

Thermodynamic Analysis of Flat Plate Solar Collector Simulator and Optimization of Process Variables

MOHAMMAD AHMAND¹, FAROOGH SHARIFIAN^{1*}, ALI MOHAMMAD NIKBAKHT¹, VAHID ROSTAMPOUR¹,
EDRIS RAHMATI⁴

1. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Urmia University, Urmia, Iran

2. Department of Bioresource Engineering, Tarbiat modares University, Tehran, Iran.

(Received: Aug. 23, 2019- Revised: Oct. 12, 2019- Accepted: Oct. 23, 2019)

ABSTRACT

In this paper the energy and exergy analysis of flat plate solar collector simulator equipped with Inclined Broken Rib roughness was investigated based on experimental data in open circuit as well as optimizing system operating conditions. The experiments were carried out with nine levels of mass flow rates (0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10 and 0.11 kg/s), five levels of heat flux (1000, 1100, 1200, 1300 and 1400 W/m²) and three levels of ambient air temperature (20, 25 and 30 °C). The results showed that the highest and lowest values of energy efficiency were found 49.8 and 0.3%, in treatments with ambient temperature of 20 and 25 °C, mass flow rate of 0.11 kg/s and heat flux of 1000 and 1400 W/m², respectively. Also, the highest and lowest exergy efficiency were calculated 5.75 and 0.607% in treatments with ambient temperature of 20 and 30 °C, mass flow rate of 0.11 kg/s and 0.03 and heat flux of 1000 W/m², respectively. The response surface methodology was employed to optimize solar collector operating conditions. Optimum operating conditions were found to be an ambient temperature of 20 °C, mass flow rate of 0.11 kg/s and heat flux of 1000 W/m². At this optimum condition, the energy and exergy efficiency were found to be 42.08 and 5.76%, respectively at a desirability level of 0.92.

Keywords: Exergy efficiency, Energy efficiency, Solar Energy, Response Surface Methodology

آنالیز ترمودینامیکی شبیه‌ساز کلکتور خورشیدی صفحه تخت و بهینه‌سازی متغیرهای فرآیند

محمد آهمنده^۱، فاروق شریفیان^{۱*}، علی محمد نیکبخت^۱، وحید رستم‌پور^۱، ادریس رحمتی^۲

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۷/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۸/۱۱)

چکیده

در تحقیق حاضر تحلیل انرژی و اکسرژی شبیه‌ساز کلکتور خورشیدی صفحه تخت مجهز به ناهمواری Inclined Broken Rib بر اساس داده‌های تجربی در یک مدار باز و همچنین بهینه‌سازی شرایط کارکرد سامانه صورت گرفته است. آزمایش‌ها در نه سطح دبی جرمی (۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۶، ۰/۰۷، ۰/۰۸، ۰/۰۹، ۰/۱۰ و ۰/۱۱) kg/s، پنج سطح شار حرارتی (۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۴۰۰) W/m² و سه سطح دمای هوای محیط (۲۰، ۲۵ و ۳۰) °C انجام شد. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار بازده انرژی به ترتیب در تیمارهای با دمای محیط ۲۰°C و ۲۵، دبی جرمی ۰/۱۱ kg/s و شار حرارتی ۱۰۰۰ W/m² با مقادیر ۴۹/۸ و ۰/۳ درصد به دست آمد. همچنین بیشترین و کمترین مقدار بازده اکسرژی به ترتیب برابر ۵/۷۵ و ۰/۶۰۷ درصد در تیمارهای با دمای محیط ۲۰°C و ۳۰، دبی جرمی ۰/۱۱ kg/s و ۰/۰۳ و شار حرارتی ۱۰۰۰ W/m² محاسبه شد. روش سطح پاسخ برای بهینه‌کردن شرایط کارکرد جمع‌کننده خورشیدی به کار گرفته شد. شرایط بهینه در دمای محیط ۲۰°C، نرخ جریان جریان جرمی ۰/۱۱ kg/s و شار حرارتی ۱۰۰۰ W/m² به دست آمد. در این شرایط بهینه، بازده انرژی و اکسرژی به ترتیب ۴۲/۰۸ و ۵/۷۶ درصد با مطلوبیت ۰/۹۲ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بازده اکسرژی، بازده انرژی، انرژی خورشیدی، روش سطح پاسخ.

مقدمه

با در نظر گرفتن توسعه اقتصادی و رشد سریع تقاضا برای انرژی در کشورهای مختلف، مصرف سالانه انرژی افزایش یافته است. با افزایش بی‌سابقه تقاضا برای انرژی، فاصله بین تقاضا و عرضه بیشتر و این مسئله منجر به مصرف بالای سوخت‌های فسیلی در بخش‌های مختلف همچون: سامانه‌های گرمایشی، خنک‌کننده‌ها و نیروگاه‌ها شده است. از طرف دیگر مصرف بالای سوخت‌های فسیلی نیز منجر به آلودگی‌های زیست محیطی، افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرم شدن کره زمین می‌گردد (Akhmat et al., 2014; Fudholi & Sopian, 2019). کاهش منابع سوخت‌های فسیلی محققین را به سمت منابع انرژی کارآمد، ایمن، پاک و سازگار با محیط زیست همچون؛ انرژی خورشیدی (Al-Liu et al., 2013; Karaghoul & Kazmerski, 2013)، زیست انرژی (Liu et al., 2016)، انرژی هیدروژن (Nojavan et al., 2017)، انرژی امواج دریایی (Zanuttigh et al., 2013) و انرژی زمین‌گرمایی (AlZaharani et al., 2013) سوق داده است.

امروزه فناوری خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر مهم، برای تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی گرمایی

و الکتریسیته شناخته شده است. تخمین زده شده است مقدار انرژی خورشیدی دریافتی توسط زمین در مدت یک ساعت می‌تواند کل انرژی مورد نیاز انسان‌ها در طول سال را فراهم کند (Goswami, 2015). برای تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی‌های مفید و قابل استفاده از پنل‌های خورشیدی یا مبدل‌های حرارتی همچون جمع‌کننده خورشیدی استفاده می‌شود (Allouhi, et al., 2015). پنل‌های خورشیدی نور خورشید را مسقیما به الکتریسته تبدیل می‌کنند، درحالی که جمع‌کننده‌های خورشیدی انرژی تشعشعی خورشید را به انرژی حرارتی تبدیل و بسته به دمای عملیاتی در بخش‌های مختلفی همچون تولید آب گرم، تهویه مطبوع و تبرید، آب‌شیرین‌کن‌ها، پخت و پز، گرمایش منازل و خشک‌کن‌ها به کار گرفته می‌شوند (Al-Othman, et al., 2018; Allouhi, et al., 2015). اصول کاری جمع‌کننده‌ها ساده است، بدین منظور ابتدا انرژی تشعشعی خورشید از پوشش شیشه شفاف با ضریب انتقال بالا عبور و سپس به وسیله یک صفحه جاذب فلز آلومینیومی جذب و به سیال مورد نظر انتقال پیدا می‌کند. گرمای تولید شده می‌تواند مستقیماً به کار گرفته شود و یا برای استفاده احتمالی در یک مخزن ذخیره و در طول شب یا

