه شیشه، در نظر گرفته شدند. این محفظه شیشه‌ای، فضای درون و بیرون ساختمان را نیز از هم جدا ساخته و عملکرد یک نمای شیشه‌ای دوجداره را خواهد داشت.

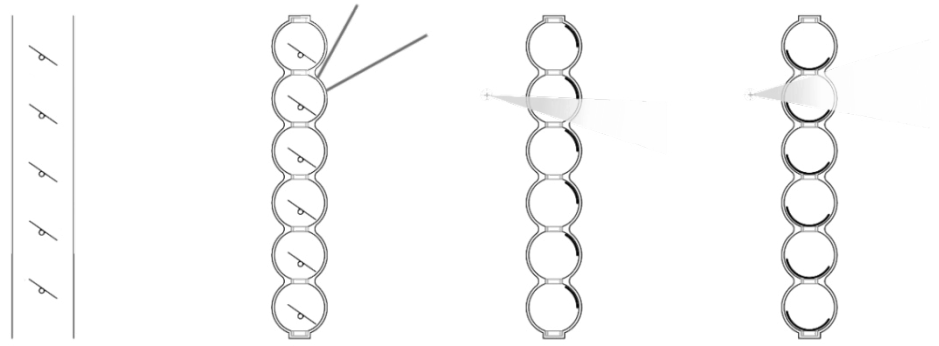
اما از طرفی دیگر، با قرارگیری شیشه‌ی تخت در برابر تابش خورشید، در فصل تابستان که زاویه ارتفاع آفتاب نزدیک به قائم است، بخش قابل‌توجهی از پرتو خورشید در اثر اختلاف زاویه‌ی تابش و بردار عمود بر سطح شیشه، منعکس شده و فرصت جذب‌شدن توسط جاذب را نمی‌یابد. به همین منظور در طراحی این محفظه، سطح شیشه محافظ به‌صورت مواج و با مقطع نیم‌دایره –فرم لوله‌ای افقی- در نظر گرفته شد، در نتیجه در تمامی ایام سال، تابش آفتاب بر سطح شیشه محافظ، قائم خواهد بود (مرحله دوم از تصویر ۳).

مرحله‌ی سوم؛ تخلیه‌ی هوا از محفظه: محفظه دوجداره، علاوه بر نقش محافظتی برای جاذب و عملکرد جداکنندگی فضای داخل از بیرون، مقاومت حرارتی حداقلی را فراهم می‌کند. به‌منظور دستیابی به مقاومت حرارتی مورد نظر، می‌توان با ایجاد خلأ نسبی، انتقال حرارت از طریق رسانش و همرفت را کاهش و نزدیک به صفر رساند. خلأ جدار را تبدیل به یک عایق با مقاومت حرارتی کاملاً مناسب و مطلوب می‌کند و ارزش جدیدی به جدار می‌بخشد. خلأ حاکم در محفظه، تلفات حرارتی سطح جاذب گردآور را نیز به حداقل می‌رساند.

اختلاف فشار زیاد بین داخل و خارج محفظه، موجب واردآمدن نیروی فشاری زیادی بر محفظه می‌شود. در این صورت، شیشه‌ی تخت، در ضخامت‌های معمول، توان تحمل تنش‌های کششی درونی را نداشته و فوراً فرومی‌پاشد. استفاده از فاصله‌اندازهای پرشمار و نزدیک به هم، می‌تواند نیروی‌های فشاری دو سوی جدار را با هم خنثی نماید، لکن با تشکیل پل‌های حرارتی بسیار، مقاومت حرارتی جدار را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. این درحالیست که شیشه موجدار، به دلیل فرم سازه‌ای بهینه، نیروی ناشی از فشار جو را صرفاً تبدیل به تنش فشاری می‌کند که برای شیشه در ضخامت‌های متعارف نیز قابل تحمل می‌باشد. در نتیجه، انحنای دو لایه‌ی تشکیل‌دهنده‌ی این جدار، علاوه بر افزایش ضریب عبور پرتو خورشید، از نظر ساختاری برای حفظ خلأ و تأمین مقاومت حرارتی آن ضروری است.

بااین‌وجود، لازم است عناصری برای انتقال و متعادل‌سازی نیروها در خطالقعر پوسته‌ی مواج در نظر گرفته شود، لذا در این ناحیه، تعبیه فاصله‌اندازهایی مستحکم، با مقاومت حرارتی بالا (نظیر پلی‌آمید که در تولید نیم‌رخ‌های آلومینیومی شکست حرارتی به‌کار گرفته می‌شود) ضروری است که در بخش شبیه‌سازی، به تأثیر آن بر کارایی حرارتی جدار پرداخته خواهد شد.

مرحله چهارم؛ انطباق فرم جاذب با محفظه: در ساختار



تصویر۳- مراحل طراحی و بهینه‌سازی نمای خورشیدی با مقاومت حرارتی بالا.

www.SID.ir

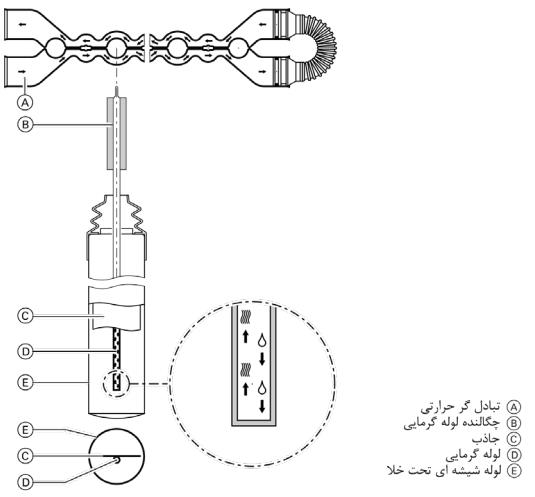
Archive of SID

حاصل، تجدیدنظر در موقعیت قرارگیری جاذب، چه از نظر زیبایی‌شناسی و چه از نظر دریافت حداکثری تابش در تابستان، ضروری به نظر می‌رسد. در صورت قرارگیری سطح جاذب در مجاورت سطح بیرونی، زاویه دید از داخل محدود می‌شد (مرحله سوم از تصویر۳). لذا، جاذب با فرمی هماهنگ با بدنه محفظه و با در نظرگرفتن زاویه تابش در زمستان و تابستان، در بخش تحتانی ردیف‌های افقی و در فاصله اندکی از سطح داخلی محفظه و فاصله‌انداز در نظر گرفته شد (مرحله چهارم از تصویر ۳).

