

## بررسی عملکرد انرژی و انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی با تغییر سرعت باد

فرهاد وحیدی‌نیا<sup>۱</sup>، حسین خراسانی زاده<sup>۲\*</sup>، علیرضا آقایی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲. استاد، مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۳. استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۳۰)

### چکیده

در این مطالعه اثر سرعت باد بر روی راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی مدل LS-2 مورد مطالعه قرار گرفته است. سرعت جریان باد بر روی کلکتور و دریافت کننده در بازه‌ی صفر تا ۲۷ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. به منظور مطالعه عملکرد کلکتور از سه سیال عامل ترمینول وی پی ۱، سیلترم ۸۰۰ و دوترم A استفاده شده است. دمای ورودی سیال عامل بین ۳۰۰ تا ۶۵۰ کلوین و دبی حجمی بین ۵۰ تا ۶۰۰ لیتر بر دقیقه فرض شده است. به منظور حل معادلات حاکم از یک مدل حرارتی توسعه داده شده در حلگر معادلات مهندسی استفاده شده است. نتایج نشان داد که در دمای ورودی سیال ۶۵۰ کلوین و دبی حجمی ۵۰ لیتر بر دقیقه، اگر سرعت باد تا ۲۷ متر بر ثانیه افزایش یابد، میزان کاهش راندمان انرژی با استفاده از سیال‌های عامل ترمینول وی پی ۱، سیلترم ۸۰۰ و دوترم A به ترتیب برابر با ۰/۸۷، ۱/۱۶ و ۰/۸۵ درصد و میزان کاهش راندمان انرژی برای این سیالات به ترتیب برابر با ۰/۸۸، ۱/۱۸ و ۰/۸۶ درصد است. همچنین نتایج نشان داد که تغییرات راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور در سرعت‌های باد بیشتر از ۱۰ متر بر ثانیه ناچیز است. بر مبنای نتایج بدست آمده هرچند افزایش سرعت باد تأثیر به نظر کمی بر روی راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور نشان می‌دهد، ولی میزان این کاهش راندمان‌ها، با میزان افزایش راندمانی که در مطالعات گذشته با استفاده از توربولاتور و نانوسیال به عنوان عوامل افزایش دهنده راندمان مشاهده شده است قابل مقایسه است و لذا سرعت باد اهمیت دارد. مقایسه عملکرد سه سیال استفاده شده در این مطالعه نشان داد که استفاده از روغن‌های ترمینول وی پی ۱ و دوترم A به عنوان سیال انتقال حرارت در کلکتورهای خورشیدی سهموی خطی مناسب‌تر از سیلترم ۸۰۰ است.

واژه‌های کلیدی: کلکتور خورشیدی سهموی خطی، سرعت باد، انرژی، انرژی کلکتور

## Investigation of energy and exergy performance of parabolic trough solar collector with wind speed variations

Farhad Vahidinia, Hossein Khorasanizadeh\* and Alireza Aghaei

### Abstract

In this study, the effect of wind speed on the energy and exergy efficiencies of the LS-2 parabolic trough solar collector have been studied. The wind speed on the reflector and receiver has been considered between zero and 27 m/s. Three working fluids of Therminol VP-1, Syltherm 800 and Dowtherm A have been used. The inlet temperature of the working fluid and volumetric flow rate are assumed to be in the range of 300 - 650 K and 50 - 600 L/min, respectively. In order to solve the governing equations, a developed thermal model in the engineering equation solver has been used. The results showed that at the inlet fluid temperature of 650 K and volumetric flow rate of 50 L/min, if the wind speed increases to 27 m/s, the energy efficiency decreases using Therminol VP-1, Syltherm 800 and Dowtherm A are 0.87%, 1.16% and 0.85%, respectively and the exergy efficiency decreases are 0.88%, 1.18% and 0.86%, respectively. Also the results showed that the variations of energy and exergy efficiencies for wind speeds greater than 10 m/s are negligible. The results indicated that although wind speed increase has little effect on the energy and exergy efficiencies of the collector, but the rate of these decreases are comparable with the rate of efficiency increases observed in previous studies using different efficiency enhancement strategies such as turbulators and nanofluids, so wind speed is important. The performance evaluation study revealed that using Therminol VP-1 and Dowtherm A are more suitable than Syltherm 800 to be used as working fluids in parabolic trough solar collectors.

**Key words:** parabolic trough solar collector, wind speed, energy, exergy

## مقدمه

از مهم‌ترین و فراوان‌ترین انرژی‌های پاک مورد نیاز بشر در طبیعت انرژی خورشیدی است که از دیرباز تاکنون مورد توجه قرار گرفته است. تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی گرمایی از طریق کلکتورهای خورشیدی صورت می‌گیرد که در بازه‌ی دمایی متوسط به بالا از کلکتورهای متمرکزکننده استفاده می‌شود. در این بین کلکتورهای سهموی خطی نسبت به دیگر کلکتورهای متمرکزکننده بیشتر استفاده شده و در حال حاضر تجاری‌ترین و با اهمیت‌ترین نوع کلکتور در نیروگاه‌های خورشیدی حرارتی هستند. سیال کاری مورد استفاده در این نوع کلکتورها بخار آب، روغن‌های صنعتی و نمک مذاب و از این قبیل سیال‌های پایه است که با توجه به کم بودن قابلیت هدایت حرارتی این نوع سیال‌ها، راندمان کلکتور پائین است. همچنین با عنایت به نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر و ارزان بودن سوخت‌های فسیلی، در حال حاضر هنوز بطور کامل قابل رقابت با نیروگاه‌های با سوخت فسیلی نیستند. به همین دلیل، متأسفانه در برخی کشورها مانند ایران که دارای منابع عظیم سوخت فسیلی هستند، دولت‌ها برنامه و تمایل چندانی به استفاده از انرژی خورشیدی ندارند و با وجود میزان تابش خورشیدی بسیار عالی در ایران و مشکلات محیط زیستی، در این خصوص اقبال بسیاری از کشورها از جمله ایران قابل قبول نیست.

