

شبیه سازی عملکرد طرحی نو از کلکتور هواگرم خورشیدی برای سیستم سرمایش خورشیدی یک ساختمان نمونه در مناطق گرم و مرطوب شمال ایران

علیرضا مجیدیان*

دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساری، ساری، ایران

چکیده

هوا گرم کن های خورشیدی (یا کلکتورهای هواگرم) نوع خاصی از کلکتورهای خورشیدی هستند که سیال عامل آن ها هوا بوده و در سیستم هایی مانند سیستم تهویه مطبوع برای گرمایش هوای ورودی به ساختمان، خشک کن های خورشیدی و ... مورد استفاده قرار می گیرند. علاوه بر موارد فوق از هوای گرم خروجی نیز می توان برای استفاده در قسمت بازپای سیستم های سرمایش یا رطوبت زدایی خورشیدی مانند سیستم سرمایش دسیکنت نیز بهره گرفت. در این پژوهش ابتدا یک نوع کلکتور هوا گرم کن خورشیدی با ساختار و کاربرد جدید معرفی شده است. سپس قسمت های مختلف آن مانند پوشش کلکتور، صفحه جاذب، سیال عامل (هوا) و ... از لحاظ انتقال گرما، مدل سازی گردید. عمل کرد این سیستم در نرم افزار متلب شبیه سازی و صحت نتایج حاصله با استفاده از نتایج تجربی موجود بررسی، مشخصات کلکتور در بهترین حالت معرفی شده است. سپس نتایج حاصل از به کارگیری این نوع کلکتور برای گرمایش و سرمایش یک ساختمان نمونه در شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب در شمال کشور مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای محاسبه بار حرارتی ساختمان، از نرم افزار کریر استفاده شده است.

واژه های کلیدی: هواگرم کن خورشیدی، کلکتور هواگرم، سرمایش خورشیدی، چرخ دسیکنت.

Modeling of a New Design Solar Cooling System Collector for a Typical Building in Humid and Warm Region in North of Iran for Simulation

A. Majidian

Islamic Azad University, Mechanical Engineering Department, Islamic Azad University, Sari Branch, Sari, Iran

Abstract

Solar air heater is a special solar collector that its working fluid is air. It is used for warming of inlet air in HVAC system, solar dryer and for regeneration of desiccant wheel in solar cooling system. In this paper, a new design of air heater collector is introduced and its mathematical model for heat transfer in collector elements like collector coating, absorber,... are derived. Then by simulation of this collector in Matlab software, the best dimension of collector is determined. The results are validated by experimental data. The behavior of this kind of collector is studied in humid and warm region in north of Iran. Carrier software is used for building thermal load calculation.

Keywords: Solar air heater, solar refrigeration, desiccant wheel.

۱- مقدمه

گرایش به انرژی های نو و تجدیدپذیر در زمانی که تقاضا برای انرژی هر روز در حال افزایش بوده و قیمت آن نیز در حال بالا رفتن است، امری اجتناب ناپذیر است. حدود یک سوم انرژی الکتریکی مصرفی کشورمان به بخش خانگی اختصاص دارد لذا استفاده از انرژی نو در این بخش ضروری به نظر می رسد [۱]. از میان انواع مختلف انرژی های نو، انرژی خورشیدی تنها انرژی است که در بخش ساختمان به صورت فراگیر قابل استفاده است. با توجه به این که هزینه اولیه راه اندازی چنین سیستم هایی در حال حاضر بسیار بالا می باشد، طراحی سیستم تهویه مطبوع خورشیدی که بتواند با حداقل هزینه، بیشترین بازدهی و بیشترین صرفه جویی در مصرف سوخت را به همراه داشته باشد در گسترش استفاده از این سیستم، بسیار موثر است. در بین انواع مختلف کلکتورهای خورشیدی، کلکتورهای هواگرم تخت یکی از ساده ترین و ارزان ترین نوع کلکتور به شمار می آیند. در صورت افزایش بازدهی این نوع کلکتورها، استفاده از آنها، هم از لحاظ انرژی و هم از نظر اقتصادی به صرفه خواهد بود. تحقیقات زیادی در راستای افزایش بازدهی این نوع کلکتورها برای گرمایش ساختمان انجام شده است [۲]. از این کلکتورها در سیستم های سرمایش دسیکنت خورشیدی برای احیای مواد جاذب دسیکنت، نیز

بهره گرفته می شود. در این نوع سیستم ها، برای احیای ماده ی جاذب رطوبت، هوای با دمای بالا به قسمت بازپای چرخ دسیکنت فرستاده می شود. برای گرمایش هوا می توان هم از کلکتورهای با سیال عامل آب و هم کلکتورهای هواگرم استفاده کرد. مزیت اصلی آب گرم کن های خورشیدی، امکان ذخیره سازی انرژی است. اما پیچیدگی و هزینه این سیستم ها در مقایسه با هواگرم کن ها بیشتر می باشد. همچنین میزان ذخیره سازی انرژی در سیستم های سرمایش خورشیدی به دلیل هم زمان بودن حداکثر نیاز به سرمایش با حداکثر انرژی تابشی خورشیدی، کمتر می باشد [۳]. از این رو کلکتورهای هواگرم به عنوان یک گزینه بسیار مناسب برای سیستم های سرمایش دسیکنت خورشیدی مطرح می باشند. تاکنون در این زمینه تحقیق های زیادی انجام شده است. هنینگ [۴] در سال ۲۰۰۶ در موسسه تحقیقات انرژی خورشیدی در شهر فرایبورگ بعد از بررسی سیستم های مختلف سرمایش خورشیدی، سرانجام به عنوان نمونه یک سیستم سرمایش خورشیدی با کلکتورهای هواگرم را در یک بیمارستان نصب و اجرا کرد. چنین نمونه هایی نیز در اسپانیا، استرالیا، پرتغال و هلند نیز با استفاده از کلکتورهای هواگرم طراحی و اجرا شده است [۵]. همچنین فونگ و همکاران [۶] در تحقیقی به بررسی استفاده از کلکتورهای هواگرم به همراه یک گرم کن کمکی در یک

