

# تحلیل و بررسی کلکتورهای هوایی خورشیدی برای پنج ماه آخر سال در شهر قائن

علیرضا جعفری بیناباج

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، b.jafari.ali@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۰۸

## چکیده

در این مقاله به بررسی و طراحی یکی از سیستم‌های پرکاربرد انرژی خورشیدی؛ یعنی کلکتورهای هوایی خورشیدی (هواگرمن) جهت گرمایش فضا پرداخته شده و محاسبات لازم و پارامترهای مؤثر بر بازده و مساحت کلکتورها مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد افزایش تعداد پوشش‌های شیشه‌ای و دبی هوای ورودی و ضخامت عایق سبب کاهش مساحت مورد نیاز کلکتور و در نتیجه افزایش راندمان آن می‌شود و نیز بیشتر شدن عمق کانال هوا نیاز به مساحت بیشتری از کلکتور برای تأمین بار گرمایشی مورد نیاز دارد که این باعث کاهش راندمان می‌گردد. تأثیر تغییرات دمای میانگین هوا با مساحت مورد نیاز رابطه عکس و تغییرات ضریب انتقال حرارت باد رابطه مستقیم دارد. در نهایت هم شیب صفحات جاذب به‌عنوان عاملی مؤثر در جذب بیشتر انرژی مورد بررسی قرار گرفته که شیب میانگین ۵۸ درجه مناسب برای منطقه مورد مطالعه تخمین زده شده است. برای ملموس بودن تحقیق حاضر و همچنین مستند بودن آن، منطقه‌ای خاص از کشور، شهر قاین در خراسان جنوبی، با عرض جغرافیایی ۳۳ درجه، یک ساختمان اداری دوطبقه در نظر گرفته شده است. با توجه به در دسترس نبودن تابش کلی رسیده به سطح در این شهر، انرژی تابشی کل به روش HDKR در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل در مقایسه با شهرهایی با عرض جغرافیایی مشابه قابل قبول بوده است. شبیه‌سازی و تحلیل کلکتور هواگرمن هم با توجه به روابط موجود توسط نرم‌افزار متلب انجام شده است.

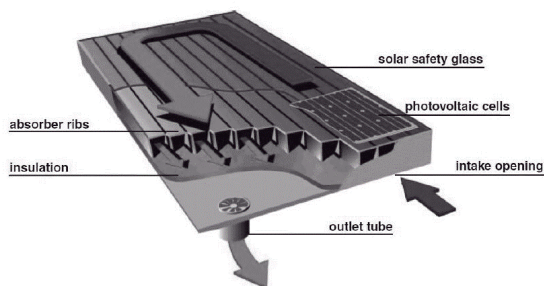
**واژگان کلیدی:** انرژی خورشیدی<sup>۱</sup>، کلکتور، هواگرمن، ضریب انتقال حرارت، HDKR، زاویه شیب

## ۱. مقدمه

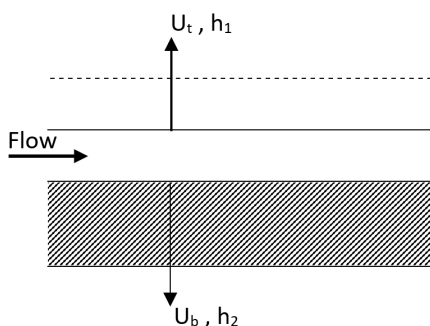
کشورهایی با پتانسیل بالای تابش ایجاد کرده است. سیستم‌های انرژی خورشیدی، فناوری‌های جدیدی هستند که برای تأمین گرما، آب گرم، الکتریسیته و حتی سرمایه‌های مسکونی، مراکز تجاری و صنعتی به کار می‌روند. گرمایش ساختمان توسط خورشید، نخستین و اصلی‌ترین کاربرد انرژی خورشیدی در

انرژی خورشیدی عظیم‌ترین منبع انرژی در جهان است. این انرژی پاک، ارزان و بی‌پایان، در بیشتر مناطق زمین قابل استحصال است. محدودیت منابع فسیلی و پیامدهای حاصل از تغییرات زیست‌محیطی و آب‌وهوای جهانی، فرصت‌های مناسبی برای رقابت انرژی خورشیدی با انرژی‌های فسیلی خصوصاً در

بازدهی حرارتی و مصرف برق برای به جریان درآوردن هوا در کلکتور، کلکتور نوع ۲ بهترین کارایی کلی را دارد و در نتیجه بالاترین سهم را در بازار فروش این کلکتورها به خود اختصاص داده است. شکل ۲ گونه‌ای پرکاربرد از این کلکتورها را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. مدلی از هواگرمن



شکل ۲. کلکتور نوع ۲، پرکاربردترین و معمول‌ترین نوع هواگرمن

در این رابطه به‌خصوص تعیین زاویه بهینه برای صفحات جاذب برای مناطق مختلف ایران مطالعات و بررسی‌هایی صورت گرفته است از جمله مهربان و همکاران [۳] مطالعاتی را در رابطه با تعیین زاویه بهینه مناطق جنوب شرق ایران انجام داده‌اند و یا بهرامی و همکاران [۴] در جهت بهینه‌سازی زاویه در شرایط اقلیمی کرج مطالعاتی را صورت داده‌اند. همچنین کاظمی و همکاران [۵] همین کار را در تهران انجام داده‌اند. در ادامه، به بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر بازده کلکتورها و مساحت آنها برای ساختمان اداری مورد نیاز و محاسبات انجام شده و اطلاعات آماری اولیه مورد نیاز پرداخته شده است که در نمودارهای اخذشده از برنامه‌ای که توسط نرم‌افزار متلب نوشته شده، ارائه شده است.

## ۲. اطلاعات اولیه

همان‌گونه که قبلاً هم اشاره شد، ساختمان مورد نظر ساختمانی در شمال غربی شهر قائن با عرض جغرافیایی ۳۳ درجه از استان

بخش ساختمان است. سیستم‌های گرمایش خورشیدی بر مبنای نوع سیال هوا یا مایع، که در کلکتورهای خورشیدی گرم می‌شود، به دو نوع عمده تقسیم‌بندی می‌شوند. هر دو نوع از این سیستم‌ها تابش خورشید را جمع‌آوری و جذب کرده و حرارت به‌دست آمده از خورشید را جهت تأمین بار گرمایش مستقیماً به فضاهای داخلی ساختمان‌ها انتقال می‌دهند.

کشور ایران در نواحی پرتابش واقع شده است. مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از تجهیزات خورشیدی در ایران مناسب است و می‌تواند بخشی از انرژی مورد نیاز کشور را تأمین نماید. ایران کشوری است که به گفته متخصصان این فن، با وجود ۳۰۰ روز آفتابی در بیش از دو سوم آن و متوسط تابش ۴/۵ تا ۵/۵ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز از کشورهای با پتانسیل بالا در زمینه انرژی خورشیدی معرفی شده است. برخی از کارشناسان انرژی خورشیدی گام را فراتر نهاده و در حالتی آرمانی ادعا می‌کنند که ایران در صورت تجهیز مساحت بیابانی خود به سامانه‌های دریافت انرژی تابشی می‌تواند انرژی مورد نیاز بخش‌های گسترده‌ای از منطقه را نیز تأمین و در زمینه صدور انرژی برق فعال شود [۱].

