



# بررسی آزمایشگاهی تاثیرات نانوسیال اکسید آهن (فرو مگنتیت) بر بازدهی انرژی در کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی در ساختمان

جلال قندهاری<sup>1\*</sup>، علی کیانی<sup>2</sup>

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

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

\* مشهد، صندوق پستی 9177511111، a-kiani@um.ac.ir

## چکیده

یکی از روش های نوین بهبود عملکرد حرارتی کالکتورهای خورشیدی به عنوان مهمترین جزء آبگرمکن های خورشیدی، استفاده از نانوسیالات می باشد. یکی از مسائلی که همواره در سیستم های ترمودینامیکی مورد توجه می باشد، بهینه سازی انرژی یا بالا بردن بازدهی انرژی سیستم ترمودینامیکی است. در این پژوهش، تاثیرات نانوسیال اکسید آهن با سیال پایه مخلوط 50 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 نانوسیال اکسید آهن در غلظت های مختلف نانوذره تا سه دهم درصد جرمی و در سه دبی مختلف مورد آزمایش قرار گرفته اند. آزمایشات تمامی در روزهای صاف و بدون ابر فصل تابستان و در پژوهشگاه هواخوردی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده پتانسیل مناسب نانوسیال اکسید آهن در افزایش بازدهی انرژی کالکتور صفحه تخت خورشیدی به عنوان اصلی ترین جزء آبگرمکن خورشیدی می باشد. نتایج بدست آمده نشان دهنده افزایش 2.1 درصدی بازدهی انرژی کالکتور صفحه تخت خورشیدی می باشد.

**کلید واژگان:** کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی، نانوسیال اکسید آهن (فرومگنتیت)، بازده انرژی

## 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. 9177511111 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

## 1- مقدمه

آبگرمکن خورشیدی استفاده شده است. همچنین در این پژوهش از مخلوط آب و پروپیلن گلیکول<sup>1</sup> به عنوان سیال پایه استفاده شده است تا ضمن استفاده از خواص ضدیخ و ضدجوش بودن پروپیلن گلیکول و جلوگیری از یخ زدگی سیال در کالکتور، با افزودن آب از کاهش شدید انتقال حرارت (به دلیل انتقال حرارت پایین پروپیلن گلیکول) جلوگیری شود [2].

در دهه ی گذشته، بسیاری از محققان به ارزیابی تاثیرات نانوسیالات بر بهبود انتقال حرارت در سیستم های گرمایی مختلف پرداخته اند [3]. در میان کاربردهای متفاوت نانوسیالات، استفاده از آنها در انرژی های تجدیدپذیر به خصوص در انرژی خورشیدی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. نانوسیالات عموماً ظرفیت حرارتی پایین تری نسبت به سیالات متداول دارند. بنابراین، استفاده از نانوسیالات در کالکتورهای خورشیدی به عنوان اصلی ترین جزء

کالکتورهای خورشیدی در واقع مبدل های حرارتی هستند که انرژی تابشی خورشید را به انرژی درونی سیال عامل کالکتور تبدیل می نمایند. این وسایل با جذب انرژی تابشی خورشید آن را به صورت گرما به سیال جاری در کالکتور (معمولاً هوا، آب یا روغن)، منتقل نموده و این انرژی جمع آوری شده از سیال جاری در کالکتور یا مستقیماً موجب گرم کردن آب مصرفی می شود و یا در مخزنی مخصوص ذخیره سازی گردیده که می توان از آن در شب و یا در روزهای ابری استفاده نمود [1]. کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی به دلیل سادگی طراحی، عملکرد مناسب و تعداد اجزای مکانیکی کمتر، پرکاربردترین و مشهورترین نوع کالکتورهای خورشیدی برای سیستم های آبگرمکن خورشیدی مورد استفاده در انواع ساختمان های مسکونی و اداری می باشند. به همین دلیل در این پژوهش از این نوع کالکتورها در سیستم

<sup>1</sup> 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 farsi)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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 farsi)