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a_majidian@iausari.ac.ir

سیستم سرمایش خورشیدی پرداخته و ضمن بهینه سازی این سیستم، با کنترل عمل کرد گرم کن، اثرات نوسانی انرژی خورشیدی را از خروجی سیستم سرمایشی حذف کردند. ایگر و پیترشکا [۷] نیز برای دستیابی به دمای هوای مناسب برای استفاده در قسمت احیای چرخ دسینکت و گرمایش از چند کلکتور حرارتی هواگرم کن به صورت سری و موازی استفاده کرده اند. یوسفی [۸] امکان استفاده از یک سیستم سرمایش و گرمایش خورشیدی با ظرفیت محدود، برای یک ساختمان آموزشی - اداری واقع در شهرستان قائم شهر، را مورد بررسی قرار داد. او نرم افزار TRNSYS که یک نرم افزار شبیه سازی سیستم های گذرا در بارهای ساختمانی است را برای مدل سازی، به کار گرفت. نتیجه کار ایشان نشان داد که در فصل سرد با خروج چیلر و منبع ذخیره آب سرد از سیستم، کلکتورهای لوله خلای حدود ۶۵ درصد بار گرمایشی ساختمان را می تواند تأمین کند. کلیس و همکاران [۹] سه نوع طرح بندی با تجهیزات مشابه، برای سیستم سرمایش و گرمایش خورشیدی مربوط به یک ساختمان اداری در جنوب ایتالیا را مورد بررسی قرار دادند. آنها مساحت سطح کلکتورها، حجم تانک ذخیره آب گرم، شیب کلکتورها و جریان اسمی مناسب پمپ در حلقه ی خورشیدی را بررسی نمودند. فلاحتکار و همکاران [۱۰] طرح سیستم سرمایش خورشیدی را، با چیلر جذبی تک اثره ی لیتیم بروماید-آب و کلکتورهای لوله داغ و یک تانک ذخیره ی عایق بندی شده، برای یک ساختمان اداری واقع در تهران پیاده کردند. مجموعه ی محاسبات آنان با استفاده از نرم افزار TRNSYS نشان داد که کلکتورها با شیب ۲۵ درجه روی سقف به تعداد ۱۶ عدد که هر کدام شامل ۳۰ لوله بوده اند، با مساحتی حدود ۴۵ مترمربع مناسب می باشند. نرخ برگشت سرمایه ۱۳ سال برآورد گردید که نسبت به سیستم سرمایش خورشیدی که با سیستم های هوایی معمولی ترکیب شده، کوتاه تر است. الیلی و همکاران [۱۱]، یک سیستم خورشیدی سرمایشی را در ابوظبی، با استفاده از کلکتورهای لوله خلای و چیلر جذبی طراحی و اجرا کردند. شبیه سازی با TRNSYS بر اساس اطلاعات آب و هوایی ابوظبی، به منظور امکان سنجی از یک چرخه ی خورشیدی جذبی آمونیاک و آب، در شرایط آب و هوایی و اقلیمی آن منطقه، انجام شد. نوآوری ده سال اخیر در خصوص کلکتور را می توان به سه بخش در راستای بهبود جنس، هندسه و سیال عامل تقسیم بندی نمود. پژوهشگران با تغییر خواص تابشی پوشش، راندمان کلکتور را به ۷۷٪ رساندند [۱۲]. فرناندز و همکاران [۱۳] لوله در بخش جاذب را حذف و صفحات مستطیلی شکل را در وسط جاذب قرار دادند. شجاعی زاده و همکاران [۱۴] راندمان اگزرژی کلکتور خورشیدی برای شرایط شهر کرمانشاه را بررسی نمودند و دریافتند که با به کارگیری نانوسیال، می توان راندمان را بهبود داد. هاوش و همکاران [۱۵]، بازده کلکتور با نانوسیال آلومینا را در شرایط محیطی اسکندریه مصر به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. در آزمایش های تجربی مشخص شد که استفاده از ۱۵٪ ذرات آلومینا در سیال می تواند موجب افزایش ۱۸٪ راندمان کلکتور شود. وکیلی و همکاران [۱۶] گزارش نمودند که استفاده از پنج هزارم گرافن می تواند موجب افزایش بازده به میزان ۹۳٪ گردد.

جدول ۱- مشخصات کلکتور طراحی شده

طول کلکتور	۴ متر (۲ متر عمودی و ۲ متر مایل)
عرض کلکتور	۶۰ سانتی متر
ضخامت مجاری هوا	۸ سانتی متر
ضخامت عایق	یک سانتی متر
جنس صفحه پوشش	آلومینیم با ضخامت یک میلی متر
رنگ صفحه پوشش	مشکی
تعداد پوشش	دو پوشش
جنس جعبه کلکتور	ورق آهن گالوانیزه
نوع جریان هوا	اجباری
فاصله صفحه جاذب و پوشش	۶ سانتی متر
زاویه نصب کلکتور	۹۰ درجه و ۳۵ درجه
ضریب عبور پوشش	۰/۸۸
ضریب جذب جاذب	۰/۹۵
نوع عایق	فوم پلی استایرن
ضخامت عایق	۵ سانتی متر
رسانایی گرمایی عایق	۰/۰۳۷ W/m K
محل نصب	دیوار جنوبی

در این مقاله ابتدا فرآیند عمل کرد یک سیستم سرمایش و رطوبت-زدایی دسینکت خورشیدی که برای مناطق گرم مناسب است، بیان شده است. سپس در ادامه با بررسی چند طرح از کلکتور هواگرم، یک نوع کلکتور هواگرم مناسب برای پشتیبانی از این سیستم معرفی شد. در نهایت نیز طرح انتخابی از کلکتور هواگرم از نظر انتقال گرما مدل سازی و شبیه سازی شده و عمل کرد آن مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- تشریح سیستم

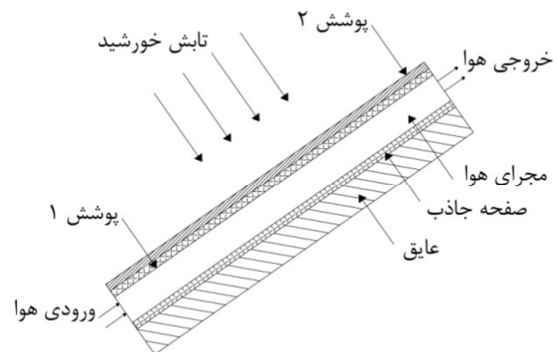
همان طور که اشاره شد در این پژوهش یک کلکتور هواگرم مناسب برای یک سیستم سرمایش دسینکت خورشیدی برای یک ساختمان مسکونی نمونه طراحی شده است. مشخصات ساختمان در جدول شماره (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات ساختمان نمونه

نوع کاربری ساختمان	مسکونی
محل ساختمان	شهر بابل
مساحت کل	۹۴ متر مربع
تعداد اتاق ها	سه عدد خواب با آشپزخانه و سرویس بهداشتی
اتاق بزرگ	۲۹/۵ مترمربع، با دو پنجره جنوبی و یک پنجره شرقی
اتاق غربی	۱۱ مترمربع، با یک پنجره غربی
اتاق شرقی	۱۴/۵ مترمربع، با یک پنجره شرقی

هدف اصلی در طراحی این کلکتور، کاهش هزینه لازم برای جذب انرژی خورشیدی به همراه تأمین حداکثر دمای ممکن سیال خروجی از کلکتور برای افزایش کارایی سیستم سرمایش و رطوبت زدایی خورشیدی در مناطق گرم و مرطوب کشور بوده است. در شکل ۱

اجزای کلکتور مدل شده، دیده می شود. شکل ۲ چگونگی قرار گرفتن کلکتور را بر روی ساختمان مورد نظر نشان می دهد. با توجه به بالا بودن شدت تابش خورشید در ضلع جنوبی ساختمان، این کلکتور در آن ضلع نصب می گردد.



