

بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر بازده حرارتی کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت

فرزاد جعفر کاظمی^{۱*}، آرش اسدزاده زرگر^۲

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۵۶۵۳۸۵، fj_kazemi@azad.ac.ir

چکیده

هدف از این مقاله بررسی عوامل تاثیر گذار بر بازده یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت است. به این منظور ابتدا مدل انتقال حرارت یک کلکتور صفحه تخت با توجه به موقعیت های متفاوت قرارگیری لوله و صفحه جاذب به دست آمد. سپس به کمک تجهیزات موجود در آزمایشگاه انرژی خورشیدی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، بازده و انرژی مفید کسب شده توسط کلکتور به صورت تجربی با مقادیر حاصل از مدل تئوری مقایسه شد. بر طبق نتایج به دست آمده هنگامی که صفحه جاذب در زیر لوله ها قرار گرفته باشد انرژی کسب شده بیشتر از انواع دیگر خواهد بود. کاهش فاصله بین رایزرها، استفاده از پوشش های شیشه ای مناسب و افزایش ضخامت عایق حرارتی از دیگر عواملی هستند که باعث افزایش راندمان کلکتور می شوند. همچنین با کاهش فشار گاز بین صفحه جاذب و پوشش شیشه ای و ایجاد خلاء راندمان کلکتور افزایش خواهد یافت. جنس عایق حرارتی و نوع سیال انتقال حرارت نیز بر بازده کلکتور تاثیر گذار می باشند.

کلیدواژگان: انرژی خورشیدی، کلکتور خورشیدی، کلکتور صفحه تخت، انتقال حرارت، صفحه جاذب

Effect of design parameters on thermal efficiency of a flat plate solar collector

Farzad Jafarkazemi^{1*}, Arash Asadzadeh Zargar²

1- Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14565385 Tehran, Iran, fj_kazemi@azad.ac.ir

Abstract

It is the aim of this paper to determine the parameters affecting thermal performance of flat plate solar collectors. As a first step, theoretical models for different configurations of a flat plate collector are introduced. These include riser tubes below the absorber plate, tubes above the absorber and tube in between.

A comparison is then made between the theoretical results and real experiments which were implemented in solar energy laboratory at South Tehran Branch of Islamic Azad University.

According to the results, the maximum absorbed energy is for the case where tubes are below the absorber plate. Decreasing the distance between the riser tubes, applying low emissivity glass and increasing insulation thickness are among the parameters which increase collector thermal efficiency.

In addition, decreasing the pressure of the gas between the absorber plate and collector glazing increase collector efficiency. Insulation material and working fluid also affect the collector thermal efficiency.

Keywords: solar energy, solar collector, flat plate collector, heat transfer, absorber plate.

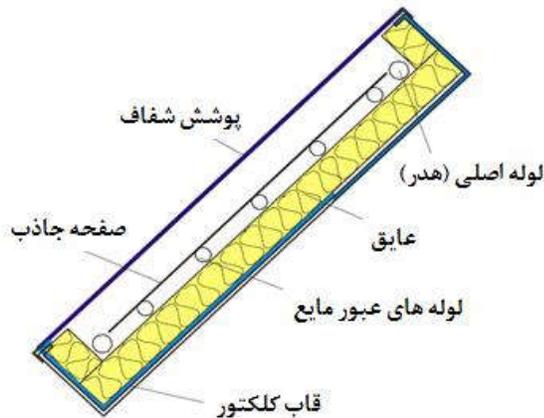


۱- مقدمه

با توجه به تحقیقات اندک صورت گرفته در خصوص تاثیر پارامترهای طراحی بر راندمان کلکتور، در این تحقیق ابتدا یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت با استفاده از روابط انتقال حرارت به صورت تئوری مدل شد. سپس با استفاده از تجهیزات موجود در آزمایشگاه انرژی خورشیدی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، و بر طبق استاندارد ISIRI 7129-1 تحت آزمون قرار گرفت. بازده و انرژی مفید کسب شده توسط کلکتور با توجه به شرایط آب و هوایی شهر تهران در دو حالت تئوری و تجربی به دست آمد و مورد مقایسه قرار گرفتند. سپس پارامترهای تاثیر گذار بر انرژی کسب شده و بازده کلکتور از قبیل زاویه کلکتور، فاصله بین رایزرها، نوع پوشش کلکتور و تعداد آن، ضخامت عایق حرارتی و جنس آن، نوع سیال انتقال حرارت و فشار گاز داخل کلکتور بررسی و اثر آن ها بر بازده کلکتور تعیین شد.

۲- تحلیل تئوری

کلکتور خورشیدی صفحه تخت طبق شکل ۱ شامل یک صفحه جاذب است که در اثر تابش خورشید حرارت را جذب کرده و آن را به یک سیال (مانند آب) که داخل لوله جریان دارد منتقل می کند. رنگ این ورق همیشه تیره انتخاب می شود و دارای پوشش خاصی است که بتواند ضریب جذب انرژی را به حداکثر و ضریب پخش را به حداقل برساند. برای رسیدن به دمای بالا، مجموعه ورق و لوله ها را در داخل یک جعبه که از اطراف و پشت آن عایق شده است قرار می دهند. تشعشع خورشید از پوشش شیشه ای عبور یافته و باعث گرم کردن صفحه جاذب می شود.



شکل ۱ کلکتور خورشیدی صفحه تخت

اتلاف حرارتی کل کلکتور برابر است با [۱۲]:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (1)$$

برای محاسبه انرژی تلف شده از بالای کلکتور از رابطه تجربی کلین به صورت زیر استفاده می شود [۱۲]:

$$U_t = \left[\frac{N}{\frac{c}{T_{p,m}} \left[\frac{(T_{p,m} - T_a)}{(N+1)} \right]^e + h_w} \right]^{-1} + \frac{\sigma(T_{p,m} + T_a)(T_{p,m}^4 + T_a^4)}{(\varepsilon_p + \dots + 0.5910R_w)^{-1} + \frac{0.047 - 1 + 0.113\varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N} \quad (2)$$

برای محاسبه ضریب بازده کلکتور و همچنین توزیع دما بین لوله ها، با توجه به اینکه لوله در زیر، بالا یا در وسط صفحه جاذب قرار داشته باشد روابط متفاوت خواهند بود که در ادامه هر کدام از حالت های فوق بررسی خواهند شد.