جمع کننده خورشیدی بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ جریان ورودی به جمع کننده، نسبت انرژی‌های به کار گرفته شده و تلفات اکسرژی کاهش، در حالی که بازده اکسرژی افزایش می‌یابد (Akbulut & Durmuş, 2010). آپادهای و همکاران آنالیز انرژی، اکسرژی و خصوصیات اپتیکی کلکتور صفحه تخت خورشیدی را برای تعیین پارامترهای طراحی و عملیاتی همچون نرخ جریان جرمی، دمای محیط، سرعت باد، هندسه کلکتور، دمای سیال ورودی با استفاده از نانوسیال‌های TiO_2 ، CuO ، Al_2O_3 و SiO_2 مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از نانوسیال‌ها سبب بهبود بازده حرارتی کلکتور می‌گردد، و به تبع آن سبب کاهش هزینه‌ها کاهش می‌یابد. افزایش دمای محیط و سرعت باد سبب کاهش بازده اکسرژی شد، همچنین با افزایش دمای سیال ورودی تا نقطه ماکزیمم، بازده اکسرژی روند افزایشی و بعد از گذر از نقطه ماکزیمم روند کاهشی داشت (Upadhyay et al., 2015). در پژوهشی دیگر تحلیل انرژی و اکسرژی خشک کن خورشیدی آزمایشگاهی با هوای اجباری در سطوح مختلف ضخامت محصول (۵ و ۷ میلی‌متر) و سرعت هوای ورودی (۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه) برای خشک کردن لایه نازک گوجه‌فرنگی انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت هوای ورودی و کاهش ضخامت محصول تلفات اکسرژی و نسبت مصرف انرژی سامانه افزایش، در حالی که میزان بازده اکسرژی و انرژی مصرفی سامانه روند افزایشی دارد (Bagheri et al., 2015). سخایی و ولی‌پور اثر پارامترهای طراحی همچون؛ ضخامت پوشش شیشه شفاف، ضخامت صفحه جاذب، فاصله بین صفحه جاذب و پوشش شیشه‌ای و همچنین اثر استفاده از نانوسیال‌ها را بر روی عملکرد جمع کننده‌های خورشیدی صفحه تخت مورد بررسی قرار دادند. نویسندگان گزارش کردند که نتایج این پژوهش می‌تواند برای ارزیابی و مقایسه روش‌های افزایش انتقال حرارت و انتخاب بهترین گزینه از میان آن‌ها به کار گرفته شود. همچنین می‌توان از مدل‌های دینامیکی برای بررسی رفتار دینامیکی کلکتورهای خورشیدی زمانی که شرایط خارجی همچون شدت تابش خورشیدی در طول تست متفاوت است بهره گرفت (Sakhaei & Valipour, 2019). جمع بندی تحقیقات مذکور حاکی از اهمیت آنالیز انرژی و اکسرژی در سامانه‌های گرمایشی بخصوص جمع کننده‌های خورشیدی است. در اکثر تحقیقات صورت گرفته در زمینه آنالیز انرژی و اکسرژی جمع کننده‌های خورشیدی اثر پارامترهای شار حرارتی و دبی هوای ورودی بر بازدهی انرژی و اکسرژی بررسی شده، در حالی که اثر دمای محیط نادیده گرفته شده یا با دمای سیال ورودی یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به شرایط جغرافیایی کشور ایران و دریافت شار

روزی‌های ابری استفاده گردد (Allouhi & Amine, 2019). کلکتورهای خورشیدی در چندین نوع؛ صفحه تخت، لوله خلاء، جذب مستقیم و متمرکزکننده‌های سهموی تقسیم بندی می‌شوند. همچنین در یک تقسیم بندی دیگر براساس دمای عملیاتی به کلکتورهای دما پایین، دما متوسط و دما بالا تقسیم بندی می‌گردند (Tong et al., 2019). جمع کننده‌های خورشیدی صفحه تخت از سال ۱۹۸۰ توسعه پیدا کرده‌اند و یکی از متداول ترین کلکتورهایی است که به دلیل ساختمانی ساده و کم هزینه بودن، برای فرآیندهایی با دمای مورد نیاز متوسط همچون منازل و بخش‌های صنعتی توصیه شده است (Eltaweel & Abdel-Rehim, 2019). جمع کننده‌های خورشیدی صفحه تخت می‌توانند دمای سیال را در محدوده ۳۰ الی ۸۰ درجه سلسیوس افزایش دهند. این نوع جمع کننده‌ها از یک صفحه جاذب، یک بستر انتقال حرارت و عایق گرمایی پشت صفحه جاذب تشکیل شده‌اند (Raj & Subudhi, 2018). اگرچه از زمان توسعه و ساخت کلکتورهای خورشیدی عملکرد آن‌ها به طور مداوم دستخوش تغییر و رو به بهبود گذاشته ولی تلاش برای افزایش بازده حرارتی، طراحی بهینه و کاهش هزینه‌ها همچنان ادامه دارد.

آنالیزهای ترمودینامیکی مخصوصاً آنالیز اکسرژی، یک ابزار ضروری برای طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های حرارتی می‌باشد (Dincer & Sahin, 2004). با استفاده از قانون اول ترمودینامیک می‌توان مقدار انرژی به دست آمده از جمع کننده خورشیدی و نسبت انرژی‌های به کار گرفته شده را تخمین زد، به هر حال قانون اول ترمودینامیک فقط کمیت انرژی را تعیین و اطلاعاتی در مورد کیفیت انرژی در اختیار قرار نمی‌دهد. قانون دوم ترمودینامیک برای آنالیز اکسرژی و تعیین تلفات اکسرژی به کار گرفته می‌شود. اکسرژی طبق تعریف، عبارت است از بیشترین مقدار کار قابل حصول از یک جریان سیال یا منبع انرژی، موقعی که از یک حالت معین به تعادل با محیط برسد (Dincer, 2002). به منظور تسهیل در تجزیه و تحلیل قانون دوم ترمودینامیک تعادل اکسرژی به کار گرفته می‌شود؛ این معادله اطلاعات ارزشمندی در مورد طراحی بهینه سامانه فراهم می‌کند؛ همچنین بیان می‌کند چه فرآیندهایی در یک سامانه ترمودینامیکی بی‌فایده هستند.

تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه آنالیز انرژی و اکسرژی کلکتورهای خورشیدی صورت گرفته است که در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌گردد. در پژوهشی پنج سطح مختلف نرخ جریان جرمی (۰/۱۴ تا ۰/۳۶ کیلوگرم بر ثانیه) بر روی انرژی مصرفی و تلفات اکسرژی در طی خشک کردن لایه نازک توت در

ASHRAE انتخاب شد. استاندارد ASHRAE برای تست و ارزیابی ترمودینامیکی کلکتورهای خورشیدی استفاده می شود. بر اساس این استاندارد، طول قسمت های ورودی، منطقه ی مورد آزمایش و خروجی مجرای کالکتور به صورت تابعی از ارتفاع و عرض مجرای کالکتور تعریف می گردد.

