



بررسی آزمایشگاهی تاثیرات نانو سیال اکسید آهن (فرو مگنتیت) بر بازدهی اگزرزی در کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی در ساختمان

جالل قندھاری^{۱*}، علی کیانی فر^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

* مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵۱۱۱۱۱ a-kiani@um.ac.ir

چکیده

یکی از روش‌های نوین بهبود عملکرد حرارتی کالکتورهای خورشیدی استفاده از نانو سیالات می‌باشد. یکی از مسائلی که همواره در سیستم‌های ترمودینامیکی مورد توجه می‌باشد، بهینه‌سازی اگزرزی یا بالا بردن بازدهی اگزرزی سیستم ترمودینامیکی است. در این پژوهش، تاثیرات نانو سیال اکسید آهن با سیال پایه مخلوط ۵۰ درصد حجمی آب و پروپیلن گلیکول به عنوان سیال عامل در کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی در کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. بدین منظور نانو سیال اکسید آهن در غلظت‌های مختلف نانو ذره تا سه دهم درصد جرمی و در سه دبی مختلف مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. آزمایشات تمامی در روزهای صاف و بدون ابر فصل تابستان و در پژوهشکده هوای خورشید دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده پتانسیل مناسب نانو سیال اکسید آهن در افزایش بازدهی اگزرزی کالکتور صفحه تخت خورشیدی به عنوان اصلی ترین جزء آبگرم کن خورشیدی می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان دهنده افزایش ۲.۱ درصدی بازدهی اگزرزی کالکتور صفحه تخت خورشیدی می‌باشد.

کلیدواژگان: کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی، نانو سیال اکسید آهن (فرومگنتیت)، بازده اگزرزی

Experimental Investigation on the Effect of Iron Oxide (Fe_3O_4) Nanofluid on the Exergy Efficiency of Flat-Plate Solar Collectors in the Building

Jalal Ghandehari, Ali Kianifar*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
* P.O.B. 917751111 Mashhad, Iran, a-kiani@um.ac.ir

ABSTRACT

Using nanofluids is one of the new methods to improve the thermal performance of solar collector, that is the most important component of solar water heaters. Exergy optimization or increase Exergy efficiency are the most important issues in thermodynamic systems. In this research, the effects of iron oxide nanofluids, with a base fluid consist of mixture of 50% water and propylene glycol as an agent fluid, in solar flat plate collectors was studied experimentally. Iron oxide nanofluid concentration was varied up to 0.3%, and discharge rate was also changed at three levels. All tests were performed on summer clear days and without cloud in Havakhorshid institute in Ferdowsi university of Mashhad. Results indicate iron oxide nanofluids has good potential to improve Exergy efficiency of solar flat plate collectors, as an increase of 1.2 % was noticed.

Keywords: Flat- plate solar collector, Fe_3O_4 nanofluids,Exergy efficiency

آبگرمکن خورشیدی استفاده شده است. همچنین در این پژوهش از مخلوط آب و پروپیلن گلیکول^۱ به عنوان سیال پایه استفاده شده است تا ضمن استفاده از خواص ضدیخ و ضدجوش بودن پروپیلن گلیکول و جلوگیری از پیغزدگی سیال در کالکتور، با افزودن آب از کاهش شدید انتقال حرارت (به دلیل انتقال حرارت پایین پروپیلن گلیکول) جلوگیری شود [۲].

در دهه‌ی گذشته، بسیاری از محققان به ارزیابی تاثیرات نانو سیالات بر بهبود انتقال حرارت در سیستم‌های گرمایی مختلف پرداخته‌اند [۳]. در میان کاربردهای متفاوت نانو سیالات، استفاده آن‌ها در انرژی‌های تجدیدپذیر به خصوص در انرژی خورشیدی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. نانو سیالات عموماً ظرفیت حرارتی پایین‌تری نسبت به سیالات متدال دارند. بنابراین، استفاده از نانو سیالات در کالکتورهای خورشیدی به عنوان اصلی ترین جزء

