

تلفیق گردآور خورشیدی حرارتی با نمای ساختمان

شاهین حیدری^۱، بهروز محمدکاری^۲، احمد عسکری انارکی^۳

چکیده

با متراکم تر شدن شهرها و افزایش ارتفاع ساختمان‌ها، سطوح عمودی نما متناسب با سطح زیربنا، افزایش می‌یابد، لذا جدارهای عمودی ساختمان، از بیشترین ظرفیت برای استفاده از انرژی خورشیدی در ساختمان‌های آینده برخوردار می‌باشند. تلفیق و یکپارچه‌سازی سیستم‌های خورشیدی نظیر گردآورهای حرارتی با عناصر تشکیل دهنده ساختمان نظیر دیوار، بام و سایه بان ضمن آن که تمامیت و یکپارچگی معماری و اجزای آن را حفظ می‌کند، می‌تواند صرفه اقتصادی کاربرد این سیستم‌ها را افزایش داده و در مجموع کارایی و بهره‌وری انرژی را در ساختمان بهبود ببخشد.

در این پژوهش، کاربرد حرارتی انرژی خورشیدی با توجه به مزیت‌های نسبی آن نظیر بازدهی بالا و بهای مناسب در مقایسه با کاربردهای الکتریکی، پیشنهاد شده است. برای جلوگیری از بازتاب پرتوهای خورشید از سطح نما - ناشی از اختلاف زاویه زیاد سطح نما و زاویه تابش آفتاب در تابستان - استفاده از گردآورهای لوله‌ای تحت خلأ به صورت افقی پیشنهاد شد. این نوع از گردآور، در مقایسه با انواع تخت، در دماهای بالای سیال خروجی، بازدهی بالای خود را حفظ می‌کند. در نتیجه، دامنه کارایی آن، برای گرمایش و حتی سرمایش متکی بر حرارت گسترش می‌یابد. برای سهولت تعمیر و نگهداری، فناوری لوله گرمایی انتخاب شد تا انتقال حرارت از گردآور به سیستم جمع‌آوری انرژی بدون انتقال سیال و به صورت اتصال خشک صورت پذیرد. لذا، خطر رسوب‌گذاری یا نشست سیال ناقل به کلی برطرف می‌شود. استفاده از گردآورهای لوله‌ای، امکان عبور نور روز و ارتباط بصری را فراهم می‌نماید؛ ضمن آن که نقش سایه بان را نیز ایفا می‌کند. در نهایت، این ایده به کمک روش‌های نرم‌افزاری شبیه‌سازی گردید و مشخص شد با استفاده از فرم لوله‌ای افقی، بازدهی سالانه در مقایسه با گردآور تخت، به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: نمای خورشیدی، گردآور خورشیدی، تلفیق گردآور با نما، گردآور لوله‌ای، لوله گرمایی.

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۲۵

۳۱

شماره ۲-۵
تابستان ۱۳۹۴

فصلنامه
علمی-پژوهشی

نقش
جهان

ب. تلفیق گردآور خورشیدی حرارتی
نمای ساختمان

۱ - دانشیار دانشکده معماری پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسؤل) shheidari@ut.ac.ir

۲ - استادیار فیزیک ساختمان مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران kari@bhrc.ac.ir

۳ - کارشناس ارشد انرژی و معماری پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران aaskari@ut.ac.ir

۱. مقدمه

در دهه‌های پایانی قرن گذشته، ابتدا با بروز بحران‌های اقتصادی ناشی از به خطر افتادن امنیت تأمین انرژی و سال‌ها پس از آن، با آشکارتر شدن عوارض زیست محیطی مصرف بی‌رویه انرژی، زنگ خطر به‌ویژه برای جوامع علمی، برنامه‌ریزان و دولت‌ها به صدا درآمد. به دنبال آن، آیین‌نامه‌های ملی برای کاهش مصرف انرژی توسط نهادهای نظارتی دولتی یا مردم نهاد، تدوین و به اجرا گذاشته شد. توجه به وجوه اقلیمی و زیست محیطی معماری و پایبندی به اصول پایداری، منبع الهام معماران پیشرو در عصر حاضر است و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، به‌عنوان یکی از معیارهای مهم ارزیابی آثار معماری، در کنار معیارهای کلاسیک آن شناخته می‌شود.

از جدار ساختمان به‌عنوان مرز فضای داخل با محیط پیرامون، انتظار می‌رود با جلوگیری از اتلاف انرژی، کنترل عوامل بیرونی و استفاده بهینه از ظرفیت‌های محیط، ضمن کمک به تأمین آسایش بهره‌برداران، از مصرف انرژی در سیستم‌های تهویه مطبوع و تأمین روشنایی، که سهم مهمی در مصرف انرژی در بخش ساختمان دارند، بکاهد و در حالت آرمانی، نقش قابل‌اعتنایی در تأمین انرژی ایفا کند (Mahdinejad et al, 2014).

اهمیت این امر، به‌ویژه زمانی بیشتر مشخص می‌شود که با گسترش بلندمرتبه‌سازی در شهرهای بزرگ و کاهش نسبت سطوح افقی نظیر بام به زیربنای ساختمان، بهره‌مندی از انرژی خورشیدی به روش‌های متعارف نظیر گردآورهای خورشیدی دچار محدودیت می‌شود، این در حالیست که وجوه عمودی، تناسب بهتری با سطح زیربنای ساختمان و به تبع آن، با تقاضای انرژی در ساختمان دارند.

در پژوهش حاضر، هدف ارائه راهکاری برای تلفیق گردآور خورشیدی^۱ با نمای ساختمان به‌نحوی است که انرژی خورشیدی را با بازدهی قابل‌قبولی جذب و به انرژی حرارتی تبدیل کند. در ادامه این نوشتار به بررسی اجزای سازنده و چگونگی عملکرد راهکار پیشنهادی می‌پردازیم و کارایی آن را با استفاده از روش شبیه‌سازی نرم‌افزاری مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

۲. پیشینه موضوع

پوسته خارجی ساختمان، به دلیل اهمیتی که در تبادل حرارت و مصرف انرژی در بخش ساختمان دارد، در پژوهش‌های پرشمار، از جنبه‌هایی نظیر جریان هوا

و تبادل حرارت و نیز رویکردهای گوناگون مانند فرم، زیبایی‌شناسی و نظیر آن مورد پژوهش واقع شده است.

مهدوی‌نژاد در مقاله با عنوان «الگوی انرژی دوستی در ساختمان براساس رفتار حرارتی بام» به بررسی فرم پوسته ساختمان در سقف می‌پردازد و نتیجه می‌گیرد بهترین فرم ساختمان، از نظر عملکرد حرارتی، بام شیبدار ۳۰-۶۰ است که سطح عمده آن رو به جنوب قرار دارد و سقف گنبدی ضعیف‌ترین عملکرد حرارتی را بروز می‌دهد (Mahdavejad, 2013).

محسن تابان و همکاران، نقش برجستگی‌ها و فرورفتگی‌های تزئینات آجری نما را در ساختمان‌های بافت تاریخی دزفول مورد ارزیابی قرار داده‌اند. با پردازش تصویری و محاسبه سایه ایجاد شده، نویسندگان ثابت می‌کنند میزان پوشش سایه بر روی جدار ۲/۵ تا ۴/۵ برابر افزایش می‌یابد (Taban, 2012).