به منظور عایق کاری مجرای جمع کننده، قسمت بالایی مجرا با دو لایه تخته فیبر که در وسط آن پشم شیشه قرار گرفته است و قسمت پایینی مجرا توسط یک لایه چوب فشرده عایق کاری شده است. از شاسی اصلی و کناری به ترتیب برای نگهداری و نصب قسمت های مختلف دستگاه و عایق بندی کامل مجرای مورد آزمایش استفاده گردیده است. با توجه به تحقیقات پیشین انجام گرفته و با توجه به عمومیت استفاده از آلومینیوم برای صفحات جاذب حرارت در جمع کننده های تخت خورشیدی به دلیل رسانندگی گرمایی بالای آن، آلومینیوم به عنوان فلز مورد نظر برای صفحه ی جاذب حرارت با ضریب هدایت حرارتی $244(W/m^2K)$ مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین به منظور تأمین حرارت لازم و شبیه سازی شرایط تابش خورشیدی از دو المنت حرارتی هر کدام با توان نامی ۱۵۰۰ وات، طول ۱۱۰ سانتی متر، قطر ۰/۸ سانتی متر و بار سطحی ۶ وات بر سانتی متر مربع که به صورت سری به یکدیگر متصل شده اند استفاده گردید. برای شبیه سازی هر چه بهتر شرایط تابشی خورشید، در پشت المنت ها از صفحه ی استیل ۲ میلی متری براق که علاوه بر قابلیت بازتابشی حرارت دارای قابلیت عایق کاری نیز بود، استفاده شده است. به منظور آرام ساختن جریان خروجی از منطقه ی مورد آزمایش با توجه به متلاطم بودن جریان خروجی از این منطقه و عدم امکان اندازه گیری صحیح دبی جرمی (حجمی) سیال عبوری از لوله ی منتهی به فن، از آرام کننده استفاده شده است.

تجهیزات کنترل و اندازه گیری

اینورتر

برای تنظیم نرخ دبی جرمی هوا ورودی، اینورتر مدل (SV040Ig5A-4) ساخت کشور کره استفاده شد. اینورتر ذکر شده بر اساس اعمال فرکانسی مشخص در محدوده ی ۵۰-۳۰ هرتز بر روی فن مکشی سانتریفوژ نصب شد.

اندازه گیری دمای صفحه جاذب حرارت و هوای ورودی

برای اندازه گیری دمای صفحات جاذب و سیال ورودی از ترموکوپل های نوع K مجهز به دیتالاگراولاین دیجیتالی، مدل SU-105KRR و رنج دمایی $200-999^{\circ}C$ ساخت کشور کره استفاده شد. این ترموکوپل ها بر روی صفحات جاذب و قسمت های ورودی صفحه جاذب نصب شدند.

حرارتی بالاتر از میزان متوسط جهانی، اهمیت این موضوع دو چندان می گردد.

آنالیز شرایط کارکرد کلکتورهای خورشیدی در طول سال وقت گیر و هزینه بر است، لذا با بکارگیری شبیه ساز کلکتورهای خورشیدی در مقیاس آزمایشگاهی می توان قابلیت اعمال رنج های بیشتری از پارامترهای مؤثر (سطوح مختلف متغیرهای مستقل) را فراهم کرد، همچنین اثر این پارامترها و مقدار بهینه ی آن ها به صورت دقیق تر مشخص می گردد. بنابراین شناخت دقیق تر و کامل تر پارامترهای مؤثر در بازدهی اکسرژی و انرژی برای بهینه سازی جمع کننده خورشیدی صفحه تخت اصلی ترین هدف تحقیق حاضر می باشد. بدین منظور در مطالعه حاضر به صورت تجربی، شبیه ساز کلکتور خورشیدی آزمایشگاهی صفحه تخت مجهز به ناهمواری در یک مدار باز بررسی شده است. با بررسی سطوح مختلف متغیرهای مستقل جمع کننده خورشیدی همچون؛ دبی هوای ورودی، شار همرفتی خورشیدی و دمای محیط، به تحلیل بازدهی اکسرژی و انرژی سامانه خواهیم پرداخت. در نهایت سطوح بهینه هر یک از متغیرهای مستقل برای دستیابی به مقادیر بهینه متغیرهای وابسته و همچنین مدل های رگرسیونی چند جمله ای برای پیش بینی هر یک از متغیرهای وابسته ارائه خواهد شد. در سامانه مذکور با ایجاد ناهمواری در زیر صفحه ی جاذب حرارت و شکستن زیرلایه ی آرام، به منظور افزایش سطح و زمان تماس هوا با صفحه ی جاذب حرارت در جریان متلاطم داخل مجرای کلکتور، ضریب انتقال حرارت جابه جایی را افزایش داده و همچنین دمای سیال ورودی به کلکتور با دمای محیط یکسان در نظر گرفته نشده و از نتایج واقعی آزمایش ها استفاده شده است.

مواد و روش ها

شبیه ساز جمع کننده خورشیدی صفحه تخت

کلکتور خورشیدی صفحه تخت برای انجام آزمایشات تجربی به همراه المنت های حرارتی به کار گرفته شده در آن در شکل (۱) نشان داده شده است. سامانه مورد استفاده در این تحقیق امکان شبیه سازی شرایط تابش خورشید در طول کل سال را فراهم می کند. این سامانه با مهیا ساختن شرایط تابشی خورشید، امکان بررسی و انجام هر آزمایشی را برای به دست آوردن بازده ترمودینامیکی، بازده ترموهیدرولیکی و تجزیه و تحلیل انرژی و اکسرژی ممکن ساخته است. این سامانه دارای مجرای عبور سیال با سطح مقطعی به مساحت ۰/۱ متر مربع، طول ۲۰۰۰ میلی متر، عرض ۳۴۸ میلی متر و ارتفاع ۲۹ میلی متر می باشد. در این پژوهش اندازه قسمت های مختلف کانال براساس استاندارد



شکل ۱. تصویر کلکتور خورشیدی صفحه تخت به همراه المنت حرارتی به کار گرفته شده

رسیدن به حالت پایا برای سیال هوا، المنتها و فن به طور همزمان شروع به کار کردند. بعد از مشخص شدن میزان فرکانس، شار حرارتی و دمای محیط، هر کدام از آزمایشها با فاصله داده برداری ۳۰ دقیقه‌ای از دمای متوسط صفحه جاذب حرارت به منظور مشخص کردن زمان رسیدن به دمای تعادل آن انجام گرفت. شرط داده برداری اختلاف دمای زیر یک درجه، در فاصله داده برداری ۳۰ دقیقه‌ای برای هر حالت در نظر گرفته شد.

آنالیز انرژی جمع کننده خورشیدی

انرژی مفید به دست آمده توسط سیال عبوری از جمع کننده با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد (Tong et al., 2019).

$$Q_U = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه c_p ظرفیت گرمای ویژه هوا (۱۰۰۵ KJ/kgK)، \dot{m} نرخ جریان جرمی هوا (kg/s) و T_{in} و T_{out} به ترتیب دمای سیال خروجی از جمع کننده و دمای سیال ورودی (k) به جمع کننده می‌باشند. با به کارگیری انرژی مفید به دست آمده از جمع کننده، بازده تجربی انرژی را می‌توان از رابطه (۲) به دست آورد.

$$\eta_{enexp} = \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})}{I_T \times A_c} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه A_c مساحت سطح جمع کننده (m^2) و I_T تشعشع خورشیدی (W/m^2) می‌باشند.