شکل ۱- ساختار اجزای کلکتور

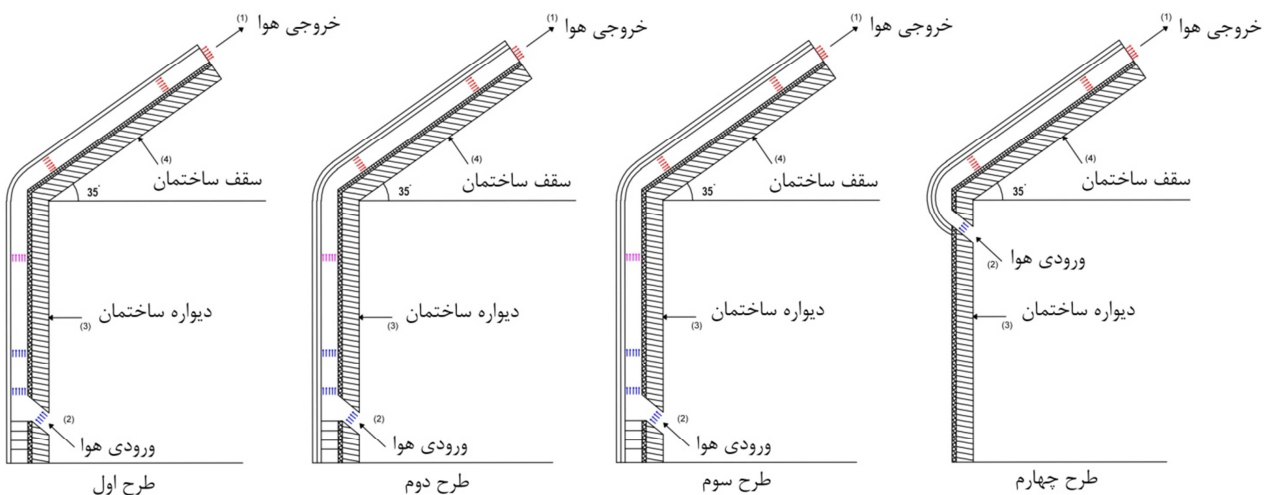
همچنین برای استفاده از اثرات دودکشی کلکتور در داخل ساختمان و تخلیه هوای داخل، ورودی هوا به داخل کلکتور از داخل ساختمان می باشد. کلکتور طراحی شده دارای ویژگی های زیر می باشد:

- به منظور کاهش هزینه، کلکتور طراحی شده از نوع تخت بوده و در دیوار جنوبی ساختمان و ادامه ی آن بر روی سقف نصب می گردد.

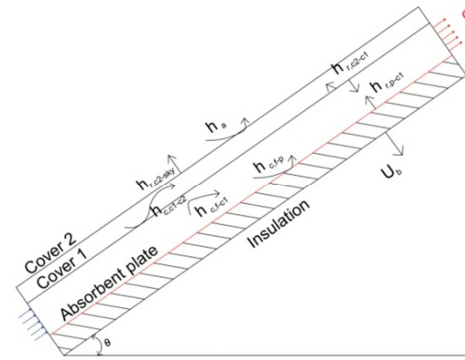
- برای تخلیه هوای گرم داخل ساختمان، مکش کلکتور از داخل ساختمان می باشد. (سرمايش طبيعي)
- جهت افزایش حداکثر دما در خروجی و افزایش مکش هوا از داخل ساختمان، طول کلکتور زیاد می باشد.

- برای جلوگیری از شکستگی پوشش بیرونی کلکتور و عایق کاری بیشتر، به جای شیشه از دو پوشش از جنس پلی کربنات شفاف استفاده شده است. فرآیند استفاده از این کلکتور بدین گونه است که از هوای گرم خروجی در فصول گرم و مرطوب به عنوان هوای بازیاب (احیاکننده) چرخ دسیکنت و در فصول سرد برای گرمایش فضای داخل ساختمان استفاده می شود. با توجه به این که از هوای گرم خروجی از کلکتور برای احیای ماده جاذب رطوبت (سلیکاژل) در چرخ دسیکنت استفاده می گردد، لذا لازم است دمای هوای خروجی از کلکتور به اندازه کافی بالا باشد [۱۷]. برای طراحی یک کلکتور مناسب، ابتدا شکل های مختلفی از کلکتور هواگرم کن که قابلیت نصب بر روی ساختمان مورد نظر را داشته باشند، بررسی شده اند. سپس هر یک از این طرح ها، مدل سازی و شبیه سازی شده و در نهایت طرح مناسب، انتخاب شده است. در شکل (۲) چهار طرح بررسی شده در این پژوهش را نشان می دهد. مشخصات این طرح ها عبارتند از:

- **طرح اول:** در این طرح، کلکتور از نوع تخت بوده که بخشی از آن به صورت عمودی بر روی دیوار جنوبی و بخش دیگر بر روی سقف جنوبی نصب شده است. کلکتور دارای یک پوشش شفاف بوده و هوا بین این پوشش و صفحه جاذب در جریان می باشد.
- **طرح دوم:** این طرح بر خلاف طرح اول، دارای دو پوشش شفاف می باشد. هوا بین پوشش داخلی و صفحه جاذب در جریان می باشد. در فضای بین دو پوشش، جریان هوا وجود ندارد.



شکل ۲- طرح های کلکتور به همراه قسمت های مختلف آن شامل ۱- خروجی هوا ۲- ورودی هوا ۳- دیواره ساختمان ۴- سقف ساختمان



شکل ۲- مدل انتقال گرمای کلکتور هواگرم تخت

گرفتن انتقال گرما بین هوا و صفحه جاذب و پوشش، معادلات حاکم برای قسمت‌های مختلف در حالت پایا بدست آمد.