در این مقاله، کارکرد بالقوه پوسته ساختمان به‌عنوان عنصر گردآورنده انرژی خورشیدی مورد تأکید قرار گرفته است.

به‌طور کلی، آن چه باعث اهمیت استفاده از انرژی خورشیدی در پوسته ساختمان می‌شود، عبارتست از (Thomas, 2012):

- محدودیت فضا در ساختمان‌های شهری با زمین معین و محدود،
- قیمت بالای زمین به خصوص در شهرهای بزرگ،
- صرفه‌جویی در هزینه تولید، نصب و نگهداری جدارهای متداول با ترکیب سیستم‌های خورشیدی با عناصر ساختمانی،
- متناسب بودن سطوح خارجی ساختمان با تقاضای انرژی در آن (در مقایسه با نسبت سطح اشغال زمین به تقاضای انرژی) به‌ویژه در ساختمان‌های مرتفع،
- ارتقای عملکرد پوسته با استفاده حداکثری از ظرفیت‌های آن.

استفاده از انرژی خورشیدی در پوسته ساختمان، می‌تواند در قالب سیستم‌های فعال^۲ و غیرفعال^۳ صورت بگیرد. برخلاف سیستم‌های فعال، کاربردهای غیرفعال انرژی خورشیدی نظیر گرمایش یا استفاده از نور روز، نیازی به سخت‌افزار یا تجهیزات مکانیکی نداشته و جریان انرژی در آن، با فرایندهای طبیعی نظیر تابش، رسانش و همرفت

طبیعی صورت می‌گیرد. دریافت مستقیم، گلخانه، انباره حرارتی و حوضچه سقفی از جمله این سیستم‌ها می‌باشد (Quesada, Rousse, Dutil, Badache, & Hallé, 2012). به‌طور خاص استفاده از انرژی خورشیدی به صورت غیرفعال در پوسته ساختمان، شامل دیوارهای آبی، دیوار ترومب و نمای دو پوسته می‌شود.

برخلاف انواع غیرفعال، سیستم‌های فعال، برای جمع‌آوری و انتقال انرژی خورشیدی، مستلزم سخت‌افزار و تجهیزات مکانیکی نظیر گردآور، ذخیره‌کننده‌های انرژی و مانند آن هستند (Mazria, 1979). از جمله این سیستم‌ها، گردآورهای خورشیدی برای کاربردهای حرارتی یا سلول‌های فوتوولتاییک برای تولید الکتریسیته هستند.

به منظور کنترل بیشتر بر جریان انرژی و نحوه توزیع آن و استفاده مفید از انرژی خورشیدی در تابستان، راهبرد در نظر گرفته شده در دستیابی به هدف پژوهش، جمع‌آوری انرژی تبدیلی از جدار، به منظور ذخیره‌سازی و استفاده در محل مورد نیاز و در زمان مناسب می‌باشد.

در پایان نامه کارشناسی ارشد پرلا لویز در دانشکده معماری دانشگاه تکنولوژی دلفت هلند، با موضوع «گردآورهای خورشیدی در نما»، با استفاده از لوله‌های گرمایی، سایه‌بانی کرکراهی طراحی شده است که در بخش داخلی بین دو لایه شیشه یا در بخش خارجی پنجره نصب می‌شود. مطابق مکانیزم‌های طراحی شده، این سایه‌بان امکان تغییر زاویه و همچنین جمع شدن را دارا می‌باشد (Lopez, 2011).

علی‌رغم خلاقیت قابل تحسین در طراحی یک سیستم جریان حرارت متحرک به صورت ریلی، از جمله معایب این ایده، پیچیدگی‌های فنی و قطعات متحرک فراوان است. همچنین، به مسئله تلفات حرارتی در این سیستم متحرک توجه چندانی نشده است. از نظر گردآوری انرژی نیز، در صورتی که سایه‌بان در خارج نصب شود، به علت تلفات زیاد ناشی از تبادل حرارت با هوا، به شدت با افت بازدهی مواجه خواهد شد. چنانچه سایه‌بان در داخل جداری شیشه‌ای قرار گیرد، امکان دریافت تابش در آن، به علت زاویه عمودی تابش آفتاب در تابستان، بسیار کاهش می‌یابد که به معنی عدم امکان استفاده از انرژی تولیدی در تابستان و کاهش بهره‌وری اقتصادی می‌شود.

از مهمترین عوامل مؤثر بر بازدهی گردآور، ضریب عبور شیشه محافظ می‌باشد. این پارامتر صرف نظر از جنس شیشه، بیش از هر چیز وابسته به زاویه تابش نسبت به بردار نرمال سطح می‌باشد. در زوایای بیش از ۶۰ درجه،

سهم بزرگی از تابش خورشید، از سطح شیشه بازتابیده می‌شود و امکان عبور از آن و جذب شدن توسط سطح جاذب را پیدا نمی‌کند. در نتیجه، با توجه به زاویه نزدیک به قائم زاویه تابش در تابستان، در صورت نصب گردآور تخت بر روی نما، سطح عمودی شیشه محافظ به دلیل اختلاف زیاد زاویه تابش با نرمال سطح، عمده تابش را منعکس می‌نماید و انرژی استحصالی از آن، در فصل تابستان به حداقل می‌رسد. عمده تمرکز این پژوهش نیز، بر مرتفع نمودن این عارضه قرار گرفته است.

از دیگر عوامل مؤثر در بازدهی گردآور، ضریب انتقال حرارت گردآور است. با عایق بندی دقیق سطح جاذب، میزان تلفات حرارتی آن کاهش و در نتیجه 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 تعبیه می‌شود. سطح رو به آفتاب نیز، به وسیله 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. گردآورهای حرارتی، انرژی خورشیدی را به واسطه 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 بگیرد. کاربرد اخیر (تغذیه خنک‌کن جذبی) مستلزم تولید سیال با دمای بالا می‌باشد. استفاده از انرژی خورشیدی برای تأمین بارهای برودتی، کاربرد گردآور را از حالت فصلی، به دائمی تغییر می‌دهد و کاربردهای گرمایشی آن را از نظر اقتصادی کاملاً موجه و مقرون به صرفه می‌کند (ASHRAE, 2008).

۳. انواع گردآورهای خورشیدی

گردآورهای مورد استفاده در تأسیسات ساختمان‌ها در دو دسته عمده شامل گردآورهای تخت و لوله‌ای قرار می‌گیرند. در گردآور تخت، در بخش زیرین یک جاذب مسطح، لوله‌های مسی عبور کرده و حرارت جاذب را به سیال ناقل انتقال می‌دهد. برای کاهش تلفات حرارتی، شیشه محافظ و عایق حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در گردآور لوله‌ای تحت خلأ، برای کاهش هرچه بیشتر تلفات، از خلأ برای حذف کامل جابجایی و رسانش استفاده می‌شود. این امر، افزایش قابل توجه بازدهی را به همراه دارد که امکان دستیابی به دماهای بالاتر و کاربردهای سرمایشی خورشیدی را فراهم می‌کند (ASHRAE, 2008).