انرژی تابشی خورشید دمای خروجی‌اش 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 ترموکوپل مدل پی‌تی 100 برای اندازه‌گیری دمای محیط و تابش سنسج کیپ‌اندزون برای اندازه‌گیری مقدار تابش در سطح افق استفاده شده که هر دو به یک دیتالاگر لوفت متصل و اطلاعات را به صورت لحظه‌ای یادداشت 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 غلظت نانوسیال 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 پژوهشکده‌ی 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 انرژی

برای به‌دست آوردن مقادیر انرژی از معادلات انرژی 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 انرژی ورودی خود از دو قسمت نرخ انرژی ورودی براساس جریان سیال و نرخ انرژی ورودی براساس نرخ انرژی تابشی تشکیل شده است. نرخ انرژی 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 انرژی تابش جذب شده که جزئی از انرژی ورودی می‌باشد به صورت رابطه (3) تعریف می‌گردد [6]:

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

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

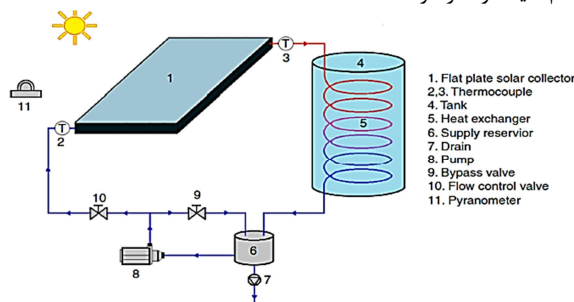


Fig.2 Schematic picture of solar water heater system

شکل 2 شکل شماتیکی سیستم آب گرم کن خورشیدی

آب گرم‌کن‌های 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 نانوسیالات بر بازدهی انرژی کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی پرداخته شده است.

در پژوهشی فرهت و همکاران [4]، به صورت تئوری به بررسی قانون دوم ترمودینامیک و بهینه‌سازی انرژی 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 انرژی 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 نانوسیالات متفاوت (نانوذرات اکسید مس، اکسید آلومینیوم، اکسید تیتانیوم و اکسید سیلیسیم در سیال پایه‌ی آب) در دبی‌های مختلف پرداخته‌اند. آن‌ها نانوسیالات را با درصد جرمی بین 1 تا 4 درصد در دبی‌های بین 1 تا 4 لیتر بر دقیقه در کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی مورد آزمایش قرار دادند که در انتها نانوسیال اکسید مس با کاهش آنتروپی تولیدی 4.3 درصد و افزایش ضریب انتقال حرارت به میزان 22.15 درصد بهترین نوع نانوسیال در میان دیگر نانوسیالات به کار رفته در کالکتور صفحه تخت خورشیدی معرفی گردید.

#### 2- طرز تهیه نانوسیال

در این پژوهش، برای تهیه نانوسیال از نانوذرات اکسید آهن (مگنتیت) با قطر متوسط 40 نانومتر در مخلوط 50 درصد جرمی آب و پروپیلن گلیکول 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 دستگاه اولتراسونیک قرار داده تا از کلوخه‌ای شدن نانوذرات جلوگیری شود و ته نشینی نانوذرات در نانوسیال به حداقل برسد، به این شیوه، با چشم غیرمسلح حداقل پس از یک ماه هیچگونه ته‌نشینی مشاهده نگردید. لازم به ذکر است که اضافه کردن اولئیک اسید باعث کلوخه‌ای شدن نانوذرات شده است. نانوسیالات برای دو درصد جرمی متفاوت 0.1 و 0.3 درصد جرمی آماده شده‌اند. در "شکل 1"، تصویر نانوفروسال پایدار شده و استفاده شده در آزمایش آورده شده است.