۳. انتقال حرارت از سطح جاذب به سیال

در جدار پیشنهادی، انتقال حرارت از سطح جاذب به سیال ناقل به دو روش ممکن است. در روش نخست موسوم به روش جریان مستقیم، سیال ناقل حرارت، از طریق یک لوله مسی دوجداره هم‌مرکز یا یک حلقه رفت‌وبرگشت، وارد محفظه شده و گرمای سطح جاذب را جذب می‌کند. در این سیستم، سیال ناقل به‌وسیله پمپ به جریان می‌افتد و وضعیت قرارگیری جاذب (افقی یا عمودی) اهمیت چندانی ندارد (Beckman & Duffie, 1980, 292). با این وجود، عبور سیال از گردآور؛ خطر گرفتگی را ایجاد می‌کند، به دلیل طولانی‌شدن مسیر سیال، سبب افت فشار شدید می‌شود، آب‌بندی اتصال گردآور به چندراهه می‌تواند باعث دشواری‌هایی در نصب شود و تخریب هر یک از گردآورها موجب تخلیه تمام سیال ناقل از نما می‌شود. همچنین تعویض یا تعمیر یک گردآور مستلزم تخلیه سیستم از سیال ناقل خواهد بود.

روش دیگر انتقال حرارت از جاذب به سیال ناقل، استفاده از لوله گرماییست که به دلیل مزیت‌های پرشمار، در این پژوهش انتخاب گردید. لوله‌های حرارتی، هدایت حرارتی مفید به‌شدت بالایی دارند. در حالی که هدایت حرارتی رساناهای جامد نظیر آلومینیوم، مس، گرافیت و الماس در محدوده ۲۵۰ تا ۱،۵۰۰ وات بر مترکلوین قرار دارد، هدایت حرارتی مفید لوله‌های حرارتی، در بازه ۵،۰۰۰ تا۲۰۰،۰۰۰ قرار دارد (Lopez, 2011, 35).



تصویر ۴- انتقال حرارت از طریق اتصال خشک و بدون نیاز به آب‌بندی در صورت استفاده از لوله‌ی گرمایی. مأخذ: (Viessmann, 2008, 28)

لوله‌ی گرمایی، لوله‌ای ساخته‌شده از موادی با هدایت حرارتی بالا مانند مس است که حاوی مقدار اندکی سیال موسوم به سیال عامل (معمولاً آب) است. در اثر گرمشدن بخش تحتانی (موسوم به تبخیرکننده)، سیال در اثر فشار اندک داخل محفظه، بخار می‌شود. این بخار به سمت انتهای سرد لوله (چگالنده) منتقل و در آنجا تقطیر می‌شود. آب تقطیرشده به‌واسطه جاذبه به انتهای گرم لوله باز می‌گردد. از آنجایی که گرمای نهان تبخیر زیاد است، حتی با اختلاف دمای اندک بین دو انتهای لوله، مقدار زیادی گرما جابه‌جا می‌شود. در نتیجه، این ساختار از هدایت گرمایی مفید بسیار بالایی برخوردار خواهد بود. به‌عنوان یک سیستم انتقال حرارت غیرفعال، لوله‌های گرمایی عملکرد ساده و قابل اتکایی دارند، هدایت حرارتی آنها بالا و فاقد اجزای متحرک بوده و امکان انتقال حرارت در فواصل طولانی را فراهم آورده و عملکردی کاملاً ساکن دارند.

در این روش، بدنه لوله‌گرمایی، حرارت را از جاذب جذب نموده و به بخش استوانه‌ای شکل لوله‌گرمایی موسوم به چگالنده منتقل می‌کند (تصویر ۴). چگالنده درون غلافی قرار می‌گیرد که با سیال ناقل جاری در چندراهه، در تماس است (Chen, 2011, 239). به این ترتیب، به علت عدم تبادل سیال، نیازی به آب‌بندی این اتصال وجود ندارد، همچنین تخریب یک گردآور یا تعویض آن منجر به تخلیه سیال نمی‌شود. لوله گرمایی خطر یخزدگی ندارد، مانند یک فیوز حرارتی عمل نموده و از گرم‌شدن بیش‌ازحد سیال، ممانعت می‌کند. در نتیجه، استفاده از این سیستم، بسیاری از دشواری‌ها و خطرات احتمالی استفاده از گردآور در نما را کاهش می‌دهد.

عمده‌ترین چالش پیش‌رو در استفاده از لوله‌های گرمایی متعارف، مسأله موقعیت قرارگیری آن است. تقریباً تمامی گردآورهای این نوع باید با شیب حداقل ۲۵ درجه نصب شوند (IIED, 2010, 34)، در غیر این صورت جریان حرارت در لوله مختل می‌شود. لذا برای نصب به‌صورت افقی، لوله‌گرمایی مورد استفاده باید دارای ساختار درونی متخلخلی موسوم به فتیله باشد تا با استفاده از خاصیت موئینگی، سیال چگالیده به تبخیرکننده بازگردد(Faghri, 1995, 3, 32) . بنابراین امکان نصب گردآور به‌صورت افقی فراهم می‌شود.