محدودیت منابع سوخت های فسیلی و همچنین آسیب های محیطی استفاده از این سوخت ها باعث شده تا تحقیق در مورد کاربردهای انرژی های تجدیدپذیر در سال های اخیر از اهمیت ویژه ای برخوردار شوند. در این میان انرژی خورشیدی، با توجه به پتانسیل بالای بالقوه، اهمیت بیشتری پیدا می کند. روش های گوناگونی برای استفاده از این انرژی پاک وجود دارد، اما گرم کردن آب با استفاده از کلکتورها و آب گرم کن های خورشیدی، به عنوان یکی از آسان ترین و اقتصادی ترین روش ها شناخته شده است.

در سال های اخیر تحقیقات زیادی برای تحلیل و مدل سازی با آزمایش عملکرد کلکتورهای خورشیدی انجام شده است. کومار و مولیک [۱] ضریب انتقال حرارت جابجایی ناشی از باد با استفاده از یک صفحه غیر صیقلی در شرایط فضای باز را محاسبه کرده اند. آزمایش های انجام شده به منظور اندازه گیری ضریب انتقال حرارت جابه جایی و بر روی پشت بام یک ساختمان در فصل تابستان به مدت دو سال انجام گرفته است. برآورد ضریب انتقال حرارت باد توسط رگرسیون خطی سرعت باد صورت گرفته و مقادیر تجربی برآورد شده برای ضریب انتقال حرارت باد با مطالعات سایر محققین مقایسه شد. المینیر و همکارانش به بررسی جنبه های تئوری انتخاب یک زاویه شیب بهینه برای کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت پرداخته و توصیه هایی در مورد اینکه چگونه می توان با تغییر زاویه شیب کلکتور، انرژی جذب شده را افزایش داد، بیان کردند [۲]. آلوارز و همکارانش یک تحلیل تجربی و مدل سازی حرارتی و هیدرودینامیکی برای یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت خاص ارائه کردند [۳]. این کلکتور دارای کانال های موجدار و سطح مقطع زیاد بود که به طور مستقیم با سیال انتقال حرارت در تماس قرار می گرفت. نیاک و آمر یک ارزیابی دقیق و جامع بر روی نه روش تست دینامیکی کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت، ارائه کردند [۴]. احمدي و همکاران اثر نانو سیال گرافن بر بازده کلکتور خورشیدی صفحه تخت را به صورت تئوری و تجربی بررسی کردند. نتایج این نشان داد که با استفاده از نانوسیال گرافن بازده می تواند تا حدود ۱۹٪ افزایش یابد [۵]. جعفر کاظمی و همکاران استانداردهای تست کلکتورهای خورشیدی را مورد مقایسه قرار دادند و نتایج تجربی حاصل از تست را برای بازده کلکتور خورشیدی نوع لوله خلاء ارائه کردند [۶]. اسدزاده زرگر و همکاران سه استاندارد ISO9459-2 و EN12976-2 را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند و یک طرح پیشنهادی به منظور آزمون سیستم ارائه کردند [۷]. زامبولین و دلکل [۸] مقایسه ای را بین دو نوع کلکتور خورشیدی انجام دادند. یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت و یک کلکتور خورشیدی لوله خلاء در شرایط یکسان مورد آزمون قرار گرفتند. در تحقیق فوق بازده کلکتور در شرایط ثابت و شبه دینامیکی براساس استاندارد EN 12975-2 اندازه گیری شد و با نمودارهای ورودی و خروجی اندازه گیری شده در تمام روز، مقایسه گردید.

در سال های اخیر تحقیقات زیادی در خصوص انتقال حرارت انواع مختلف کلکتور نیز انجام شده است. جعفر کاظمی و همکاران یک کلکتور خورشیدی از نوع لوله حرارتی را مورد بررسی تئوری و تجربی قرار دادند [۹]. کایا و همکاران راندمان حرارتی یک کلکتور خورشیدی از نوع لوله U شکل را به صورت تجربی بررسی کردند [۱۰]. همچنین انتقال حرارت کلکتورهای هواگرمکن صفحه تخت توسط آیسائوی و همکاران مورد بررسی تئوری و تجربی قرار گرفت [۱۱].



$$F' = \frac{1}{\frac{w}{\pi D_i h_{fi}} + \frac{1}{D + \frac{1}{U_i} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{h_{fi} \pi D_i}}} \quad (7)$$

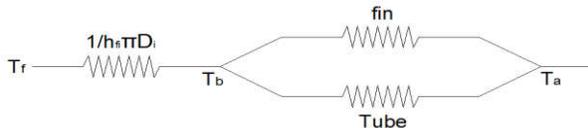
روابط مربوط به ضریب برداشت گرمایی، انرژی کسب شده توسط کلکتور و راندمان کلکتور همانند حالت قبل، همان روابط (۴)، (۵) و (۶) بوده با این تفاوت که مقدار ضریب بازدهی کلکتور از رابطه (۷) جایگزین می گردد.

۲-۳- لوله در وسط صفحه جاذب

در این حالت همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، انرژی مفید کسب شده کمی متفاوت خواهد بود. همچنین ترتیب قرارگیری مقاومت هایی که در مسیر انتقال انرژی مفید کسب شده و سیال قرار دارند مطابق شکل ۷ خواهند بود.