به منظور بالا بردن راندمان کلکتور خورشیدی سهموی خطی مطالعات گسترده‌ای انجام شده است که هم به ساختار لوله‌ی جاذب و هم به تغییر نوع سیال عامل مرتبط هستند. مطالعه عددی تأثیر نانوسیال اکسید آلومینیوم- روغن دوترم A بر عملکرد یک کلکتور سهموی خطی توسط وانگ و همکاران [۱] انجام شد. نتایج آنها نشان داد که افزایش کسر حجمی نانوذرات تا ۵ درصد در سرعت ورودی (m/s) ۳، حداکثر تا ۰/۵ درصد راندمان انرژی کلکتور را افزایش می‌دهد. همچنین آنها گزارش نمودند که اگر سرعت ورود سیال به کلکتور برابر با (m/s) ۱ باشد، میزان افزایش راندمان انرژی کلکتور با استفاده از نانوسیال نسبت به سیال پایه برابر با ۱/۲ درصد حاصل می‌شود. مطالعه‌ی عددی کلکتور سهموی خطی با لوله‌ی جاذب پره‌دار با استفاده از روغن سیلترم ۸۰۰ به عنوان سیال عامل توسط بلوس و همکاران [۲] انجام شد. در مطالعه‌ی آنها پره‌های مستطیل شکل با طول و عرض‌های مختلف مورد

استفاده قرار گرفته است. نتایج آنها نشان داد که بیشترین افزایش راندمان انرژی کلکتور با لوله‌ی جاذب پره‌دار نسبت به لوله‌ی جاذب معمولی برابر با ۱/۳۸ درصد است. بررسی عملکرد حرارتی یک کلکتور خورشیدی سهموی خطی با استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم- ترمینول ۶۶ توسط قاسمی و رنجبر [۳] انجام شد. آنها مشاهده کردند که بیشترین مقدار افزایش راندمان انرژی کلکتور با افزایش کسر حجمی ذرات نانو حدود ۰/۵ درصد است. در مطالعه‌ی که توسط بلوس و تیزیوانیدیس [۴] با استفاده از نانوسیال هیبریدی اکسید آلومینیوم/دی اکسید تیتانیوم- سیلترم ۸۰۰ و مونو نانوسیال‌های اکسید آلومینیوم- سیلترم ۸۰۰ و دی اکسید تیتانیوم- سیلترم ۸۰۰ در یک کلکتور خورشیدی سهموی خطی انجام شد، بیشترین افزایش راندمان انرژی و اگزرژی برای نانوسیال هیبریدی به ترتیب برابر با ۱/۸ و ۱/۷۸ درصد و برای مونو نانوسیال‌ها به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۰/۶۸ درصد گزارش شد. آلهی و همکاران [۵] با استفاده از نانوذرات اکسید مس، اکسید آلومینیوم و دی اکسید تیتانیوم و ترمینول وی پی ۱ به عنوان سیال پایه به بررسی عملکرد کلکتور سهموی خطی پرداختند. آنها گزارش کردند که بیشترین میزان افزایش راندمان انرژی برای سه نانوسیال اکسید مس- ترمینول وی پی ۱، اکسید آلومینیوم- ترمینول وی پی ۱ و دی اکسید تیتانیوم- ترمینول وی پی ۱ نسبت به سیال پایه به ترتیب برابر با ۱/۲۵، ۱/۴۶ و ۱/۴ درصد است. بلوس و همکاران [۶] در یک مطالعه‌ی تحلیلی با استفاده از پخش نانوذرات اکسید مس در سیال‌های پایه سیلترم ۸۰۰ و نمک نیترات مذاب، راندمان‌های انرژی و اگزرژی کلکتور سهموی خطی را بررسی کردند. آنها پس از تجزیه و تحلیل نتایج، نشان دادند که حداکثر افزایش راندمان انرژی کلکتور با استفاده از نانوسیال‌های اکسید مس- سیلترم ۸۰۰ و اکسید مس- نمک نیترات مذاب نسبت به سیال پایه به ترتیب برابر با ۰/۷۶ درصد و ۰/۲۶ درصد است. همچنین حداکثر افزایش راندمان اگزرژی برای نانوسیال اکسید مس- سیلترم ۸۰۰ نسبت به سیلترم ۸۰۰ برابر با ۰/۷۲ درصد و برای اکسید مس- نمک نیترات مذاب نسبت به نمک نیترات مذاب ۰/۱۳ درصد گزارش شد. ایلماز و همکاران [۷] با قرار دادن سیم کوئلی داخل لوله‌ی جاذب کلکتور سهموی خطی، عملکرد آن را به طور عددی بررسی کردند. مطالعه‌ی آنها نشان داد که حداکثر افزایش راندمان انرژی در این حالت نسبت به عدم استفاده از

کلکتور پشت به باد است از ۵۰/۳۵ به ۳۹/۹۷ درصد و در حالتی که دهانه کلکتور رو به باد است از ۲۵/۴۲ به ۰/۱۵ درصد کاهش پیدا می‌کند. از طرفی دیگر اگر لوله جاذب دارای پوشش و فضای بین پوشش و لوله‌ی جاذب نیز خلاء باشد، راندمان انرژی برابر با ۶۱/۲۴ درصد بدست می‌آید. بلوس و همکاران [۱۴] اثر سرعت باد را بر روی راندمان حرارتی کلکتور سهموی خطی در سه نوع دریافت‌کننده‌ی بدون پوشش، با پوشش و وجود هوا در فضای حلقوی و با پوشش و وجود حالت خلأ در فضای حلقوی بررسی کردند. آنها گزارش کردند که سرعت باد یک پارامتر بسیار تأثیرگذار بر دریافت‌کننده‌ی بدون پوشش است. در این حالت راندمان حرارتی کلکتور در سرعت صفر برابر با ۶۴/۹۳ درصد است و هنگامی که سرعت باد افزایش یابد و به مقدار ۱۰ متر بر ثانیه برسد، راندمان حرارتی به شدت کاهش می‌یابد و مقدار آن برابر با ۱۶/۷۲ درصد می‌شود. همچنین نتایج آنها نشان داد که افزایش سرعت باد در دو نوع دریافت‌کننده‌ی دیگر اثر ناچیزی بر راندمان حرارتی کلکتور دارد. بنابراین در مناطق بادخیز و وزش باد با سرعت بالا، وجود پوشش شیشه‌ای اثر مهمی در عملکرد کلکتور دارد.