به دلیل چیدمان افقی تیغه‌های جاذب، استفاده از لوله‌گرمایی فتیله‌دار ناگزیر خواهد بود. این نوع از لوله‌گرمایی، به‌صورت تجاری در دسترس است و به‌تازگی نمونه‌هایی از کاربرد آن در گردآورهای حرارتی لوله‌ای تحت خلأ مشاهده شده است (URL 2, Solar Rating & Certification Corporation, 2019).

لازم به توضیح است که علت تأکید بر چیدمان افقی تیغه‌های جاذب، چنانچه در شرح مرحله دوم از بخش ۲ گفته شد، استفاده از مقطع مدور به‌صورت فرم لوله‌ای افقی به‌منظور کاهش انعکاس از روی شیشه (برخلاف فرم تخت) و دستیابی به بیشترین بازدهی است.

۴. شبیه‌سازی و ارزیابی کارایی جدار

۴. ۱. انرژی خورشیدی دریافتی

در این بخش، به‌منظور ارزیابی کارایی جدار در گردآوری

www.SID.ir

Archive of SID

انرژی خورشیدی، مقدار انرژی حرارتی تولیدی محاسبه می‌شود. همچنین، تأثیر فرم هندسی منحنی-به‌صورت افقی و با مقطع نیم‌دایره- بر میزان کسب انرژی، در مقایسه با فرم تخت شیشه، مورد بحث قرار می‌گیرد. ابزار شبیه‌سازی، نرم‌افزار Transol 3.0 است که به‌عنوان یک رابط کاربری، از موتور TRNSYS به‌صورت اختصاصی برای شبیه‌سازی گردآورهای خورشیدی گوناگون استفاده می‌کند.

فرضیات: شبیه‌سازی بر اساس داده‌های آب‌وهوایی شهر تهران انجام پذیرفته است. در این شبیه‌سازی، تعداد چهار عدد از مدول‌های نما، با سطح ناخالص هر یک، برابر با ۵,۴۴ مترمربع به‌صورت موازی و با مشخصات مندرج در جدول ۱ استفاده شده است. محاسبات براساس دمای سیال ۷۰ و ۹۰ درجه سلسیوس صورت گرفته است که در ادامه، به ترتیب سیال گرم و سیال داغ خوانده می‌شوند. کارایی سیستم‌های سرمایشی جذبی در تابستان مستلزم استفاده از سیال داغ است، در حالی که در زمستان، از سیال با دمای کم‌تر نیز می‌توان استفاده نمود تا با کاهش اختلاف دمای آن با هوای سرد محیط، بازدهی آن را افزایش یابد. برای ارزیابی اثرگذاری فرم منحنی شیشه در مدول طراحی‌شده و تأثیر خلأ بر کارایی جدار، سه حالت مختلف برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد:

- مدول پیشنهادی: از پارامترهای استاندارد گردآورهای لوله‌ای تحت خلأ استفاده شده است؛
- بدون لحاظ فرم لوله‌ای مدول: در این حالت، به‌جای فرم موجدار، سطح محفظه شیشه‌ای، تخت در نظر گرفته شد، با این فرض که از نظر مقاومت حرارتی، مشابه مدول پیشنهادی است. هرچند این فرض در عمل، غیرممکن است، چراکه گردآورهای تخت تلفات حرارتی به‌مراتب بالاتری نسبت به نوع لوله‌ای دارند. لذا هدف از این فرض، بررسی تأثیر انحنای شیشه صرف‌نظر از تأثیر خلأ است.
- گردآور تخت: از پارامترهای گردآورهای تخت استاندارد استفاده شده است.

نتایج شبیه‌سازی: خلاصه نتایج این شبیه‌سازی در جدول ۲ آمده است. در تمامی حالات، چنانچه انتظار می‌رفت، با افزایش دمای سیال تولیدی، بازدهی کاهش پیدا می‌کند. روند کاهش بازدهی با افزایش دما، برای مدول پیشنهادی بسیار ملایم‌تر از دو حالت دیگر و به‌ویژه گردآور تخت است.

برخلاف گردآور تخت، در مدول پیشنهادی، بیشترین بازدهی ماهانه، در فصل تابستان تحقق یافته است. در گردآور تخت نصب‌شده بر روی نما، با وجود کاهش اتلاف حرارتی در تابستان، بیشترین نسبت انرژی خورشیدی از سطح شیشه محافظ گردآور منعکس می‌شود. بیشترین بازدهی سالانه، ۶۴,۶٪ و ۶۲,۱٪ (به ترتیب سیال گرم و سیال داغ) برای مدول پیشنهادی در این پژوهش است که بخش عمده آن، مرهون دریافت بهتر تابش در تابستان است. این میزان، بدون در نظر گرفتن فرم لوله‌ای، در حدود ۵۰ و در گردآور تخت نصب‌شده به‌صورت عمودی (انعکاس تابش از سطح مسطح شیشه محافظ و تلفات حرارتی بیشتر) در حدود ۳۰ درصد است.

در (نمودار تصویر ۵)، تأثیر فرم هندسی شیشه‌ی محافظ و همچنین

جدول ۱- مشخصات گردآورهای مورد استفاده در شبیه‌سازی برگرفته از گردآورهای متعارف تحت خلأ و گردآورهای تخت.
مأخذ: (URL2, Solar Rating & Certification Corporation, 2014)

	مدول پیشنهادی	گردآور تخت	واحد
بازدهی نوری	۰,۸۰۴	۰,۷۷۶	-
ضریب اول معادله کارایی	۱,۳۳۰	۴,۱۴۰	W/m^2K
ضریب دوم معادله کارایی	۰,۰۰۶۷	۰,۰۱۴۵	W/m^2K^2
ضریب تعدیل کننده زاویه برخورد	۰,۹۸	۰,۹۰	-
نرخ جریان سیال	۶۱,۲	۷۲	$l/h.m^2$
ظرفیت حرارتی	۸,۳۸	۱۰,۷۸	$KJ/m^2.K$

جدول ۲- بازدهی (درصد) و استحصال انرژی خورشیدی (کیلووات ساعت) در پیکربندی‌های مختلف گردآور.