شکل ۶ نحوه اتصال لوله و صفحه جاذب



شکل ۷ مقاومت های ایجاد شده در مقابل جریان گرما به سیال

همچنین ضریب بازدهی کلکتور برابر خواهد بود با :

$$F' = \frac{1}{\frac{1}{w \left[\frac{1}{U_i(D+(W-D)F)} + \frac{1}{h_{fi}\pi D_i} \right]}} \quad (8)$$

در یک اتصال خوب بین صفحه جاذب و لوله ها، با توجه به اینکه $1/C_b$ مقدار بسیار کوچکی می شود، می توان از آن صرف نظر نمود. با توجه به اینکه اتصال لوله در وسط صفحه جاذب را می توان یک اتصال خوب در نظر گرفت، در این حالت از ضریب هدایت حرارتی جوش صرف نظر کرده و صفر در نظر گرفته شده است.

همچنین روابط مربوط به ضریب برداشت گرمایی، انرژی کسب شده توسط کلکتور و راندمان کلکتور، همان روابط (۴)، (۵) و (۶) بوده با این تفاوت که مقدار ضریب بازدهی کلکتور از رابطه (۸) جایگزین می گردد.

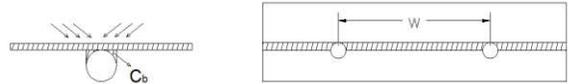
۳- شرح تجهیزات آزمون تجربی

به منظور اعتبارسنجی نتایج تئوری، یک کلکتور صفحه تخت در آزمایشگاه خورشیدی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب و بر مبنای استاندارد ملی ISIRI 7129-1 مورد آزمایش قرار گرفت. در شکل ۸ و ۹ به ترتیب تصویر دستگاه آزمون و دیاگرام مدار آن نشان داده شده اند. تجهیزات هواشناسی بکار گرفته شده شامل دو عدد پیرانومتر به منظور اندازه گیری میزان تشعشع کل و تشعشع پراکنده، دماسنج برای تعیین دمای محیط، بادسنج و ثبت کننده اطلاعات هستند که همگی ساخت شرکت SolData می باشند [۱۳].

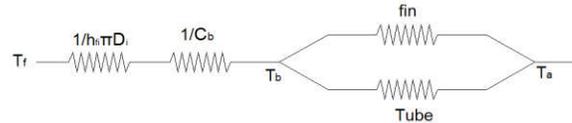
برای گرم کردن آب داخل مخزن از دو هیتر دو کیلووات و یک هیتر یک کیلووات الکتریکی استفاده شد. این هیترها توسط کنترلر دما با خروجی SSR تحت کنترل قرار دارند تا آب را به دمای مورد نظر در آزمایش برسانند. مخزن مورد استفاده از نوع گالوانیزه و به ظرفیت ۱۵۰ لیتر است. به منظور اندازه

۲-۱- لوله در زیر صفحه جاذب

انرژی مفید کسب شده توسط کلکتور باید به سیال منتقل شود. با توجه به محل و نحوه اتصال لوله و صفحه جاذب، ترتیب قرارگیری مقاومت هایی که در مسیر انتقال انرژی مفید کسب شده و سیال قرار دارند، متفاوت خواهد بود. حال با توجه به اینکه در این بخش اتصال لوله در زیر صفحه جاذب قرار دارد، این مقاومت ها در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شده اند.



شکل ۲ نحوه اتصال لوله و صفحه جاذب



شکل ۳ مقاومت های ایجاد شده در مقابل جریان گرما به سیال

ضریب بازدهی کلکتور برابر است با [۱۲]:

$$F' = \frac{1}{\frac{1}{w \left[\frac{1}{U_i(D+(W-D)F)} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{h_{fi}\pi D_i} \right]}} \quad (3)$$

C_b ضریب هدایت حرارتی جوش است که نشان دهنده میزان انتقال حرارت بین لوله جاذب و جوش می باشد و بستگی به جنس جوش، ضخامت جوش و رسانش گرمایی این اتصال دارد. همچنین ضریب برداشت گرمایی کلکتور برابر با نسبت مقدار واقعی انرژی انتقال یافته به حداکثر مقدار ممکن انرژی قابل انتقال، می باشد که بصورت زیر تعریف می شود [۱۲]:

$$F_R = \frac{m C_p}{A_c U_i} \left[1 - \exp \left(\frac{-A_c U_i F'}{m C_p} \right) \right] \quad (4)$$

بنابراین انرژی که توسط کلکتور بدست می آید برابر است با [۱۲]:

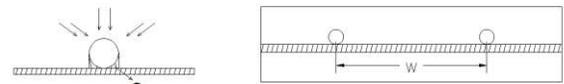
$$Q_u = A_c F_R [G_t(\tau\alpha)_n - U_L(T_i - T_a)] \quad (5)$$

در نتیجه بازده کلکتور برابر خواهد بود با [۱۲]:

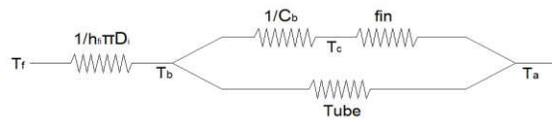
$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G_t} = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \left(\frac{T_i - T_a}{G_t} \right) = \frac{m C_p [T_o - T_i]}{A_c G_t} \quad (6)$$

۲-۲- لوله در بالای صفحه جاذب

در این حالت با توجه به شکل قرارگیری و اتصال لوله به صفحه جاذب که در شکل ۴ نشان داده شده است، انرژی مفید کسب شده کمی متفاوت خواهد بود. همچنین ترتیب قرارگیری مقاومت هایی که در مسیر انتقال انرژی مفید کسب شده و سیال قرار دارند مطابق شکل ۵ است.