معادله حاکم بر پوشش بیرونی:

جمله سمت چپ معادله بقای انرژی برای پوشش دوم ($I\alpha_{c2}$)، میزان جذب انرژی تابشی خورشیدی ورودی در پوشش دوم در واحد سطح و در واحد زمان می باشد که بخشی از این مقدار شار انرژی ورودی به پوشش دوم، به صورت جابجایی $h_d(T_{c2}-T_a)$ و تابشی $h_{r,c2-sky}(T_{c2}-T_{sky})$ با محیط تبادل می شود و بخش دیگری به صورت تابشی و همرفتی $(h_{r,c1-c2}+h_{c,c1-c2})(T_{c1}-T_{c2})$ بین دو پوشش انتقال گرما صورت می گیرد:

$$I\alpha_{c2} = h_d(T_{c2} - T_a) + h_{r,c2-sky}(T_{c2} - T_{sky}) + (h_{r,c1-c2} + h_{c,c1-c2})(T_{c1} - T_{c2}) \quad (1)$$

معادله حاکم بر پوشش درونی:

جمله سمت چپ معادله بقای انرژی ($I(\alpha_{c1})$)، میزان جذب انرژی تابشی خورشیدی عبور نموده از پوشش دوم ($I\tau_{c1}$) که در پوشش اول در واحد سطح و در واحد زمان جذب می شود، است. بخشی از این مقدار شار، به صورت جابجایی و تابشی $(h_{r,q1-c2} + h_{c,q1-c2})(T_{c2} - T_a)$ با پوشش دوم تبادل می شود، بخش دیگری به صورت همرفتی $h_{c,f-q}(T_q - T_f)$ با سیال و بخش دیگر به صورت تابشی $h_{r,p-q}(T_q - T_p)$ به صفحه جاذب منتقل می شود:

$$I(\tau_{c1})(\alpha_{c1}) = (h_{r,q1-c2} + h_{c,q1-c2})(T_{c2} - T_a) + h_{c,f-q}(T_q - T_f) + h_{r,p-q}(T_q - T_p) \quad (2)$$

معادله حاکم بر صفحه جاذب:

بخشی از انرژی جذب شده در صفحه جاذب به جریان سیال داده می شود و بخشی نیز به وسیله انتقال گرمای تابشی به پوشش درونی می رسد و قسمت دیگر آن از طریق زیر کلکتور تلف می گردد.

$$I(\tau_{c2})(\alpha_{c1}) = h_{c,f-p}(T_p - T_f) + h_{r,p-q}(T_p - T_q) + U_b(T_p - T_a) \quad (3)$$

معادله حاکم بر جریان هوا:

$$mc \frac{dT_f}{dx} = h_{c,f-p}(T_f - T_p) + h_{c,f-c1}(T_{c1} - T_f) \quad (4)$$

انتقال گرمای تابشی بین صفحات [۱۷]

$$h_{r,1-2} = \frac{\sigma(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1} \quad (5)$$

و همچنین برای دمای آسمان از رابطه زیر استفاده شد [۱۷]:

$$T_{sky} = T_a - 6 \quad (6)$$

مقدار ضریب انتقال گرمای همرفتی بر روی پوشش بیرونی کلکتور وابسته به مقدار سرعت باد می باشد و مقدار آن با تقریب خوبی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد [۱۷].

$$h_d = 5.7 + 3.8V \quad (7)$$

از طرف دیگر انتقال گرما بین دو پوشش پلی کرنباتی کلکتور از نوع جابه جایی آزاد می باشد که مقدار ضریب انتقال گرمای همرفتی بین دو پوشش برابر است با:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{\delta} \quad (8)$$

- **طرح سوم:** در این طرح جریان هوا در زیر صفحه جاذب و روی بستر کلکتور می باشد. یک صفحه شفاف در روی صفحه جاذب برای جلوگیری از افت حرارتی کلکتور نصب شده است.

- **طرح چهارم:** این طرح از لحاظ ساختاری کاملاً شبیه طرح دوم است با این تفاوت که طول کلکتور کمتر بوده و کلکتور تنها بر روی سقف ساختمان نصب شده است.

۲-۲- مدل سازی کلکتور

شکل ۳ کلکتور هواگرم خورشیدی را به همراه مکانیزم انتقال حرارت در بخش‌های مختلف آن نشان می دهد. برای مدل سازی عمل کرد کلکتور علاوه بر مشخصات فیزیکی کلکتور باید شرایط ورودی (دما و سرعت هوای ورودی) و شرایط محیطی مانند دمای هوای محیط سرعت باد، مقدار تابش و ... مشخص گردد.

مقدار تابش خورشید با توجه به روش پیشنهادی دافی و بکمن [۱۷] و بر اساس طراحی انجام شده برای دو زاویه ۹۰ درجه و ۳۵ درجه (شیب سقف ساختمان) در طول یک سال به صورت لحظه ای محاسبه شده است. اطلاعات دما و رطوبت نیز از سایت سازمان هواشناسی [۱۸] و سایت سازمان انرژی های نو (سانا) [۱۹] استخراج شده است.

با توجه به نوع عمل کرد کلکتور و انتقال گرما بین جریان هوا و صفحه جاذب، می توان تغییرات دمایی را تنها در راستای طول کلکتور در نظر گرفته و مسئله را به صورت یک بعدی و با استفاده از روش تفاضل محدود^۱ حل نمود. برای مدل ریاضی عمل کرد کلکتور و استخراج معادلات حاکم فرضیاتی در نظر گرفته شده است که برخی از این فرضیات عبارتند از:

- جریان هوا اجباری، پایا و یک بعدی در نظر گرفته می شود.
- خواص ترموفیزیکی هوا و کلکتور ثابت و مستقل از دما می باشند.
- سرعت هوا در تمام مقاطع کانال ثابت است.
- به دلیل ضخامت ناچیز پوشش ها از رسانش گرمایی داخل آن صرف نظر می گردد.
- ضریب انتقال گرمای تابشی تابع دما بوده و از رابطه (۵) محاسبه می شود.
- انتقال گرمای همرفتی بین دو پوشش، طبیعی می باشد.
- با نوشتن معادلات انتقال گرما و بقای جرم برای قسمت های مختلف کلکتور مانند صفحه جاذب، پوشش ها و جداره ها و همچنین با در نظر

¹ Finite Difference Method (FDM)

با زاویه β نسبت افق نصب شده است به صورت زیر می‌باشد [۱۷]. کل تابش ورودی به سطح کلکتور را می‌توان به سه بخش تابش مستقیم به کلکتور، تابش دیفیوز و تابش حاصل از انعکاس نور از زمین اطراف بر روی کلکتور (ρ_g) تقسیم نمود. بنا بر این:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_{pg} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (۱۴)$$

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (۱۵)$$

در رابطه فوق ϕ عرض جغرافیایی محل، ω زمان محاسبه تابش است و نسبت به ۱۲ ظهر سنجیده می‌شود و δ انحراف زاویه زمین در طول سال بوده و برای n امین روز سال (شروع از اول ژانویه) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\delta = 23.45 \sin \left(306 - \frac{284 + n}{365} \right) \quad (۱۶)$$

از طرفی مقدار تابش در خارج از جو را می‌توان با استفاده از مقدار ثابت خورشیدی که برابر ۱۳۶۷ وات بر متر مربع می‌باشد، محاسبه کرد [۱۷]. بنابراین مقدار تابش خورشیدی روی سطح کلکتور با توجه به شرایط جوی و مقادیر ضرایب ابر و اقلیم، برای تمامی ساعات سال محاسبه می‌گردد (شکل ۵).