انتقال حرارت از جاذب به سیال ناقل، به دوروش جریان مستقیم و لوله گرمایی صورت می‌گیرد (شکل ۱). در گردآورهای لوله‌ای جریان مستقیم، سیال ناقل حرارت، از طریق یک لوله مسی دو جداره هم مرکز، وارد لوله شیشه‌ای تحت خلأ شده و حرارت سطح جاذب را جذب می‌کند. در این سیستم، سیال ناقل به وسیله پمپ به جریان می‌افتد و وضعیت قرارگیری گردآور (افقی یا عمودی) اهمیت چندانی ندارد.

در نوع لوله گرمایی^۴، حرارت از جاذب به بدنه لوله گرمایی موسوم به تبخیرکننده^۵ و سپس به بخش استوانه‌ای شکل انتهای لوله گرمایی به نام چگالنده^۶ منتقل می‌شود. چگالنده درون غلافی قرار می‌گیرد که با سیال ناقل جاری در چندراهه، در تماس است. به این ترتیب، هیچ نیازی به آب بندی این اتصال وجود ندارد، همچنین تخریب یک گردآور یا تعویض آن منجر به تخلیه سیال نمی‌شود. خطر یخ زدگی و گرم شدن بیش از حد نیز، کاهش می‌یابد. در نتیجه، استفاده از این سیستم، بسیاری از دشواری‌ها و خطرات احتمالی استفاده از گردآور در نما را کاهش می‌دهد (IIED, 2010).

عمده‌ترین چالش پیش‌رو در استفاده از گردآور لوله‌ای از نوع لوله گرمایی، مسئله موقعیت قرارگیری آن است. تقریباً تمامی گردآورهای این نوع باید با شیبی بین ۲۰ تا ۷۰ درجه نصب شوند، در غیر این صورت جریان حرارت در لوله مختل می‌شود. لذا برای نصب به صورت افقی، لوله گرمایی مورد استفاده باید دارای فتیله^۷ باشد تا با استفاده از خاصیت موینگی، سیال چگالیده بتواند به تبخیرکننده بازگردد (Faghri, 1995).

۴. کاربرد گردآور در نما

از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر کاربرد گردآورهای خورشیدی، بازدهی آن‌ها می‌باشد. افزایش بازدهی، توجیه فنی و اقتصادی این سیستم را ارتقا می‌دهد و دامنه کاربرد آن را گسترده‌تر می‌کند. بازدهی گردآور، بر اساس معادلات تعادل انرژی از رابطه زیر به دست می‌آید (DOE, 2013):

$$(1) \quad \eta = F_R \left[\tau \alpha - U_L (T_m - T_a) - F_{R,sh} (T_m - T_{amb}) \right] \quad (1)$$

که در آن، η بازدهی گردآور، F_R ضریب تصحیح یا ضریب برداشت حرارتی گردآور که عددی کوچکتر از یک است، $\tau\alpha$ حاصل ضرب همه ضرایب عبور و جذب، U_L ضریب کلی تلفات حرارتی که ترکیبی از تابش، همرفت و رسانش

می‌باشد با واحد وات بر مترمربع کلوین، T_{in} و T_{air} به ترتیب دمای سیال ورودی و دمای هوا با واحد کلوین، می‌باشند.

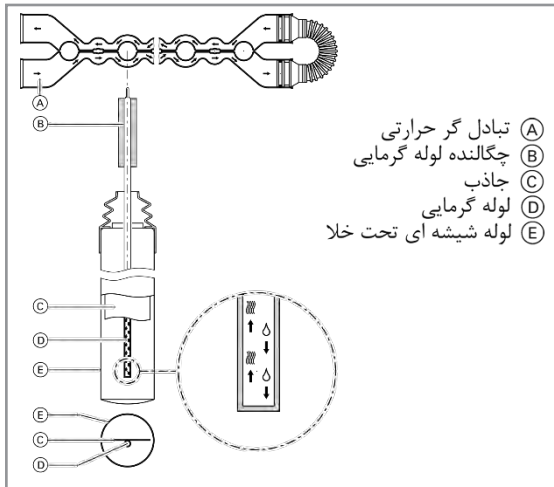
با توجه به رابطه بازدهی در گردآورها، ضریب عبور نور از شیشه محافظ یک پارامتر با اهمیت در کارایی گردآور است. در نمودار شکل ۲، مشاهده می‌شود تا حدود ۴۰ درجه انحراف از نرمال سطح، تأثیر معناداری در کاهش ضریب عبور نور از شیشه ندارد، اما در زوایای بیش از ۶۰ درجه، ضریب عبور نور با شیب تندی کاهش می‌یابد.

از آنجایی زاویه تابش خورشید با نرمال سطح نما، در تابستان، در عرض‌های جغرافیایی کشور ایران به حدود ۸۰ درجه نیز می‌رسد، در نتیجه، میزان کارایی گردآور در صورت نصب بر روی نما، بسیار کاهش می‌یابد. در این صورت، انرژی حاصله تنها برای تأمین آب گرم مصرفی کفایت خواهد کرد. گرچه، ذاتاً گردآورهای تخت به علت تلفات حرارتی، در دماهای بالا کارایی نداشته و امکان استفاده از آن‌ها به منظور سرمایه‌ش خورشیدی در سیستم‌های جذبی وجود ندارد (Chen, 2011). همچنین، این سیستم مانع دریافت روشنائی طبیعی از طریق جدار می‌شود.

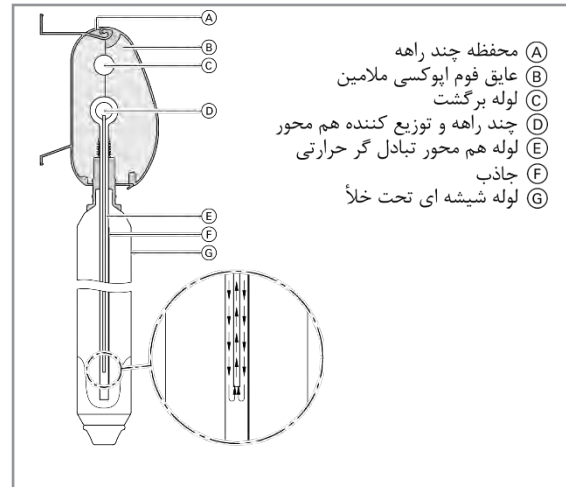
راه حل پیشنهادی در این پژوهش، مدول‌هایی با ابعاد ۳,۵*۱,۸ متر را شامل می‌شود که چیدمانی افقی از گردآورهای لوله‌ای تحت خلأ را در خود جای داده است. برخلاف چیدمان رایج عمودی، چیدمان افقی این امکان را می‌دهد که گردآور نسبت به زاویه فصلی تابش حساس نباشد و در همه فصول، تابش بر بخش عمده‌ای از آن عمود باشد (شکل ۳ و ۴).

در این طراحی، امکان عبور نور روز و ارتباط بصری بین فضای داخل و خارج، از طریق فواصل افقی بین لوله‌ها امکان پذیر است. لذا با لحاظ یک سیستم عایق شفاف نظیر شیشه سه جداره کم گسیل^۸ یا شیشه با لایه معلق داخلی، در پشت گردآورها می‌توان با حفظ استانداردهای حرارتی جدار، مقاومت حرارتی از این ظرفیت به خوبی استفاده شود.