همان‌طور که به اولین و اصلی‌ترین کاربرد انرژی خورشیدی یعنی گرمایش ساختمان اشاره شد، برای تأمین گرمایش از کلکتورها استفاده می‌کنند؛ این کلکتورها انواع مختلفی دارند که با توجه به استفاده مورد نظر یعنی گرمایش ساختمان مسکونی و غیرمسکونی و فرایندهای صنعتی در مقاله حاضر از کلکتورهای هوایی استفاده شده است. از مزایای این نوع کلکتورها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲]:

۱. یخ نزدن در زمستان
۲. داغ نکردن در تابستان
۳. سادگی اجزای سیستم
۴. نبودن مشکل نشت آب

در شکل ۱ نمونه‌ای از کلکتورهای هوایی خورشیدی (هواگرمن) نمایش داده شده است. اساساً کلکتورها را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد که تفاوت آنها در شیوه جریان هوا نسبت به جاذب است: جریان هوا در بالای جاذب، جریان هوا در زیر جاذب، جریان هوا در اطراف جاذب و نهایتاً جریان هوا در جاذب مشبک. با توجه به معایب و مزایای هر گونه از این کلکتورها می‌توان گفت که با عنایت به اهمیت دو پارامتر،

فصل‌های پاییز و زمستان دارای سرمای است که نیاز به وسایل گرمایشی است و نیز بیشترین روزهای ابری را در بین ماه‌های سال دارد از این جهت اطلاعات در ۵ ماه آخر سال مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱. اطلاعات هواشناسی شهرستان قائن

متوسط دما درجه سانتی‌گراد	سال	ماه	حداکثر سرعت باد (متر بر ثانیه)
۱۲/۳	۱۳۸۳	آبان	۱۰
۱۰	۱۳۸۳	اسفند	۱۱
۹/۷	۱۳۸۴	آبان	۸
۱۱	۱۳۸۷	اسفند	۱۴
۶/۶	۱۳۸۸	دی	۸
۷/۲	۱۳۹۱	بهمن	۱۰

### ۳. روش حل

کد نوشته شده دارای دو بخش می‌باشد که بخش اول مربوط به قسمتی است که معادلات تابشی کلی روی سطح شیبدار را در نظر می‌گیرد و در قسمت بعد مربوط به محاسبات هواگرمن‌های خورشیدی است. سه مدل برای حل و محاسبه تابش کلی روی سطح شیبدار پیشنهاد می‌شود [۷-۹]. اولین بخش، بخش ایزوتروپیک است؛ یعنی بخشی که تابش یکنواختی را از کل آسمان دریافت می‌کند. دومین بخش، تابش پراکنده محیط خورشید است که ناشی از پراکندگی روبه جلوی تابش خورشیدی است و در بخشی از آسمان در اطراف خورشید متمرکز می‌شود. سومین بخش، به‌عنوان درخشندگی افق شناخته می‌شود که نزدیک افق متمرکز و در بیشتر اوقات در آسمان‌های صاف مطرح می‌شود. مدل ایزوتروپیک ساده‌ترین مدل است. محافظه‌کارترین تخمین‌ها مربوط به تابش روی سطح شیبدار را ارائه می‌دهد و به‌طور گسترده استفاده شده است. کاربرد مدل HDKR (غیرایزوتروپیک) تقریباً شبیه ایزوتروپیک ساده است و نتایجی نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده می‌دهد. برای سطوحی که شیب آنها به‌سمت خط استوا است مدل HDKR پیشنهاد می‌شود. کاربرد مدل پرز<sup>۲</sup> (سومین بخش از سه مدل) پیچیده‌تر است و عموماً تابش کلی را روی سطح

خراسان جنوبی، که از سمت شمال با شهرستان گناباد، از سمت جنوب با شهرستان بیرجند، از سمت شرق با شهرستان زیرکوه و از سمت غرب با شهرستان سرایان هم‌جوار می‌باشد، کاربرد اداری داشته و عرض آن ۱۸/۳۰ متر و طول آن ۴۷/۵۰ متر در دو طبقه که ارتفاع هر طبقه ۳ متر می‌باشد، که مواد معمولی به مانند بقیه ساختمان‌ها از قبیل آجر، سیمان، گچ، آجرنما به‌کار رفته است. شیشه‌ها دوجداره بوده و در هر طبقه ۸ پنجره موجود است. چون به کاربرد اداری ساختمان اشاره شده است، با توجه به استانداردهای موجود دمای مناسب جهت تهویه اتاق‌ها ۲۲ درجه سانتی‌گراد خواهد بود.

بارگرمایش ساختمان دو طبقه اداری با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. بار گرمایش کلی به‌دست آمده برای دو طبقه ۱۹۴۹۹۶ بی. تی. یو. بر ساعت یا ۵۶۵۴۸ وات می‌باشد. چون دمای آسایش برای محیط اداری ۲۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، معمولاً دمای برگشتی اتاق به ورودی هواگرمن حدود ۵ تا ۶ درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای آسایش در نظر گرفته می‌شود. دمای خروجی کلکتور حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد از مقدار دمای آسایش اتاق اداری بیشتر در نظر گرفته شده است [۶]، که با این فرضیات اختلاف دمای ورودی و خروجی کلکتور حدود ۳۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. طبق رابطه ۳۶، مقدار  $\dot{m}$  میزان دبی هوای مورد نیاز کلی برای گرمایش کل ساختمان ۱/۶ کیلوگرم بر ثانیه به‌دست آمده است. حال با توجه به اینکه چه مقدار دبی از هوا را بتوان وارد کلکتور کرد، مجموع دبی تمام کلکتورها با مساحت مشخص باید به عدد ۱/۶ کیلوگرم بر ثانیه برسد.

در این مقاله هواگرمن‌های خورشیدی که جهت گرم کردن هوا استفاده می‌شود، در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. چون اطلاعات هواشناسی دقیقی در رابطه با تابش کلی رسیده به سطح زمین در این منطقه موجود نیست؛ یعنی توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری تابش خورشیدی، اندازه‌گیری نشده است، ناچار به شبیه‌سازی انرژی خورشیدی تابیده شده به سطح با توجه به روابط موجود شده‌ایم. جدول ۱ بخشی از اطلاعات هواشناسی شهر قائن که توسط اداره هواشناسی شهرستان تهیه شده است را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که فقط به‌صورت نمونه، اطلاعاتی در این جدول آورده شده است. لازم به توضیح است که در این منطقه نیمه‌بیابانی و ملایم در ۵ ماه آخر سال در

$$\begin{aligned} & \times (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) \\ & - (\cos \delta \sin \beta \sin \gamma)(\cos \omega_2 - \cos \omega_1) \\ & b = (\cos \phi \cos \delta)(\sin \omega_2 - \sin \omega_1) \\ & + (\sin \phi \sin \delta) \frac{1}{180} (\omega_2 - \omega_1) \pi \end{aligned} \quad (6)$$

رابطه ۷ بیانگر زاویه غروب خورشید و منفی آن زاویه طلوع خورشید است.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (7)$$