		سیال گرم						سیال داغ					
		مدول پیشنهادی		بدون لحاظ فرم موجدار		گردآور تخت		مدول پیشنهادی		بدون لحاظ فرم موجدار		گردآور تخت	
	تابش خورشیدی	بازدهی	استحصال	بازدهی	استحصال	بازدهی	استحصال	بازدهی	استحصال	بازدهی	استحصال	بازدهی	استحصال
JAN	2,342	56.3%	1,318	55.9%	1,309	32.1%	751	53.8%	1,260	53.3%	1,248	29.1%	682
FEB	2,278	60.5%	1,378	56.1%	1,278	32.6%	743	58.0%	1,321	53.5%	1,220	30.8%	702
MAR	2,308	61.5%	1,420	52.0%	1,200	30.1%	695	59.2%	1,365	49.8%	1,149	28.9%	666
APR	2,022	63.2%	1,279	43.6%	882	26.4%	533	60.8%	1,229	41.8%	845	26.2%	531
MAY	1,706	64.2%	1,096	33.0%	563	21.9%	373	61.9%	1,056	32.1%	547	21.9%	373
JUN	1,555	67.1%	1,043	31.0%	482	21.8%	340	64.7%	1,006	30.3%	472	21.8%	340
JUL	1,692	68.1%	1,153	31.9%	541	23.2%	393	65.7%	1,112	31.1%	527	23.2%	393
AUG	2,196	69.2%	1,519	46.2%	1,015	29.5%	648	66.7%	1,464	44.1%	968	29.4%	645
SEP	2,743	68.7%	1,883	58.6%	1,606	35.8%	982	66.3%	1,818	55.9%	1,533	33.7%	924
OCT	3,055	66.4%	2,030	62.2%	1,901	38.7%	1,181	63.9%	1,952	59.3%	1,812	35.4%	1,080
NOV	2,655	62.1%	1,648	60.8%	1,613	38.4%	1,020	59.5%	1,581	58.1%	1,544	34.7%	921
DEC	2,335	57.0%	1,330	57.5%	1,344	34.3%	802	54.3%	1,268	54.7%	1,278	31.3%	731
مجموع	26,885	64.6%	17,355	51.1%	13,728	31.5%	8,456	62.1%	16,698	48.9%	13,136	29.7%	7,982

www.SID.ir

Archive of SID

تأثیر مقاومت حرارتی در گردآور، کاملاً مشهود است. بدون در نظر گرفتن فرم هندسی موجدار، انرژی استحصال‌شده در تابستان به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. تأثیر این عامل، در زمستان– به دلیل کاهش اختلاف زاویه تابش با بردار عمود بر سطح نما-بسیار کم‌رنگ‌تر می‌شود. آنچه در زمستان بیش از هر عامل دیگری بر بازدهی اثر می‌گذارد، مقاومت حرارتی گردآور و درنتیجه، کاهش تلفات حرارتی ناشی از اختلاف دمای زیاد با محیط است.

در این نمودار، همچنین مشاهده می‌شود بیشترین دسترسی به تابش و به‌تبع آن، بیشترین استحصال انرژی در ماه‌های نسبتاً معتدل سال صورت می‌گیرد که ممکن است با الگوی مصرف انرژی در طول فصول مختلف چندان خوانایی نداشته باشد، لذا لازم است تمهیداتی برای اجتناب از گرم‌شدن بیش‌ازحد در نظر گرفته شود. با استفاده از فناوری لوله گرمایی با بازه دمایی مناسب، این تمهیدات با سهولت بیشتری امکان‌پذیر خواهد بود که مزیت مهم دیگری برای استفاده از لوله گرمایی در جدار پیشنهادی است.

گردآور تخت، در تابستان به دلیل زاویه عمودی تابش و درنتیجه بازتاب زیاد سطح شیشه آن، و در زمستان به علت تلفات حرارتی بیشتر، ناشی از اختلاف دما با محیط، همواره بازدهی کم‌تر ی از مدول پیشنهادی دارد و برای استفاده در نمای ساختمان مناسب نیست.

۴. ۲. مقاومت حرارتی

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های جدار پیشنهادی که دستیابی به آن از اهداف اصلی این پژوهش بوده است، مقاومت حرارتی بالای آن است. استفاده از خلأ نسبی به‌عنوان عایق، به‌واسطه‌ی فرم منحنی پوسته، امکان‌پذیر شده است.

مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر انتقال حرارت در شیشه دوجداره تحت خلأ، تابش بین سطوح داخلی دولایه شیشه و عملکرد ستونک (یا در اینجا فاصله‌انداز) به‌عنوان پل حرارتی است (Simko et al., 1999,4).

در این بخش، به بررسی کارایی جدار از نظر مقاومت حرارتی پرداخته می‌شود. ضریب انتقال حرارت جدار بدون فاصله‌انداز، در نرم‌افزار Window 7.1 محاسبه و با انتقال آن به محیط نرم‌افزار Therm 6.3 تأثیر فاصله‌انداز در ضریب انتقال حرارت بررسی شد.