شکل ۴ نحوه اتصال لوله و صفحه جاذب

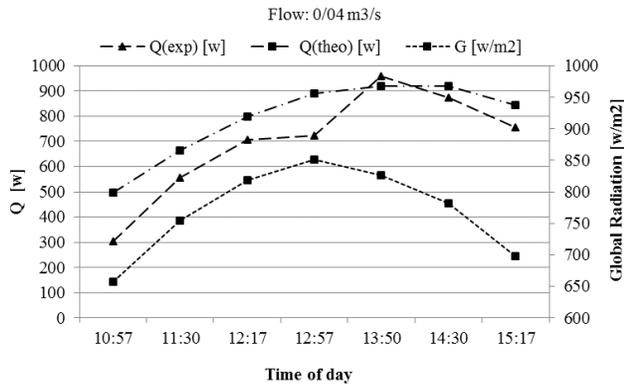


شکل ۵ مقاومت های ایجاد شده در مقابل جریان گرما به سیال

در این حالت ضریب بازدهی کلکتور برابر خواهد بود با :



شکل ۱۰ مقدار انرژی دریافتی در حالتی که دبی آب گذرنده از کلکتور 0.04 مترمکعب بر ثانیه است را در طول مدت تست نشان می دهد. در این نمودار انرژی بدست آمده از کلکتور و منتقل شده به آب عبوری از داخل کلکتور در روش تئوری و مقدار انرژی کسب شده با استفاده از روش تجربی و آزمایش بر حسب وات نمایش داده شده اند. شدت تابش نیز بر حسب وات بر متر مربع مشخص شده است. همچنین محور افقی نشان دهنده زمان است.



شکل ۱۰ انرژی دریافتی در مدل تئوری و تجربی با دبی آب 0.04 مترمکعب بر ثانیه

در شکل ۱۱ بازده حاصل از مدل تئوری و آزمایش تجربی کلکتور در حالتی که دبی آب 0.04 مترمکعب بر ثانیه است مقایسه شده اند. بر طبق توصیه استاندارد SIRI 7129-1، در رسم نمودار راندمان کلکتور، در محور افقی از پارامتر $Ti - Ta/G$ استفاده می شود که در آن Ti دمای ورودی به کلکتور، Ta دمای هوای محیط و G شدت تشعشع است. البته در برخی موارد به جای Ti از Tm که بیان گر دمای متوسط ورودی و خروجی کلکتور است نیز استفاده می شود.

همانطور که از نمودارها مشخص است با افزایش پارامتر $Ti - Ta/G$ بازده کاهش می یابد. این موضوع بیانگر آن است که برای دستیابی به حداکثر بازده ممکن برای یک کلکتور صفحه تخت، حتی الامکان باید دمای آب ورودی به کلکتور نزدیک به دمای محیط اطراف باشد، زیرا با افزایش دمای آب ورودی بازده کاهش می یابد.

مقایسه نتایج تئوری و تجربی در دو شکل قبل نشان می دهند که با توجه به اختلاف کم بین نتایج تجربی و تئوری (کمتر از ۵ درصد)، می توان از روابط ارائه شده در بخش قبل برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد کلکتور مورد بررسی استفاده کرد.

در بخش بعد با استفاده از روابط تئوری ارائه شده در بخش ۲، اثر برخی از پارامترهای تاثیر گذار بر عملکرد کلکتور مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

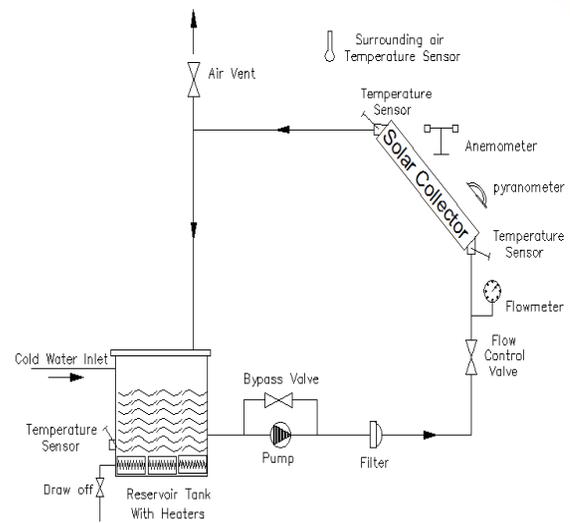
گیری دمای ورودی و خروجی کلکتور، از سنسورهای دمای Pt-100 استفاده شد. مشاهده دما بصورت دیجیتالی توسط کنترلر آتونیکس مدل: TZN4S- گرفت [۱۴].

کلکتور خورشیدی صفحه تخت مورد استفاده، ساخت کارخانه دریا کشور ترکیه با شماره مدل DAC 18 است [۱۵]. این کلکتور شامل دو هدر افقی و ۱۲ رابزر عمودی است که بصورت موازی قرار گرفته اند. صفحات جاذب از پره های مجزا تشکیل شده اند. جنس پره ها از آلومینیوم بوده و از شیشه معمولی به ضخامت ۴ میلی متر به عنوان پوشش صفحه جاذب برای جلوگیری از اتلافات جابه جایی و تابشی استفاده شده است.

شکل قرار گیری لوله نسبت به صفحه جاذب مطابق روشی است که در بند ۲-۳ توضیح داده شد.



شکل ۸ تصویر بستر آزمون کلکتور صفحه تخت



شکل ۹ تجهیزات و دیاگرام مدار بستر آزمون کلکتور صفحه تخت

۴- مقایسه نتایج تئوری و تجربی

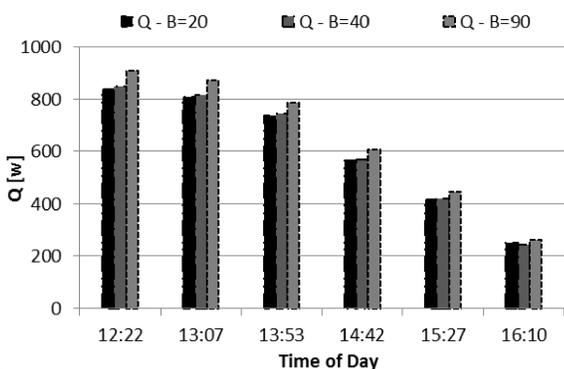
با توجه به این که در کلکتور تحت آزمون، لوله در وسط صفحه جاذب قرار دارد، با توجه به روابطی که در بخش ۲-۳ بیان شد و با توجه به آزمون های انجام گرفته، نتایج تئوری و تجربی مقایسه خواهند شد. آزمون ها در ۸ آگوست سال ۲۰۱۱ میلادی انجام گرفته اند.