آنالیز اکسرژی جمع کننده خورشیدی

اکسرژی کار مفید نهان در یک سامانه و انرژی مفید قابل اندازه گیری است. در یک سامانه پایا و باز، تعادل اکسرژی می‌تواند با استفاده از رابطه (۳) بیان گردد (Ucar & Inallı, 2006).

$$\dot{E}_{heat} - \dot{E}_{work} + \dot{E}_{mass,in} - \dot{E}_{mass,out} = \dot{E}_{des} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این رابطه سمت چپ بیانگر نرخ اکسرژی کار، گرما و دبی جرمی است، سمت راست هم بیانگر تخریب اکسرژی در

فشارسنج

برای اندازه گیری افت فشار تولید شده در مجرای جمع کننده و همچنین اختلاف فشار بین نقطه ورود و خروج جریان سیال هوا، از فشارسنج تفاضلی مدل (CPE310S) با بازه اندازه گیری اختلاف فشار (۱۰۰ تا ۱۰۰- پاسکال) و دقت ۰/۱ پاسکال استفاده شد.

اندازه گیری دبی جرمی سیال

برای اندازه گیری دبی جرمی سیال از سرعت سنج TSI مدل (Velocity Meter-8355) استفاده شد. سرعت سنج دارای محدوده عملکرد (۰/۰ تا ۵۰ متر بر ثانیه) و دقت ۰/۰۱ بوده و در قسمت میانی لوله منتهی به فن نصب گردید.

سامانه کنترل و ثبت داده‌ها

به منظور کنترل اختلاف فشار و مقدار شار حرارتی اعمال شده به صفحه جاذب حرارت و نمایش دماهای صفحه جاذب حرارت و سیال هوای عبوری از مجرای جمع کننده، یک سامانه کنترل و نمایش طراحی و به کار گرفته شد.

متغیرهای آزمایش

آزمایشها در نه سطح دبی جرمی هوای ورودی به جمع کننده (۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۶، ۰/۰۷، ۰/۰۸، ۰/۰۹، ۰/۱۰ و ۰/۱۱ kg/s)، پنج سطح شار حرارتی المنتها (۱۱۰۰، ۱۰۰۰، ۹۰۰، ۸۰۰، ۷۰۰، ۶۰۰، ۵۰۰، ۴۰۰، ۳۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰، ۰ W/m^2) و سه سطح دمای هوای محیط (۲۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۴۰۰) و سه سطح دمای هوای محیط (۲۰، ۳۰ و ۴۰) طراحی، در نهایت ۱۳۵ حالت آزمایش تعیین و هر یک از آزمایشها با انجام سه تکرار انجام شد. قابل ذکر است که حد بالایی شار حرارتی المنتها در نظر گرفته شده در شرایط آب و هوایی نادر اتفاق می‌افتد، با این وجود این مقدار شار حرارتی بر روی بازده انرژی و اکسرژی مورد آزمایش قرار گرفت. به منظور رسیدن به حالت تعادل برای صفحه جاذب حرارت و همچنین

محیط و بازده انرژی و اکسرژی به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند. آنالیز تیمارها با استفاده از نرم افزار SAS (ورژن ۹/۴) انجام و در پایان کلیه میانگین‌ها گزارش شدند.

مدل‌سازی و بهینه‌سازی متغیرهای آزمایش

برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته و همچنین درجه تأثیر هر یک از متغیرهای مستقل، از مدل‌های رگرسیونی چند جمله‌ای (معادله ۱۳) با استفاده از روش سطح پاسخ در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت (Design-Expert® Software Version 10) به شرح زیر استفاده شد.

$$Y_i = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 + a_{12}X_{12} + a_{13}X_{13} + a_{23}X_{23} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

در این رابطه Y متغیر وابسته، X_1 ، X_2 و X_3 متغیرهای مستقل، a_1 ، a_2 و a_3 ضرایب رگرسیونی خطی، a_{11} ، a_{22} و a_{33} ضرایب رگرسیونی درجه دو و a_{12} ، a_{13} و a_{23} ضرایب رگرسیونی اثرات متقابل هستند. در نهایت با توجه به درجه اهمیت هر یک از متغیرهای وابسته، از روش تابع مطلوبیت برای بهینه‌سازی همزمان متغیرهای وابسته استفاده شد. تابع مطلوبیت در بهینه‌سازی چندین متغیر وابسته به طور همزمان استفاده می‌شود با توجه به درجه اهمیت هر یک از متغیرهای وابسته محدوده تغییرات تابع مطلوبیت از ۰-۱ (حداقل تا حداکثر) تغییر می‌کند معادله تابع مطلوبیت میانگین هندسی کل متغیرهای وابسته می‌باشد (رابطه ۱۴).

$$D = \sqrt[n]{(d_1 * d_2 * d_n)} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

در این معادله D تابع مطلوبیت، n تعداد متغیرهای وابسته و d متغیرهای وابسته رانسان می‌دهد (Eren & Kaymak- (Ertekin, 2007).

نتایج و بحث

بازده انرژی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس برای بازده انرژی در جدول (۱) نشان داده شده است. مطابق این نتایج اثرات ساده متغیرهای شار حرارتی المنت‌ها، دمای هوای محیط، نرخ جریان جرمی و همچنین اثرات دوگانه و سه‌گانه این متغیرها تأثیر معنی‌داری بر بازده انرژی گذاشته‌اند ($p < 0.01$). تغییرات بازده انرژی برای شرایط مختلف کاری سامانه در شکل (۲) نشان داده شده است. بیشترین مقدار بازده انرژی در تیمار با دمای محیط 20°C ، دبی جرمی 0.11 kg/s و شار حرارتی 1000 W/m^2 با مقدار $49/88$ درصد به دست آمد. با افزایش دمای هوای ورودی به جمع‌کننده،

سامانه است. نرخ اکسرژی تشعشع خورشیدی از رابطه (۴) به دست آمد.

$$\dot{E}_{\text{heat}} = \eta_o I_T A_c \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این رابطه η_o بازده اپتیکی جمع‌کننده، T_a دمای محیط و T_s دمای ظاهری سطح خورشید به عنوان منبع اکسرژی که به طور تقریبی $3/4$ دمای جسم سیاه خورشید در نظر گرفته می‌شود. نرخ جریان جرمی اکسرژی ورودی و خروجی از جمع‌کننده براساس روابط (۵) و (۶) به دست آمد (Kotas, 2013).

$$\dot{E}_{\text{mass,in}} = \dot{m}[(h_{\text{in}} - h_a) - T_a (S_{\text{in}} - S_a)] \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\dot{E}_{\text{mass,out}} = \dot{m}[(h_{\text{out}} - h_a) - T_a (S_{\text{out}} - S_a)] \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در این رابطه h_{in} آنتالپی ورودی، h_{out} آنتالپی خروجی، h_a آنتالپی محیط، S_{in} آنتروپی ورودی، S_{out} آنتروپی خروجی و S_a آنتروپی محیط می‌باشد. با جایگزینی این معادلات در معادله (۳)، معادله زیر حاصل می‌گردد (معادله ۷).

$$\eta_o I_T A_c \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) - \dot{m}c_p(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) + \dot{m}c_{p,av} T_a \ln\left(\frac{T_{\text{out}}}{T_{\text{in}}}\right) - \dot{m} \frac{\Delta p}{\rho} = \dot{E}_{\text{des}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

برگشت‌ناپذیری یا تخریب اکسرژی سامانه می‌تواند با در نظر گرفتن فرآیند انتقال حرارت و اصطکاک سیال ویسکوز محاسبه گردد، تخریب اکسرژی ناشی از افت فشار جریان سیال از رابطه (۸) به دست آمد (Chamoli, 2013).

$$\dot{E}_{\text{des}\Delta p} = T_a \dot{m} \frac{\Delta p}{\rho} \frac{\ln\left(\frac{T_{\text{out}}}{T_{\text{in}}}\right)}{T_{\text{out}} - T_{\text{in}}} \quad (\text{رابطه ۸})$$

تخریب اکسرژی با استفاده از رابطه (۹) دست آمد.

$$\dot{E}_{\text{des}} = T_a \dot{S}_{\text{gen}} \quad (\text{رابطه ۹})$$

تولید آنتروپی در جمع‌کننده خورشیدی با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه شد (Bejan, 2013).