از جمله مزایای این راه حل، عملکرد آن به صورت سایه بان (لوور) است. همزمان با جمع‌آوری انرژی خورشیدی در تمام فصول سال، در عمل مانع از تابش مستقیم آفتاب و ایجاد مزاحمت‌های بصری و حرارتی نظیر چشم زدگی، ناراضی‌تی حرارتی موضعی و... در داخل فضا می‌شود و در مجموع به میزان قابل توجهی از بار ورودت ساختمان می‌کاهد.



- (A) تبادل گر حرارتی
- (B) چکاننده لوله گرمایی
- (C) جاذب
- (D) لوله گرمایی
- (E) لوله شیشه ای تحت خلا



- (A) محافظه چند راهه
- (B) عایق فوم اپوکسی ملامین
- (C) لوله برگشت
- (D) چند راهه و توزیع کننده هم محور
- (E) لوله هم محور تبادل گر حرارتی
- (F) جاذب
- (G) لوله شیشه ای تحت خلا

شکل ۱: گردآور لوله ای از نوع جریان مستقیم (بالا) گردآور لوله ای از نوع لوله گرمایی یا هیت پاپ (پایین) (2008 Viessmann)

۵. محاسبه انرژی دریافتی

در این بخش، به منظور ارزیابی کارایی جدار در زمینه استحصال انرژی خورشیدی، مقدار کمی انرژی حرارتی تولیدی محاسبه شده و همچنین، تأثیر فرم هندسی لوله ای در مقایسه با فرم تخت شیشه محافظ گردآور در جذب انرژی مورد بحث قرار می‌گیرد.

ابزار شبیه‌سازی، نرم افزار ترنسول نسخه ۳ می‌باشد که به‌عنوان یک رابط کاربری، از موتور محاسباتی معتبر ترنسیس به‌طور تخصصی برای شبیه‌سازی گردآورهای خورشیدی گوناگون استفاده می‌کند. (URL: DOE, Building Energy Software Tools Directory, 2014) با توجه به اهمیت شهر تهران از نظر جمعیتی و مصرف انرژی، شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های آب و هوایی این شهر انجام پذیرفت.

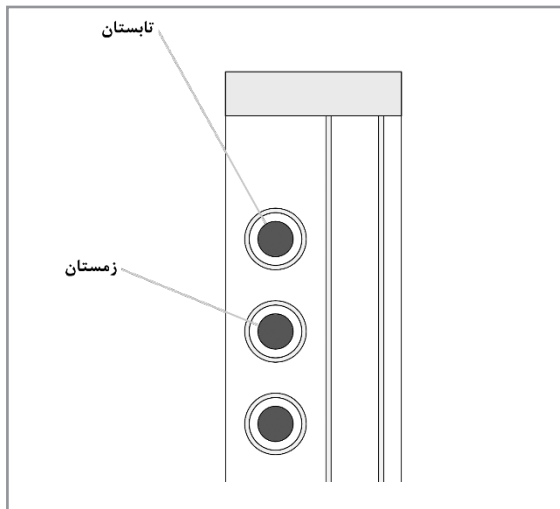
۵-۱. فرضیه‌های شبیه‌سازی

در این شبیه‌سازی، تعداد چهار عدد از مدول‌های نما، با سطح ناخالص هر یک، برابر ۵/۴۴ متر مربع به صورت موازی و با مشخصات مندرج در جدول ۱ استفاده شده است. محاسبات بر اساس دمای سیال ۷۰ و ۹۰ درجه سلسیوس صورت گرفته است که در ادامه، به ترتیب سیال گرم و سیال داغ خوانده می‌شود. کارایی سیستم‌های سرمایشی جذبی در تابستان مستلزم استفاده از سیال داغ است، اما به دلیل افزایش اتلاف حرارت در گردآور با افزایش دمای سیال، می‌توان در زمستان از سیال گرم استفاده نمود.

گردآورهای لوله‌ای، به علت اتلاف حرارتی بسیار کم ناشی از خلا درون آن‌ها، می‌توانند در دماهای بالا نیز کارایی مطلوبی داشته باشند و برای مقاصد سرمایشی، هم در سیستم‌های سرمایش دسیکانت^۱ و هم در سیستم‌های جذبی^۱ و ادسورپشن^۱ مورد استفاده قرار گیرند (IIED, 2010). در نمودار شکل ۵، دامنه دمایی عملکرد انواع خنک‌کن حرارتی و بازدهی انواع گردآور در دماهای متناظر آورده شده است.

تا کنون، طراحی رایج گردآورهای خورشیدی تولید آب گرم عموماً بر این اصل استوار بوده است که باید از گرمای اضافه بر نیاز در تابستان اجتناب کرد یا حداقل آن را در کمترین مقدار خود نگاه داشت. با رواج سیستم‌های گرمایشی خورشیدی در سال‌های اخیر، دریافت گرمای اضافی در تابستان در کل اجتناب‌ناپذیر است. به دلایل اقتصادی، با افزایش سهم انرژی خورشیدی، انرژی استحصال شده ویژه در گردآورها کاهش می‌یابد. عموماً از سطوح وسیع گردآور اجتناب می‌شود، حتی اگر این امر در نهایت موجب آسایش محیطی بیشتر می‌شود.

بنابراین استفاده از گرمای اضافی تابستان برای سرمایش حرارتی خورشیدی، فرصتی را در بهبود کارایی سیستم حرارت خورشیدی برای تهیه آب گرم و یا پشتیبانی از سیستم گرمایش ایجاد می‌کند. به علاوه کاربرد جدید به میزان زیادی از خاموش شدن سیستم، که با افزایش دمای بسیار زیادی همراه است، و باعث ایجاد تنش‌های حرارتی مصالح سازنده آن می‌شود، می‌کاهد.

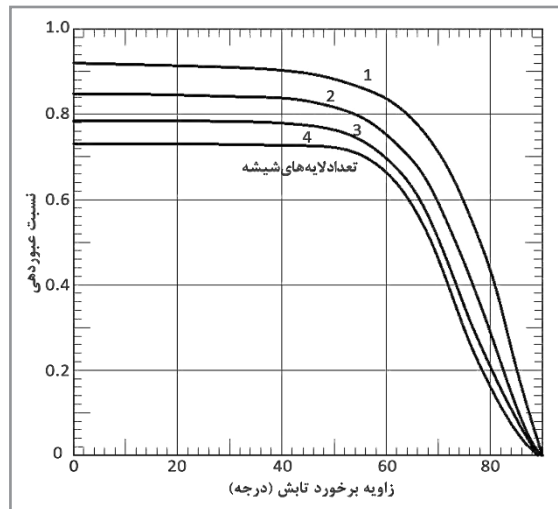


شکل ۳: عمود بودن تابش بر سطح شیشه محافظ در صورت استفاده از گردآور لوله‌ای (ترسیم: نگارندگان)

در تمامی حالات، چنان چه انتظار می‌رود، 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. بر خلاف گردآور تخت، در مدول پیشنهادی، بیشترین بازدهی ماهانه، در فصل تابستان تابستان تحقق یافته است. در گردآور تخت نصب شده بر روی نما، با وجود کاهش اتلاف حرارتی در تابستان، بیشترین نسبت انرژی خورشیدی از طریق شیشه محافظ گردآور بازتابیده می‌شود.