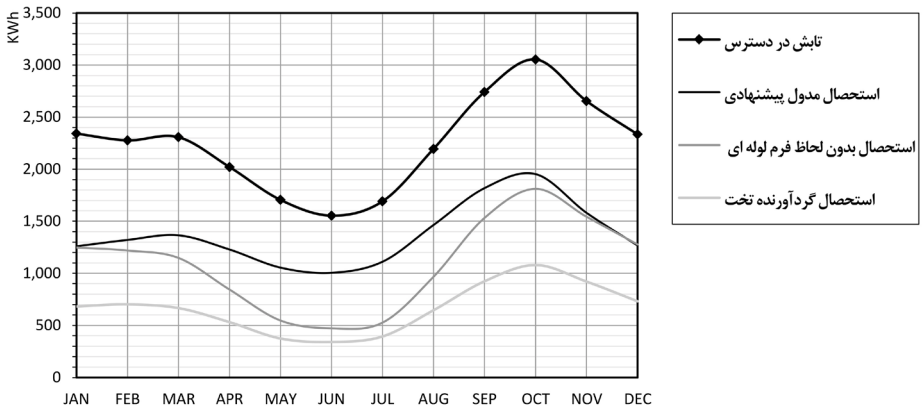
تأثیر خلأ: در این بخش از شبیه‌سازی، جدار به‌صورت دو لایه شیشه فرض شده است که بین آنها فاصله وجود دارد. فشار هوا در این لایه میانی، مطابق آنچه در گردآورهای لوله‌ای تحت خلأ تجاری رایج است، 10^{-6} کیلوپاسکال و ضخامت لایه‌های شیشه ۳ میلی‌متر و از نوع ساده تعیین شد. در محاسبات ضریب انتقال حرارت، دمای هوای داخل ۲۱ و دمای هوای خارج، ۱۸- درجه سلسیوس و جدار به‌صورت عمودی فرض شده است.

برای دستیابی به معیاری برای مقایسه، ابتدا، ضریب انتقال حرارت این ساختار، برای حالتی که در محفظه خلأ حاکم نباشد، محاسبه شد که مقدار آن، $(W/m^2.K)$ ۲۸۰۰- تقریباً معادل پنجره‌های دوجداره متعارف- به دست آمد. مطابق نتایج شبیه‌سازی که در جدول ۳ آمده است، ضریب انتقال حرارت کلی، در صورت تخلیه‌ی هوا، برابر $(W/m^2.K)$ ۲,۰۵۹ خواهد بود.

لایه‌ی خلأ، رسانش حرارتی را تقریباً به صفر می‌رساند، اما از طرفی دیگر، این مسأله، باعث افزایش اختلاف دما، بین دو سمت جدار می‌شود که مسبب افزایش انتقال حرارت از طریق تابش بین سطوح داخلی می‌شود.

برای برطرف نمودن این تأثیر منفی، استفاده از پوشش کم‌گسیل پیشنهاد می‌شود. این پوشش، به دلایل مختلف و ازجمله، حفظ قابلیت عبوردهی تابش خورشیدی و اجتناب از افت بازدهی گردآور، صرفاً می‌تواند بر روی لایه‌ی داخلی محفظه استفاده شود. نتایج محاسبات نیز، مطابق جدول ۳ این امر را تأیید می‌کند: در حالتی که این پوشش، در سمت رو به داخل قرار گیرد، ضریب انتقال حرارت (W/m^2K) ۱,۴۶۸ و در صورتی که رو به بیرون باشد، (W/m^2K) ۰,۱۰۱ خواهد بود که دستاورد قابل توجهی به شمار می‌آید .

تأثیر فاصله‌انداز: جنس فاصله‌انداز، پلی‌آمید با عرض ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۴,۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد که در سراسر عرض جدار به‌صورت یکپارچه قرار دارد. پلی‌آمید، ضمن مقاومت مکانیکی بسیار بالا، از نظر هدایت حرارتی نیز ویژگی‌های مناسبی دارد و در پروفیل‌های آلومینیومی شکست حرارتی، مورد استفاده قرار می‌گیرد.



تصویر ۵- مقایسه انرژی استحصالی در حالات مختلف گردآور و انرژی تابشی در دسترس.

www.SID.ir

Archive of SID

(تصویر ۶) چگونگی شار حرارتی در مقطع جدار و خطوط هم‌دما را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود، تقریباً تمام شار حرارتی از فاصله‌انداز عبور می‌کند. همین مسأله، ضریب انتقال حرارت جدار را از (W/m²K) ۰,۱۰۱، به (W/m²K) ۰,۴۶۶، می‌رساند. با وجود این تأثیر منفی، همچنان مقاومت حرارتی جدار در سطح کاملاً مناسب و قابل قبولی قرار دارد. چنانچه، تجویز مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان ایران، برای جدارهای غیر نورگذر سبک در تهران (W/m²K) ۰,۴۷۶ است.

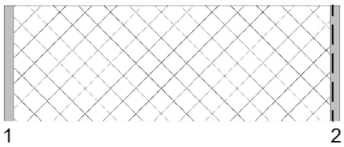
بااین‌وجود، طراحی فاصله‌انداز با فرم‌های بهینه‌ای که در آن، مصالح بخش‌های فاقد عملکرد سازه‌ای حذف شده است، می‌تواند تأثیر مثبتی بر کاهش انتقال حرارت در آن داشته باشد. ازجمله، می‌توان به فرم‌های خرپایی یا لانه‌زنبوری اشاره کرد.

همچنین، می‌توان با باریک‌ترنمودن مقطع فاصله‌انداز در دو انتهای مماس با سطوح محفظه، پل حرارتی را باریک‌تر نمود. این مقاومت زیاد در دو انتهای این مسیر، که با مقاومت نسبتاً کم‌تر در میانه‌ی مسیر، به‌صورت سری در برابر جریان قرار دارد، انتقال حرارت را به میزان چشمگیری کاهش می‌دهد، چراکه انتقال حرارت در این پل‌های حرارتی، با شعاع نقطه تماس ارتباط مستقیم دارد (Simko et al., 1999, 4-5).

مسأله دیگری که در (تصویر ۶) قابل ارزیابی است، عدم احتمال بروز میعان بر روی سطح داخلی شیشه است. در شرایطی که دمای بیرون ۱۸- و داخل ۲۱ درجه سلسیوس باشد، در فواصل دورتر از فاصله‌انداز، تقریباً دمای سطح شیشه با دمای هوا برابر بوده و حتی در نزدیکی آن، دمای سطح، بالاتر از ۱۷,۹ درجه خواهد بود که جز در شرایط نزدیک به اشباع، در رطوبت‌های نسبی متعارف امکان بروز پدیده‌ی میعان وجود ندارد.