اگر فضای بین پوشش شیشه‌ای و لوله‌ی جاذب خلاء نباشد میزان اتلافات حرارتی زیاد خواهد بود. در یک مطالعه که در همین راستا توسط مولودپور و همکاران [۱۵] انجام شده است، اثر سرعت باد بر راندمان انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی در دماهای مختلف سیال مورد ارزیابی قرار گرفته است. آنها گزارش کردند که اگر فضای بین لوله‌ی جاذب و پوشش شیشه‌ای خلاء نباشد و کلکتور در دمای سیال عامل (□) ۳۰۰ کار کند، با افزایش سرعت باد از صفر تا ۱۵ (m/s)، میزان کاهش راندمان انرژی برابر با ۵/۳۳ درصد بدست می‌آید. در این شرایط اگر دمای سیال به (□) ۱۰۰ کاهش یابد، میزان کاهش راندمان انرژی با افزایش سرعت باد برابر با ۲ درصد حاصل می‌شود. تغییرات سرعت باد موجب تغییر در راندمان نوری کلکتور نیز می‌شود، به طوری که در یک مطالعه‌ی عددی [۱۶]، میزان اتلافات نوری ناشی از سرعت باد (m/s) ۱۴، حدود ۱۹/۸۳ درصد گزارش شده است.

مطالعات گذشته نشان داده است که برای جلوگیری و یا کم کردن اتلافات تشعشی و جابجایی، وجود پوشش بر روی لوله‌ی جاذب یک ضرورت است. در اغلب مطالعات گذشته که به منظور افزایش راندمان کلکتور صورت گرفته است و فضای

توربولاتور برابر ۱/۴ درصد است. آل اران و همکاران [۸] برای مطالعه راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی از سیال‌های عامل مختلفی از جمله نانوسیال هیبریدی استفاده کردند. آنها نتیجه گرفتند که بیشترین افزایش راندمان انرژی و انرژی با استفاده از نانوسیال هیبریدی اکسید آلومینیوم/اکسید سرب - سیلترم ۸۰۰ بدست می‌آید و به ترتیب برابر با ۱/۰۹ درصد و ۱/۰۳ درصد است. بررسی عملکرد یک کلکتور سهموی خطی با لوله‌ی جاذب نیمه دایره‌ای و وجود سپر تابشی صفحه تخت در بالای لوله‌ی جاذب توسط گانگ و همکاران [۹] به صورت عددی انجام شد. آنها با قرار دادن دو نوع پره کوتاه و ضخیم و پره بلند و نازک در داخل لوله‌ی جاذب، راندمان حرارتی کلکتور را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که افزایش راندمان حرارتی کلکتور با استفاده از پره‌های کوتاه و ضخیم برابر با ۱/۲۳ درصد و با استفاده از پره‌های بلند و نازک برابر با ۱/۶ درصد است. عبداللطیف و همکاران [۱۰] اثر سیال‌های عامل مختلف را بر عملکرد یک کلکتور خورشیدی سهموی خطی با استفاده از حلگر معادلات مهندسی مطالعه کردند. آنها نتیجه گرفتند که بیشترین مقدار افزایش راندمان حرارتی کلکتور با استفاده از نانوسیال مس - سیلترم ۸۰۰ اتفاق می‌افتد و مقدار آن برابر با ۰/۱۴۱ درصد است.

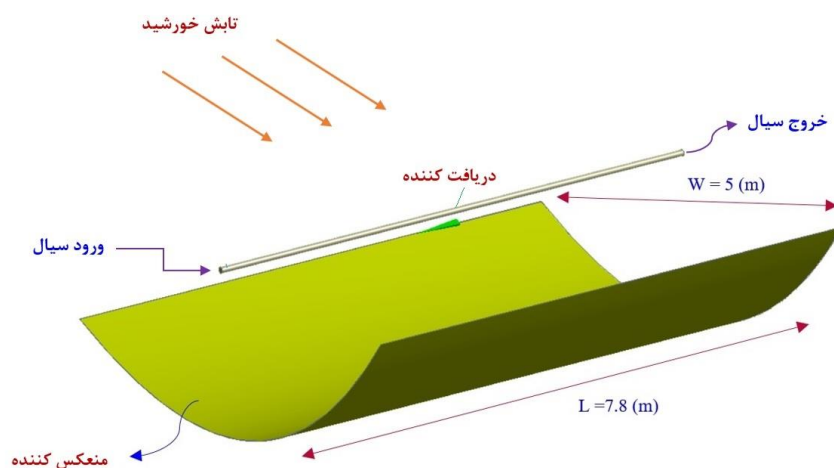
از پارامترهای اثرگذار در عملکرد کلکتورهای خورشیدی سرعت باد است [۱۱] که در بخش اتلافات جابجایی بین پوشش شیشه‌ای و محیط اطراف در نظر گرفته می‌شود. برای به حداقل رساندن اتلافات حرارتی فضای بین لوله‌ی جاذب و پوشش شیشه‌ای از هوا و گازهایی نظیر هیدروژن در فشار بسیار کم حدود (Pa) ۰/۰۱۳ [۱۲] استفاده می‌شود که حالت خلاء به آن اطلاق می‌شود. اگر این فضا حالت خلاء نباشد مقادیر اتلافات جابجایی قابل توجه است و باید در محاسبات در نظر گرفته شود. از طرفی دیگر، اگر لوله‌ی جاذب کلکتور بدون پوشش شیشه‌ای استفاده شود، اتلافات جابجایی ناشی از شرایط محیطی نظیر سرعت باد اهمیت ویژه‌ای دارد. به منظور بررسی تأثیر پوشش شیشه‌ای بر عملکرد کلکتور خورشیدی سهموی خطی مدل LS-2 مطالعه‌ای توسط صادقیانی و همکاران [۱۳] انجام شد. آنها گزارش کردند که در کلکتور سهموی خطی با لوله‌ی جاذب بدون پوشش، اگر مقدار سرعت باد از ۵ (m/s) به ۱۵ (m/s) افزایش یابد، راندمان انرژی در حالتی که دهانه

حجمی و دماهای مختلف سیال عامل با تغییر سرعت باد از صفر تا  $27 \text{ m/s}$  بررسی می‌شود. بدین منظور از سه روغن ترمینول وی پی ۱، سیلترم ۸۰۰ و دوترم A به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود.

### مدلسازی ریاضی

در مطالعه‌ی حاضر مدل کلکتور خورشیدی سهموی خطی از نوع LS-2 است. تابش مستقیم خورشید پس از برخورد به منعکس کننده و انعکاس از آن به دریافت کننده می‌رسد. جنس لوله‌ی جاذب از فولاد ضد زنگ است. به منظور به حداقل رساندن میزان صدور و متعاقباً کم کردن اتلافات حرارت، لوله‌ی جاذب با سرمت پوشش داده شده است.