بیشترین بازدهی سالانه، ۶۴٫۶٪ و ۶۲٫۱٪ 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٪ در گردآور تخت نصب شده به صورت عمودی (به علت استفاده از شیشه محافظ مسطح و تلفات حرارتی بیشتر) در حدود ۳۰ درصد می‌باشد.

در نمودار شکل ۶، می‌توان تأثیر فرم هندسی شیشه محافظ و همچنین تأثیر انتقال حرارت در گردآور را مشاهده کرد. بدون در نظر گرفتن فرم هندسی شیشه محافظ، انرژی استحصال شده در تابستان به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. تأثیر این عامل، در زمستان بسیار کم‌رنگ‌تر می‌شود. آن‌چه در زمستان بیش از هر چیز دیگری اهمیت دارد، تلفات حرارتی می‌باشد. گردآور تخت، در تابستان به دلیل زاویه عمودی تابش و بازتاب زیاد سطح شیشه آن، و در زمستان به علت تلفات حرارتی بیشتر، ناشی از اختلاف دمای سطح جاذب با محیط، همواره بازدهی کمتری از مدول پیشنهادی دارد.



شکل ۲: عبوردهی شیشه در زوایای مختلف تابش

برای ارزیابی اثرگذاری فرم ویژه شیشه در مدول طراحی شده، سه حالت مختلف برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد:

- مدول پیشنهادی: از پارامترهای استاندارد گردآورهای لوله‌ای تحت خلأ استفاده شده است.

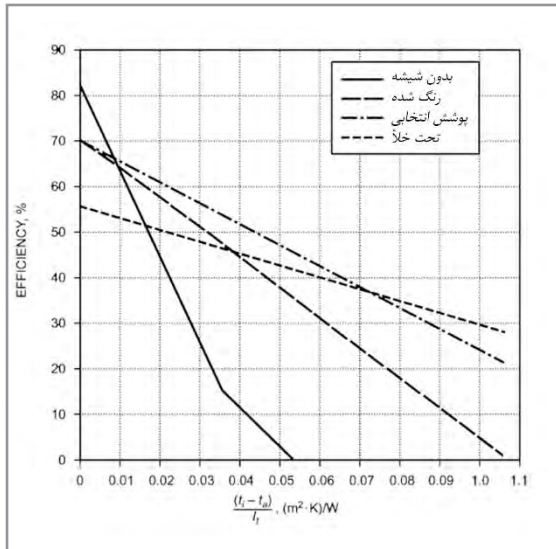
- بدون لحاظ فرم لوله‌ای مدول: در این حالت، به جای شیشه با فرم استوانه‌ای، شیشه تخت استفاده شد، لکن فرض بر این گذاشته شد که از نظر تلفات حرارتی، مشابه مدول پیشنهادی است. هر چند این فرض در عمل، غیر ممکن است، چرا که گردآورهای تخت تلفات حرارتی به مراتب بالاتری نسبت به نوع لوله‌ای دارند. اما هدف از این فرض، بررسی تأثیر انحنای شیشه به صورت مستقل است.

- گردآور تخت: از پارامترهای استاندارد گردآورهای تخت استفاده شده است.

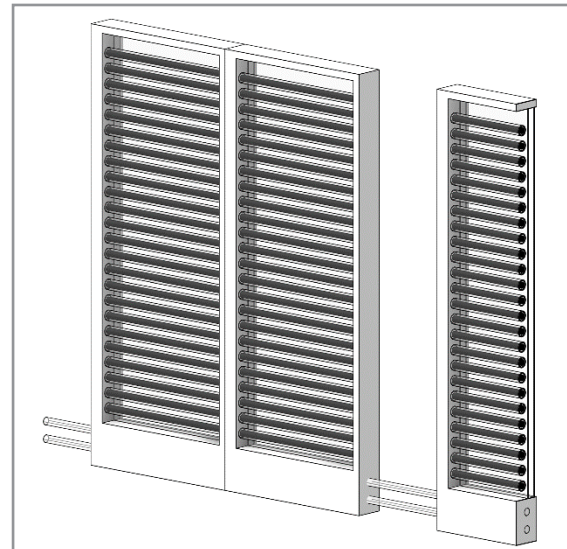
(URL2: Solar Rating & Certification Corporation, 2014)

۵-۲. آنالیز نتایج شبیه‌سازی

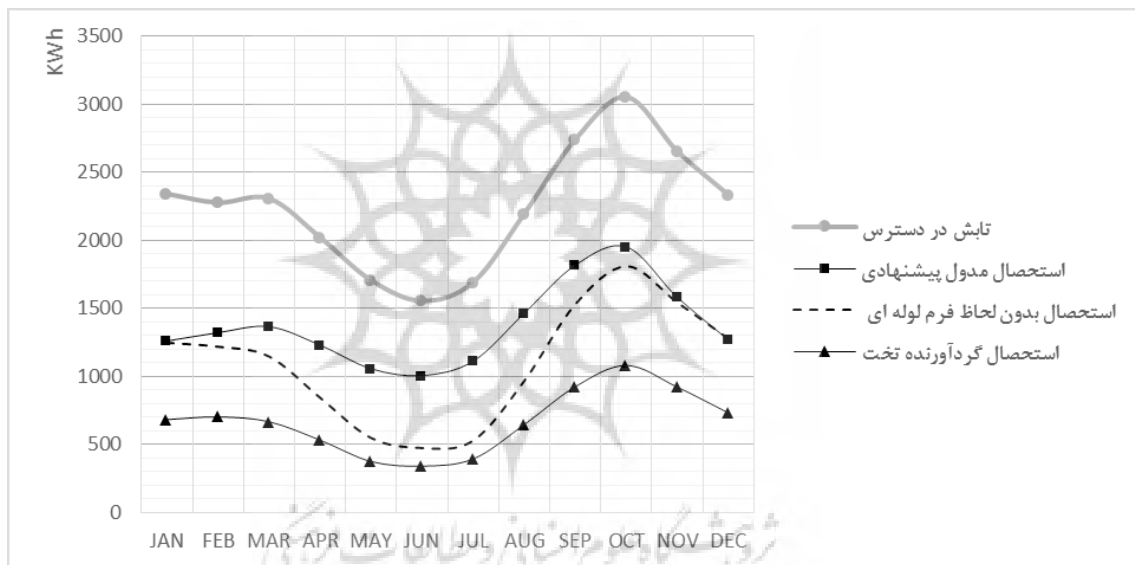
خلاصه نتایج این شبیه‌سازی در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول، تابش خورشیدی معرف میزان انرژی خورشیدی در دسترس بر روی سطح نما، و استحصال، معرف میزان انرژی جذب شده است. در این جدول، پس زمینه تیره‌تر معرف بازدهی بیشتر در هر ستون بازدهی می‌باشد. همچنین، سطح مستطیل‌های ستون تابش خورشیدی و ستون‌های استحصال، معرف مقادیر مطلق و قابل مقایسه در کل جدول است.



شکل ۵: بازدهی گردآورهای متعارف در ارای ماههای مختلف سیال ناقل حرارت (Walker, 2013)



شکل ۴: تلفیق مدول نما با گردآور لوله ای (ترسیم: نگارندگان)



شکل ۶: مقایسه انرژی استحصالی در حالات مختلف گردآور انرژی تابشی در دسترس (ترسیم نگارندگان)

پوشش خورشیدی گردآور تلفیقی با نما

در بخش قبل، انرژی قابل استحصال توسط مدول های نما محاسبه شد. در این بخش به منظور دستیابی به مقیاسی ملموس تر از اثربخشی مدول های جدار، یک اتاق اداری به عنوان نمونه تعریف و بار سرمایش و گرمایش آن در صورت استفاده و عدم استفاده از مدول، محاسبه می شود. شبیه سازی های این بخش به وسیله نرم افزار انرژی پلاس نسخه ۸،۰ صورت پذیرفته است.