۵. شفافیت ، دید و روشنایی

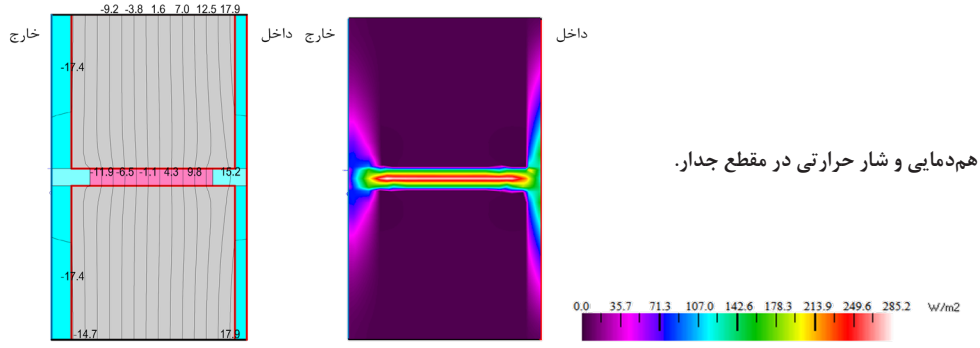
به‌منظور تجسم ظاهر نهایی جدار، مدول طرح با در نظر گرفتن مشخصات و پارامترهایی که پیش‌تر به آنها پرداخته شد، در نمای جنوبی یک ساختمان اداری در تهران فرض و در نرم‌افزار رؤیت ۲۰۱۴ مدلسازی و با استفاده از تصویرسازی و آنالیز روشنایی آتودسک ۳۶۰ ، شبیه‌سازی شد. نتایج این نرم‌افزار، توسط موتور محاسباتی رادیانس و نمونه‌های تجربی اعتبارسنجی شده است. در آنالیز روشنایی مدل آسمان یکنواخت و پارامترهای تابش مستقیم عمود بر سطح و پراکنده بر سطح افقی، به ترتیب برابر ۸۲۵ و ۱۲۵ وات بر مترمربع و جنس سطوح داخلی کاملاً مات در نظر گرفته شد. (تصویر ۷)، ظاهر نهایی جدار را در یک طرح معماری نشان



جدول ۳- ضریب انتقال حرارت و مشخصات فیزیکی محفظه نما: به ترتیب از بالا به پایین: لایه کم‌گسیل در سطح بیرونی شیشه داخلی، لایه کم‌گسیل در سطح داخلی شیشه داخلی، بدون لایه کم‌گسیل. شماره‌ی ۱، معرف لایه‌ی خارجی و شماره‌ی ۲، معرف لایه‌ی داخلی است.

	Material	Thick.	Tsol	$Rsol_1$	$Rsol_2$	Tvis	$Rvis_1$	$Rvis_2$	Tir	E_1	E_2	Cond.
Layer 1	Clear Glass	3.0 mm	0.834	0.075	0.075	0.899	0.083	0.083	0.000	0.840	0.840	1.000
Gap	Vacuum	100.0 mm										
Layer 2	LoE Glass	3.0 mm	0.275	0.429	0.549	0.713	0.066	0.044	0.000	0.840	0.022	1.000

	U-factor (W/m².K)	SC (-)	SHGC (-)	Rel. Ht. Gain (W/m²)	Tvis (-)	Keff (W/m.K)	Layer 1 Keff (W/m.K)	Gap Keff (W/m.K)	Layer2 Keff (W/m.K)
	1.468	0.436	0.379	286	0.645	0.3238	1.0000	0.3112	1.0000
	0.101	0.458	0.399	290	0.644	0.0110	1.0000	0.0104	1.0000
	2.059	0.880	0.765	574	0.814	0.3388	1.0000	0.3257	1.0000



تصویر ۶- خطوط هم‌دمایی و شار حرارتی در مقطع جدار.

www.SID.ir

Archive of SID

می‌دهد. تصویر، وضعیت سایه را در بعدازظهر یک روز زمستانی نشان می‌دهد که آفتاب تا حدی از جدار عبور کرده است. با فاصله گرفتن از انقلاب زمستانی، نفوذ آفتاب دائماً کم‌تر شده و در تابستان، تقریباً نفوذ مستقیم آفتاب به داخل ناممکن می‌شود، در ساعات ابتدایی و انتهایی روز، به دلیل تابش مایل خورشید، ممکن است آفتاب از لابه‌لای تیغه‌های افقی جاذب عبور کند، هرچند در این اوقات، جهت تابش نسبت به بردار عمود بر سطح نمای جنوبی بسیار بزرگ شده و تابش آفتاب تماماً از سطح نما بازتابیده شده و امکان عبور از شیشه را نمی‌یابد.

با وجود سایه‌اندازی، (تصویر ۸) نشان می‌دهد در فاصله قابل قبولی از جدار، تراز روشنایی روز، در سطح مناسبی– بیش از ۳۰۰ لوکس- وجود خواهد داشت و در عین حال در نقاط نزدیک به جدار، روشنایی به حدود ۷۰۰ لوکس محدود می‌شود که بیانگر توزیع نسبتاً یکنواخت روشنایی در مقایسه با نماهای شیشه‌ای متعارف و عدم وجود تضاد شدید روشنایی و خیرگی است.