رابطه ۸ مربوط به محاسبه تابش خارج از جو روی یک سطح افقی برای یک زمان خاص بین  $\omega_1$  و  $\omega_2$  می‌باشد و مقدار Gsc ثابت خورشیدی را براساس اندازه‌گیری‌های دونکان<sup>۳</sup>، ۱۳۶۷ وات بر متر مربع [۹] انتخاب شده است.

$$\begin{aligned} I_o &= \frac{12 \times 3600}{\pi} G_\pi \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \\ & \times [\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) \\ & + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta] \end{aligned} \quad (8)$$

رابطه ۹ مربوط به تابش کلی مستقیم شامل سه مؤلفه تابش مستقیم عمودی  $G_{cnb}$ ، تابش روی سطح افقی  $G_{cb}$  و تابش پراکنده  $G_{cd}$  می‌باشد.

$$I = G_{cnb} + G_{cb} + G_{cd} \quad (9)$$

در ادامه تعیین سه نوع تابش به ترتیب در روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲ آمده است.

$$G_{cnb} = G_{on} \tau_b \quad (10)$$

$$G_{cb} = g_o \tau_b \cos \theta_z \quad (11)$$

$$G_{cd} = \tau_d (G_{on} \cos \theta_z) \quad (12)$$

رابطه ۱۳ به تابش عمودی خارج از جو اشاره دارد. در این رابطه  $n$  معرف روز سال است.

$$G_{cn} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \quad (13)$$

روابطی که در ادامه آمده برای محاسبه دیگر پارامترهای موجود است.

$$a_0^* = 0.4273 - 0.00821(6 - A)^2$$

$$a_1^* = 0.5055 - 0.0055(6.5 - A)^2 \quad (14)$$

$$k^* = 0.2711 - 0.01858(2.5 - A)^2$$

$$r_0 = \frac{a_0}{a_0^*}$$

$$r_1 = \frac{a_1}{a_1^*} \quad (15)$$

$$r_k = \frac{k}{k^*}$$

شیدار، کمی بیشتر از مقدارش پیشگویی می‌کند. بنابراین این روش دارای کمترین محافظه‌کاری در بین سه روش است. این روش با داشتن حداقل اندازه‌گیری‌ها بهترین روش است. برای سطوحی که زاویه  $\gamma$  از صفر درجه در سمت شمالی قسمت نیمه‌کره یا ۱۸۰ درجه در سمت جنوبی نیمه‌کره دارند، مدل پرز پیشنهاد می‌شود. در این مقاله، با توجه به برتری مدل HDKR نسبت به حالت ایزوتروپیک و همچنین با در نظر گرفتن کاربرد پرز برای روزهای صاف و با توجه به اینکه تحقیق ما برای ۵ ماه آخر سال که همیشه دارای هوای صافی نیست می‌باشد، بنابراین از مدل HDKR استفاده شده است.

#### ۴. معادلات حاکم

رابطه ۱ بیان‌کننده تابش کلی اعم از پراکنده و مستقیم روی یک سطح شیدار می‌باشد [۲].

$$\begin{aligned} I_T &= (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \\ & \times \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left( 1 + F \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right) \\ & + I_p \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

رابطه ۲ یک شاخص غیرایزوتروپیک و تابعی از انتقال تابش مستقیم توسط اتمسفر است. این شاخص سهمی از تابش پراکنده افقی را تعیین می‌کند که با آن به‌عنوان تابش پراکنده از جلو برخورد می‌شود.

$$A_i = \frac{I_b}{I_o} \quad (2)$$

رابطه ۳ ضریب تصحیحی است که برای روزهای ابری به‌کار می‌رود.

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}} \quad (3)$$

رابطه ۴ نسبت تابش مستقیم روی سطح شیدار به تابش مستقیم روی سطح افقی را بیان می‌کند. مقادیر  $a$  و  $b$  نیز به ترتیب از روابط ۵ و ۶ به‌دست می‌آید.

$$R_b = \frac{a}{b} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a &= (\sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) \\ & \times \frac{1}{180} (\omega_2 - \omega_1) \pi \\ & - (\cos \delta \cos \phi \cos \beta + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma) \end{aligned} \quad (5)$$

رینولدز اشاره دارد که  $m$  دبی هوا،  $D_h$  قطر هیدرولیکی،  $A_c$  مساحت سطح کلکتور و  $\mu$  ویسکوزیته هوا می‌باشد.

$$Re = \frac{mD_h}{A_c\mu} \quad (24)$$

رابطه ۲۵ به عدد ناسلت مربوط به انتقال حرارت اشاره دارد و رابطه ۲۶ بیانگر ضریب انتقال حرارت داخل کانال است.

$$Nu = 0.0158(Re)^{0.8} \quad (25)$$

$$h = Nu \frac{k}{D_h} \quad (26)$$

رابطه ۲۷ بیان‌کننده ضریب کارایی کلکتور است. ضریب بازدهی کلکتور یک ثابت ضروری برای هر طرح کلکتور و شدت جریان سیال است. در این رابطه  $h_r$  ضریب انتقال حرارت تابشی است.

$$F' = \left[ 1 + \frac{U_l}{h + \left[ \frac{1}{h} + \frac{1}{h} \right]^{-1}} \right]^{-1} \quad (27)$$

روابط ۲۸ و ۲۹ بیانگر ضریب اتلاف بالایی و ضریب اتلاف پشتی می‌باشند که مجموع این دو ضریب اتلاف کلی  $U_L$  می‌باشد. در یک طراحی خوب کلکتور ضریب اتلاف کناری باید اندک باشد که صرف‌نظر شده است.

$$U_l = \left[ \frac{N}{\frac{c}{T_{pm}} \left[ \frac{T_{pm} - T_a}{N + f} \right]^e} + \frac{1}{h_w} \right]^{-1} + \frac{\sigma(T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{\frac{1}{\varepsilon + 0.0059Nh_w} + \frac{2N + f - 1 + 0.133\varepsilon_p - N}{\varepsilon_g}} \quad (28)$$

$$U_b = \frac{k}{l} \quad (29)$$

در رابطه ۲۸،  $N$  تعداد پوشش کلکتور،  $T_{pm}$  دمای متوسط صفحه،  $T_a$  دمای محیط،  $f$  مدولی برای تصحیح ضریب تصحیح روزهای ابری  $h_w$  ضریب انتقال حرارت باد و  $\varepsilon_p$  ضریب نشر صفحه جذب می‌باشد. در ادامه، در روابط ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ پارامترهای مؤثر در ضریب اتلاف بالایی آمده است. همچنین  $k$  و  $l$  در رابطه ۲۹ به ترتیب نشان‌دهنده هدایت حرارتی عایق و ضخامت عایق می‌باشد.

$$f = (1 + 0.089h_w - 0.1166h_w\varepsilon_p) \times (1 + 0.07866N) \quad (30)$$

مقادیر  $r_0$  و  $r_1$  و  $r_k$  در رابطه ۱۵ برای آب‌وهوای زمستانی در عرض جغرافیایی متوسط به ترتیب برابر ۱/۰۳ و ۱/۰۱ و ۱/۰۰ می‌باشد. که با توجه به آن، مجهولات در این روابط به دست می‌آید. باید توجه داشت که  $A$  در رابطه ۱۴ برابر با عرض جغرافیایی منطقه است. در رابطه ۱۶،  $\theta_z$  زاویه مربوط به بالاترین نقطه‌ی آسمان،  $\phi$  عرض جغرافیایی،  $\delta$  انحراف نسبت به مکان زاویه‌ای خورشیدی در ظهر خورشیدی و  $\omega$  جابه‌جایی زاویه‌ای می‌باشد.