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \dot{m}c_p \ln\left(\frac{T_{\text{out}}}{T_{\text{in}}}\right) - \frac{\eta_o I_T A_c}{T_s} + \frac{\dot{Q}_o}{T_a} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

در این رابطه Q_o تلفات حرارتی به اتمسفر و با استفاده از معادله (۱۱) به دست آمد.

$$Q_o = \eta_o I_T A_c - \dot{m}c_p(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

بازده اکسرژی کلکتور خورشیدی به صورت نسبت اکسرژی مفید خروجی به کل اکسرژی ورودی و با استفاده از معادله (۱۲) به دست آمد (Tong et al., 2019).

$$\eta_{\text{ex}} = 1 - \frac{\dot{E}_{\text{des}}}{\dot{E}_{\text{heat}}} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

آنالیز آماری

طرح آزمایشی پژوهش حاضر براساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. متغیرهای مستقل شامل؛ نرخ جریان جرمی هوای ورودی، شارحرارتی المنت‌ها و دمای هوای

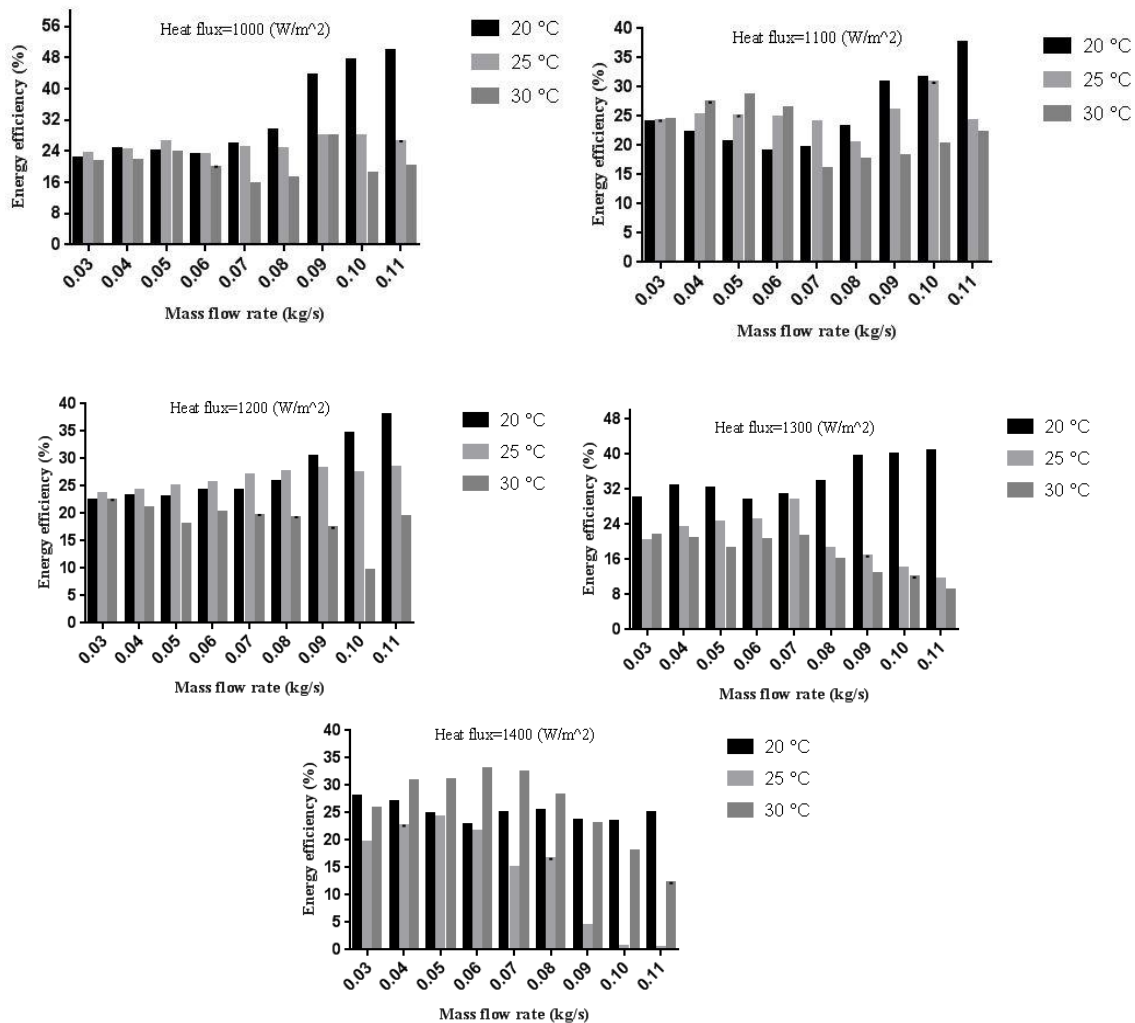
افزایش نرخ جریان جرمی بالاتر از مقادیر ۰/۰۰۳۱ کیلوگرم بر ثانیه بازده انرژی روند افزایش دارد (Luminosu & Fara, 2005). افزایش شار حرارتی در دبی‌های جرمی پایین سبب افزایش بازده انرژی شد (شکل ۲). این افزایش بازده در بعضی از تیمارها تا شار حرارتی ۱۳۰۰ و ۱۴۰۰ وات بر متر مربع مشاهده شد؛ چرا که با افزایش شار تشعشع المنت‌ها، دمای سیال خروجی از جمع‌کننده افزایش و با توجه به تعریف بازده انرژی، افزایش دما سبب افزایش بازده انرژی می‌شود. با افزایش دبی هوای ورودی و شار تشعشعی به صورت همزمان، بازده انرژی روند کاهشی داشت. چرا که در دبی‌های بالا سرعت سیال زیاد بوده و زمان تبادل انتقال حرارت بین سیال و المنت‌ها کاهش می‌یابد، لذا دمای سیال خروجی از جمع‌کننده چندان افزایش نخواهد یافت.