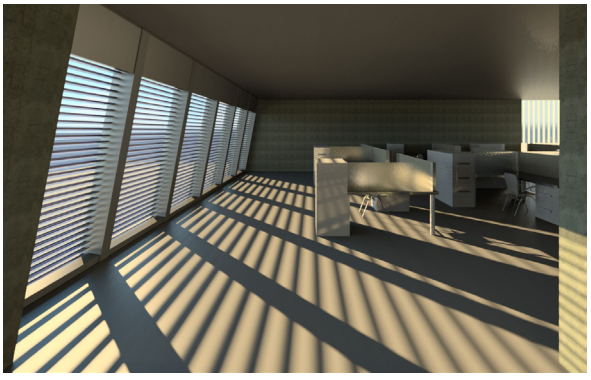
از نظر دید و منظر نیز، این جدار تا حدی مشابه سایه‌بان‌های کرکره‌ای افقی عمل می‌کند: در فواصل نزدیک، زاویه دید نسبتاً مناسب بوده و امکان مشاهده مناظر پیرامونی را فراهم می‌سازد و با فاصله‌گرفتن از آن، تصویری بافت‌دار از چشم‌انداز پیش رو دیده شده و ارتباط بصری از داخل به خارج به‌طور نسبی برقرار می‌شود. از بیرون، نمای ساختمان، به‌صورت طیفی از نیمه شفاف تا کاملاً کدر دیده می‌شود. مدول‌های هم‌تراز با چشم ناظر، تا حدی به داخل دید دارند، اما مدولهای بالاتر و پایین‌تر، به‌تدریج کدرتر به نظر می‌رسند. لذا از نظر محرمیت نیز، این پیکربندی، شرایط مناسبی را فراهم می‌آورد.

نتیجه

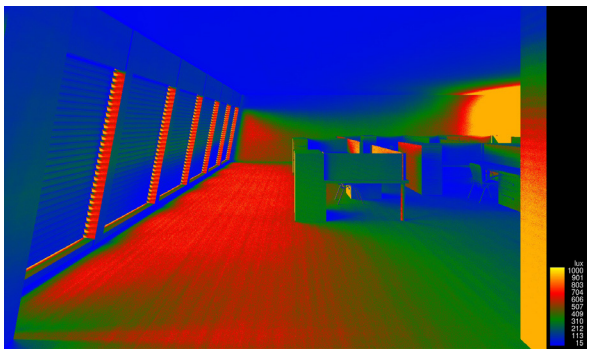
در این پژوهش، پیکربندی نوینی متشکل از سطوح جاذب افقی، لوله‌ی گرمایی و خلأ در قالب مدول سازنده‌ی یک جدار ارائه شد که ضمن برخورداری از مقاومت حرارتی بالا، انرژی خورشیدی را در تمام طول سال، با بازدهی مناسبی جذب می‌کند تا به مصارف سرمایشی و گرمایشی برسد. علاوه براین، جدار حاصل، روشنایی یکنواخت و ارتباط بصری مناسبی بین داخل و خارج برقرار می‌کند و با سایه‌اندازی در تابستان، از بار سرمایش ساختمان می‌کاهد. به‌منظور کاهش بازتاب انرژی خورشیدی از سطح نما و دریافت حداکثری انرژی خورشیدی، سطح جدار، به‌صورت منحنی با فرم مقطع مدور طراحی شد تا در کلیه فصول (زوایای مختلف ارتفاع خورشید)، تابش بر سطح آن عمود بوده و با جذب حداکثری تابش، بیشترین بازدهی حاصل شود. همچنین، با تخلیه‌ی محفظه شیشه‌ای جدار از هوا، مقاومت حرارتی جدار و بازدهی گردآور، به میزان چشمگیری افزایش یافت. با استفاده از روش شبیه‌سازی رایانه‌ای و براساس داده‌های آب‌وهوایی تهران، کارایی جدار از جنبه‌های مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفت.

براساس نتایج شبیه‌سازی، فرم استوانه‌ای افقی در لایه‌ی خارجی، بازدهی متوسط سالانه جدار پیشنهادی را در مقایسه با گردآور تخت، از ۳۰٪ به ۶۲٪ افزایش داد. همچنین، تأثیر این فرم هندسی، در تابستان بسیار پررنگ‌تر از زمستان است، چنانچه مقادیر بازدهی متوسط برای فصل تابستان، به ترتیب در حدود ۲۱٪ و ۶۵٪ محاسبه شد. در کنار فرم هندسی، تخلیه هوا از محفظه و اعمال خلأ نسبی نیز، نقش مؤثری در کاهش تلفات و افزایش بازدهی گردآور ایفا نمود. لذا، امکان تولید سیال داغ به‌منظور مصارف سرمایشی – راه‌اندازی خنک‌کن‌های جذبی- در جدار پیشنهادی فراهم می‌شود. همچنین مشخص شد گردآور تخت، در تابستان به دلیل زاویه عمودی تابش و بازتاب آن از سطح شیشه؛ و در زمستان به علت تلفات حرارتی بیشتر همواره بازدهی کم‌تر ی از مدول پیشنهادی دارد و برای استفاده در نمای ساختمان مناسب نیست.

ضریب انتقال حرارت این ساختار، برای حالتی که در محفظه‌ی جدار خلأ حاکم نیست، محاسبه شد که مقدار آن، ۲٫۸ (W/m^2K) -معادل پنجره‌های دوجداره متعارف- به دست آمد. با تخلیه‌ی هوا، این مقدار به ۲٫۱ (W/m^2K) کاهش یافت. خلأ نسبی، تبادل حرارت از طریق رسانش و جابجایی را منتفی می‌کند، اما با افزایش مقاومت حرارتی جدار، اختلاف دمای سطوح داخلی و خارجی جدار افزایش می‌یابد که موجب افزایش تبادل حرارت از طریق تشعشع توسط



تصویر ۷- ظاهر نهایی جدار.



تصویر ۸- تراز روشنایی در سطوح فضای مجاور جداره در ظهر روز اول تیر.

www.SID.ir

Archive of SID

سطوح مذکور می‌شود. با اعمال پوشش‌های کم‌گسیل، در سطح رو به خارج لایه‌ی داخلی، تبادل حرارت به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. در شبیه‌سازی حالت اخیر مشخص شد ضریب انتقال حرارت مدول پیشنهادی (بدون قاب) بسته به طراحی فاصله‌انداز بین دو لایه‌ی داخلی و خارجی جدار، از(W/m^2K) ۰,۱ (بدون لحاظ فاصله‌انداز) تا (W/m^2K) ۰,۵ (در بدبینانه‌ترین حالت) متغیر است.