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (16)$$

$$\delta = 23.45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (17)$$

روابط ۱۸ و ۱۹، به ترتیب انتقال اتمسفری برای تابش مستقیم و ضریب انتقال مربوط به تابش پراکنده و مستقیم در یک آسمان صاف می‌باشد.

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp \left( \frac{-k}{\cos \theta_z} \right) \quad (18)$$

$$\tau_d = \frac{G_d}{G_o} = 0.271 - 0.294\tau_b \quad (19)$$

در رابطه ۲۰ شاخص وضوح ساعتی نیز تعریف شده است.

$$k_1 = \frac{I}{I_o} \quad (20)$$

در رابطه ۲۰،  $I$  نشان‌دهنده تابش روی سطح افقی و  $I_o$  نشان‌دهنده تابش خارج از جو می‌باشد. رابطه ۲۱ نسبت تابش پراکنده همسانگرد به تابش روی سطح افقی را نشان می‌دهد.

$$\frac{I_d}{I} = 1 - 0.09k_\tau \quad (21)$$

به طوری که  $I_b$  نشان‌دهنده تابش مستقیم است و از رابطه ۲۲ محاسبه می‌شود.

$$I_b = 1 - I_d \quad (22)$$

تا این مرحله، روابط مربوط به تعیین تابش به سطوح جذب بررسی شد. در ادامه، روابط مربوط به محاسبات کلکتورها بیان می‌شود. رابطه ۲۳ مربوط به ضریب انتقال حرارت تابشی می‌باشد.

$$h_r = \frac{4\sigma\bar{T}^3}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (23)$$

در رابطه ۲۳،  $\sigma$  ضریب تشعشع،  $\bar{T}$  دمای متوسط سیال و  $\varepsilon$  ضریب نشر صفحات داخل کانال می‌باشد. رابطه ۲۴ به عدد

$$h_w = \max \left[ 5, \frac{8.6v^{0.6}}{L^{0.4}} \right] \quad (39)$$

رابطه ۴۰ مربوط به زاویه شکست بعد از عبور تشعشع خورشیدی از پوشش کلکتور تحت زاویه برخوردی که با کلکتور داشته است، می‌شود. روابط ۴۱ تا ۴۶ مربوط به محاسبه ضرایب عبور، جذب و انعکاس می‌شود که مجموع این سه ضریب عدد یک خواهد بود.

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left( \frac{\sin \theta_1}{n} \right) \quad (40)$$

به طوری که  $\theta_1$  زاویه برخورد تابش می‌باشد.

$$\tau_a = \exp \left( \frac{kl}{\cos \theta_2} \right) \quad (41)$$

در رابطه ۴۱،  $k$  ضریب کاهش نورس پوششی و  $l$  نشان‌دهنده ضخامت عایق است. رابطه ۴۱ ضریب عبور نام دارد.

$$r_1 = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (42)$$

$$r_2 = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (43)$$

$$\tau = \frac{\tau_a}{2} \left( \frac{1-r_2}{1+r_2} + \frac{1-r_1}{1+r_1} \right) \quad (44)$$

روابط ۴۵ و ۴۶ بیانگر ضریب جذب و انعکاس می‌باشند.

$$\alpha = 1 - \tau \quad (45)$$

$$\rho = 1 - \tau - \alpha \quad (46)$$

رابطه ۴۷ مقدار انرژی خورشیدی برخورد کرده به صفحه را برحسب وات بر متر مربع (تابش خورشیدی جذب شده) بیان می‌کند.

$$S = (\tau\alpha)_{ave} I_t \quad (47)$$

$$(\tau\alpha)_{ave} = 1.01\tau\alpha \quad (48)$$

در پایان این بخش هم به نحوه محاسبه بازده کلکتور (هواگرمن خورشیدی) پرداخته شده است که رابطه ۴۹ بازده را نشان می‌دهد.

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c I_t} \quad (49)$$

## ۵. تحلیل و بررسی نتایج

در شکل ۳ تغییرات مساحت کلکتور برحسب تعداد پوشش‌های شیشه‌ای روی کلکتور هواگرمن نمایش داده شده است.

$$e = 0.430 \left( 1 - \frac{100}{T_{pm}} \right) \quad (31)$$

$$c = 520(1 - 0.000051\beta^2) \quad (32)$$

تعریف کمیتی که انرژی مفید دریافتی واقعی یک کلکتور را در حالی که کل سطح کلکتور در دمای ورودی سیال باشد به انرژی مفید دریافتی مرتبط کند متداول است. این کمیت ضریب تفکیک گرمایی کلکتور نامیده می‌شود، که رابطه ۳۳ نشان‌دهنده این پارامتر است.

$$F_R = \frac{m c_p}{A_c U_l} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{A_c U_l F'}{m c_p} \right) \right] \quad (33)$$

$$F'' = \frac{F_R}{F'} \quad (34)$$

رابطه ۳۴ نشان‌دهنده نسبتی از ضریب تفکیک گرمایی به ضریب کارایی کلکتور می‌باشد. روابط ۳۵ و ۳۶ نشان‌دهنده انرژی مفید دریافتی کلکتور است که به صورت تابعی از دمای سیال ورودی محاسبه شده است. چون مقدار دمای سیال ورودی همواره مقدار معلومی است، این رابطه یک بیان مناسب در هنگام آنالیز سیستم‌های انرژی خورشیدی است.

$$Q_u = A_c F_R (S - U_l (T_l - T_a)) \quad (35)$$

$$Q_u = m c_p (T_o - T_l) \quad (36)$$

در روابط ۳۵ و ۳۶،  $S$  معرف انرژی خورشیدی برخورد کرده به صفحه (تابش خورشیدی جذب شده) می‌باشد که در ادامه بعد از معرفی چند پارامتر به معرفی آن در قالب یک رابطه ریاضی پرداخته خواهد شد. در ادامه روابط ۳۷ و ۳۸ به ترتیب مربوط به دمای متوسط سیال و دمای متوسط صفحه جاذب کلکتور می‌شود.