۱- مقدمه کالکتورهای خورشیدی در واقع مبدل‌های حرارتی هستند که انرژی تابشی خورشید را به انرژی درونی سیال عامل کالکتور تبدیل می‌نمایند. این وسایل با جذب انرژی تابشی خورشید آن را به صورت گرمایی به سیال جاری در کالکتور (معمولًا هوا، آب یا روغن)، منتقل نموده و این انرژی جمع‌آوری شده از سیال جاری در کالکتور یا مستقیماً موجب گرم کردن آب مصرفی می‌شود و یا در مخزنی مخصوص ذخیره‌سازی گردیده که می‌توان از آن در شب و یا در روزهای ابری استفاده نمود [۱]. کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی به دلیل سادگی طراحی، عملکرد مناسب و تعداد اجزای مکانیکی کمتر، پرکاربردترین و مشهورترین نوع کالکتورهای خورشیدی برای سیستم‌های آبگرم کن خورشیدی مورد استفاده در انواع ساختمان‌های مسکونی و اداری می‌باشند. به همین دلیل در این پژوهش از این نوع کالکتورها در سیستم

^۱ Propylene glycol

Please cite this article using:

J.Ghandehari1, A.Kianifar, Experimental Investigation on the Effect of Iron Oxide (Fe_3O_4) Nanofluid on the Exergy Efficiency of Flat-Plate Solar Collectors in the Building, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 217-221, 2016 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

انرژی تابشی خورشیدی دمای خروجی اش از کالکتور بالا رفته و به وسیله لوله‌های مسی به داخل یک مبدل گرمایی منتقل می‌شود و انرژی دریافتی خود را در داخل یک مخزن به آب گرم مصرفی برای مصارف مختلف چون شستشو و ظرفشویی منتقل می‌کند و پس از از دست دادن انرژی خود و کاهش دما دوباره به سمت ورودی کالکتور پمپ می‌گردد. در این سیستم طراحی شده از یک ترموموپل مدل پی‌تی 100 برای اندازه‌گیری دمای محیط و تابش سنج کیپاندنزون برای اندازه‌گیری مقدار تابش در سطح افق استفاده شده که هر دو به یک دیتالاگر لوفت متصل و اطلاعات را به صورت لحظه‌ای پاداشت و ذخیره می‌نمایند. همچنین از دو دما‌سنج خودکاری برای اندازه‌گیری دمای ورود و خروج سیال از کالکتور استفاده شده است به طوری که سنسور دما‌سنج‌ها کاملاً داخل جریان و مطابق با استاندارد اشری قرار گرفته است [8]. برای تنظیم نمودن دبی نیز از سه درجه‌ی موجود در پمپ و باز یا بسته کردن شیر کنترل جریان بعد از پمپ استفاده گردیده تا دبی موردنظر ایجاد گردد. قبل از آزمایش‌ها، تمامی وسایل به طور کامل و با دقت کالیبره شده‌اند. آزمایش‌ها در فصل تابستان و در روزهای کاملاً آفتابی مطابق استاندارد اشری برای سه غلاظت نانوسيال 0 و 0.1 و 0.3 درصد جرمی و سه دبی حجمی مختلف 1 و 1.5 و 2 لیتر بر دقیقه در شهر مشهد در پژوهشگاهی هوا خورشید دانشگاه فردوسی با طول جغرافیایی 59.35 و عرض جغرافیایی 36.17 انجام گرفته است. تمامی آزمایش‌ها با رعایت کامل استاندارد اشری برای انجام آزمایش در کالکتورهای خورشیدی برای تامین آب گرم مصرفی در منازل انجام پذیرفته است.

4- محاسبات بازدهی اگزرزی

برای به دست آوردن مقادیر اگزرزی از معادلات اگزرزی در سیستم استفاده می‌نمایند که این معادله برای کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی به صورت کلی زیر تعریف می‌گردد [6]:

$$\dot{E}x_{in} + \dot{E}x_s + \dot{E}x_{out} + \dot{E}x_d = 0 \quad (1)$$

نرخ اگزرزی ورودی خود از دو قسمت نرخ اگزرزی ورودی براساس جریان سیال و نرخ اگزرزی ورودی براساس نرخ اگزرزی تابشی تشکیل شده است.