ساخت کلکتورهای صفحه تختی که لوله در وسط صفحه جاذب قرار دارد دشوارتر از سایر انواع کلکتورهای صفحه تخت است. از این رو استفاده از کلکتورهای صفحه تخت که لوله در زیر صفحه جاذب قرار دارد به دلیل سهولت در ساخت، مرسوم تر است.

۵-۲- تاثیر زاویه کلکتور خورشیدی

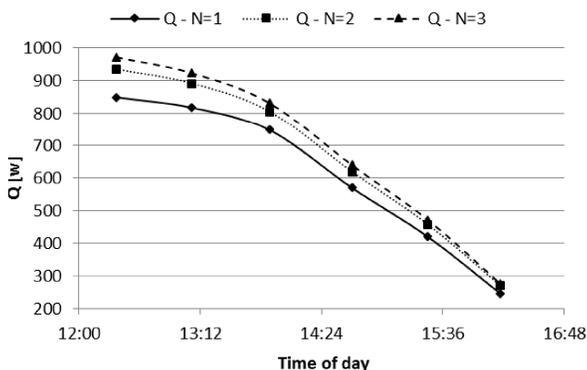
در شکل ۱۳ تاثیر زاویه کلکتور خورشیدی بر میزان انرژی دریافتی آن از خورشید نشان داده شده است. با افزایش زاویه کلکتور نسبت به سطح افق، شدت تابش اعمال شده به سطح کلکتور تا جایی که اشعه خورشید بر کلکتور عمود شود افزایش یافته و سپس کاهش می یابد. پارامتر دیگر تاثیر گذار، اتلاف حرارت در لایه های هوا در بین صفحه جاذب و محافظ شیشه ای است. البته تاثیر این پارامتر در مقایسه با تاثیر زاویه بهینه ای که باعث عمود بودن تابش به صفحه کلکتور شود ناچیز است.



شکل ۱۳ انرژی دریافتی کلکتور صفحه تخت با توجه به زاویه شیب کلکتور

۵-۳- تاثیر تعداد شیشه های محافظ کلکتور

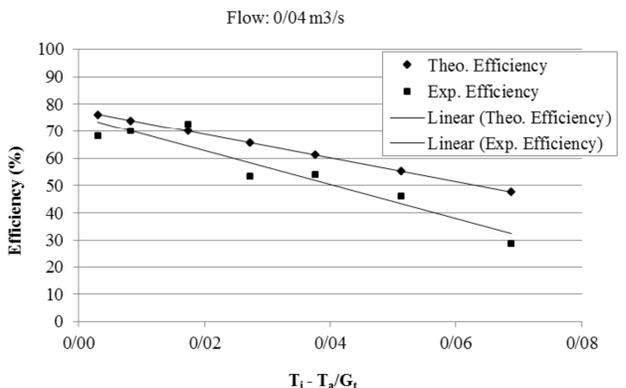
با توجه به اینکه با افزایش تعداد پوشش های شیشه ای یک کلکتور میزان اتلاف حرارتی از بالای کلکتور کاهش می یابد، بنابراین با افزایش تعداد این پوشش ها میزان انرژی دریافتی توسط کلکتور خورشیدی، همانطور که در شکل ۱۴ نمایش داده شده است، افزایش می یابد.



شکل ۱۴ انرژی دریافتی کلکتور صفحه تخت با تعداد کاورهای شیشه ای کلکتور

۵-۴- تاثیر فاصله بین رایزرهای صفحه جاذب بر بازده کلکتور

یکی از عوامل تاثیر گذار بر بازده کلکتور، فاصله بین رایزرهای صفحه جاذب است. همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می شود با کم شدن فاصله بین رایزرها بازده کلکتور افزایش می یابد. با توجه به اینکه سطح کلکتور ثابت



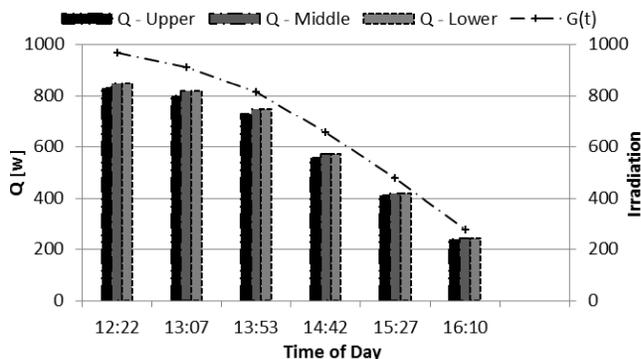
شکل ۱۱ بازده کلکتور صفحه تخت در مدل تئوری و تجربی با دبی آب ۰/۰۴ مترمکعب بر ثانیه

۵- بررسی اثر پارامترهای مختلف

در این بخش، بر اساس مدل تئوری ارائه شده، پارامترهایی که می توانند بر میزان انرژی دریافتی یک کلکتور خورشیدی تاثیر گذار باشند مورد بررسی قرار خواهند گرفت. کلیه نتایج به دست آمده در این بخش بر اساس معادلات تئوری ارائه شده در بخش

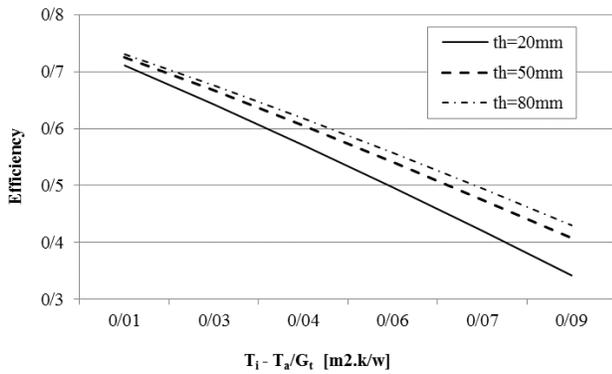
۵-۱- تاثیر موقعیت قرار گیری صفحه جاذب نسبت به لوله