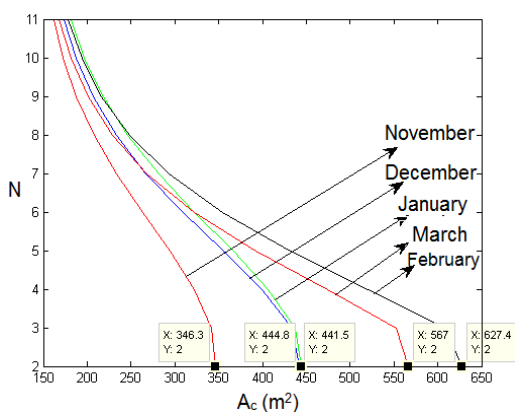
$$T_{fm} = T_{f1} + \frac{Q_u / A_c}{F_R U_l} (1 - F'') \quad (37)$$

$$T_{pm} = T_{f1} + \frac{Q_u / A_c}{F_R U_l} (1 - F_R) \quad (38)$$

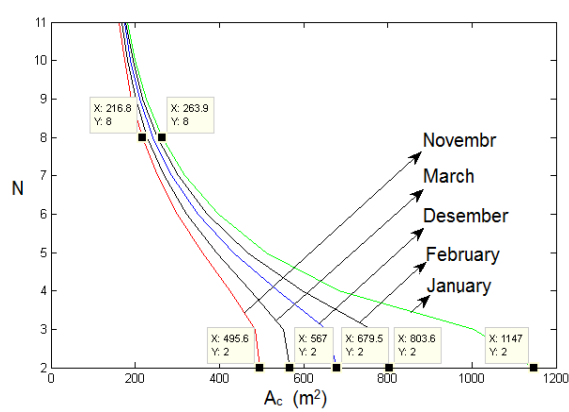
در روابط ۳۷ و ۳۸ تمامی پارامترها قبلاً معرفی شده‌اند؛ فقط  $T_{f1}$  معرف دمای ورودی هوا می‌باشد. رابطه ۳۹ بیانگر ضریب انتقال حرارت باد است که این پارامتر بین دو مقدار که حاصل از همرفت آزاد و اجباری است انتخاب می‌گردد. در این رابطه  $v$  مربوط به سرعت باد و  $L$  ریشه سوم حجم ساختمان است. در این رابطه از حداکثر سرعت باد جهت ضریب اطمینان طبق جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، پنج خط که هر کدام به یکی از پنج ماه آخر سال در ایران مربوط می‌شود، رسم شده است. در روند کلی این تغییرات مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد پوشش‌های شیشه‌ای، مساحت مورد نیاز کلکتور هواگرمکن برای تأمین گرمایش مورد نیاز کاهش پیدا می‌کند؛ زیرا با افزایش تعداد پوشش‌های شیشه‌ای در صد تابش بیشتری از خورشید جذب سطح کلکتور می‌گردد. مقدار دبی هوای ورودی به هر کلکتور هواگرمکن برابر  $0.03$  کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد و همین‌طور طبق جدول ۱ که نمایه ای از جدول کامل آن می‌باشد دمای میانگین هوا ( $T_a$ ) در طول روز برای ۵ ماه، متفاوت بوده و برای هر ماه مقدار اختصاصی آن اعمال شده

است. نتایج مقدار مساحت کلکتور برای دو پوشش شیشه‌ای نزدیک به تک‌پوشش است. مشاهده می‌شود در پوشش‌هایی با تعداد کم اختلاف مساحت در ماه‌های مختلف زیاد است، اما در تعداد زیاد از این پوشش‌های شیشه‌ای این مقدار مساحت تفاوت چندانی در ماه‌های مختلف ندارد. با توجه به اینکه سرعت باد در ماه‌های مختلف متفاوت است، براساس میانگینی از سرعت باد در ۵ ماه، طبق رابطه ۳۹ مقدار  $h_w$  در این ۵ ماه با هم متفاوت خواهد بود که برای ملموس‌بودن این تفاوت مقادیر در جدول ۲ گزارش شده است. بنابراین با اعمال این تفاوت و با در نظر گرفتن تفاوت‌هایی که قبلاً ذکر شد تغییرات مساحت به حالت شکل ۴ خواهد بود.



شکل ۴. تغییرات مساحت کلکتور بر حسب تعداد پوشش‌های شیشه‌ای در ۵ ماه از سال



شکل ۳. تغییرات مساحت کلکتور بر حسب تعداد پوشش‌های شیشه‌ای در ۵ ماه از سال

جدول ۲. مقادیر ضریب انتقال حرارت باد برای ۵ ماه

$h_w$	ماه
۸	November آبان
۸/۵	December آذر
۸	January دی
۹/۵	February بهمن
۱۰	March اسفند

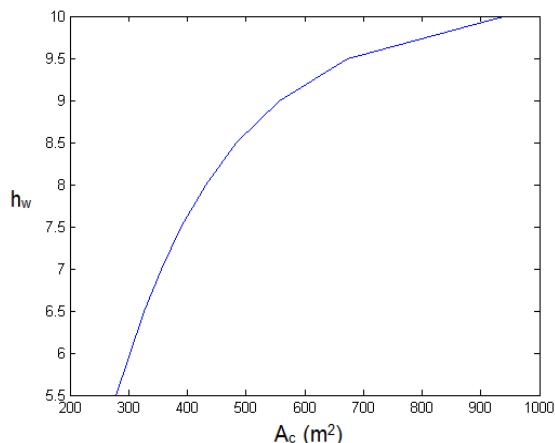
می‌شود با گذاشتن پوشش‌های شیشه‌ای، درصد بیشتری از انرژی تابنده کلی جذب صفحه جاذب می‌شود. طبق فرمول ۴۹، همان‌طور که از شکل‌های ۳ و ۴ دریافت می‌شود، با افزایش تعداد پوشش‌های شیشه‌ای، سطح کلکتور هواگرمکن مورد نیاز کاهش می‌یابد، راندمان افزایش خواهد داشت. از دیگر پارامترهای مؤثر و قابل ملاحظه در اندازه سطح کلکتور هواگرمکن، عمق کانال هواست. هرچه این عمق کمتر باشد،

این تفاوت‌ها در نتایج دو شکل ۳ و ۴ بر اساس تفاوت  $T_a$ ،  $h_w$  و  $S$  در ۵ ماه می‌باشد. برای درک بهتر تأثیر  $T_a$  و  $h_w$  بر مساحت کلکتور به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان این روند را مشاهده نمود. ثابت‌های در نظر گرفته شده عبارت‌اند از:

$$\dot{m} = 0.03 \text{ kg/s} \quad t = 0.01 \text{ m}$$

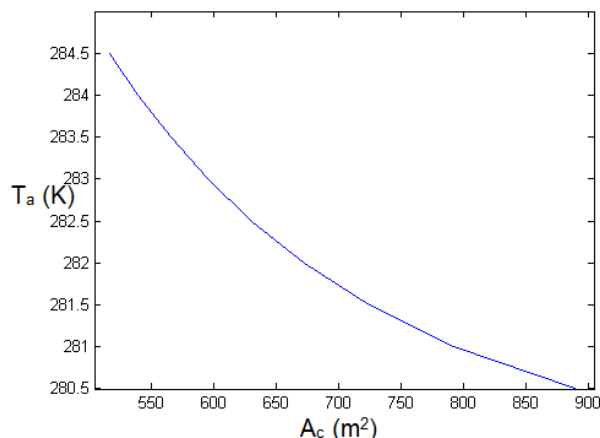
در شکل ۷ تغییرات راندمان کلکتور بر حسب تعداد پوشش‌های شیشه‌ای مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده

۰/۰۱ متر تا ۰/۱۹ متر در دسامبر و ژانویه رسم شده است. روند افزایشی در مساحت کلکتور هواگرمکن با افزایش مقدار عمق کانال هوا به خوبی مشهود است. گفتنی است تأثیر عمق کانال در  $D_h$  در عدد رینولدز و ضریب انتقال حرارت در داخل کانال است که به طور غیرمستقیم بر مساحت و راندمان اثرگذار است.