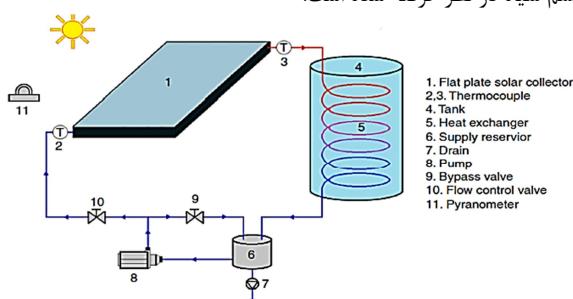
نرخ اگزرزی ورودی براساس جریان سیال به صورت رابطه (2)، تعریف می‌گردد [6]:

$$\dot{E}x_{in} = \dot{m}c_p \left[T_{in} - T_a - T_a \ln \left(\frac{T_{in}}{T_a} \right) \right] \quad (2)$$

نرخ اگزرزی تابش جذب شده که جزوی از اگزرزی ورودی می‌باشد به صورت رابطه (3) تعریف می‌گردد [6]:

$$\dot{E}x_s = \eta_0 G_t A_p \left[1 - \left(\frac{T_a}{T_s} \right) \right] \quad (3)$$

در رابطه فوق دمای سطح خورشید برابر با 5700 درجه کلوین و به صورت جسم سیاه در نظر گرفته شده است.



شکل 2 شکل شماتیکی سیستم آب گرم کن خورشیدی

آب گرم کن‌های خورشیدی موجب بالا رفتن دمای خروجی از کالکتور می‌شود که همین امر یعنی دمای بالاتر خروجی سیال برای بسیاری از کاربردها به ویژه سیستم‌های گرمایشی ساختمان‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در زیر به مرور چند تحقیق انجام گرفته بر تأثیر نانوسيالات بر بازدهی اگزرزی کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی پرداخته شده است.

در پژوهشی فرهت و همکاران [4]، به صورت تئوری به بررسی قانون دوم ترمودینامیک و بهینه‌سازی اگزرزی کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی کالکتور خورشیدی به این نتیجه رسیدند که با بالا رفتن دمای ورودی، قطر لوله‌های کالکتور و همچنین مقدار تابش، بازدهی اگزرزی کالکتور بیشتر می‌شود.

علیم و همکاران [5]، به صورت تئوری به بررسی قانون اول و دوم ترمودینامیک در کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی با استفاده از نانوسيالات متفاوت (نانوذرات اکسید مس، اکسید الومینیوم، اکسید تیتانیوم و اکسید سیلیسیوم در سیال پایه‌ی آب) در دبی‌های مختلف پرداخته‌اند. آن‌ها نانوسيالات را با درصد جرمی بین 1 تا 4 لیتر بر دقیقه در کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی مورد آزمایش قرار دادند که در انتها نانوسيال اکسید مس با کاهش آنتروپی تولیدی 4.3 درصد و افزایش ضربی انتقال حرارت به میزان 22.15 درصد بهترین نوع نانوسيال در میان دیگر نانوسيالات به کار رفته در کالکتور صفحه تخت خورشیدی معرفی گردید.

2- طرز تهیه نانوسيال

در این پژوهش، برای تهیه نانوسيال از نانوذرات اکسید آهن (مگنتیت) با قطر متوسط 40 نانومتر در مخلوط 50 درصد حجمی آب و پروپیلن گلکول استفاده شده است، به طوری که با توجه به درصد جرمی مورد نیاز، نانوذرات آهسته در سیال پایه ریخته شده و به وسیله همزن به طور همزمان مخلوط گردیده‌اند. سپس، به محلول چند قطره اسید استیک اضافه کرده و محلول برای مدت سی دقیقه داخل حمام اولتراسونیک قرار داده تا از کلخه‌ای شدن نانوذرات جلوگیری شود و ته نشینی نانوذرات در نانوسيال به حداقل برسد، به این شیوه، با چشم غیرمسلح حداقل پس از یک ماه هیچگونه ته نشینی مشاهده نگردید. لازم به ذکر است که اضافه کردن اولتیک اسید باعث کلخه‌ای شدن نانوذرات شده است. نانوسيالات برای دو درصد جرمی متفاوت 0.1 و 0.3 درصد جرمی آماده شده‌اند. در "شکل 1"، تصویر نانوفروسيال پایدار شده و استفاده شده در آزمایش آورده شده است.