۲-۴- حل مدل

در ادامه برای حل معادلات بدست آمده از مدل‌سازی ریاضی، کلکتور در راستای طول شبکه بندی شده است (شکل ۴). سپس با داشتن شرایط مرزی مسئله و شرایط محیطی (تابش خورشید، دمای محیط و سرعت باد) معادلات حاکم در تمامی شبکه با حدس مقادیر دمای پوشش‌ها و تصحیح آن حل شده‌اند. سپس جهت بررسی صحت نتایج بدست آمده، پروفیل دمای هوای خروجی از کلکتور در طول یک روز با نتایج تجربی در دسترس [۲۱] مقایسه شده است (شکل ۶). بدین ترتیب، با حل معادلات پروفیل دمای پوشش‌ها، صفحه جاذب و هوا در طول کلکتور برای تمامی سال بدست آمد. به عنوان نمونه شکل ۷ تغییرات دمای هوا را در طول کلکتور برای شهر آبادان در ساعت ۱۲ روز ۱۸م آگوست که مقدار دما و رطوبت محیط به ترتیب ۳۰ درجه سلسیوس و ۸۰ درصد اعلام شده است را نشان می‌دهد. با استخراج پروفیل دما در طول کلکتور، دمای هوای خروجی از کلکتور که مطلوب مسئله می‌باشد، نیز محاسبه می‌گردد. با داشتن دمای هوا در خروجی کلکتور میزان انرژی مفید از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Q_u = m \cdot C_{pa} (T_{air, out} - T_{air, in}) \quad (۱۷)$$

که در این صورت برای بازده کلکتور می‌توان نوشت:

$$\eta = \frac{Q_u}{IA} \quad (۱۸)$$

مقدار ناسلت بین دو پوشش با استفاده از مقادیر رایلی (Ra) و پرانتل (Pr) از رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

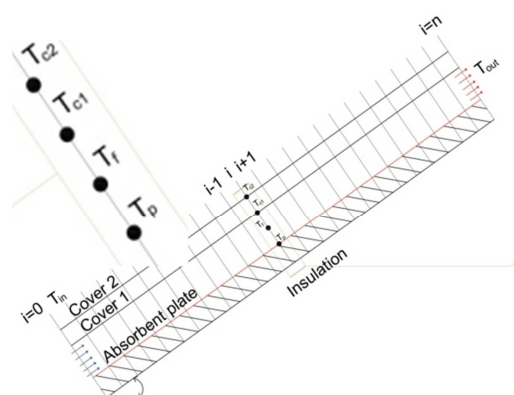
$$Nu = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708 (\sin 1.8 \beta)^{1.6}}{(Ra) \cos \beta} \right] A + [B - 1] \quad (۹)$$

$$A = \left[1 - \frac{1708}{(Ra) \cos \beta} \right] \quad (۱۰)$$

$$B = \left(\frac{(Ra) \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} \quad (۱۱)$$

β ضریب انبساط حجمی بوده که مقدار آن برای هوا برابر عکس دما می‌باشد. همچنین مقدار ضریب انتقال گرمای همرفتی بین جریان هوا و صفحه جاذب با توجه به پیشنهاد کیز و کرافورد [۲۰] برای کلکتورهای خورشیدی هواگرم از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