در شکل ۱ شماتیک یک کلکتور خورشیدی سهموی خطی ترسیم شده است. طول منعکس کننده و لوله‌ی جاذب برابر با  $7/8$  متر و عرض دهانه کلکتور برابر با ۵ متر است. مشخصات ابعادی اجزای مختلف کلکتور و شرایط محیطی مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱ - شماتیک یک کلکتور خورشیدی سهموی خطی مدل LS-2

جابجایی در این فضا وجود ندارد و فقط اتلافات تشعشی در نظر گرفته می‌شود.

اتلافات بین پوشش شیشه‌ای و محیط اطراف از نوع جابجایی و بین پوشش شیشه‌ای و آسمان از نوع تشعشی است.

بین پوشش و لوله‌ی جاذب نیز خلاء منظور شده است، سرعت باد یک پارامتر ثابت و اندازه آن کم و معمولاً بین ۱ تا  $2 \text{ (m/s)}$  در نظر گرفته شده است. در این مطالعات برای بهبود عملکرد، کلکتور سهموی خطی رایج یا دچار تغییر ساختار شده و یا سیال کاری تغییر کرده است و از نانوسیال به جای سیال پایه استفاده شده است. در هر دو حالت هزینه سرمایه گذاری افزایش یافته است. با این حال گزارش شده است که راندمان انرژی کلکتور بین  $0/19$  درصد تا  $1/8$  درصد بهبود پیدا کرده است [۴]. با بررسی مطالعات گذشته مشاهده می‌شود که میزان کاهش راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی در سرعت‌های خیلی زیاد باد، با وجود حالت خلأ بین فضای حلقوی تا کنون بررسی نشده است. لذا سوالی که پاسخ به آن باقی مانده اینست که بطور کلی اثر تغییر سرعت باد بر راندمان‌های انرژی و انرژی و روند آن چگونه است. هدف از این مطالعه بررسی تغییرات راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور سهموی خطی با تغییرات سرعت باد از سرعت‌های باد ناچیز تا سرعت‌های خیلی زیاد است. در این مطالعه عملکرد انرژی و انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی در دبی‌های

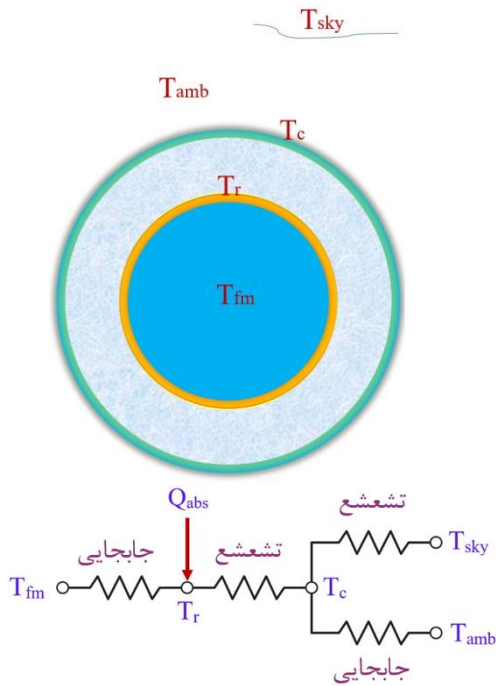
تابش خورشید پس از عبور از دریافت کننده به لوله‌ی جاذب و در نهایت به سیال عامل می‌رسد. بخش زیادی از این تابش توسط سیال عامل جذب می‌شود که حرارت مفید نامیده می‌شود و بخشی دیگر نیز تلف می‌شود.

در شکل ۲ دریافت کننده کلکتور سهموی خطی نشان داده شده است. با توجه به اینکه فضای بین لوله‌ی جاذب و پوشش شیشه‌ای خلاء در نظر گرفته شده است، اتلافات

شیشه‌ای بر حسب  $(K)$  است.  $h_{out}$  ضریب انتقال حرارت جابجایی بین پوشش شیشه‌ای و محیط اطراف  $(W/m^2K)$  است و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۱۸].

$$h_{out} = 4V_{wind}^{0.58} D_{co}^{-0.42} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)  $V_{wind}$  سرعت باد بر حسب  $(m/s)$  است که در مطالعه‌ی حاضر با تغییر آن بر اساس سرعت‌های باد در نقاط مختلف کشور، اتلافات جابجایی در خارج پوشش شیشه‌ای بدست می‌آید.



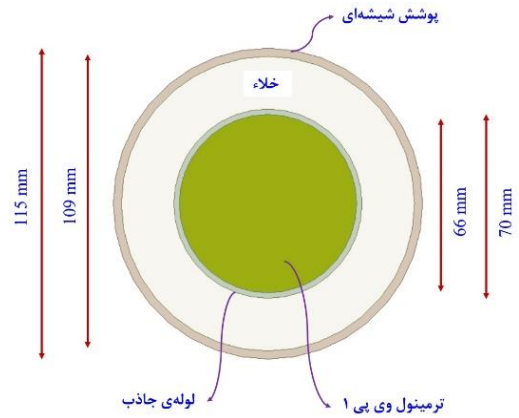
شکل ۳ - مدار حرارتی دریافت کننده کلکتور سهموی خطی به

همراه نمایش دماهای قسمت‌های مختلف آن

با در نظر گرفتن حالت خلأ در فضای حلقوی اتلافات جابجایی در این فضا ناچیز است و فقط اتلافات تشعشی منظور می‌شود. اتلافات تشعشی بین لوله‌ی جاذب و پوشش شیشه‌ای از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$Q_{loss} = \frac{A_{ro} \sigma (T_r^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c} \left( \frac{D_{ro}}{D_{ci}} \right)} \quad (3)$$

که در آن  $\epsilon_r$  ضریب صدور لوله‌ی جاذب است که تابعی از دمای لوله در نظر گرفته شده و از رابطه‌ی (۴) بدست می‌آید [۲۰]:



شکل ۲ - شماتیک دریافت کننده کلکتور سهموی خطی

جدول ۱ - مشخصات کلکتور سهموی خطی به همراه شرایط

محیطی [۴]

مقدار	نماد و واحد	پارامتر
۰/۰۶۶	$D_{ri}$ (m)	قطر داخلی لوله جاذب
۰/۰۷۰	$D_{ro}$ (m)	قطر خارجی لوله جاذب
۰/۱۰۹	$D_{ci}$ (m)	قطر داخلی پوشش شیشه‌ای
۰/۱۱۵	$D_{co}$ (m)	قطر خارجی پوشش شیشه‌ای
۷/۸	$L$ (m)	طول کلکتور و لوله جاذب
۵	$W$ (m)	عرض کلکتور
۰/۸۶	$\epsilon_c$	ضریب صدور پوشش شیشه‌ای
۱۰۰۰	$G_b$ ( $W/m^2$ )	تشنش مستقیم برخوردی به کلکتور
۳۰۰	$T_{amb}$ (K)	دمای محیط
۵۷۷۰	$T_{sun}$ (K)	دمای خورشید
۲۹۸	$T_0$ (K)	دمای مرجع