۵-۱. فرضیه ها

یک اتاق با عملکرد اداری به ابعاد ۷/۲*۱۰ متر به عنوان نمونه تعریف شد. ضلع کوچک آن که رو به جنوب قرار

در این نمودار، همچنین مشاهده می شود بیشترین دسترسی به تابش و به تبع آن، بیشترین استحصال انرژی در ماه های نسبتاً معتدل سال صورت می گیرد که ممکن است با الگوی توزیع مصرف انرژی در طول فصول مختلف چندان خوانایی نداشته باشد، لذا تمهیداتی برای اجتناب از گرم شدن بیش از حد می بایست در نظر گرفته شود، که در صورت استفاده از لوله گرمایی با مشخصات مناسب. دامنه ی مناسب دمای عملکرد این تمهیدات با سهولت بیشتری امکان پذیر خواهد بود که مزیت مهم دیگری برای استفاده از لوله گرمایی در گردآورهای تحت خلأ می باشد.

| گردآور تخت | | گردآور لوله‌ای تحت خلأ | | |
|------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 0.776 | | 0.804 | | بازدهی نوری |
| 4.140 | (W/m ² K) | 1.330 | (W/m ² K) | ضریب اول معادله کارایی |
| 0.0145 | (W/m ² K ²) | 0.0067 | (W/m ² K ²) | ضریب دوم معادله کارایی |
| 0.90 | | 0.98 | | ضریب تعدیل کننده زاویه برخورد |
| 72 | (l/h.m ²) | 61.2 | (l/h.m ²) | نرخ جریان سیال |
| 10.78 | (K.KJ/m ²) | 8.38 | (K.KJ/m ²) | ظرفیت حرارتی |

جدول ۱: مشخصات گردآورهای مورد استفاده در شبیه سازی

| ماه | تابش در دسترس | سیال گرم | | | | | سیال داغ | | | | | | | | | | |
|---------|---------------|-----------------|---------|-----------------------|---------|------------|----------|-----------------|---------|-----------------------|---------|------------|---------|-------|--------|-------|--------|
| | | لوله ای تحت خلأ | | بدون لحاظ فرم لوله ای | | گردآور تخت | | لوله ای تحت خلأ | | بدون لحاظ فرم لوله ای | | گردآور تخت | | | | | |
| | | بازدهی | استحصال | بازدهی | استحصال | بازدهی | استحصال | بازدهی | استحصال | بازدهی | استحصال | بازدهی | استحصال | | | | |
| ژانویه | 2,342 | 56.3% | 1,318 | 55.9% | 1,309 | 32.1% | 751 | 53.8% | 1,260 | 53.3% | 533 | 26.4% | 882 | 43.6% | 1,279 | 63.2% | 2,022 |
| فوریه | 2,278 | 60.5% | 1,378 | 56.1% | 1,278 | 32.6% | 743 | 58.0% | 1,321 | 53.5% | 533 | 26.4% | 882 | 43.6% | 1,279 | 63.2% | 2,022 |
| مارس | 2,308 | 61.5% | 1,420 | 52.0% | 1,200 | 30.1% | 695 | 59.2% | 1,365 | 49.8% | 533 | 26.4% | 882 | 43.6% | 1,279 | 63.2% | 2,022 |
| آوریل | 2,022 | 63.2% | 1,279 | 43.6% | 882 | 26.4% | 533 | 60.8% | 1,229 | 41.8% | 533 | 26.4% | 882 | 43.6% | 1,279 | 63.2% | 2,022 |
| مه | 1,706 | 64.2% | 1,096 | 33.0% | 563 | 21.9% | 373 | 61.9% | 1,056 | 32.1% | 547 | 21.9% | 373 | 21.9% | 547 | 32.1% | 1,706 |
| ژوئن | 1,555 | 67.1% | 1,043 | 31.0% | 482 | 21.8% | 340 | 64.7% | 1,006 | 30.3% | 472 | 21.8% | 340 | 21.8% | 472 | 30.3% | 1,555 |
| جولای | 1,692 | 68.1% | 1,153 | 31.9% | 541 | 23.2% | 393 | 65.7% | 1,112 | 31.1% | 527 | 23.2% | 393 | 23.2% | 527 | 31.1% | 1,692 |
| اگوست | 2,196 | 69.2% | 1,519 | 46.2% | 1,015 | 29.5% | 648 | 66.7% | 1,464 | 44.1% | 968 | 29.4% | 645 | 29.4% | 968 | 44.1% | 2,196 |
| سپتامبر | 2,743 | 68.7% | 1,883 | 58.6% | 1,606 | 35.8% | 982 | 66.3% | 1,818 | 55.9% | 1,533 | 33.7% | 924 | 33.7% | 1,533 | 55.9% | 2,743 |
| اکتبر | 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 | 35.4% | 1,812 | 59.3% | 3,055 |
| نوامبر | 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 | 34.7% | 1,544 | 58.1% | 2,655 |
| دسامبر | 2,335 | 57.0% | 1,330 | 57.5% | 1,344 | 34.3% | 802 | 54.3% | 1,268 | 54.7% | 1,278 | 31.3% | 731 | 31.3% | 1,278 | 54.7% | 2,335 |
| 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 | 29.7% | 13,136 | 48.9% | 26,885 |

جدول ۲: انرژی استحصالی در مدول های نمای تلفیقی با گردآور درازای شرایط متفاوت سیال ناقل و ساختار گردآور (مأخذ: نگارندگان)

نرخ تعویض هوا، مطابق مبحث ۱۴ مقررات ملی ساختمان ایران و نیز منابع مورد استفاده در تأسیسات ساختمان، به شرح زیر در نظر گرفته شد:

- نیم بار در ساعت: مطابق مبحث ۱۴ مقررات ملی ساختمان ایران، نرخ تعویض هوا ۲۰ فوت مکعب در دقیقه به ازای هر نفر تعیین شده است که با توجه به حجم فضا و فرض ۵ نفر به عنوان تعداد کارمندان، نرخ تعویض هوا در حدود معادل نیم بار در ساعت خواهد بود.
- یک بار در ساعت: با فرض تعداد مراجعین، معادل تعداد کارمندان، استفاده کنندگان از فضا ۱۰ نفر در نظر گرفته و مطابق حالت اول، در تعیین تعویض هوا لحاظ گردید.
- دو بار در ساعت: تعداد کارمندان و مراجعین ۲۰ نفر در نظر گرفته شد.
- چهار بار در ساعت: مطابق برخی استانداردهای مورد استفاده در طراحی تأسیسات مکانیکی، حداقل