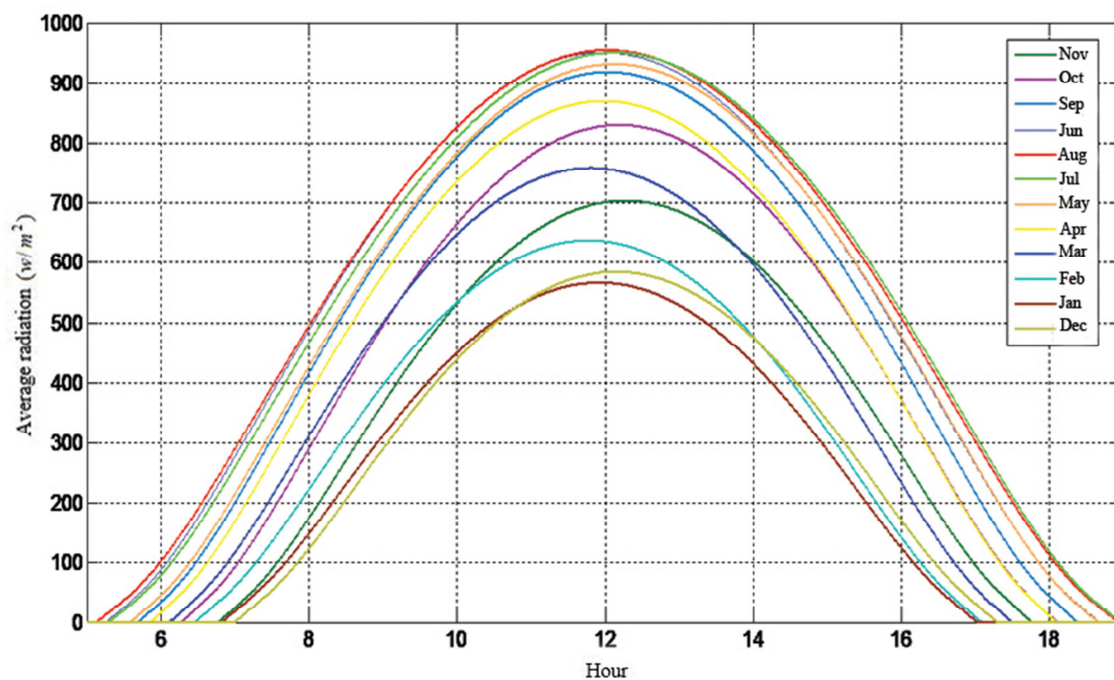
$$Nu = 0.0158 Re^{0.8} \quad (۱۲)$$



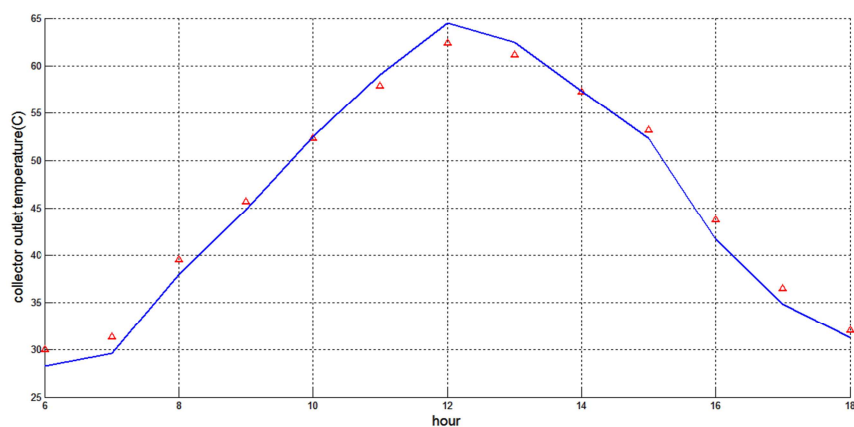
شکل ۴- شبکه جهت حل عددی کلکتور هواگرم تخت

۲-۳- محاسبه شدت تابش خورشید

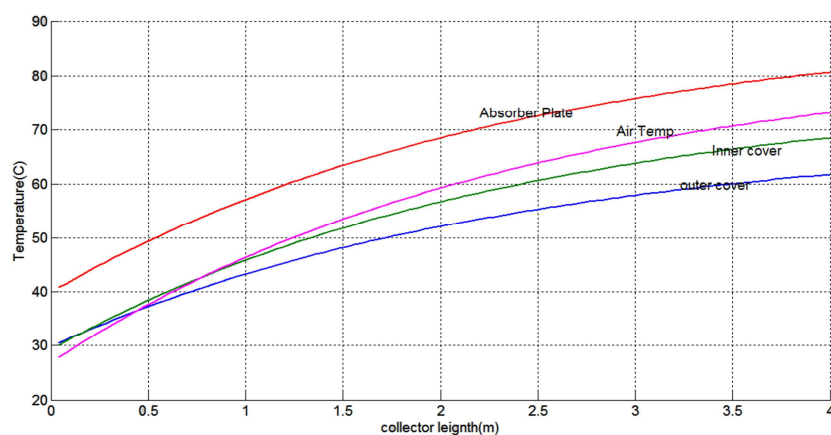
یکی از مهم‌ترین نکات در انجام محاسبات و شبیه سازی سیستم‌های خورشیدی، محاسبه‌ی میزان تابش خورشید بر سطح کلکتور خورشیدی در ساعات مختلف روز و روزهای مختلف سال می‌باشد. هر چند محاسبه مقدار دقیق تابش خورشید با توجه به طبیعت تابش خورشید و تغییرات غیر قابل پیش‌بینی میزان ابری بودن هوا، امکان‌پذیر نیست ولی با توجه به نتایج تجربی موجود از اطلاعات هواشناسی، محاسبات آماری و محاسبات هندسی مربوط به حرکت زمین به دور خورشید و دور محور خود، می‌توان مقدار تابش خورشید را با استفاده از روش‌های بیان شده در منابع محاسبه کرد. شدت تابش خورشید علاوه بر زمان اندازه گیری تابش خورشید (روز و ساعت) به مکان اندازه گیری شدت تابش (طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا) و میزان شفافیت آسمان در لحظه‌ی محاسبه، بستگی دارد. چگونگی محاسبه مقدار تابش بر روی سطح کلکتوری که



شکل ۵- مقدار متوسط تابش خورشید در شهر بابل در روز ۱۵ام ماه های مختلف سال (با اعمال ضرایب ابرناکی)



شکل ۶- تغییرات دمای خروجی از کلکتور در طول روز و صحنه گذاری نتایج با استفاده از نتایج تجربی

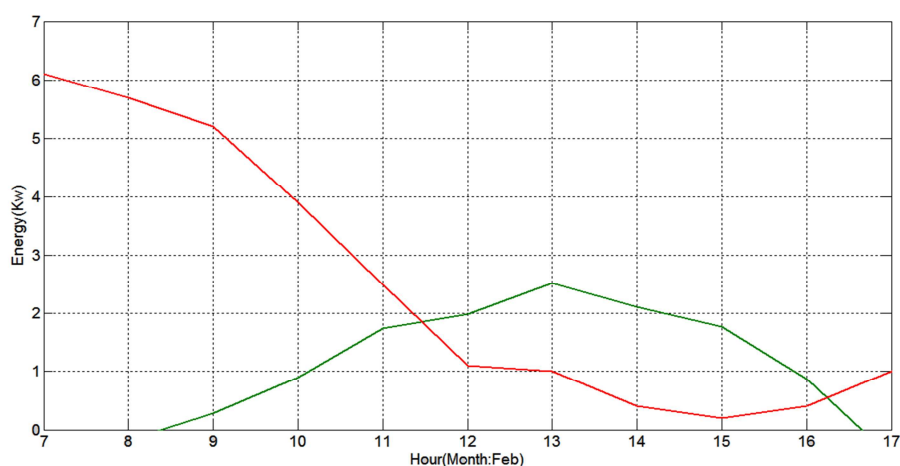


شکل ۷- تغییرات دمای هوا در طول کلکتور و دمای صفحه جاذب و پوشش های کلکتور بعد از ظهر ۱۸ام آگوست در شهر آبادان

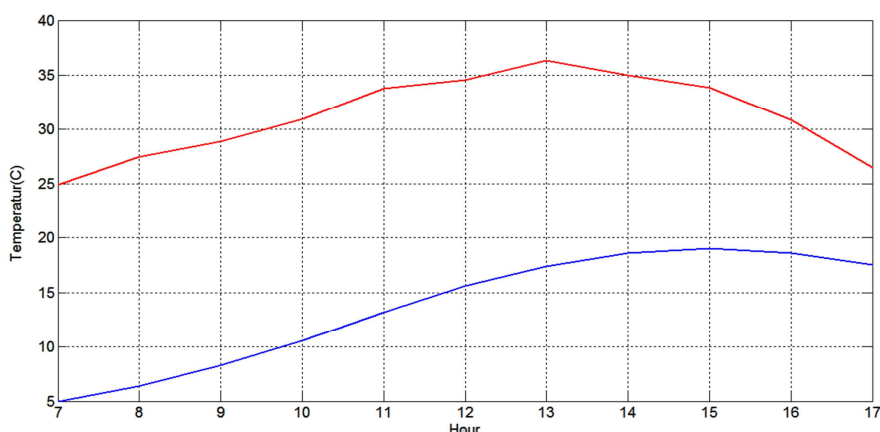
۳-۱- ارزیابی نتایج حاصل از استفاده از کلکتور