لازم به ذکر است کمترین میزان بازدهی انرژی در دمای ۲۵ °C، دبی جرمی ۰/۱۱ kg/s و شار حرارتی ۱۴۰۰ W/m² با مقدار ۰/۳ درصد به دست آمد. تعیین مقادیری از دبی جرمی، شار حرارتی، دمای سیال ورودی و دیگر کمیت‌ها که بازدهی انرژی یک جمع‌کننده به ازای آن‌ها بیشینه می‌شود، دشوار است. ولی در مفهوم بازدهی انرژی اثرگذاری متغیرها مشهودتر است، بنابراین بررسی بازده انرژی در قالب مفهوم اکسرژی حائز اهمیت بوده و در نتایج تحقیق حاضر مورد بحث قرار می‌گیرد.

بازده انرژی روند کاهشی داشت، چرا که افزایش دمای سیال ورودی سبب افزایش دمای داخل مجرای جمع‌کننده و به تبع آن افزایش افت‌های حرارتی داخل جمع‌کننده می‌گردد. این نتیجه با گزارش صورت گرفته توسط (Ajam et al., 2005) از همخوانی بالایی برخوردار بود. افزایش دبی جرمی هوای ورودی به جمع‌کننده سبب افزایش بازده انرژی شد (شکل ۲). این نتیجه با توجه به این واقعیت است که با افزایش دبی جرمی ($> 0/8 \text{ kg/s}$) جریان متلاطم شده و عدد رینولدز به بالای ۴۰۰۰ می‌رسد لذا سرعت سیال افزایش یافته و منجر به متلاطم شدن جریان در داخل جمع‌کننده می‌گردد؛ در جریان متلاطم ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش و در نتیجه بازده انرژی افزایش می‌یابد. علاوه بر این گرادیان دمایی بین صفحه جاذب و محیط کاهش، که این پدیده منجر به کاهش ضرایب اتلاف حرارتی و در نتیجه افزایش بازده حرارتی جمع‌کننده می‌گردد (Jafarkazemi & Ahmadifard, 2013). لازم به ذکر است که افزایش بازده انرژی فقط در تیمارهای با دمای ۲۰ و ۲۵ درجه سلسیوس و تا شار حرارتی ۱۳۰۰ وات بر مترمربع به صورت محسوس مشاهده شد. در دما و شار حرارتی بالاتر به دلیل تشدید افت‌های حرارتی و کاهش انرژی مفید کسب شده توسط سیال عبوری از جمع‌کننده، بازده انرژی کاهش یافت. لومینوس و فارا گزارش کردند که با

جدول ۱. تجزیه واریانس متغیرهای مورد آزمایش در جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت

میانگین مربعات		درجات آزادی	منابع تغییرات
بازده انرژی	بازده اکسرژی		
۰/۰۰۱۶۴۲**	۰/۰۰۶۶۹۹**	۸	دبی جرمی
۰/۰۱۸۰۲۴**	۰/۰۰۰۱۵۷**	۴	شار حرارتی
۰/۲۵۳۶۶۶**	۰/۰۰۰۶۵۲**	۲	دمای محیط
۰/۰۱۴۱۴۶**	۰/۰۰۰۱۲**	۳۲	دبی جرمی × شار حرارتی
۰/۰۳۳۳۶۳**	۰/۰۰۰۰۰۸**	۱۶	دبی جرمی × دمای محیط
۰/۰۶۸۵۹۵**	۰/۰۰۰۰۰۶۵**	۸	شار حرارتی × دمای محیط
۰/۰۰۲۲۷۹**	۰/۰۰۰۰۰۰۲**	۶۴	دبی جرمی × شار حرارتی × دمای محیط
۰/۰۰۰۰۰۸۵۷	۰/۰۰۰۰۰۰۰۲	۲۷۰	خطای آزمایش
-	-	۴۰۴	کل
۱/۲۲۴۴۱	۰/۵۲۱۲۲۷	-	ضریب تغییرات (/.)

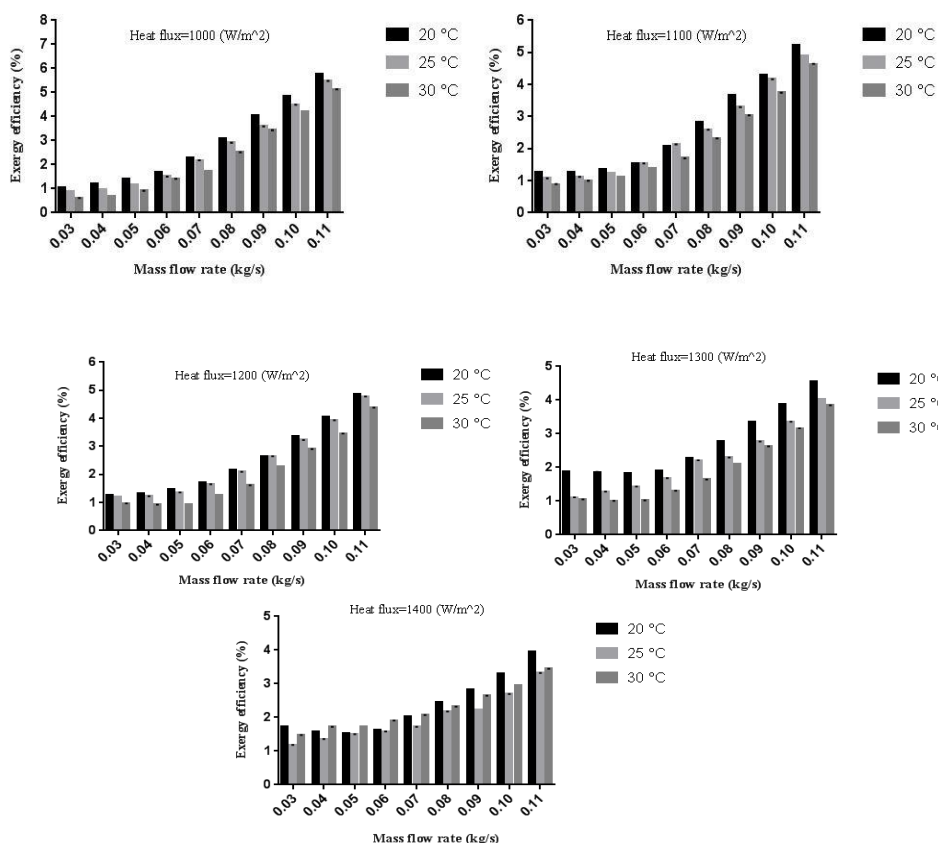


شکل ۲. تغییرات بازده انرژی در شرایط مختلف کارکرد جمع کننده خورشیدی

بازده اکسرژی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس برای بازده اکسرژی در جدول (۱) بیان شده است. مطابق این نتایج اثرات ساده متغیرهای شار حرارتی المنت‌ها، دمای هوای محیط، نرخ جریان جرمی و همچنین اثرات دوگانه و سه‌گانه این متغیرها تأثیر معنی‌داری بر بازده اکسرژی گذاشته‌اند ($p < 0.01$). تأثیر شرایط مختلف سامانه بر روی بازده اکسرژی در شکل (۳) نشان داده شده است. بیشترین مقدار بازده اکسرژی در تیمار با دمای سیال ورودی ۲۰ °C، دبی جرمی ۰/۱۱ kg/s و شار حرارتی ۱۰۰۰ W/m² برابر با ۵/۷۶ درصد به دست آمد. همچنین کمترین مقدار بازده اکسرژی در تیمار با دمای ۳۰ °C، دبی جرمی ۰/۰۳ kg/s و شار حرارتی ۱۰۰۰ W/m² با مقادیر ۰/۶۱ درصد به دست آمد. افزایش دبی جرمی و شار تشعشع خورشیدی به صورت همزمان سبب افزایش بازده اکسرژی شد. نرخ جریان جرمی پارامتری است که به تفاوت