در این قسمت تغییرات مقدار انرژی دریافتی کلکتور خورشیدی با توجه به اینکه موقعیت لوله در زیر، بالا یا وسط صفحه جاذب باشد بررسی شده است. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می شود، با توجه به زمان تست انجام شده و با کاهش میزان تشعشع، مقدار انرژی دریافتی از خورشید در سه نوع کلکتور مورد نظر کاهش می یابد. با مقایسه مقادیر حاصل از سه نوع کلکتور می توان دریافت که در حالتی که صفحه جاذب در بالای لوله قرار دارد کمترین مقدار انرژی جذب می شود. با قرار گرفتن لوله در وسط صفحه جاذب با توجه به اینکه سطح بیشتری از لوله در معرض نور خورشید قرار می گیرد میزان انرژی دریافتی افزایش می یابد. همانطور که مشاهده می شود با قرارگیری صفحه جاذب در زیر لوله ها، باز هم سطح بیشتری از لوله ها در معرض نور خورشید قرار گرفته و انرژی دریافتی هم افزایش می یابد. البته در این حالت میزان افزایش انرژی دریافتی نسبت به حالتی که لوله ها در وسط صفحه جاذب قرار دارند قابل توجه نیست و تقریباً یکسان بنظر می رسد.



شکل ۱۲ انرژی دریافتی کلکتور صفحه تخت با توجه به موقعیت قرار گیری صفحه جاذب نسبت به لوله

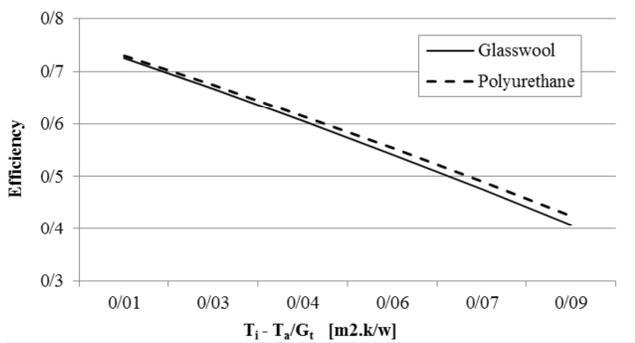




شکل ۱۷ نمودارهای بازده کلکتور خورشیدی برای ضخامت های مختلف عایق حرارتی

۵-۷- تاثیر جنس عایق بر بازده کلکتور

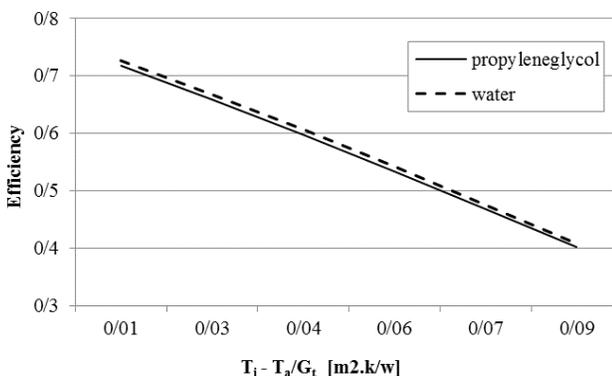
یکی دیگر از عوامل تاثیر گذار بر بازده کلکتور خورشیدی جنس عایق حرارتی می باشد. ضریب انتقال حرارت پلی اورتان کمتر از پشم شیشه است و این بدین معناست که عایق پلی اورتان مقاومت بهتری در مقابل انتقال حرارت از صفحه جاذب به محیط بیرون دارد و همانطور که در شکل ۱۸ نشان داده شده است استفاده از عایق پلی اورتان باعث کاهش اتلافات حرارتی از زیر کلکتور و افزایش بازده می شود.



شکل ۱۸ اثر جنس عایق بر بازده کلکتور خورشیدی

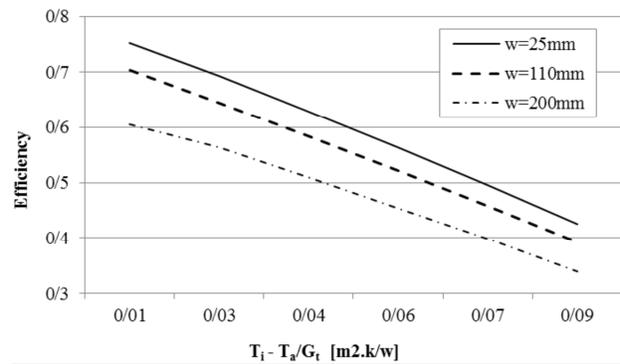
۵-۸- تاثیر نوع سیال انتقال حرارت بر بازده کلکتور

در شکل ۱۹، تاثیر نوع سیال در راندمان کلکتور نشان داده شده است. مطابق این شکل با تغییر سیال عامل از آب به محلول ضدیخ پروپیلن گلیکول و آب (با درصد ۵۰/۵۰) بازده کلکتور با کاهش بسیار اندک همراه بود. لیکن این اختلاف در محدوده خطای دستگاه های اندازه گیری بود و نمی توان با قطعیت در این خصوص اظهار نظر کرد.



شکل ۱۹ اثر نوع سیال انتقال حرارت بر بازده کلکتور خورشیدی

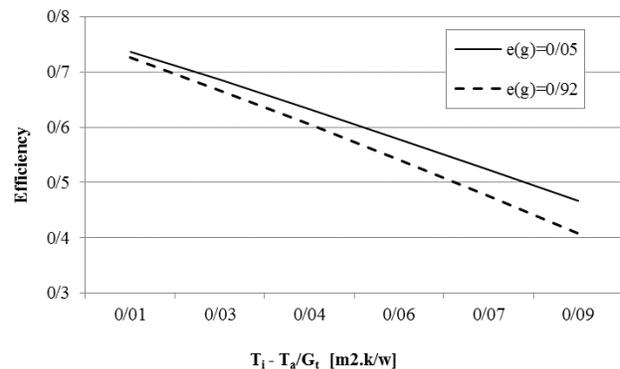
در نظر گرفته شده است، کاهش فاصله بین رایزرها بدین معناست که تعداد رایزرها باید افزایش یابد. این امر باعث می شود در هر سیکل از چرخش سیال در کلکتور، سطح بیشتری از سیال در معرض تشعشع خورشید قرار گیرد و در نتیجه افزایش انرژی دریافتی منطقی بنظر می رسد.