در شکل ۳ مدار حرارتی دریافت کننده به همراه نمایش دماهای قسمت‌های مختلف آن ترسیم شده است. از مقاومت هدایتی لوله‌ی جاذب و پوشش شیشه‌ای صرف نظر شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود اتلافات پوشش شیشه‌ای به سمت خارج از آن شامل اتلافات تشعشی با آسمان و اتلافات جابجایی با محیط اطراف است که به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۷].

$$Q_{loss} = A_{co} \sigma \epsilon_c (T_c^4 - T_{sky}^4) + A_{co} h_{out} (T_c - T_{amb}) \quad (1)$$

که در آن  $T_{sky}$  و  $T_{amb}$  بیانگر دمای محیط و دمای آسمان بر حسب  $(K)$  هستند.  $T_c$  نیز بیانگر دمای متوسط پوشش

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D_{\dot{n}} \mu} \quad (12)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (13)$$

رابطه‌ی بین دبی جرمی سیال عامل  $\dot{m}$  بر حسب  $(kg/s)$  و دبی حجمی  $V$  بر حسب  $(L/min)$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V = 6 \times 10^4 \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (14)$$

مساحت‌های داخلی و خارجی لوله جاذب و مساحت سطح خارجی پوشش شیشه‌ای به ترتیب بر اساس روابط (۱۵) تا (۱۷) بدست می‌آیند.

$$A_{\dot{n}} = \pi D_{\dot{n}} L \quad (15)$$

$$A_{ro} = \pi D_{ro} L \quad (16)$$

$$A_{co} = \pi D_{co} L \quad (17)$$

دمای خروجی سیال عامل مطابق با رابطه‌ی (۱۸) محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$T_{out} = T_{in} + \frac{Q_u}{\dot{m} c_p} \quad (18)$$

دمای آسمان،  $T_{sky}$  بر اساس رابطه‌ی (۱۹) بدست می‌آید [۲۳]:

$$T_{sky} = 0.0552 T_{amb}^{1.5} \quad (19)$$

راندمان انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی مطابق با رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$\eta_{en} = \frac{Q_u}{A_a G_b} \quad (20)$$

راندمان انرژی کلکتور نسبت بین انرژی مفید جریان  $(E_u)$  به انرژی ورودی یا انرژی خورشیدی  $(E_s)$  است و بر اساس رابطه‌ی (۲۱) تعریف می‌شود [۱۷]:

$$\eta_{en} = \frac{E_u}{E_s} \quad (21)$$

$$\varepsilon_r = 0.05599 + 1.039 \times 10^{-4} (T_r - 273.15) \quad (4)$$

$$2.249 \times 10^{-7} (T_r - 273.15)^2$$

مقدار انرژی تابشی جذب شده توسط لوله‌ی جاذب بر اساس رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شود. بخشی از این انرژی تلف می‌شود  $(Q_{loss})$  و بخشی نیز به عنوان انرژی مفید  $(Q_u)$  توسط سیال عامل دریافت می‌شود [۱۷].

$$Q_{abs} = \eta_{op} A_a G_b \quad (5)$$

$$Q_{abs} = Q_{loss} + Q_u \quad (6)$$

که در آن  $\eta_{op}$  راندمان نوری کلکتور است و در مطالعه‌ی حاضر مقدار آن برابر با ۰/۷۵۷ در نظر گرفته شده است.  $A_a$  مساحت دهانه کلکتور است که بر اساس رابطه‌ی زیر بیان می‌شود [۱۹].

$$A_a = (W - D_{co}) L \quad (7)$$

انرژی مفیدی که توسط سیال عامل دریافت می‌شود مطابق با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۱۹].

$$Q_u = A_{\dot{n}} h (T_r - T_{fm}) \quad (8)$$

در رابطه (۸)،  $T_r$  بیانگر دمای متوسط لوله‌ی جاذب و  $T_{fm}$  نشان دهنده دمای متوسط سیال عامل  $(K)$  هستند. دمای متوسط سیال مطابق با رابطه‌ی (۹) بدست می‌آید [۲۱].

$$T_{fm} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (9)$$

در رابطه‌ی (۸)،  $h$  ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال عامل  $(W/m^2K)$  است و بر اساس رابطه (۱۰) تعریف می‌شود [۲۲].

$$h = Nu k / D_{\dot{n}} \quad (10)$$

که در آن  $k$  قابلیت هدایت حرارتی  $(W/mK)$  سیال است. عدد ناسلت  $(Nu)$  نیز بر اساس رابطه دیتوس - بولتر محاسبه می‌شود [۲۲].

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (11)$$

$Pr$  و  $Re$  در رابطه‌ی (۱۱) به ترتیب بیانگر اعداد رینولدز و پرانتل هستند و به ترتیب توسط روابط (۱۲) و (۱۳) تعریف می‌شوند [۲۲].

برای اعتبار سنجی روش حل مطالعه‌ی حاضر از نتایج تجربی دودلی و همکاران [۲۶] استفاده شده است. دودلی و همکاران [۲۶] با استفاده از روغن انتقال حرارت سیلترم ۸۰۰ عملکرد یک کلکتور خورشیدی سهموی خطی مدل LS-2 را در سه حالت لوله‌ی جاذب بدون پوشش شیشه‌ای، لوله‌ی جاذب با پوشش شیشه‌ای و در نظر گرفتن خلأ در فضای حلقوی و لوله‌ی جاذب با پوشش شیشه‌ای و وجود هوا در فضای حلقوی به طور تجربی مطالعه کردند. در جدول ۲ دمای خروجی سیال عامل در کار حاضر با نتایج تجربی دودلی و همکاران [۲۶] در ۸ حالت متفاوت مقایسه شده است. در هر حالت پارامترهای شار حرارتی مستقیم، سرعت باد، دمای محیط، دمای ورودی سیال و دبی حجمی به عنوان داده‌های ورودی و دمای خروجی سیال به عنوان داده‌ی خروجی هستند.