3- روش انجام آزمایش

همان‌طور که در "شکل شماتیکی 2"، نشان داده شده است، نانوسيال به وسیله یک پمپ سیرکوله داخل سیکل بسته‌ی آب‌گرم کن خورشیدی طراحی شده چرخش می‌کند، به طوری که نانوسيال پس از گرم شدن و دریافت



شکل 1 تصویر نانوسيال استفاده شده در آزمایش

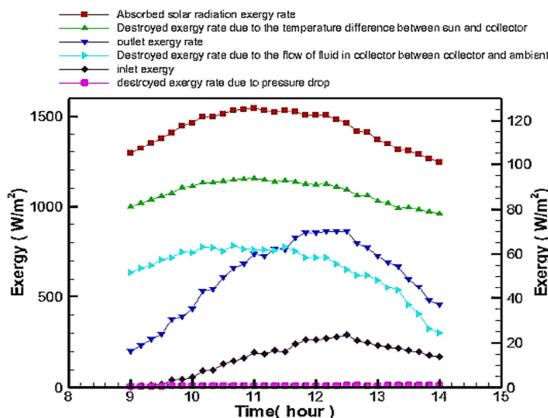


Fig.3 تغییرات نرخ‌های اگررژی تابش جذب شده و اگررژی تخریب شده ناشی از اختلاف دمای خورشید و سطح کالکتور، اگررژی نشست شده، اگررژی ناشی از جریان سیال و اختلاف دمای سطح کالکتور و دمای سیال و همچنین اختلاف نرخ اگررژی‌های خروج و ورود

اختلاف دمای ورود و خروج سیال از کالکتور می‌باشد. در این نمودار به دلیل افت فشار به دلیل مقدار بسیار اندک آن (کمتر از یک وات) در پایین نمودار مشخص شده است.

با توجه به روابط بازدهی اگررژی، مقدار بازدهی در روزها و ساعت مختلف آزمایش در بازه‌های 10 دقیقه‌ای برای دبی‌ها و درصد جرمی‌های مختلف نانوسیال محاسبه گردیده‌اند. در "اشکال 4 و 5"، مقدار بازدهی اگررژی در ساعت مختلف روز با توجه به مقدار تابش و دمای محیط نشان داده شده‌اند. از "اשکال 4 و 5"، مشخص می‌گردد با بیشتر شدن مقدار تابش و در نتیجه میانگین دمای سطح کالکتور، مقدار بازدهی اگررژی کالکتور افزایش می‌باید همچنین با افزودن نانوذره فرو-مگنتیت به سیال پایه (50 درصد پروبیلن گلکیول و 50 درصد آب)، بازدهی اگررژی در شرایطی که مقدار تابش دریافتی تقریباً برابر بوده، افزایش مناسبی داشته است.

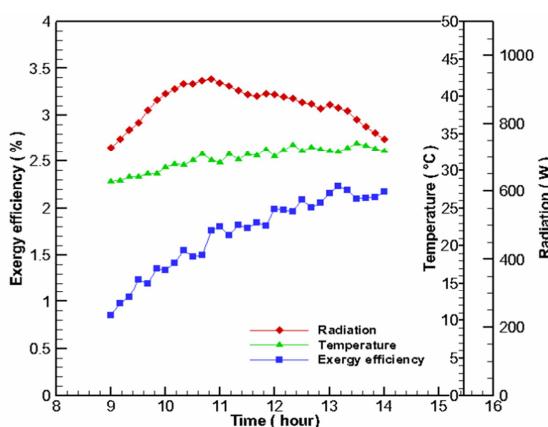


Fig.4 تغییرات بازدهی اگررژی براساس مقدار تابش و دمای محیط برای ساعت مختلف روز در حالت سیال پایه با دبی 1.5 لیتر بر دقیقه