دمای سیال خروجی و ورودی جمع‌کننده و تشعشع المنت‌ها وابسته است. با افزایش شار تشعشع المنت‌ها دمای سیال خروجی از جمع‌کننده‌ها افزایش و به تبع آن بازده اکسرژی افزایش می‌یابد از طرف دیگر با افزایش نرخ جریان جرمی، جابجایی اجباری هوا داخل جمع‌کننده افزایش و لایه مرزی حرارتی کاهش می‌یابد. بنابراین انتقال حرارت در مرزها افزایش و سبب افزایش بازده اکسرژی می‌شود. افزایش دمای محیط اثر منفی بر بازده اکسرژی داشت (شکل ۳). اگر چه در دماهای بالا تلفات حرارتی به محیط کاهش می‌یابد، با این وجود در دماهای بالا تخریب اکسرژی مهمتر است و بازده اکسرژی کاهش می‌یابد (Kalogirou., et al., 2016). روند تغییرات بازده اکسرژی با گزارش‌های صورت گرفته توسط دیگر محققین مطابقت داشت (Allouhi & Amine, 2019; Farahat et al., 2009).



شکل ۳. تغییرات بازده اکسرژی در شرایط مختلف کاری جمع کننده خورشیدی

و دمای محیط می باشند.

بهینه سازی متغیرهای آزمایش

به منظور دستیابی به سطوح بهینه متغیرهای بازده انرژی و اکسرژی، آزمایشاتی در سطوح مختلف متغیرهای دمای هوای محیط، نرخ جریان جرمی هوای ورودی به جمع کننده و شار حرارتی المنتها انجام شد. روش سطح پاسخ برای بهینه سازی عددی شرایط عملیاتی جمع کننده خورشیدی و دستیابی به پاسخ های بهینه به کار گرفته شد. درجه اهمیت هر یک از متغیرهای مستقل و پاسخ ها و تابع هدف در جدول (۲) نشان داده شده است. مقادیر ماکزیمم هر یک از پاسخ ها با در نظر گرفتن افزایش عملکرد سامانه انتخاب گردید، چرا که با ماکزیمم کردن بازده انرژی و اکسرژی به ترتیب تلفات انرژی و تخریب اکسرژی سامانه کاهش می یابد.

شکل (۴) سطوح بهینه هر یک از متغیرهای مستقل و مقادیر پیش بینی شده برای هر یک از پاسخ ها را نشان می دهد. دمای هوای ۲۰ °C، نرخ جریان جرمی ۰/۱۱ kg/s و شار حرارتی ۱۰۰۰ W/m² منجر به بهینه ترین پاسخ ها با تابع مطلوبیت ۰/۹۱۸ شد. در این شرایط بهینه، بیشترین بازده انرژی و اکسرژی به ترتیب ۴۲/۰۸ و ۵/۷۶ درصد به دست آمد.

مدل های رگرسیونی

دو مدل رگرسیونی گذشته برای پیش بینی بازده انرژی و اکسرژی با استفاده از داده های تجربی به دست آمد. این مدل های رگرسیونی چند جمله ای که با استفاده از آنالیز سطح پاسخ به دست آمده اند، تأثیر متغیرهای مستقل دبی جرمی، شار حرارتی و دمای هوای محیط را بر بازده انرژی و اکسرژی به ترتیب در معادلات (۱۴) و (۱۵) نشان می دهند. در این معادلات، علامت جبری نشان دهنده روند تغییرات متغیرهای مستقل با متغیر وابسته و بزرگی ضرایب رگرسیونی نشان دهنده اهمیت متغیر مورد نظر بر روی متغیر وابسته هست. با در نظر گرفتن ضرایب رگرسیونی اثرات ساده، دمای هوای محیط و نرخ جریان جرمی به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را در روند تغییرات بازده انرژی داشتند، همچنین نرخ جریان جرمی و شار حرارتی به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر روند تغییرات بازده اکسرژی گذاشتند.

$$\text{Energy efficiency} = +23.91 - 1.7 \times B - 4.04 \times C - 5.56 \times AB - 5.63 \times AC \quad (\text{رابطه } 14)$$

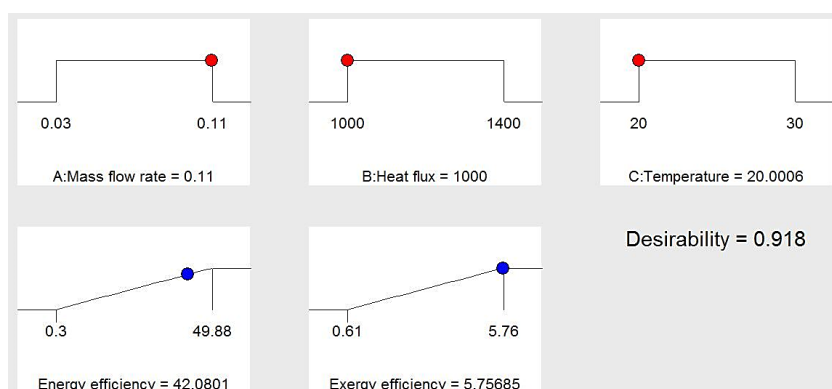
(رابطه ۱۵)

$$\text{Exergy efficiency} = +1.97 + 1.71 \times A - 0.17 \times B - 0.22 \times C - 0.65 \times AB - 0.057 \times AC + 0.055 \times BC + 0.86 \times A^2$$

در این روابط A، B و C به ترتیب نرخ جریان جرمی، شار حرارتی

جدول ۲. معیارها و تابع هدف هر یک از متغیرها در جمع کننده خورشیدی صفحه تخت

متغیرها	نوع تابع هدف	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	درجه اهمیت (۱-۵)
دمای هوای محیط (°C)	۲۰-۳۰	۲۰	۳۰	۳
نرخ جریان جرمی (kg/s)	۰/۰-۰۳/۱۱	۰/۰۳	۰/۱۱	۳
شار حرارتی (W/m ²)	۱۴۰۰-۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۴۰۰	۳
بازده انرژی (/)	ماکزیمم	۰/۳	۴۹/۸۸	۳
بازده اکسرژی (/)	ماکزیمم	۰/۶۱	۵/۷۶	۳



شکل ۴. نقاط مطلوب برای کارکرد بهینه جمع کننده خورشیدی صفحه تخت

نتیجه گیری

در این مطالعه ۱۳۵ آزمایش مختلف با استفاده از آزمایش فاکتوریل به منظور بررسی بازده انرژی و اکسرژی جمع کننده خورشیدی صفحه تخت در سطوح مختلف دمای هوای محیط، نرخ جریان جرمی هوای ورودی به جمع کننده و شار حرارتی المنتها به انجام شد. نتایج کلی به شرح زیر است:

۱- افزایش دبی جرمی هوای ورودی به جمع کننده سبب افزایش بازده انرژی شد. این نتیجه در تیمارهای با دمای محیط ۲۰ و ۲۵ درجه سلسیوس و تا شار حرارتی ۱۳۰۰ وات بر مترمربع به صورت محسوس مشاهده شد.