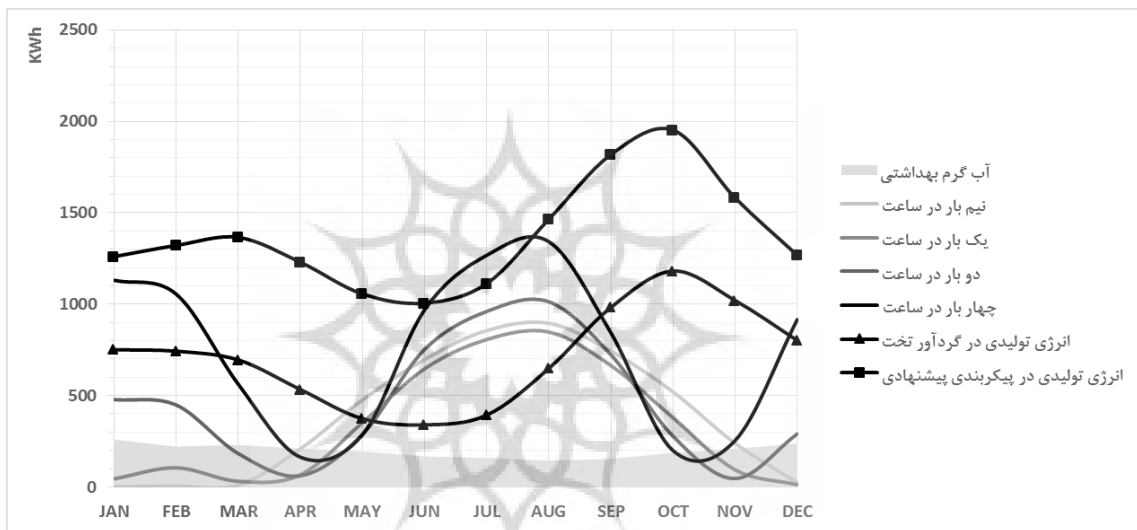
دارد از چهار مدول نمای تلفیقی با گردآور به عرض ۱/۸ و ارتفاع ۳/۵ متر تشکیل شده است. سطح ناخالص گردآور آن دارای ابعاد ۳/۴*۱/۶ متر می باشد. ارتفاع کف تا زیر سقف کاذب اتاق ۳ متر فرض شد. به عنوان اتاقی در طبقات میانی یک برج اداری، تبادل حرارت صرفاً از جدار شمالی و جنوبی لحاظ گردید و سایر سطوح بی دررو در نظر گرفته شدند.

همچنین با در نظر گرفتن سرانه استاندارد ۱۴ متر مربع به ازای هر کارمند، استفاده کنندگان از این فضا، ۵ نفر با توان تولید حرارت ۱۱۰ وات در حالت نشسته در نظر گرفته شدند. سرانه توان حرارتی تولیدی توسط تجهیزات الکتریکی، ۲۰۰ وات و روشنایی ۱۵ وات به ازای هر نفر فرض شد.

دمای معیار برای محاسبه بار گرمایش در زمستان، ۲۰ درجه و برای سرمایش در تابستان ۲۵ درجه و شرایط محیطی براساس داده های آب و هوایی شهر تهران می باشد.

| نوع بار | نیم بار در ساعت | | یک بار در ساعت | | | دو بار در ساعت | | | چهار بار در ساعت | | |
|---------|-----------------|--------------------|----------------|---------|--------------------|----------------|---------|--------------------|------------------|---------|--------------------|
| | گرمایش | مجموع تقاضای انرژی | گرمایش | سرماایش | مجموع تقاضای انرژی | گرمایش | سرماایش | مجموع تقاضای انرژی | گرمایش | سرماایش | مجموع تقاضای انرژی |
| ژانویه | 0 | 1 | 45 | 0 | 45 | 478 | 0 | 478 | 1,131 | 0 | 1,131 |
| فوریه | 0 | 4 | 105 | 0 | 105 | 448 | 0 | 448 | 1,055 | 0 | 1,055 |
| مارس | 5 | 1 | 31 | 0 | 31 | 182 | 0 | 182 | 562 | 0 | 562 |
| آوریل | 125 | 0 | 1 | 46 | 66 | 37 | 17 | 61 | 145 | 13 | 163 |
| مه | 286 | 0 | 0 | 246 | 352 | 0 | 202 | 288 | 0 | 286 | |
| ژوئن | 419 | 0 | 0 | 452 | 646 | 0 | 527 | 752 | 0 | 969 | |
| جولای | 514 | 0 | 0 | 565 | 807 | 0 | 672 | 960 | 0 | 1,267 | |
| آگوست | 537 | 0 | 0 | 593 | 848 | 0 | 709 | 1,013 | 0 | 1,342 | |
| سپتامبر | 446 | 0 | 0 | 465 | 664 | 0 | 507 | 724 | 0 | 843 | |
| اکتبر | 312 | 0 | 0 | 265 | 378 | 0 | 194 | 278 | 25 | 199 | |
| نوامبر | 143 | 0 | 0 | 66 | 94 | 22 | 17 | 46 | 0 | 254 | |
| دسامبر | 14 | 0 | 12 | 0 | 12 | 290 | 0 | 290 | 0 | 915 | |
| مجموع | 2,802 | 4,010 | 194 | 2,698 | 4,048 | 1,459 | 2,844 | 5,521 | 3,431 | 8,987 | |

جدول ۳: تخمین بارهای حرارتی مدل نمونه با عملکرد اداری در آرای مقادیر متفاوت تعویض هوا (مأخذ: نگارندگان)



شکل ۷: نمودار همزمانی عرضه انرژی خورشیدی و تقاضای انرژی حرارتی (ترسیم: نگارندگان)

۲-۵. آنالیز نتایج شبیه سازی

جدول ۳ خلاصه نتایج حاصل از شبیه سازی بارهای حرارتی مدل نمونه را ارائه می دهد. به منظور محاسبه مجموع تقاضای انرژی حرارتی در بخش تهویه مطبوع، بار سرماایش با در نظر گرفتن ضریب کارایی ۰/۷ با بار گرمایی جمع شده است. لازم به توضیح است که ضریب کارایی سیستم های سرماایشی متکی بر حرارت، نظیر خنک کن های جذبی، براساس دمای سیال ورودی تعیین می گردد که معمولاً بین ۰/۶ تا ۱/۲ قرار دارد.

دستیابی به ضریب ۱/۲ مستلزم استفاده از خنک دواثره با دمای ورودی بیش از ۱۲۰ درجه می باشد. هرچند دستیابی به این دما توسط گردآور خورشیدی امکان پذیر است، اما باعث افزایش تلفات و افت بازدهی و ایجاد پیچیدگی در سیستم تأسیسات می شود.

تعویض هوا در فضای اداری چهار بار در ساعت تعیین شد.

جدارها: جدارهای بی دررو مطابق تجویز مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، با ضریب انتقال حرارت ۰/۴۸ وات بر مترمربع کلوین در نظر گرفته شد.

آب گرم مصرفی: بار حرارتی تولید آب گرم مصرفی، با فرض مصرف ۲۰۰ لیتر در روز، آب گرم با دمای ۴۵ درجه سلسیوس، محاسبه شد. در این محاسبات، تغییرات فصلی دمای آب شهر، براساس مدل تخمین دمای آب براساس داده های آب و هوایی شهر تهران در نرم افزار ترنسول لحاظ شده است.