نرخ اگررژی خروجی سیال به صورت رابطه (4)، تعریف می‌گردد [6]:

$$\dot{Ex}_{out} = \dot{m} c_p \left[T_{out} - T_a - T_a \ln \left(\frac{T_{out}}{T_a} \right) \right] \quad (4)$$

نرخ اگررژی تخریب شده کالکتور خود از سه نرخ اگررژی تخریب شده مطابق رابطه (5) تشکیل شده است [6]:

$$\dot{Ex}_d = \dot{Ex}_{d,\Delta T_s} + \dot{Ex}_{d,\Delta P} + \dot{Ex}_{d,\Delta T_f} \quad (5)$$

به طوری که اگررژی تخریب شده ناشی از اختلاف دما بین سطح کالکتور و سطح خورشید برابر است با [6]:

$$\dot{Ex}_{d,\Delta T_s} = -\eta_o G_t A_p T_a \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_s} \right) \quad (6)$$

در کالکتور صفحه تخت خورشیدی نرخ اگررژی ناشی از حرارت نشست شده از سطح جاذب کالکتور به محیط پیرامون، نرخ اگررژی تلف شده ناشی از اتلاف حرارت با محیط معرفی می‌گردد که با رابطه (7) معرفی می‌گردد [6]:

$$\dot{Ex}_{d,\Delta T_f} = -U_L A_p (T_p - T_a) \left(1 - \frac{T_a}{T_p} \right) \quad (7)$$

و در انتهای اگررژی تخریب شده ناشی از افت فشار در کالکتور برابر است با [6]:

$$\dot{Ex}_{d,\Delta P} = -\frac{m \Delta P}{\rho} \quad (8)$$

در روابط بالا c_p ظرفیت حرارتی سیال استفاده شده در کالکتور می‌باشد که در صورت استفاده از نانوسیال ظرفیت حرارتی نانوسیال از رابطه (9) بدست می‌آید [6]:

$$C_{p,np} = \frac{\emptyset(\rho_{np} C_{p,np}) + (1 - \emptyset)(\rho_{bf} C_{p,bf})}{\emptyset\rho_{np} + (1 - \emptyset)\rho_{bf}} \quad (9)$$

در این رابطه \emptyset درصد جرمی نانوسیال و $C_{p,np}$ و ρ_{np} به ترتیب ظرفیت حرارتی و چگالی سیال پایه، $C_{p,np}$ و ρ_{bf} به ترتیب ظرفیت حرارتی و چگالی نانوذره می‌باشند.

بازدهی اگررژی کالکتور صفحه تخت خورشیدی به صورت اختلاف اگررژی ورودی و خروجی جریان سیال عامل بر اگررژی تابشی توسط منع تابش تعريف می‌گردد [7].

$$\eta_{ex} = \frac{mc_p \left[T_{out} - T_{in} - T_a \ln \left(\frac{T_{out}}{T_{in}} \right) \right]}{G_t A_p \left(1 - \frac{T_a}{T_s} \right)} \quad (10)$$

5- نتایج

برای بررسی بازدهی اگررژی در ابتدا بایستی نرخ‌های مختلف اگررژی در کالکتور صفحه تخت خورشیدی را مورد بررسی قرار داد. در "شکل 3" تغییرات نرخ‌های مختلف اگررژی برای نانوسیال با درصد جرمی 0.3% در دبی 2 لیتر بر دقیقه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از "شکل 3" مشخص می‌گردد با افزایش مقدار تابش بر سطح کالکتور و در نتیجه بالارفتن دمای سطح کالکتور و دمای سیال عامل، مقدار نرخ‌های اگررژی همگی افزایش پیدا می‌کنند. برای دو منحنی اگررژی تابش جذب شده و اگررژی تخریب شده ناشی از اختلاف دمای سطح کالکتور و دمای سطح خورشید، مقدادرین این دو نرخ اگررژی نسبت به دیگر مقدادرین نرخ‌های اگررژی بیشتر می‌باشند و با افزایش مقدار تابش، این دو نرخ اگررژی افزایش چشمگیری دارند اما دیگر مقدادرین نرخ‌های اگررژی تخریب شده و نشت شده و همچنین اختلاف نرخ اگررژی ورود و خروج سیال عامل کالکتور مقدادرین نسبتاً کمتری دارا می‌باشند. همچنین نرخ اگررژی خروج و ورود نیز با بیشتر شدن تابش، افزایش می‌باید که این موضوع به دلیل بیشتر شدن

6- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیرات نانوسیال اکسید آهن (مگنتیت) با سیال پایه‌ی مخلوط 50% پروپیلن گلیکول و آب بر بازدهی اگررژی آبگرمکن‌های خورشیدی که موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی ساختمان می‌گردد، مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. آزمایش‌ها برای نانوسیال با درصد جرمی‌های 0 و 0.1 و 0.3 در سه دبی 1 و 1.5 و 2 لیتر بر دقیقه انجام پذیرفت. در ابتدا بررسی عوامل موثر در اگررژی کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی پرداخته شد که بیشترین نرخ اگررژی تخریب شده ناشی از اختلاف دمای سطح کالکتور و دمای سطح خورشید به دلیل اختلاف زیاد بین این دو دما می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شده است بازدهی اگررژی رابطه مستقیم با ظرفیت حرارتی و ضریب هدایت سیال عامل دارد و با توجه به این که استفاده از نانوسیال باعث افزایش ضریب هدایت می‌گردد استفاده از نانوسیال می‌تواند باعث افزایش بازدهی اگررژی گردد. نتایج بدست آمده در این آزمایش‌ها نشان دهنده افزایش 0.9 درصدی بازدهی اگررژی است. نتایج در این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان و درصد جرمی نانوسیال بازدهی اگررژی به دلیل کاهش اتلافات اگررژی افزایش می‌یابد.

7- فهرست علامی

A_p	مساحت سطح کالکتور (m^2)
C_p	ظرفیت حرارتی ($J/kg \cdot K$)
E_x	نرخ اگررژی (W)
T	دما (K)
\dot{m}	دبی جرمی کل جریان (kg/s)
G_t	مقدار تابش تابیده شده بر سطح کالکتور (W/m^2)
علامی یونانی	
\emptyset	درصد جرمی نانوسیال
ρ	چکالی (kgm^{-3})
η	بازدهی
زیرنویس‌ها	
in	هوای
out	مقدار متوسط
a	محیط
s	سطح خورشید
ex	اگررژی
np	نانو ذره
bf	سیال پایه
nf	نانوسیال

8- منابع

- [1] S. A. Kalogirou, *Solar energy engineering: processes and systems*: Academic Press, 2013 .
- [2] E. Shojaeizadeh, F. Veysi, T. Yousefi, F. Davodi, An experimental investigation on the efficiency of a Flat-plate solar collector with binary working fluid: A case study of propylene glycol (PG)-water, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 53, pp. 218-226, 2014 .
- [3] T. Yousefi, F. Veysi, E. Shojaeizadeh, S. Zinadini, An experimental investigation on the effect of Al₂O₃-H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors, *Renewable Energy*, Vol. 39, No. 1, pp. 293-298, 2012 .
- [4] S. Farahat, F. Sarhaddi, H. Ajam, Exergetic optimization of flat plate solar collectors, *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 4, pp. 1169-1174, 2009 .