شکل ۱۵ بازده کلکتور صفحه تخت بر حسب فاصله بین رایزرها صفحه جاذب

۵-۵- تاثیر ضریب نشر شیشه بر بازده کلکتور

شدت نشر شیشه ای که بعنوان محافظ روی کلکتورهای صفحه تخت قرار می گیرد نیز یکی دیگر از عواملی است که بر بازده کلکتور موثر است. بخشی از تابش خورشید که به شیشه محافظ می رسد از آن عبور کرده و به صفحه جاذب می رسد و مابقی آن توسط شیشه باز پخش می شود. مقدار تابشی که توسط شیشه منعکس می گردد بستگی به ضریب نشر شیشه دارد و همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می شود هرچه ضریب نشر بیشتر باشد، تابش کمتری به سطح صفحه جاذب خواهد رسید و در نتیجه بازده کلکتور کاهش خواهد یافت.



شکل ۱۶ بازده کلکتور صفحه تخت با توجه به ضریب نشر کاور شیشه ای کلکتور

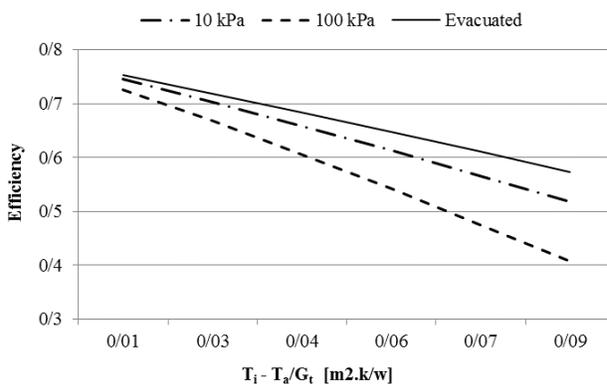
۵-۶- تاثیر ضخامت عایق حرارتی بر بازده کلکتور

در شکل ۱۷ بازده کلکتور خورشیدی بر حسب ضخامت های مختلف عایق حرارتی استفاده شده در قاب کلکتور، نشان داده شده است. این عایق که معمولا از جنس پشم شیشه می باشد، انتقال حرارت از زیر صفحه جاذب به محیط بیرون را کاهش می دهد. بین یک کلکتور با ۴۰ میلیمتر و ۶۰ میلیمتر عایق تفاوت قابل توجهی در بازده مشاهده نمی شود ولی در یک کلکتور با عایق ۲۰ میلیمتری اختلاف بازده قابل توجه است. همانطور که انتظار می رود با افزایش ضخامت عایق، اتلافات حرارتی از زیر کلکتور کاهش یافته و بازده کلکتور افزایش می یابد.



۹-۵- تاثیر فشار گاز داخل کلکتور بر بازده

فشار گاز داخل کلکتور (بین صفحه جاذب و پوشش شیشه ای کلکتور) نیز می تواند بر بازده آن تاثیر گذار باشد. شکل ۲۰ نشان می دهد هنگامی که فشار گاز داخل کلکتور ۱۰۰ کیلوپاسکال یعنی تقریباً برابر با فشار اتمسفر در سطح دریا باشد، بازده آن در کمترین مقدار خواهد بود و با کاهش فشار داخلی کلکتور بازده آن افزایش می یابد. بیشترین راندمان در حالتی اتفاق می افتد که داخل کلکتور خلا ایجاد شود. دلیل این امر کاهش ضریب انتقال حرارت جابه جایی بین صفحه جاذب و محیط اطراف است. البته با وجود این مزیت، به دلیل دشواری ساخت، به جز موارد بسیار محدود محفظه بین جاذب و پوشش شیشه ای کلکتور خلاء نمی شود و در فشار اتمسفر قرار دارد.



شکل ۲۰ اثر فشار گاز داخل کلکتور بر بازده

۶- نتایج

در این مقاله پس از مقایسه عملکرد تئوری و تجربی یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت، اثر پارامترهای تاثیرگذار بر راندمان این کلکتور مورد بررسی تئوری قرار گرفت. آزمون های تجربی در آزمایشگاه انرژی خورشیدی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب و بر اساس استاندارد ISIRI 7129-1 انجام گرفت. مهمترین نتایج به دست آمده را می توان بصورت زیر نام برد:

- در حالی که لوله در زیر صفحه جاذب قرار داشته باشد، بیشترین مقدار انرژی توسط کلکتور دریافت خواهد شد. لیکن با توجه به اختلاف اندک، نکات دیگر از جمله سادگی ساخت و مسائل مونتاژ کلکتور می تواند ملاک عمل قرار گیرد.
- با افزایش زاویه کلکتور با سطح افق مقدار انرژی دریافتی آن نیز افزایش می یابد.
- افزایش تعداد پوشش های شیشه ای کلکتور باعث کاهش اتلاف حرارتی از بالای کلکتور و در نتیجه افزایش انرژی دریافتی می شود.
- کاهش فاصله بین رایزرها باعث افزایش بازده کلکتور خواهد شد.
- نوع پوشش کلکتور نیز بر بازده آن تاثیر گذار خواهد بود. استفاده از پوشش هایی که ضریب نشر پایین دارند باعث افزایش بازده می شود.
- ضخامت و جنس عایق از دیگر عوامل تاثیر گذار بر بازده کلکتور می باشند. بدیهی است با افزایش ضخامت عایق اتلاف حرارتی از زیر کلکتور کاهش یافته و بازده افزایش می یابد. همچنین به علت اینکه ضریب انتقال حرارت پلی اورتان کمتر از پشم شیشه

- است و مقاومت بهتری در مقابل انتقال حرارت از صفحه جاذب به محیط بیرون دارد، افزایش بازده را در پی خواهد داشت.
- در صورت استفاده از محلول ضدیخ پروپیلن گلیکول و آب (با درصد ۵۰/۵۰) بعنوان سیال انتقال حرارت در کلکتور، بازده کلکتور کاهش می یابد. در نتیجه نوع سیال انتقال حرارت نیز بر بازده کلکتور موثر می باشد.
 - فشار گاز بین صفحه جاذب و پوشش شیشه ای بر بازده کلکتور تاثیر گذار است. هنگامیکه فشار گاز داخل کلکتور ۱۰۰ کیلوپاسکال یعنی برابر با فشار اتمسفر باشد، بازده آن در کمترین مقدار خواهد بود و با کاهش فشار داخلی کلکتور بازده آن به می یابد و هنگامیکه داخل کلکتور خلا ایجاد شود بازده آن به حداکثر خواهد رسید.