در ماه‌های گرم سال کلکتور طراحی شده به دو دلیل به تهویه هوای داخل ساختمان (سرمایش) کمک می‌کند. در جنبه اول، به دلیل اینکه هوای ورودی به کلکتور از هوای داخل ساختمان می‌باشد، لذا این فرآیند سبب خروج هوای نامطلوب داخل ساختمان می‌شود. این حالت ممکن است به دو صورت طبیعی و اجباری رخ دهد. در حالتی که سیستم سرمایش دسیکنت در حال استفاده باشد، به دلیل نیاز به دبی زیاد هوا در قسمت بازپای چرخ دسیکنت، تخلیه هوای از طریق کلکتور به صورت جریان اجباری و از طریق فن انجام می‌گیرد. اما در صورتی که سیستم دسیکنت در مدار نباشد، کلکتور طراحی شده می‌تواند به عنوان یک دودکش خورشیدی ساده عمل کرده و تحت تأثیر تابش خورشید و جابه‌جایی آزاد داخل کلکتور سبب تخلیه هوای داخل ساختمان گردد. در جنبه دوم نیز به دلیل استفاده از هوای خروجی از کلکتور به عنوان هوای گرم احیا کننده چرخ دسیکنت، کلکتور طراحی شده سبب کاهش رطوبت هوای ورودی به ساختمان و کاهش میزان گرمای نهان موجود در هوا در سیستم سرمایشی می‌گردد. این امر سبب کوچک‌تر شدن اندازه سیستم سرمایشی مورد نیاز ساختمان (مثلاً کولر گازی) و کاهش میزان انرژی مصرفی آن (برق) می‌شود. به عنوان نمونه، برای لحظه مورد نظر دمای هوای خروجی از کلکتور (احیای کننده چرخ دسیکنت) برابر ۷۰ درجه سلسیوس محاسبه شده است. با مهیا بودن این دما برای دبی یکسان هوا در دو قسمت از چرخ دسیکنت، می‌توان رطوبت هوای محیط در خروجی از چرخ را تا ۳۰ درصد کاهش داده که با انجام فرآیند سرمایش تبخیری در خروجی چرخ، دمای هوای ورودی به ساختمان تا دمای ۲۵/۵ درجه سلسیوس کاهش خواهد یافت که در صورت نیاز به سرمایش بیشتر می‌توان از یک سیستم سرمایشی کمکی بهره گرفت. برای فصول سرد سال نیز، با فرستادن حرارت داخل ساختمان به کلکتور هواگرم و بازگشت هوای گرم به داخل ساختمان می‌توان در طول روز، کل یا بخشی از بار گرمایی مورد نیاز ساختمان را تأمین

کرد. برای ارزیابی عمل‌کرد کلکتور در حالت گرمایی، ابتدا باید نیاز حرارتی ساختمان در طول روز مشخص گردد، برای این منظور ساختمان مورد نظر در نرم افزار Carrier مدل‌سازی شده و بار حرارتی ساختمان به صورت ساعتی محاسبه شده است. برای سهولت در انجام محاسبات، یک خانه ۵۵ متری و به صورت تک ناحیه‌ای و با دمای طرح داخل ۲۵ درجه سلسیوس در نرم افزار کریر تعریف شده است و مصالح آن نیز مطابق استاندارد مرکز ملی تحقیقات ساختمان انتخاب شده است. سپس با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی، مقدار دبی هوای مورد نیاز برای گرمایش ساختمان محاسبه شده است. با فرستادن این مقدار هوا به داخل کلکتور هواگرم از طریق یک فن، دمای هوای خروجی از کلکتور و در نتیجه آن مقدار انرژی مفید بدست آمده برای تمامی ماه‌های سرد سال محاسبه شده است. به عنوان نمونه در شکل ۸ که تحلیل سیستم را برای ماه بهمن در شهر بابل نشان می‌دهد، مقدار انرژی مورد نیاز ساختمان در طول روز که با استفاده از نرم افزار کریر محاسبه شده است با انرژی مفید حاصل از کلکتور هواگرم مقایسه شده است که در نتیجه آن در طول روز حدود ۴۱ درصد انرژی حرارتی مورد نیاز از طریق انرژی خورشیدی تأمین شده است. با انجام این شبیه سازی برای ماه‌های دیگر و برای چند شهر میزان صرفه جویی در مصرف انرژی (گاز طبیعی) ساختمان از طلوع تا غروب آفتاب محاسبه شده است. دمای هوای خروجی از کلکتور وابسته به دبی هوا می‌باشد. در صورتی که دبی هوای داخل کلکتور کم باشد، میزان افزایش دما زیاد می‌باشد. در این صورت ابتدا هوای گرم خروجی با هوای خنک بیرون مخلوط شده و در نتیجه آن، هوا با دمای مناسب به داخل ساختمان تزریق می‌گردد. مقدار کل دبی هوای مورد نیاز برای تهویه ساختمان نیز با استفاده از نتایج خروجی حاصل از شبیه سازی ساختمان در نرم افزار کریر محاسبه شده است. شکل ۹ تغییرات دمای خروجی از کلکتور را به همراه دمای هوای محیط برای شهر بابل در ماه بهمن نشان می‌دهد. قابل ذکر است که دمای هوای ورودی به کلکتور برابر دمای هوای طرح داخل می‌باشد.