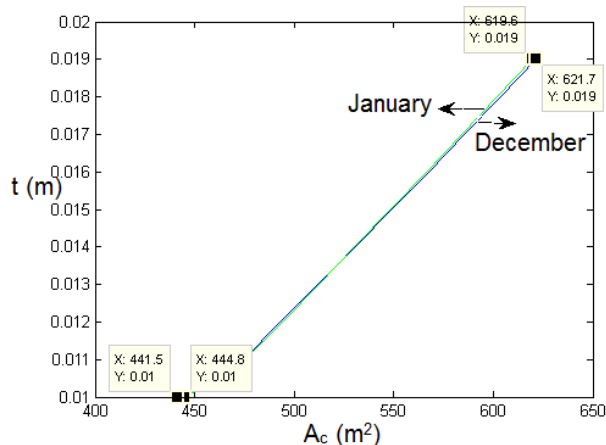


شکل ۶. تغییرات مساحت کلکتور برحسب تغییرات ضریب انتقال حرارت باد در ماه فوریه

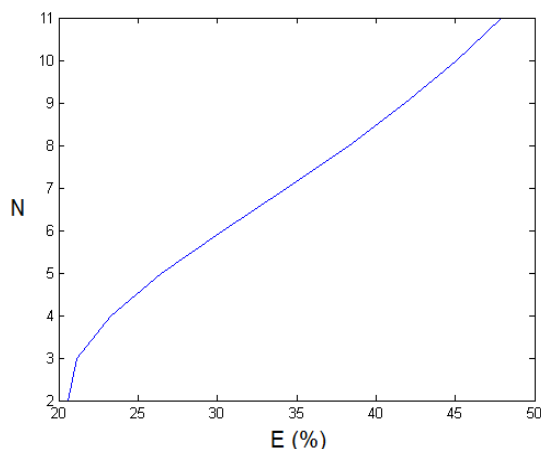
افت فشار در طول کانال بیشتر می‌شود؛ بنابراین به فن با قدرت بالاتری نیاز خواهد شد و البته دمای خروجی مقدار بیشتری خواهد داشت؛ اما چنانچه عمق کانال بیشتر شود به مساحت بیشتری جهت تأمین گرمای مورد نظر نیاز خواهد بود. شکل ۸ با فرض دبی ۰/۰۳ کیلوگرم بر ثانیه و تغییر مقدار عمق هوا از



شکل ۵. تغییرات مساحت کلکتور برحسب تغییرات دمای میانگین هوا در ماه فوریه



شکل ۸. تغییرات مساحت کلکتور بر حسب عمق کانال هوا در دسامبر و ژانویه



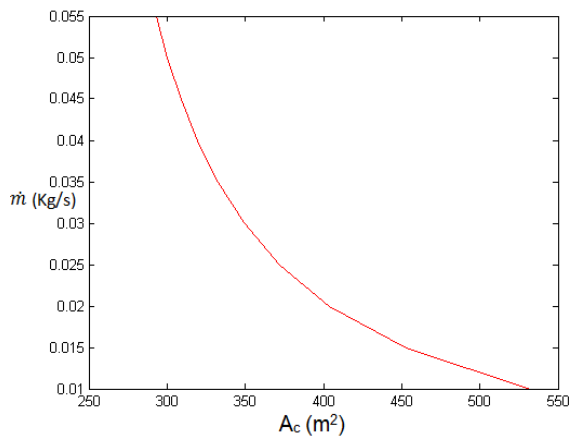
شکل ۷. تغییرات راندمان یک کلکتور برحسب تعداد پوشش‌های شیشه‌ای در ماه نوامبر

کلکتور پرداخته است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، بر اثر افزایش دبی هوای ورودی مساحت کلکتور کاهش می‌یابد. چون محاسبه شد در مجموع با توجه به بار گرمایشی ساختمان، حدود ۱/۶ کیلوگرم بر ثانیه دبی هوای ورودی به کلکتور نیاز است، طبیعی است هرچه ظرفیت یک کلکتور بالا رود در مجموع به تعداد کلکتورهای کمتر با سطح

در ادامه به بررسی تغییرات راندمان برحسب عمق کانال هوا پرداخته شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، چون در نمودار ۶ نشان داده شد که با افزایش عمق کانال، مساحت کلکتور زیاد می‌شود، طبق فرمول ۴۹ راندمان باید کاهش یابد که این موضوع در شکل ۹ نشان داده شده است. شکل ۱۰ به تغییرات سطح کلکتور هواگرمکن بر اثر تغییر دبی هوای ورودی به



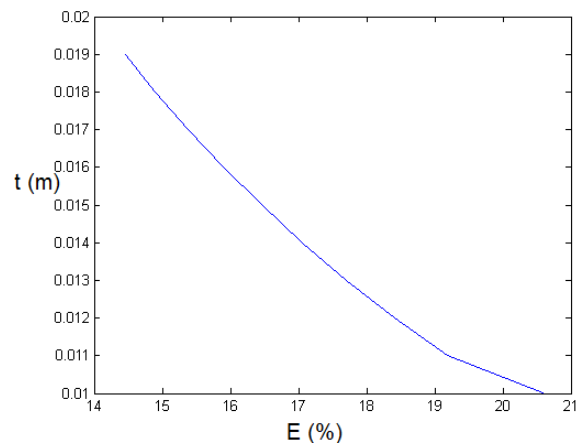
و ضریب اتلاف کلی دارد، مساحت کلکتور تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. بدیهی است هرچه ضخامت عایق بیشتر باشد، میزان اتلاف انرژی کسب‌شده از خورشید توسط صفحه جاذب هواگرمن کمتر بوده؛ بنابراین سطح کمتری نسبت به میزان ضخامت خواهد داشت. شکل ۱۲ تأثیر تغییرات ضخامت عایق را بر سطح کلکتور نشان می‌دهد.



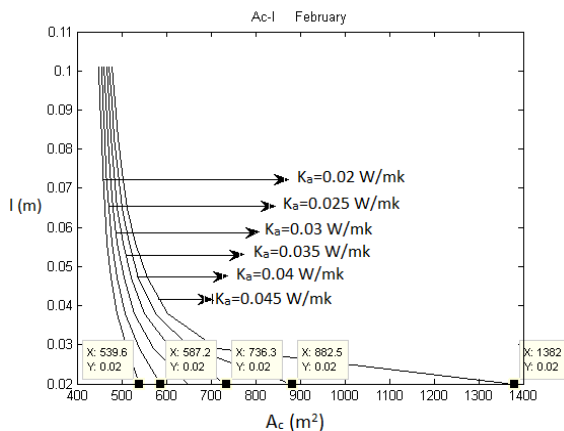
شکل ۱۰. تغییرات مساحت کلکتور برحسب دبی هوای ورودی در ماه نوامبر

مشخص (در مجموع مساحتی کمتر) نیاز می‌باشد. در ادامه شکل ۱۱ وضعیت تغییرات راندمان برحسب افزایش دبی را نشان داده است.