در نهایت می‌توان گفت تجمیع خاصیت گردآوری انرژی خورشیدی با مقاومت حرارتی، با تأمین هم‌زمان دید و روشنایی و سایه‌اندازی جدار در داخل، آزادی عمل بیشتری به طراح داده و کارایی اقتصادی و بهره‌وری استفاده از انرژی خورشیدی را در صنعت ساختمان ارتقا می‌دهد.

پی‌نوشت‌ها

1. Building Integrated Photo-Voltaic
2. Selective Coating
3. Thermal break
4. Direct Flow
5. Solid
7. Stagnation Effect

۸. با توجه به ابعاد در نظر گرفته‌شده برای وادارها، ابعاد سطح شیشه‌خور مدول‌ها، ۱,۶*۳,۴ متر فرض شد.

9. Autodesk Revit
10. Rendering
11. Autodesk 360
12. Radiance

فهرست منابع

ASHRAE. (2008). *HVAC systems and equipment: American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers*, Atlanta, GA.

Beckman, W. A., & Duffie, J. A. (1980). Solar engineering of thermal processes: John Wiley and Sons.

Chen ,C. J. (2011). *Physics of solar energy*. New Jersey: John Wiley & Sons.

Faghri, A. (1995). *Heat pipe science and technology*: Taylor & Francis.

IIED. (2010). *Planning & Installing Solar Thermal Systems*: Earth scan.

Lopez, P. B. C. (2011). *Solar Thermal Collector in Facades*. (MS), TU Delft.

Quesada, G., Rousse, D., Dutil, Y., Badache, M., & Hallé ,S. (2012a). A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (5), 2820-2832.

Quesada, G., Rousse, D., Dutil, Y., Badache, M., & Hallé ,S. (2012b). A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (5), 2643-2651.

Simko, T., Elmahdy, A., & Collins, R. (1999). Determination of the overall heat transmission coefficient (U-value) of vacuum Glazing. *ASHRAE Transactions*, 105 (pt 2), 1-9.

Thomas, R. (2012). *Photovoltaics and architecture*: Taylor & Francis.

Viessmann. (2008). *Technical guide, Solar thermal systems*. Viessman GmbH & Co KG.

URL1: VITOSOL 200-T. Retrieved 15/1/2019, from https://www.viessmann-us.com/en/residential/solar/tube-collectors/vitosol_200-t_spe.html

URL2: Solar Rating & Certification Corporation. Retrieved 1/1/2014, from www.solar-rating.com

www.SID.ir

Archive of SID

Modular Solar Façade With High Thermal Resistance*

*Shahin Heidari**[1], Behrouz Mohammad Kari[2], Ahmad Askari Anaraki[3]*

[1]Professor, School of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran.
[2]Associate Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.
[3]M.A in Energy and Architecture, School of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran.
(Received 23 Jun 2015, Accepted 10 Nov 2019)

Prevention from thermal losses in buildings and using environmental potentials such as solar energy, are two fundamental strategies in designing buildings with the approach of saving nonrenewable energy resources. As a border between the interior space and the environment, the building envelope plays a determining role in approaching these strategies. It is expected from the building's envelope to mitigate unwanted energy dissipations and protect occupants from severe weather conditions. At the same time, a well-designed building envelope should provide the occupants' comfort using environmental potentials, and ideally it may even take part in fulfilling energy demands. The importance of energy harvesting in building envelops is more recognized in metropolises in which the growth of high-rise construction causes an intense decrease in the ratio of sun exposed horizontal surfaces such as roofs or yards to the area of floors. However, on the height of building and the overall area of floors -and followed by them, demand for energy- increases, the area of vertical surfaces such as facades, increases in a more appropriate proportion. Additionally, installing solar energy equipment on horizontal surfaces with high potential of functionality, is usually an undesirable interference in architecture.

From another point of view, conventional insulating stops the wall from transferring solar energy to the interior spaces. This research aims to make a convergence between high thermal resistance and solar energy collection. To achieve this, different methods of solar energy collection was reviewed. Due to the large angles between the sun's altitude and the normal vector of southern façades, especially in summer days, a significant part of solar radiation is reflected from the cover glass surface of flat collectors. Non-glazed collectors, because of large amount of heat loss, have a low efficiency and like the conventional flat collectors, do not transfer the light and ban the transparency. However tubular evacuated solar collectors, if installed horizontally on southern façade, represent a circular section which is always perpendicular to the rays of sun, regardless of the altitude of radiation. So, solar reflection from glass cover of the collector, will no longer depend on the sun's vertical position in the sky in different seasons. Also, the relative vacuum -made possible according to tubular form- decreases heat loss to a minimum. According to these two facts, this type results in an appropriate performance, which enables the envelope to provide a part of heating load and indirectly, cooling loads by supplying an absorption/adsorption chiller or a desiccant cooling machine.

The concept of the proposed system is a combination between the idea of tubular evacuated solar collector and vacuum transparent insulation. It consists of aluminum blades covered with a selectively solar absorbing coating, arrayed like a louver, surrounded by an evacuated glass container with corrugated skin. The result is a modular façade panel, with a high thermal resistance, which efficiently takes part in solar energy collecting and at the same time, acts as a louver to protect the interior spaces from direct solar radiation, while providing a relative visual transparency and daylight transmission.

Keywords: Solar Façade, Tubular Evacuated Collector, Vacuum Insulation, Solar Heating and Cooling.

* This article is extracted from master thesis, written by Ahmad Askari Anaraki in title of "Optimization of insulated building shell against thermal conductivity in order to benefit from solar radiation energy" which is supervised by the first and the second authors in Architecture faculty, School of Fine Arts, University of Tehran.

** Corresponding Author: Tel/Fax: (+98-21) 66972083, E-mail: shheidari@ut.ac.ir.

www.SID.ir