انرژی مفید جریان بر اساس رابطه‌ی (۲۲) تعریف می‌شود [۴]:

$$E_u = Q_u - \dot{m} c_p T_0 \ln \left( \frac{T_{out}}{T_{in}} \right) \quad (22)$$

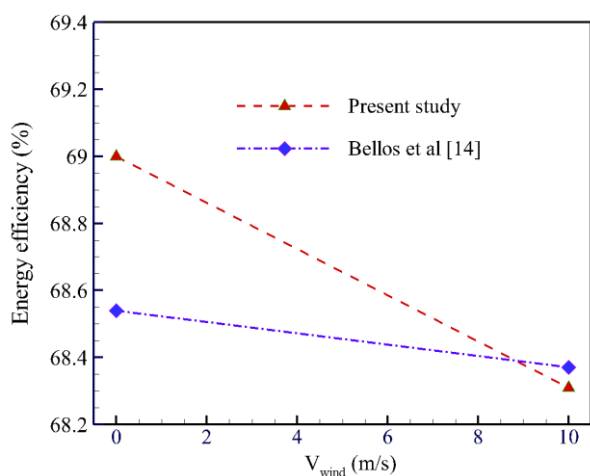
انرژی خورشیدی نیز مطابق با رابطه‌ی پتلا به صورت زیر بیان می‌شود [۲۴]:

$$E_s = A_a G_b \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_0}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{T_0}{T_{sun}} \right)^4 \right] \quad (23)$$

به منظور حل معادلات این مطالعه از نرم افزار حلگر معادلات مهندسی (EES) استفاده می‌شود [۲۵].

جدول ۲ - مقایسه نتایج روش حل مطالعه‌ی حاضر با نتایج تجربی دودلی و همکاران [۲۶]

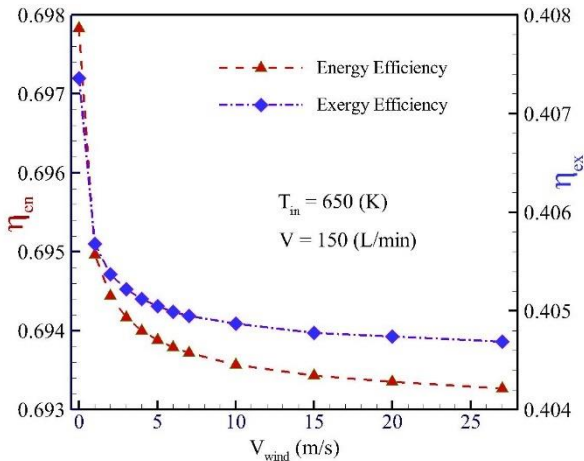
Error %	T <sub>out</sub> (K), Present study	T <sub>out</sub> (K) [26]	V (L/min)	T <sub>in</sub> (K)	T <sub>amb</sub> (K)	V <sub>wind</sub> (m/s)	G <sub>b</sub> (W/m <sup>2</sup> )	حالت‌ها
۰/۱۳	۳۹۷/۶۸	۳۹۷/۱۵	۴۷/۷	۳۷۵/۳۵	۲۹۴/۳۵	۲/۶	۹۳۳/۷	۱
۰/۱۶	۴۴۷/۱۸	۴۴۶/۴۵	۴۷/۸	۴۲۴/۱۵	۲۹۵/۵۵	۳/۷	۹۶۸/۲	۲
۰/۱۵	۴۹۳/۴۱	۴۹۲/۶۵	۴۹/۱	۴۷۰/۶۵	۲۹۷/۴۵	۲/۵	۹۸۲/۳	۳
۰/۰۶	۵۴۲/۹۰	۵۴۲/۵۵	۵۴/۷	۵۲۳/۸۵	۲۹۹/۳۵	۳/۳	۹۰۹/۵	۴
۰/۰۹	۵۹۰/۵۸	۵۹۰/۰۵	۵۵/۵	۵۷۰/۹۵	۳۰۱/۹۵	۱	۹۳۷/۹	۵
۰/۰۲	۵۹۰/۴۸	۵۹۰/۳۵	۵۵/۶	۵۷۲/۱۵	۳۰۰/۶۵	۲/۹	۸۸۰/۶	۶
۰/۱۶	۶۷۲/۲۴	۶۷۱/۱۵	۵۶/۸	۶۵۲/۶۵	۳۰۲/۶۵	۲/۶	۹۲۰/۹	۷
۰/۱۵	۶۴۸/۱۰	۶۴۷/۱۵	۵۶/۳	۶۲۹/۰۵	۳۰۴/۲۵	۴/۲	۹۰۳/۲	۸



شکل ۴ - مقایسه راندمان انرژی بر حسب سرعت باد مطالعه حاضر با نتایج مطالعه بلوس و همکاران [۱۴]

همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، نتایج کار حاضر با نتایج تجربی [۲۶] (اختلاف دمای خروجی دو مطالعه) تقریباً برابر است. بر اساس جدول ۲ بیشترین خطا برابر با ۰/۱۶ درصد و کمترین خطا ۰/۰۲ درصد و خطای متوسط نیز برابر با ۰/۱۲ درصد است. بر اساس جدول ۲ مشاهده می‌شود که حداکثر سرعت حالت‌های مقایسه در کار حاضر با نتایج تجربی [۲۶] برابر با ۴/۲ (m/s) است. به همین منظور نتایج روش حل این مطالعه با نتایج مطالعه بلوس و همکاران [۱۴] مقایسه می‌شوند. در شکل ۴ راندمان انرژی کلکتور برای سیال پایه سیلترم ۸۰۰ در سرعت‌های صفر و ۱۰ (m/s) برای کار حاضر و نتایج مطالعه بلوس و همکاران [۱۴] ترسیم شده است.

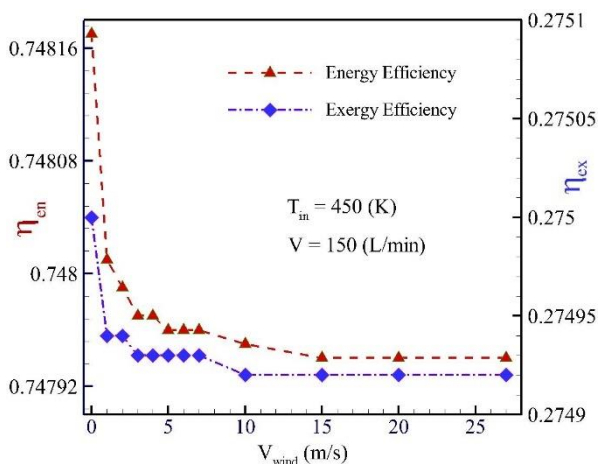
وضعیت بدون باد به اندازه ۰/۶۱ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش راندمان انرژی برای سرعت ۲۷ (m/s) حدود ۰/۶۵ درصد است. در واقع افزایش سرعت باد از ۱۰ (m/s) تا ۲۷ تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش راندمان انرژی کلکتور ندارد.