رنگ تیره در جدول ۳، معرف مقادیر بیشتر است، لذا با افزایش تعویض هوا، چنان چه واضح است بارهای حرارتی بیشتر می‌شود. همچنین، این جدول نشان می‌دهد در مقادیر پایین تعویض هوا، در صورت استفاده از این جدار، گرمایش هوا صرفاً با دریافت‌های داخلی قابل تأمین است، همین دریافت‌های داخلی و تعویض هوای کم، باعث می‌شود بار سرمایش در بخش عمده سال، هرچند به میزان متفاوت، وجود داشته باشد.

با افزایش دفعات تعویض هوا، این روند تغییر می‌کند و به تدریج اثر دریافت‌های داخلی کمرنگ می‌شود. در نتیجه، بار گرمایشی به سرعت افزایش می‌یابد و باروندی آهسته‌تر، به تدریج بار سرمایشی نیز در بعضی ماه‌ها افزایش می‌یابد. لذا صرف نظر از ضروریات بهداشتی و آسایشی، میزان تعویض هوا، چه افزایش و چه کاهش آن، در فصول و شرایط مختلف، می‌تواند تأثیرات مثبت یا منفی داشته باشد.

با چهار بار تعویض هوا، بار گرمایی از بار سرمایی پیشی می‌گیرد، هرچند ضریب کارایی ۰/۷ در سرمایش، موجب می‌شود نیازهای حرارتی نسبتاً در طول سال متعادل شود.

در نمودار شکل ۷ استحصال انرژی از مدول پیشنهادی و گردآور تخت و تقاضای انرژی حرارتی برای تهویه و تولید آب گرم، در طول ماه‌های مختلف سال مقایسه شده است. گردآور تخت، سهم مناسبی از بار گرمایشی مدل نمونه را تأمین می‌کند و در فصل‌های معتدل‌تر، تقریباً امکان تأمین کلیه نیازهای حرارتی وجود دارد. اما در تابستان تنها سهم ناچیزی از تقاضای حرارتی سیستم سرمایشی، می‌تواند از طریق انرژی خورشیدی فراهم شود، که از نظر اقتصادی فاقد توجیه بوده و می‌توان صرفاً به تأمین آب گرم مصرفی از آن، اکتفا کرد.

در نقطه مقابل، گردآور تعبیه شده در مدول پیشنهادی، تقریباً در تمام طول سال، امکان پوشش کامل نیازهای حرارتی را دارد، گرچه با در نظر گرفتن بار آب گرم مصرفی، در بازه‌ای مشخص از تابستان و زمستان، شرایطی که تعویض هوا ۴ بار در ساعت است، انرژی استحصال شده، در تأمین بار حرارتی کل دچار کسری اندکی می‌شود. این کسری اندک، می‌تواند با کاهش دفعات تعویض هوا در محدوده استاندارد و یا انحراف مناسبی از دمای خنثی، جبران شود.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، راهکاری برای تلفیق گردآور خورشیدی با نمای ساختمان ارائه شد تا انرژی خورشیدی را به نحو مؤثری جذب و به انرژی حرارتی تبدیل کند. پس از بررسی اجزا و عملکرد راهکار فوق، کارایی آن با استفاده از روش شبیه‌سازی نرم‌افزاری مورد ارزیابی قرار گرفت.

بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار ترنسول، با استفاده از فرم استوانه‌ای افقی، بازدهی سالانه در مقایسه با گردآوری تخت، از ۲۰٪ به ۶۲٪ می‌رسد. تأثیر این فرم هندسی، در تابستان بسیار پررنگ‌تر از زمستان است، چنانچه مقادیر بازدهی فوق برای فصل تابستان، به ترتیب در حدود ۲۱٪ و ۶۵٪ خواهد بود. همچنین افت بازدهی ناشی از افزایش دمای سیال در گردآور لوله‌ای، به دلیل مقاومت حرارتی بیشتر آن، ملایم‌تر از گردآور تخت صورت می‌گیرد.

مهمترین عامل در عملکرد بهتر گردآور لوله‌ای در فصل زمستان، کاهش تلفات حرارتی ناشی از مقاومت حرارتی محفظه گردآورنده است، حال آن که، فرم هندسی شیشه محافظ در فصل تابستان، به دلیل زاویه عمودی تابش آفتاب، عامل اصلی در بازدهی بالای گردآور لوله‌ای در نمای ساختمان است؛ به عبارت دیگر، گردآور تخت، در تابستان به دلیل زاویه عمودی تابش و بازتاب زیاد سطح شیشه آن، و در زمستان به علت تلفات حرارتی بیشتر، ناشی از اختلاف دمای سطح جاذب با محیط، همواره بازدهی کمتری از مدول پیشنهادی دارد. در بررسی یک فضای اداری مفروض، مشخص شد استفاده از مدول‌های نمای تلفیقی با گردآور حرارتی، امکان دستیابی به سطح بالایی از پوشش خورشیدی را فراهم کند.

به‌طور خلاصه، جذب تابش خورشید در زمستان بدون ایجاد چشم‌زدگی و مزاحمت حرارتی، جذب مناسب انرژی خورشیدی در تابستان به سبب هندسه لوله‌ای شیشه محافظ گردآور و نیز بازدهی بالای گردآور در اثر مقاومت حرارتی خلأ که امکان تولید سیال با دمای بالا به منظور تأمین انرژی مصرفی سیستم‌های سرمایشی جذبی و دسیکانت را با کارایی قابل قبول فراهم می‌آورد، از جمله مهمترین مزایای ایده مطرح شده در این پژوهش است که در ارزیابی و تصمیم‌گیری برای استفاده از انرژی تجدیدپذیر در ساختمان‌ها می‌بایست لحاظ گردد.

پی‌نوشت‌ها

1. Solar collector
2. Active

URL1: Solar Rating & Certification Corporation. Retrieved 2014/1/1, from www.solar-rating.com

URL2: Solar Rating & Certification Corporation. Retrieved 2014/27/12, from http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=602/pagename=alpha_list_sub

US Department of Energy. (2013). EnergyPlus Engineering Reference.

Walker, A. (2013). Solar Energy: Technologies and Project Delivery for Buildings: John Wiley and Sons.

3. Passive
4. Heat pipe
5. Evaporator
6. Condenser
7. Wick
8. Low-E (Low Emission)
9. Desiccant
10. Absorption
11. Adsorption
12. Energy Plus

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.
- Lopez, P. B. C. (2011). Solar Thermal Collector in Facades. (MS), Delft University of Technology.
- Mahdaveinejad, M. (2013). Optimum Energy Efficient Architecture Based on Thermal Behaviour of Buildings. Naqshejahan-Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, Fall 2013 & Winter 42-35 : (2)3, 2014.
- Mahdinejad, M. Mahdaveinejad, M. and Ashtiani, S. R. (2014). Thermal Behavior of Double Skin Buildings, Journal of Energy Technologies and Policy 14-1 : (9)4.
- Mazria, E. (1979). Passive solar energy book. Emmaus, PA., United States: Rodale Press.
- Quesada, G., Rouse, D., Dutil, Y., Badache, M., & Hallé, S. (2012). A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2832-2820, (5)16.
- Thomas, R. (2012). Photovoltaics and architecture: Taylor & Francis.

۴۱

شماره ۲-۵
تابستان ۱۳۹۴

فصلنامه
علمی-پژوهشی

نقش
جهان

با نهمای ساختمان
تلفیق گردآور خورشیدی حرارتی