شکل ۸- مقدار انرژی مورد نیاز ساختمان از نرم افزار Carrier (قرمز) و مقدار انرژی مفید حاصل از هوای گرم خروجی کلکتور هواگرم (سبز) در ماه بهمن - بابل



شکل ۹- تغییرات دمای هوای محیط و دمای هوای خروجی از کلکتور در طول روز برای ماه بهمن در شهر بابل

۶- فهرست علائم

شدت تابش خورشید، W/m^2	I
دبی هوا، kg/s	m
دما، $^{\circ}C$	T
ضریب انتقال حرارت تابشی، W/m^2K	h
ضریب انتقال حرارت کلی، W/m^2K	U
ضریب هدایت حرارتی، W/mK	K
عدد رینولدز	Re
سرعت باد، m/s	V
عدد رایلی	Ra
سطح کلکتور، m^2	A
قطر هیدرولیکی، m	D_h
ضریب جذب	α
ضریب صدور	ε
ضریب عبور پوشش	τ
ضریب استفان - بولتزمن	σ
ضریب انعکاس	ρ
سیال	زیر نویس
صفحه جاذب	f
پوشش کلکتور	P
هوا	$C2, C1$
انتقال حرارت جابه جایی	a
انتقال حرارت تابشی	c
انرژی مفید	R
زمین	U
تابش دیفیوز	G
تابش مستقیم	D
	B

۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل نشان می دهد که در مناطق گرم و مرطوب شمال (بابل) کشور که سیستم سرمایش دسیکنت خورشیدی برای این مناطق بسیار مناسب می باشد، کلکتور طراحی شده قادر است دمای مورد نیاز برای باز یاب چرخ دسیکنت (۶۰-۷۰ درجه سلسیوس) را به طور متوسط برای ۸۵ درصد روزهای گرم سال و برای شهرهای شمالی کشور (بابل) به طور متوسط برای ۷۰ درصد روزهای گرم سال تأمین کند. از دید کاربردی با توجه به این که در سیستم های هوایی- خورشیدی تقریباً امکان ذخیره سازی انرژی برای شب وجود ندارد لذا سیستم طراحی شده، بیشتر برای ساختمان های اداری، سوله های کارگاهی، مدارس و ... که به صورت تک شیفت بوده و فقط در طول روز نیاز به سیستم سرمایش و گرمایش می باشند، مناسب می باشد. همچنین علاوه بر موارد فوق در بسیاری از مناطق کشور (به عنوان مثال مناطق شمال کشور) به دلیل نوع آب و هوایی آن، در تابستان تنها در طول روز نیاز به سیستم سرمایشی وجود دارد که با توجه به شبیه سازی انجام شده برای این مناطق، این سیستم می تواند با حذف گرمای نهان موجود در هوای فرآیند رطوبت زدایی، انرژی مورد نیاز برای انجام سرمایش را تا ۴۸ درصد در روزهای گرم تابستان کاهش دهد. برای فصول سرد سال نیز هر چند این سیستم تنها در طول روز قابل استفاده می باشد ولی با این وجود در شهرهای شمالی مصرف گاز طبیعی را برای گرمایش در روزهای سرد سال به طور متوسط تا ۴۰ درصد کاهش می دهد. همچنین در صورت ارزیابی این سیستم برای ساختمان های با کاربری اداری (از ساعت ۸ صبح الی ۴ عصر) درصد صرفه جویی برای شهرهای شمالی به طور متوسط تا ۵۲ افزایش خواهد یافت.

۵- قدردانی

بدین وسیله از مسوولین دانشگاه آزاد اسلامی- واحد ساری که اعتبار بوده پژوهشی این طرح را تصویب و تأمین کرده اند، تشکر می شود.

۷- مراجع

- [۱] خلاصه وضعیت آماری صنعت برق کشور، معاونت منابع انسانی و تحقیقات، دفتر فن آوری اطلاعات و آمار توانیر.
- [2] Balghouthi M., Chahbani M.H., Guizani A., *Investigation of a solar cooling installation in Tunisia*, Applied Energy, 2012.
- [3] Calise F., Dentice Accadia M., Palombo A., *Transient analysis and energy optimization of solar heating and cooling systems in various configurations*, Solar Energy, 2010
- [4] Henning H.M., *Solar assisted air conditioning of buildings—an overview*, Applied Thermal Engineering, 27(10), pp. 1734-1749, 2007.
- [5] Dai Y.J., *Solar cooling: research and application*, October 8, 2008. <http://www.sjtuirc.sjtu.edu.cn>
- [6] Fong K., et al., *Simulation-optimization of solar-assisted desiccant cooling system for subtropical Hong Kong*, Applied Thermal Engineering, 30(2), 2010.
- [7] Eicker J.U., Pietruschka D., *Optimization and Economics of Solar Cooling Systems*, Advances in Building Energy Research, 3(1): pp. 45-81, 2009.
- [۸] یوسفی، اسماعیل. امکان سنجی استفاده از یک سیستم سرمایش و گرمایش خورشیدی با ظرفیت محدود، برای یک ساختمان آموزشی- اداری در شهرستان قائم شهر، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد ساری، صفحات ۱۰-۱۵، تابستان ۹۳.
- [9] Calise F, Palombo A., Vanoli L., *Maximization of primary energy savings of solar heating and cooling systems by transient simulations and computer design of experiments*, Applied Energy, 2010.
- [10] Falahatkar A., Khalaji Assadi M., *Analysis of solar lithium bromide-water absorption cooling system with heat pipe solar collector*, , Solar Thermal Application, 2011.
- [11] Alili, Al A., Islam M.D., Kubo, Hwang I. Y., Radermacher R., *Modeling of a solar powered absorption cycle for Abu Dhabi*, Applied Energy, 2012.
- [12] Colangelo G., et al. *Innovation in flat solar thermal collectors: A review of the last ten years experimental result*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 57, 1141-1159, 2016.
- [13] Fernández A, Dieste JA, *Low and medium temperature solar thermal collector based in innovative materials and improved heat exchange performance*, Energy Conversion and Management, 75: 118-29, 2013.
- [14] Shojaeizadeh E., Veysi F., Kamandi A., *Exergy efficiency investigation and optimization of an Al₂O₃-water nanofluid based Flat-plate solar collector*., Energy and Buildings 101, 12-23, 2015.
- [15] Hawwash A. A., et al, *Experimental Study of Alumina Nanofluids Effects on Thermal Performance Efficiency of Flat Plate Solar Collectors*, International Conference on Sustainable Energy & Environmental Sciences (SEES). Proceedings. Global Science and Technology Forum, 2016.
- [16] Vakili M., et al, *Experimental investigation of grapheme nanoplatelets nanofluid-based volumetric solar collector for domestic hot water systems*, Solar Energy 131, 119-130, 2016.
- [17] Duffie JA, Beckmann WA. *Solar engineering of thermal processes*, 4th ed., New Jersey: Wiley; 2013.
- [18] <http://www.weather.ir>
- [19] <http://www.sun.org.ir>
- [20] Kays, W. M., Crawford, M. E., Weigand B., "convective heat and mass transfer," 4th ed., Tata McGraw-Hill Education, 2012.
- [۲۱] سلمان پور، ایمان. طراحی یک سیستم سرمایش خورشیدی برای یک ساختمان اداری و ارزیابی فنی و اقتصادی آن، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد ساری، صفحات ۳۰-۳۵، تابستان ۹۳.