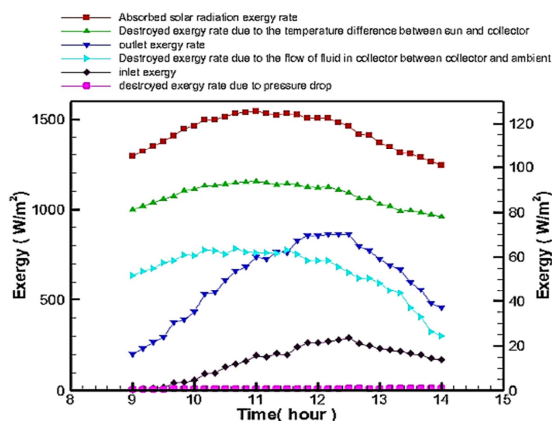
#### 3- روش انجام آزمایش

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



Fig. 1 Nanofluid picture used in the test

شکل 1 تصویر نانوسیال استفاده شده در آزمایش

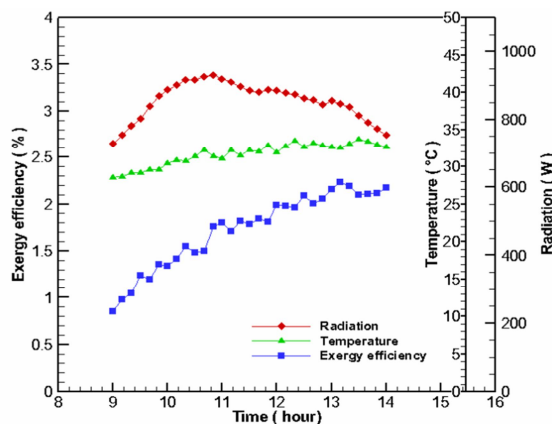


**Fig.3** Variations of absorbed radiation Exergy Rate and destroyed Exergy by the solar temperature variations and collector surface, leaking Exergy, Exergy based on fluid flow and the temperature variations between collector surface and the fluid temperature as well as departure and Variations of inlet and outlet Exergies Rate

شکل 3 تغییرات نرخ‌های انرژی تابش جذب شده و انرژی تخریب شده ناشی از اختلاف دمای خورشید و سطح کالکتور، انرژی تخریب شده ناشی از جریان سیال و اختلاف دمای سطح کالکتور و دمای سیال و همچنین اختلاف نرخ انرژی‌های خروج و ورود

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

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



**Fig.4** Exergy efficiency variations according to irradiance duration and ambient temperature in different day hours at the base fluid mode with volumetric flow rate 1.5 liters / minute

شکل 4 تغییرات بازدهی انرژی براساس مقدار تابش و دمای محیط برای ساعات مختلف روز در حالت سیال پایه با دبی 1.5 لیتر بر دقیقه

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

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

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

$$\dot{E}x_d = \dot{E}x_{d,\Delta T_s} + \dot{E}x_{d,\Delta P} + \dot{E}x_{d,\Delta T_f} \quad (5)$$

به‌طوری‌که انرژی تخریب شده ناشی از اختلاف دما بین سطح کالکتور و سطح خورشید برابر است با [6]:

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

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

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

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

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

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]:

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

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

بازدهی انرژی کالکتور صفحه تخت خورشیدی به صورت اختلاف انرژی ورودی و خروجی جریان سیال عامل بر انرژی تابشی توسط منبع تابش تعریف می‌گردد [7].

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

## 5- نتایج

برای بررسی بازدهی انرژی در ابتدا بایستی نرخ‌های مختلف انرژی در کالکتور صفحه تخت خورشیدی را مورد بررسی قرار داد. در "شکل 3" تغییرات نرخ‌های مختلف انرژی 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 بالا رفتن دمای سطح کالکتور و دمای سیال عامل، مقادیر نرخ‌های انرژی همگی افزایش پیدا می‌کنند. برای دو منحنی انرژی تابش جذب شده و انرژی تخریب شده ناشی از اختلاف دمای سطح کالکتور و دمای سطح خورشید، مقادیر این دو نرخ انرژی نسبت به دیگر مقادیر نرخ‌های انرژی بیشتر می‌باشند و با افزایش مقدار تابش، این دو نرخ انرژی افزایش چشمگیری دارند اما دیگر مقادیر نرخ‌های انرژی تخریب شده و نشت شده و همچنین اختلاف نرخ انرژی ورود و خروج سیال عامل کالکتور مقادیر نسبتاً کمتری دارا می‌باشند. همچنین نرخ انرژی خروج و ورود نیز با بیشتر شدن تابش، افزایش می‌یابد 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 انرژی 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 انرژی کالکتورهای صفحه تخت خورشیدی پرداخته شد که بیشترین نرخ انرژی 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 انرژی رابطه مستقیم با ظرفیت حرارتی و ضریب هدایت سیال عامل دارد و با توجه به این‌که استفاده از نانوسیال باعث افزایش ضریب هدایت می‌گردد استفاده از نانوسیال می‌تواند باعث افزایش بازدهی انرژی گردد. نتایج بدست آمده در این آزمایش‌ها نشان دهنده افزایش 0.9 درصدی بازدهی انرژی است. نتایج در این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان و درصد جرمی نانوسیال بازدهی انرژی به دلیل کاهش اتلافات انرژی افزایش می‌یابد.