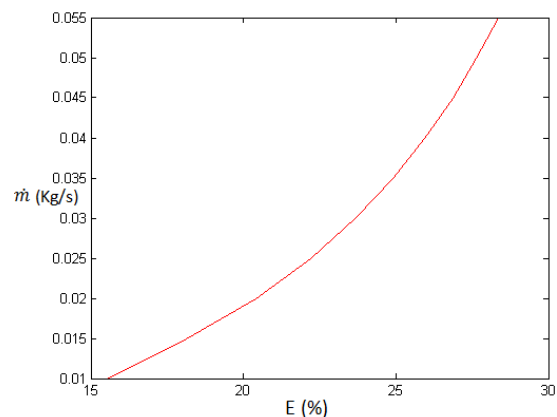
یکی دیگر از اجزای تأثیرگذار در سیستم‌های هواگرمن، عایقی است که در قسمت تحتانی هواگرمن قرار دارد. با توجه به ضریب اتلاف تحتانی که تأثیر مستقیم بر میزان اتلاف انرژی



شکل ۹. تغییرات بازده یک کلکتور برحسب عمق کانال هو در ماه نوامبر



شکل ۱۲. تغییرات مساحت کلکتور برحسب تغییرات ضخامت عایق در ۶ حالت از ضریب هدایت رسانایی عایق

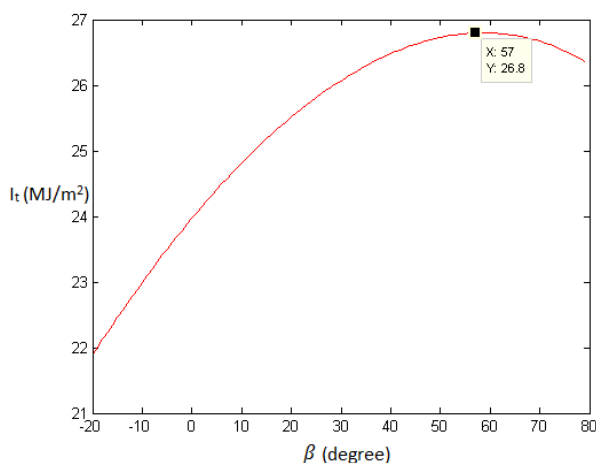


شکل ۱۱. تغییرات راندمان یک کلکتور برحسب تغییرات دبی هوای ورودی به کلکتور

نمی‌شود. برای درک بهتر در شکل ۱۳ این تغییرات در ضریب رسانایی ۰/۰۲ تا ۰/۱ متر بر متری کلکولین و ضخامت عایق از محدوده ۰/۰۱ تا ۰/۱ متر بررسی شده است که مشاهده می‌گردد تغییرات شدیدی به ازای ۰/۰۱ متر ضخامت عایق در مقدار مساحت کلکتور به وجود می‌آید. گفتنی است مقدار ضریب رسانایی ۰/۰۳۵ وات بر متر کلکولین تا نزدیک ۵ وات بر متر کلکولین مربوط

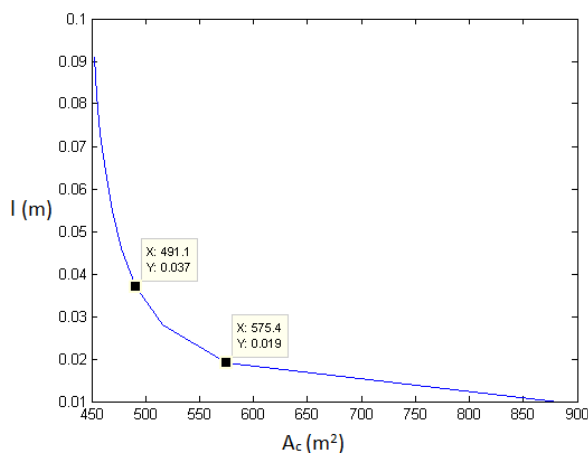
در شکل ۱۲ برای شش مقدار هدایت رسانایی عایق ( $k_a$ ) تغییرات مساحت کلکتور برحسب تغییرات ضخامت عایق در نظر گرفته شده است. اختلاف فاحش مساحت کلکتور در تغییر ضخامت عایق به اندازه ۰/۰۱ متر در ضریب هدایت رسانایی بالا مشاهده می‌شود؛ به طوری که در ضریب هدایت رسانایی پایین از مقدار ضخامت ۰/۰۲ متر به بعد تغییرات شدیدی ملاحظه

خیر. با توجه به نتایج و نمودارهای این مقاله و بهینه‌سازی صورت گرفته دریافت شد که براساس استاندارد موجود در مقادیر مختلف از پارامترهای مؤثر بر سطح کلکتور، بحرانی‌ترین ماه که نیاز به مساحت بیشتری از سطح کلکتور برای تأمین گرمایش ساختمان نمونه لازم دارد، ماه فوریه (بهمن) است که در شرایط مختلفی که بررسی شد مساحت‌های مختلفی به دست آمد که در جدول ۳ بیشترین و کمترین مساحت و همچنین یک حالت عادی از پارامترهای مختلف آورده شده است.



شکل ۱۴. تغییرات میزان تابش کلی رسیده به سطح کلکتور بر حسب زاویه شیب کلکتور در فوریه

به پشم معدنی (شیشه) و پشم سنگ می‌باشد و کمتر از آن مربوط به انواع عایق‌ها مثل پلی یورتان با فویل فلزی و پلی ایزوسیانورات با فویل فلزی می‌شود. بنابراین با توجه به انتخاب نوع عایق باید به شکل ۱۲ توجه کرد که اگر به فرض مثال عایقی با ضریب رسانایی ۰/۰۴۵ وات بر متر کلوین انتخاب می‌گردد ضخامت ۰/۰۲ و چه تأثیر قابل ملاحظه‌ای در مساحت عایق دارد. البته باید با توجه به قیمت‌های روز در نظر گرفت که اضافه کردن این مقدار ضخامت عایق صرفه اقتصادی دارد یا



شکل ۱۳. تغییرات مساحت کلکتور بر حسب تغییرات ضخامت عایق در ماه فوریه

جدول ۳. بیشترین و کمترین مساحت و حالت نرمال پارامترهای مختلف در بحرانی‌ترین ماه (فوریه)

	$A_c$ (m <sup>2</sup> )	$K_a$ (W/mk)	T (m)	m (kg/s)	l (m)
$A_{min}$	۶۳۵/۲	۰/۰۴۰	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۵
$A_{max}$	۱۸۰۴	۰/۰۴۵	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۲
Normal	۱۱۴۹	۰/۰۴۵	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۵

تغییرات انرژی تابشی کلی ( $I_t$  (MJ/m<sup>2</sup>)) بر حسب تغییرات زاویه شیب کلکتور مد نظر است. در جدول ۴ مقادیر شیب جهت جذب بیشترین مقدار انرژی از خورشید در شهر قائن گزارش شده است. در حال حاضر تحقیقاتی مشابه تحقیق حاضر در رابطه با شهر قائن انجام نشده است، اما طالبی‌زاده و همکاران [۳] بررسی‌های تعیین شیب را برای مناطق جنوب شرق کشور از جمله طبس، یزد و بیرجند انجام داده است که این سه شهر با عرض جغرافیایی به ترتیب ۳۳/۳۶، ۳۱/۵۴ و ۳۲/۵۲ و نزدیک به عرض جغرافیایی شهر قائن زاویه بهینه‌ای که برای پنج ماه

از جمله عواملی که واند کارایی کلکتور هواگرمکن را زیاد کند بیشتر شدن تابش جو روی این صفحات است. یکی از روش‌هایی که وجود دارد تا بتوان انرژی خورشیدی بیشتری را جذب صفحات کرد زاویه این کلکتورهای خورشیدی نسبت به افق است [۱۰].