شکل ۵ - تغییرات راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور سهموی خطی بر حسب سرعت باد برای شرایط استفاده از ترمینول وی پی ۱ با  $T_{in}=650$  (K) و  $V=150$  (L/min)

با توجه به نمودار مربوط به راندمان انرژی در شکل ۴ مشاهده می‌شود که کاهش راندمان انرژی نیز روند مشابهی با کاهش راندمان انرژی دارد.

اثر کاهش دمای ورودی سیال عامل بر روی راندمان‌های انرژی و انرژی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶ - تغییرات راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور سهموی خطی بر حسب سرعت باد برای شرایط استفاده از ترمینول وی پی ۱ با  $T_{in}=450$  (K) و  $V=150$  (L/min)

اختلاف بین نتایج این مطالعه و نتایج مطالعه بلوس و همکاران [۱۴] در سرعت صفر برابر با ۰/۷ درصد و در سرعت ۱۰ (m/s) ناچیز است. بنابراین نتایج مطالعه حاضر در سرعت‌های بالا نیز از دقت بسیار خوبی برخوردار است.

## نتایج و بحث‌ها

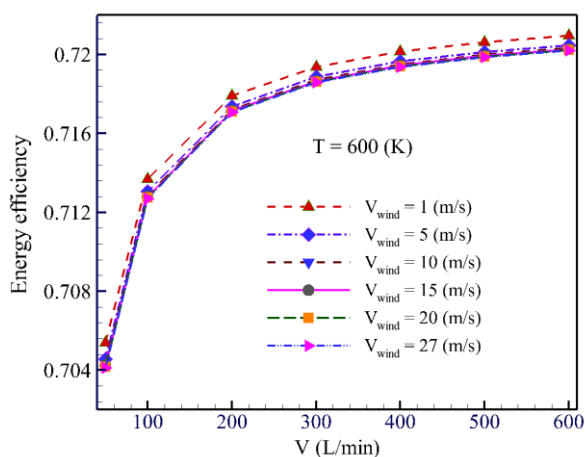
به منظور بررسی اثر سرعت باد بر راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی، مقادیر سرعت باد در بازه صفر تا ۲۷ (m/s) در نظر گرفته شده است. در ابتدا اثر سرعت باد بر عملکرد کلکتور با استفاده از روغن انتقال گرمای ترمینول وی پی ۱ به عنوان سیال عامل کلکتور بررسی می‌شود و سپس مطالعه مقایسه‌ای با دو سیال عامل دیگر یعنی سیلترم ۸۰۰ و دوترم A انجام می‌شود. خواص ترموفیزیکی ترمینول وی پی ۱ شامل چگالی  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) لزجت دینامیکی  $\mu$  (Pas)، گرمای ویژه  $c_p$  ( $J/kgK$ ) و قابلیت هدایت حرارتی  $k$  ( $W/mK$ ) تابعی از دما هستند که از [۲۷] آورده شده‌اند. همچنین دمای ورودی سیال عامل بین ۳۰۰ تا ۶۵۰ (K) و دبی حجمی آن برابر با ۵۰ تا ۶۰۰ (L/min) فرض شده است.

هدف از این مطالعه میزان تأثیر سرعت باد و اتلافات بوجود آمده ناشی از آن بر عملکرد کلکتور است. با توجه به اینکه فضای بین لوله‌های جاذب و پوشش شیشه‌ای به صورت خلاء است، تا حد امکان اتلافات پوشش شیشه‌ای کم شده است. اگر کلکتور در محیطی با سرعت باد متغیر و بالا نصب شود، میزان اتلافات ناشی از سرعت باد باید مورد تحلیل قرار گیرد. قابل به ذکر است که سرعت زیاد باد باعث تغییر مکان کلکتور می‌شود و یا نیروهای زیادی بر روی سازه کلکتور اعمال می‌کند که در مطالعه حاضر این موضوع مورد بحث نیست. در کار حاضر، با ثابت در نظر گرفتن دیگر متغیرها از جمله دمای محیط، اثر سرعت باد بر عملکرد کلکتور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل ۵ راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور با تغییر سرعت باد برای دمای ورودی ۶۵۰ (K) و دبی حجمی ۱۵۰ (L/min) ترسیم شده است. بهترین عملکرد کلکتور و یا بیشترین مقدار راندمان‌های انرژی و انرژی هنگامی رخ می‌دهد که باد وجود نداشته باشد. هر چه سرعت باد افزایش می‌یابد به تدریج راندمان‌های انرژی و انرژی کاهش پیدا می‌کنند. هنگامی که سرعت باد تا ۱۰ (m/s) افزایش می‌یابد، با فرض ثابت بودن دمای محیط راندمان انرژی نسبت به



در این حالت با افزایش سرعت باد تا  $27 \text{ (m/s)}$  میزان کاهش راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور نسبت به وضعیت بدون باد به ترتیب برابر با  $0/596$  درصد و  $0/597$  درصد بدست می‌آید. با بررسی شکل‌های ۵ و ۷، که هر دو برای دمای ورودی یکسان  $650 \text{ (K)}$  ولی دبی‌های مختلف سیال عامل ( $150 \text{ (L/min)}$  و  $300 \text{ (L/min)}$ ) هستند، مشاهده می‌شود که در دبی‌های حجمی بالاتر کاهش راندمان نامحسوس است. همانطور که در شکل‌های ۵ تا ۷ مشاهده شد راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی به سه عامل دمای ورودی سیال، دبی حجمی و سرعت باد وابسته هستند.