## 7- فهرست علائم

$A_p$	مساحت سطح کالکتور ( $m^2$ )
$C_p$	ظرفیت حرارتی ( $J/kg \cdot K$ )
$\dot{E}_x$	نرخ انرژی ( $W$ )
$T$	دما ( $K$ )
$\dot{m}$	دبی جرمی کل جریان ( $kg/s$ )
$G_t$	مقدار تابش تابیده شده بر سطح کالکتور ( $W/m^2$ )

## علائم یونانی

$\phi$	درصد جرمی نانوسیال
$\rho$	چگالی ( $kg/m^3$ )
$\eta$	بازدهی
زیر نویس‌ها	
in	هوا
out	مقدار متوسط
a	محیط
s	سطح خورشید
ex	انرژی
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 Al 2 O 3-H 2 O 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.

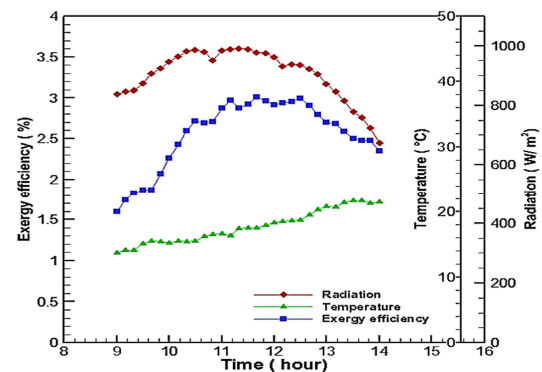


Fig.5 Exergy efficiency variances according to irradiance duration and ambient temperature in different day hours at the nanofluid mode with mass percentage 0.3% and volumetric flow rate 1.5 liters / minute

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

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

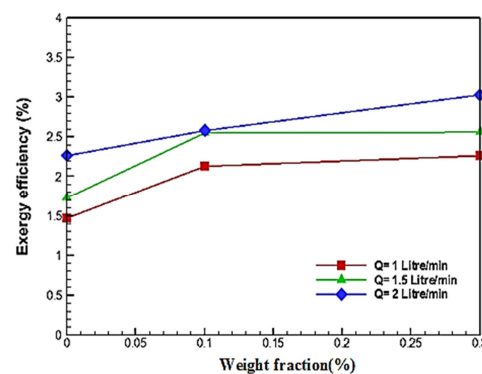


Fig.6 Exergy efficiency variances according to mass percentage and various volumetric flow rate of iron oxide nanofluid

شکل 6 تغییرات بازدهی انرژی براساس درصد جرمی‌ها و دبی‌های مختلف نانوسیال اکسید آهن

از "شکل 6"، می‌توان دریافت با افزایش غلظت نانوسیال فرومگنتیت از صفر تا سه درصد، مقدار بازدهی انرژی 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 به‌طور کلی با افزایش دبی جریان نانوسیال، بازدهی انرژی کالکتور صفحه تخت خورشیدی افزایش می‌یابد، زیرا افزایش دبی و کاهش اتلافات حرارتی، میزان انرژی تخریب شده کل کاهش یافته که این موضوع موجب بالا رفتن بازدهی انرژی 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.