۷- فهرست علائم

U_t	ضریب اتلاف انتقال حرارت از بالای کلکتور (W/m^2C)
U_b	ضریب اتلاف انتقال حرارت از زیر کلکتور (W/m^2C)
U_e	ضریب اتلاف انتقال حرارت از لبه های کلکتور (W/m^2C)
U_L	ضریب اتلاف انتقال حرارت کلکتور (W/m^2C)
T_f	دمای سیال (درجه سلسیوس)
T_a	دمای هوای محیط (درجه سلسیوس)
T_i	دمای آب ورودی (درجه سلسیوس)
T_o	دمای آب خروجی (درجه سلسیوس)
$T_{p,m}$	دمای مرکز صفحه جاذب (درجه سلسیوس)
D	قطر لوله های صفحه جاذب (متر)
D_i	قطر داخلی لوله های صفحه جاذب (متر)
F'	ضریب بازدهی کلکتور
F_R	ضریب برداشت گرمایی کلکتور
Q_u	انرژی دریافتی (J)
A_c	مساحت کلکتور (m^2)
G	تشعشع کلی خورشیدی روی سطح دهانه (W/m^2)
η	بازده حرارتی (%)
C_p	ظرفیت ویژه گرمایی
\dot{m}	دبی جریان
h_w	ضریب انتقال حرارت باد
N	تعداد شیشه های محافظ کلکتور
ϵ_p	ضریب نشر صفحه جاذب
ϵ_g	ضریب نشر شیشه
w	فاصله بین رایزرها
C_b	ضریب انتقال حرارت جوش
h_{fi}	ضریب انتقال گرما بین سیال و جدار لوله
α	ضریب جذب صفحه جاذب
τ	ضریب عبور شیشه



[7] آ. اسدزادہ زرگر، ف. جعفر کاظمی و ح. عبدی، بررسی و مقایسه استانداردهای تست کلکتورهای خورشیدی، مجموعه مقالات سومین کنفرانس بین المللی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع، تهران، خرداد ۱۳۹۰.

- [8] E. Zambolin and D. Del Col, Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions, *Solar Energy*, Volume 84, Issue 8, pp. 1382-1396, 2010
- [9] F. Jafarkazemi, E. Ahmadifard, H. Abdi, Energetic and Exergy Efficiency of Heat Pipe Evacuated Tube Solar Collectors, *Thermal Science*, Vol. 20, No. 1, pp. 327-335, 2016.
- [10] H. Kaya, A. Arslan, N. Eltugral, Experimental investigation of thermal performance of an evacuated U-tube solar collector with ZnO/Ethylene glycol pure water nanofluids, *Renewable Energy*, Volume 122, pp. 329-338, 2018.
- [11] A. Aissaoui, A. H. Benmachiche, A. Brima, D. Bahloul, Y. Belloufi, Experimental and theoretical analysis on thermal performance of the flat plate solar air collector, *International Journal of Heat and Technology*, Volume 24, No. 2, pp. 213-220, 2016.
- [12] J.A. Duffie and W.A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, third edition, J. Wiley & Sons, 2006
- [13] <http://www.soldata.dk/> (Last visited on 2018-03-10).
- [14] http://www.autoniconline.com/product/product&product_id=10587 (Last visited on 2018-03-10).
- [15] https://deryasolar.en.ec21.com/Solar_Aluminum_Collector--217553_217556.html (Last visited on 2018-03-10).

۸- تقدیر و تشکر

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی با عنوان "طراحی، ساخت و تست عملکرد مولد همزمان برق و حرارت خورشیدی" به شماره قرارداد ۱۶/۸۳۷/ب با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب انجام پذیرفته است.

۹- مراجع

- [1] S. Kumar, S.C. Mullick, Wind heat transfer coefficient in solar collectors in outdoor conditions, *Solar Energy*, Volume 84, Issue 6, pp. 956-963, 2010.
- [2] H. K. Elminir, A. E. Ghitas, F. El-Hussainy, R. Hamid, M.M. Beheary and K. M. Abdel-Moneim, Optimum solar flat-plate collector slope: Case study for Helwan, Egypt, *Energy Conversion and Management*, Volume 47, Issue 5, pp. 624-637, 2006.
- [3] A. Alvarez, O. Cabeza, M.C. Muñoz and L.M. Varela, Experimental and numerical investigation of a flat-plate solar collector, *Energy*, Volume 35, Issue 9, pp. 3707-3716, 2010.
- [4] J.K. Nayak and E.H. Amer, Experimental and theoretical evaluation of dynamic test procedures for solar flat-plate collectors, *Solar Energy*, Volume 69, Issue 5, pp. 377-401, 2000.
- [5] A. Ahmadi, D.D. Ganji, F. Jafarkazemi, Analysis of utilizing Graphene nanoplatelets to enhance thermal performance of flat plate solar collectors, *Energy Conversion and Management*, Volume 126, pp. 1-11, 2016.
- [6] F. Jafarkazemi, H. Abdi, A. Asadzadeh zargar, A. Hassani, Development of a solar collector/solar water heating system test center in iran, *Proceeding of ISES Solar world congress*, Sep 2011.