چون صفحات کلکتور یا فتوولتائیک در طول سال ثابت هستند، می‌توان با تدبیری در وسائل جانبی آنها در طول سال حداقل یک تا دوبار زاویه آنها را نسبت به افق تغییر داد تا بتوان به میزان انرژی بیشتری دست یافت. شکل ۱۴ نمونه‌ای از

به‌طور میانگین به دست آورده‌اند به‌ترتیب برابر با ۵۱، ۵۱ و ۵۲ می‌باشد. با توجه به تقریب‌هایی که در این پژوهش برای میزان تابش رسیده به سطح کلکتورها با توجه به نبود وسائل اندازه‌گیری در شهر قاین و استفاده از مدل عددی وجود داشته است مقداری کمتر از زاویه به‌دست آمده برای کلکتورهای هواگرمن در شهر قاین می‌توان گفت مناسب است.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شده است تا اهمیت یکی از چندین کاربرد انرژی خورشیدی؛ یعنی استفاده از کلکتورهای هواگرمن جهت گرمایش فضا را نشان داده و به بررسی پارامترهای مؤثر برای بازدهی بیشتر این کلکتورها از لحاظ راندمان کاری و اقتصادی پرداخته است. همچنین یک نتیجه‌گیری در جدول ۴ برای یک طراحی قابل قبول از کلکتورها جهت تأمین بار گرمایشی در ساختمانی در منطقه نمونه ارائه شده است. با توجه به نتایج، پارامترهای گوناگونی بر راندمان و میزان مساحت مورد نیاز از کلکتورها مؤثر است که به‌صورت موردی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

هرچه تعداد پوشش‌های شیشه‌ای بیشتر باشد، میزان جذب انرژی خورشیدی توسط صفحات جذب بیشتر شده که این امر سبب نیاز به میزان کمتری از مساحت کلکتور جهت تأمین بار گرمایشی مورد نیاز می‌شود. در پوشش‌های شیشه‌ای با تعداد کم اختلاف مساحت در ماه‌های مختلف زیاد است، اما در تعداد زیاد از این پوشش‌های شیشه‌ای این مقدار مساحت تفاوت چندانی در ماه‌های مختلف ندارد. تغییرات دمای میانگین هوا با مساحت مورد نیاز از کلکتورها رابطه عکس و تغییرات ضریب انتقال حرارت باد رابطه مستقیم دارد. افزایش تعداد پوشش‌های شیشه‌ای به‌سبب جذب بیشتری از انرژی خورشیدی باعث افزایش راندمان کلکتورها می‌گردد. هرچه عمق کانال هوا کمتر

باشد، افت فشار در طول کانال بیشتر است؛ بنابراین احتیاج به فن با قدرت بالاتری نیاز خواهد شد که از لحاظ اقتصادی باید بدان توجه شود و البته دمای خروجی مقدار بیشتری خواهد داشت. اما در صورتی که عمق کانال بیشتر گردد؛ به مساحت بیشتری جهت تأمین گرمای مورد نظر نیاز خواهد بود. بیشتر شدن عمق کانال هوا کاهش راندمان را دربر خواهد داشت. هرچه دبی ورودی به کلکتورها بیشتر شود، در مجموع به مساحت کمتری از کلکتورها نیاز خواهد بود و راندمان کلی افزایش خواهد یافت. هرچه ضریب هدایت حرارتی عایق کمتر باشد، به مساحت کمتری از کلکتورها نیاز خواهد بود و نیز هرچه ضخامت این عایق‌ها بیشتر باشد به‌سبب کاهش اتلاف انرژی به مساحت کمتری نیاز می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل‌شده عایقی که میزان هدایت رسانایی آن پایین باشد ضخامت تأثیر زیادی در میزان مساحت مورد نیاز کلکتورها نخواهد داشت؛ به‌طوری‌که این تأثیر در عایق‌هایی با میزان هدایت رسانایی بالا کاملاً مشهود است. در ادامه می‌توان به بررسی انواع کلکتور ها به‌صورت صفحات جذب پره‌دار و با اعوجاج به‌وسیله نرم‌افزارهای طراحی مثل فلوئنت یا توسط کد CFD پرداخت. همان‌طور که در این مقاله شیب بهینه برای ۵ ماه مشخص شده است، بهتر است شیب بهینه برای منطقه قاین در تمام فصول سال و به‌صورت فصلی و همچنین ماهیانه با شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار متلب تعیین شود. چون امکان دارد مساحت زیادی از کلکتور را برای گرمایش در ماه‌های سرد سال استفاده کرد و متحمل هزینه‌ای گزاف شد، بهتر است به نوعی برای کاربرد این هواگرمن‌ها در بقیه فصول سال مثل امکان گرم‌کردن آب با استفاده از کمترین تجهیزات جانبی و کاملاً به‌صرفه مطالعه و طراحی نمود. از جمله کارهای تهویه مطبوعی که می‌توان برای هواگرمن‌ها انجام داد جایابی مناسب ورودی و خروجی هواگرمن در داخل یک اتاق است.

جدول ۴. بیشترین مقدار انرژی تابشی کل در زاویه شیب کلکتور

$\varphi = 33$			
$\beta$	$I_t$ مگاژول بر متر مربع	ماه	
۶۲	۲۶	November	آبان
۶۶	۲۴/۵	December	آذر
۶۴	۲۵	January	دی
۵۷	۲۶/۸	February	بهمن
۴۲	۳۲/۱۳	March	اسفند
۵۸		میانگین	

- [1] ReneWable Energy organization of IRAN, <http://www.sauna.org.ir> (accessed 23 Jun 2017).
- [2] John A. Duffie, William A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. John Wiley & Sons Ltd, New York, 2013.
- [3] P. Talebizade, M. Mehrabian, M. Abdolzade, Determining the optimum angle of slope of the ridge and flat solar collectors in parts of South-East Iran, *Sharif Mechanical Engineering*, Vol. 3-28, No. 1, pp. 77-86, (Technical Note) (in Persian فارسی).
- [4] A. Bahrami, K. Abbaspour, Determine the optimal slope angle for solar arrays in Karadj, *Iranian Energy Journal*, Volume 15, Issue 2, Summer 2010 (in Persian فارسی).
- [5] K. Jafar, A. Saadabadi, Determine the optimal tilt angle flat plate collectors in Tehran, *Mechanical Engineering*, No. 79, the twentieth year, 2009 (in Persian فارسی).
- [6] Hans-Martin Henning, *Solar- Assisted Air Condition in Bulding*, a handbook, 2<sup>nd</sup> rev. ed., 2007.
- [7] D. J. Harper Gavin, *Solar energy projects for the evil genius*, New York, 2007.
- [8] Deo Prasad, Mark Snow, *Designing With Solar Power*.
- [9] H. J. Yellott, Utilization of Sun and Sky Radiation for Heating and Cooling of Buldings, *ASHRAE*, Vol. 15, pp. 31-42, 1973.
- [10] M. M. El-Kassaby, M. H. Hassb, Investigation of a variable tilt angle Australian type solar collector, *Renewable Energy*, Vol. 4, No. 3, 1994 pp. 327-32.

پی نوشت

- 
1. solar energy
  2. Perez
  3. Duncan