۲- افزایش دمای محیط در سطوح مختلف متغیرهای دبی جرمی و شار حرارتی سبب کاهش بازده انرژی در جمع کننده خورشیدی شد.

۳- افزایش شار تشعشع خورشیدی موجب افزایش بازده اکسرژی در تمام وضعیتها شد، در حالی که با افزایش دمای

محیط در سطوح مختلف متغیرهای شار حرارتی و نرخ جریان جرمی، بازده اکسرژی روند کاهش داشت.

۴- با افزایش نرخ جریان جرمی هوای ورودی به جمع کننده، به دلیل وجود ناهموازی در زیر صفحه جاذب و شکستن زیرلایه آرام که باعث افزایش سطح و زمان تماس هوا با صفحه جاذب حرارت می گردد، بازده اکسرژی روند افزایشی داشت ولی برای هر شار حرارتی یک دبی بهینه منحصراً به فردی وجود دارد که به ازای آن بازدهی اکسرژی حداکثر مقدار خود را دارد.

به منظور دستیابی به بیشترین بازده انرژی و اکسرژی تحت سطوح مختلف متغیرهای آزمایشی، روش سطح پاسخ برای بهینه کردن شرایط کاری دستگاه به کار گرفته شد. در این پژوهش شرایط بهینه کاری دستگاه در نرخ جریان جرمی ۰/۱۱ kg/s، شارحرارتی ۱۰۰۰ W/m² و دمای محیط ۲۰ °C، برای بهینه سازی همزمان متغیرهای بازده انرژی و اکسرژی پیشنهاد شد.

REFERENCES

Ajam, H., Farahat, S., & Sarhaddi, F. (2005). Exergetic optimization of solar air heaters and comparison with energy analysis. *International Journal of Thermodynamics*, 8(4), 183-190.

Akbulut, A., & Durmuş, A. (2010). Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer. *Energy*, 35(4), 1754-1763.

Akhmat, G., Zaman, K., Shukui, T., Sajjad, F., Khan, M. A., & Khan, M. Z. (2014). The challenges of reducing greenhouse gas emissions and air pollution through energy sources: evidence from a panel of developed countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(12), 7425-7435.

Al-Karaghoul, A., & Kazmerski, L. L. (2013). Energy consumption and water production cost of

- conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 343-356.
- Al-Othman, A., Tawalbeh, M., Assad, M. E. H., Alkayyali, T., & Eisa, A. (2018). Novel multi-stage flash (MSF) desalination plant driven by parabolic trough collectors and a solar pond: A simulation study in UAE. *Desalination*, 443, 237-244.
- Allouhi, A., & Amine, M. B. (2019). Effect analysis on energetic, exergetic and financial performance of a flat plate collector with heat pipes. *Energy Conversion and Management*, 195, 274-289.
- Allouhi, A., Jamil, A., Kousksou, T., El Rhafiki, T., Mourad, Y., & Zeraouli, Y. (2015). Solar domestic heating water systems in Morocco: An energy analysis. *Energy Conversion and Management*, 92, 105-113.
- Allouhi, A., Kousksou, T., Jamil, A., Bruel, P., Mourad, Y., & Zeraouli, Y. (2015). Solar driven cooling systems: An updated review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 159-181.
- Allouhi, A., Kousksou, T., Jamil, A., El Rhafiki, T., Mourad, Y., & Zeraouli, Y. (2015). Economic and environmental assessment of solar air-conditioning systems in Morocco. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 770-781.
- AlZaharani, A. A., Dincer, I., & Naterer, G. (2013). Performance evaluation of a geothermal based integrated system for power, hydrogen and heat generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(34), 14505-14511.
- Bagheri, h., Arabhoseini, a., & Kianmehr, m. h. (2015). Energy and exergy analyses of thin layer drying of tomato in a forced solar dryer. (In farsi).
- Bejan, A. (2013). Entropy generation minimization: the method of thermodynamic optimization of finite-size systems and finite-time processes: CRC press.
- Chamoli, S. (2013). Exergy analysis of a flat plate solar collector. *Journal of Energy in Southern Africa*, 24(3), 08-13.
- Dincer, I. (2002). On energetic, exergetic and environmental aspects of drying systems. *International Journal of Energy Research*, 26(8), 717-727.
- Dincer, I., & Sahin, A. (2004). A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(4), 645-652.
- Eltaweel, M., & Abdel-Rehim, A. A. (2019). Energy and exergy analysis of a thermosiphon and forced-circulation flat-plate solar collector using MWCNT/Water nanofluid. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 100416
- Eren, İ. & Kaymak-Ertekin, F. (2007). Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 344-352.
- Farahat, S., Sarhaddi, F., & Ajam, H. (2009). Exergetic optimization of flat plate solar collectors. *Renewable Energy*, 34(4), 1169-1174.
- Fudholi, A., & Sopian, K. (2019). A review of solar air flat plate collector for drying application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 333-345.
- Goswami, D. Y. (2015). *Principles of solar engineering*: CRC Press.
- Jafarkazemi, F., & Ahmadifard, E. (2013). Energetic and exergetic evaluation of flat plate solar collectors. *Renewable Energy*, 56, 55-63.
- Kalogirou, S. A., Karellas, S., Braimakis, K., Stanciu, C., & Badescu, V. (2016). Exergy analysis of solar thermal collectors and processes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 56, 106-137.
- Kotas, T. J. (2013). *The exergy method of thermal plant analysis*: Elsevier.
- Liu, H., Jiaqiang, E., Deng, Y., Xie, C., & Zhu, H. (2016). Experimental study on pyrolysis characteristics of the tobacco stem based on microwave heating method. *Applied Thermal Engineering*, 106, 473-479.
- Luminosu, I., & Fara, L. (2005). Determination of the optimal operation mode of a flat solar collector by exergetic analysis and numerical simulation. *Energy*, 30(5), 731-747.
- Nojavan, S., Zare, K., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2017). Application of fuel cell and electrolyzer as hydrogen energy storage system in energy management of electricity energy retailer in the presence of the renewable energy sources and plug-in electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 136, 404-417.
- Raj, P., & Subudhi, S. (2018). A review of studies using nanofluids in flat-plate and direct absorption solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 84, 54-74.
- Sakhaei, S. A., & Valipour, M. S. (2019). Performance enhancement analysis of The flat plate collectors: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 186-204.
- Tong, Y., Lee, H., Kang, W., & Cho, H. (2019). Energy and exergy comparison of a flat-plate solar collector using water, Al₂O₃ nanofluid, and CuO nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 113959.
- Ucar, A., & Inalli, M. (2006). Thermal and exergy analysis of solar air collectors with passive augmentation techniques. *International communications in heat and mass transfer*, 33(10), 1281-1290.
- Upadhyay, S., Sarkar, J. and Sahoo, R.R (2015). Combined Energy, Exergy and Optical Analyses of Flat Plate Solar Thermal Collector using Nanofluids. *Journal of Material Science and Mechanical Engineering*, 2(3), 134-139.
- Zanuttigh, B., Angelelli, E., & Kofoed, J. P. (2013). Effects of mooring systems on the performance of a wave activated body energy converter. *Renewable Energy*, 57, 422-43