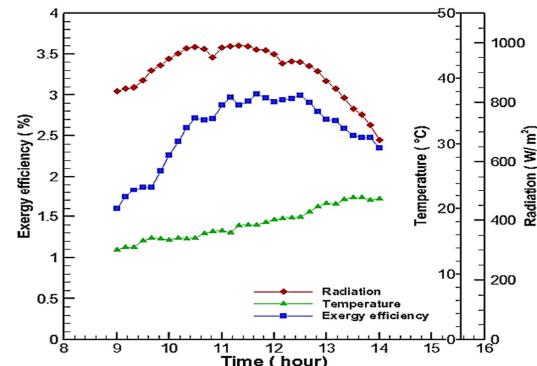


Fig.5 Exergy efficiency variances according to irradiance duration and ambient temperature in different day hours at the nanofluid mode with mass percentage 0.3% and volumetric flow rate 1.5 liters / minute

شکل 5 تغییرات بازدهی اگررژی براساس مقدار تابش و دمای محیط برای ساعت مختلف روز در حالت نانوسیال با درصد جرمی 0.3% با دبی 1.5 لیتر بر دقیقه

برای مقایسه بازدهی اگررژی برای نانوسیال فرومگنتیت در غلظت‌ها و دبی‌های متفاوت لازم است برای هر روز آزمایش، بازدهی اگررژی برای تمامی ساعت‌های محاسبه گردد و پس از رسم نمودار بازدهی اگررژی برحسب ساعت‌های مختلف روز، مطابق "شکل 4 و 5"، سطح زیر نمودار بازدهی اگررژی محاسبه گردد و سپس با توجه به ساعت‌های آزمایش (از ساعت 9 تا 14)، برای هر روز آزمایش یک مقدار متوسط برای بازدهی اگررژی محاسبه گردد که نماینده بازدهی اگررژی برای یک روز آزمایش می‌باشد. به این ترتیب مطابق "شکل 6"، می‌توان بازدهی اگررژی را برحسب درصد جرمی‌های مختلف نانوسیال فرومگنتیت برای دبی‌های مختلف رسم نمود.

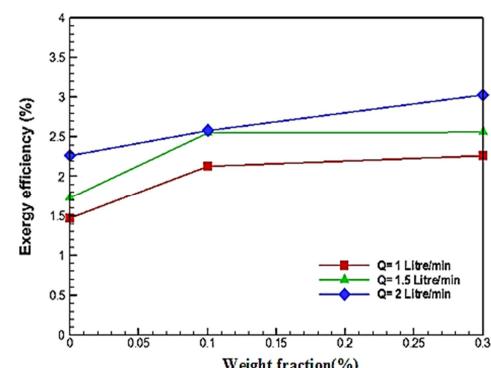


Fig.6 Exergy efficiency variances according to mass percentage and various volumetric flow rate of iron oxide nanofluid
شکل 6 تغییرات بازدهی اگررژی براساس درصد جرمی‌ها و دبی‌های مختلف نانوسیال اکسید آهن

از "شکل 6"، می‌توان دریافت با افزایش غلظت نانوسیال فرومگنتیت از صفر تا سه دهم درصد، مقدار بازدهی اگررژی برای تمامی دبی‌ها مورد آزمایش افزایش می‌یابد که با استفاده از نانوسیال میزان افزایش بازدهی نسبت به حالت سیال عامل بدون نانوسیال حدود 0.9 درصد می‌باشد. همچنین به طور کلی با افزایش دبی جریان نانوسیال، بازدهی اگررژی کالکتور صفحه تخت خورشیدی افزایش می‌یابد، زیرا افزایش دبی و کاهش اتلافات حرارتی، میزان اگررژی تخریب شده کل کاهش یافته که این موضوع موجب بالا رفتن بازدهی اگررژی کالکتور می‌گردد.

- [6] A .Bejan, Theory of heat transfer-irreversible power plants, *International Journal of Heat and mass transfer*, Vol. 31, No. 6, pp. 1211-1219, 1988 .
- [7] I. Luminosu, L. Fara, Determination of the optimal operation mode of a flat solar collector by exergetic analysis and numerical simulation, *Energy*, Vol. 30, No. 5, pp. 731-747, 2005.
- [5] M. Alim, Z .Abdin, R. Saidur, A. Hepbasli, M. Khairul, N. Rahim, Analyses of entropy generation and pressure drop for a conventional flat plate solar collector using different types of metal oxide nanofluids, *Energy and Buildings*, Vol. 66, pp. 289-296, 2013.