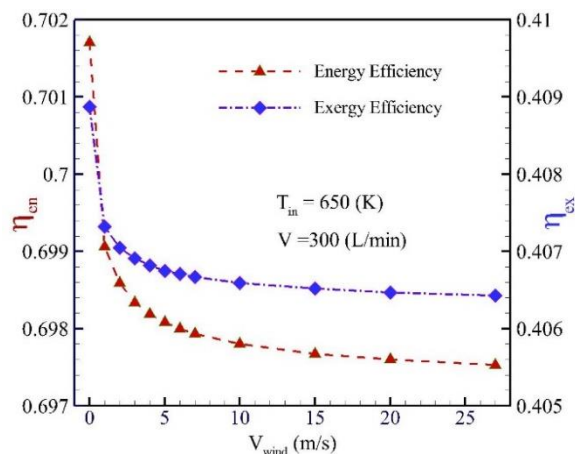
به منظور بررسی بیشتر این موضوع، تغییر راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور در دبی‌های حجمی بین  $50$  تا  $600 \text{ (L/min)}$  و سرعت‌های باد  $1$  تا  $27 \text{ (m/s)}$  در دمای ورودی  $600 \text{ (K)}$  به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. بر این اساس، در دبی حجمی  $50 \text{ (L/min)}$  با افزایش سرعت باد از  $1$  تا  $27 \text{ (m/s)}$ ، میزان کاهش راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور حدود  $0/18$  درصد و در دبی حجمی  $600 \text{ (L/min)}$  کاهش حدود  $0/10$  درصد است. بنابراین تغییر سرعت باد تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد. با این وجود افزایش دبی حجمی باعث بهبود عملکرد کلکتور شده است. هنگامی که دبی جریان افزایش می‌یابد، جریان مغشوش‌تر شده و به تبع آن ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. در نتیجه میزان انرژی مفید ورودی به سیال افزایش یافته و همزمان دمای لوله‌ی جاذب و میزان اتلافات کاهش می‌یابند.



شکل ۸ - تغییرات راندمان انرژی کلکتور سهموی خطی بر حسب دبی حجمی و با تغییر سرعت باد برای شرایط استفاده از ترمینول وی پی ۱ با  $T_{in}=600 \text{ (K)}$

بر اساس شکل ۶ که برای دمای ورودی سیال  $450 \text{ (K)}$  است، کاهش راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور برای سرعت باد  $27 \text{ (m/s)}$  نسبت به وضعیت بدون باد به ترتیب برابر با  $0/03$  درصد و  $0/29$  درصد است. علت کم شدن روند کاهش راندمان‌ها ناشی از کاهش دمای لوله‌ی جاذب برای شرایطی است که دمای سیال ورودی کاهش یافته است. هنگامی که دمای لوله جاذب کم باشد، دمای پوشش شیشه‌ای نیز کم است و متعاقباً اتلافات حرارتی کلکتور نیز کم خواهد بود. به همین دلیل است که از مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که راندمان انرژی در دمای کمتر سیال ورودی دارای مقدار بیشتری است که علت آن کم بودن میزان اتلافات حرارتی در دماهای کمتر است. با بررسی شکل‌های ۵ و ۶ نتیجه گرفته می‌شود که میزان تأثیر سرعت باد بر راندمان انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی تابع دمای سیال عامل کلکتور است. اگر کارکرد کلکتور در دماهای بالا باشد، افزایش سرعت باد یک عامل منفی محسوب می‌شود. البته وجود خلأ در فضای بین لوله‌ی جاذب و پوشش شیشه‌ای باعث می‌شود که اثرات افزایش سرعت باد بر کاهش راندمان انرژی کلکتور چشمگیر نباشد. اگر در فضای حلقوی خلأ وجود نداشته باشد، چنانچه مطالعات پیشین نشان داده‌اند افزایش سرعت باد کاهش قابل ملاحظه‌ای در راندمان انرژی کلکتور ایجاد خواهد کرد [۱۵].

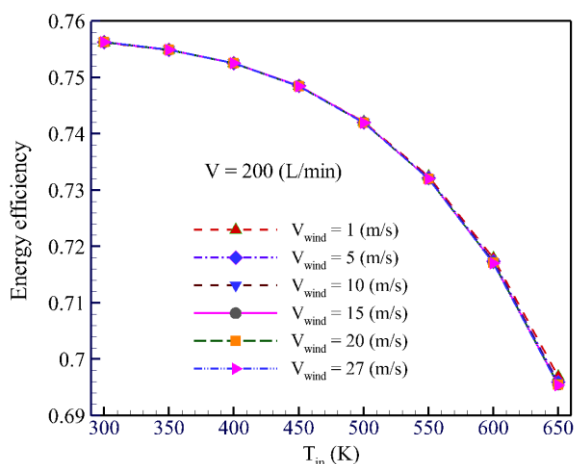
در شکل ۷ به بررسی تغییرات راندمان انرژی و انرژی کلکتور با تغییر سرعت باد برای دمای سیال ورودی  $650 \text{ (K)}$  با دبی حجمی  $300 \text{ (L/min)}$  پرداخته شده است.



شکل ۷ - تغییرات راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور سهموی خطی بر حسب سرعت باد برای شرایط استفاده از ترمینول وی پی ۱ با  $T_{in}=650 \text{ (K)}$  و  $V=300 \text{ (L/min)}$

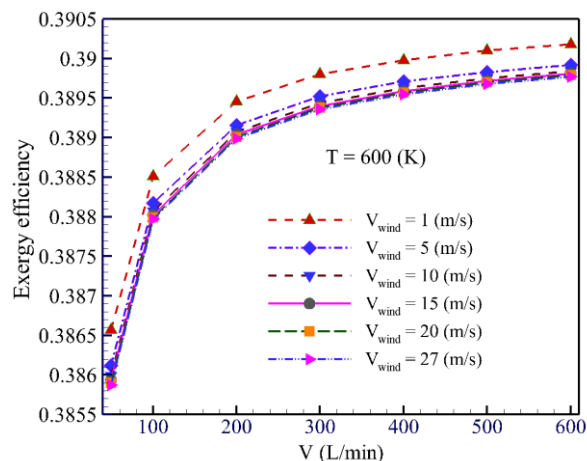
تغییر هر یک از این پارامترها، عدد رینولدز تغییر خواهد کرد. در مطالعه‌ی حاضر همواره در تمام حالت‌های محاسباتی عدد رینولدز بزرگتر از  $10^4$  در نظر گرفته شده است.

تا اینجا تغییرات راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور در در دماهای بالا با تغییر سرعت باد مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه تغییرات راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور سهموی خطی در دماهای مختلف سیال ورودی از جمله در دماهای پائین با تغییر سرعت باد بررسی می‌شود. بدین منظور در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب تغییرات راندمان انرژی و انرژی کلکتور برای سرعت‌های باد و دمای سیال ورودی مختلف ولی دبی حجمی ثابت  $200 \text{ (L/min)}$  نشان داده شده است. در دمای ورودی  $300 \text{ (K)}$ ، با افزایش سرعت باد تا  $27 \text{ (m/s)}$  میزان تغییرات راندمان‌های انرژی و انرژی تقریباً صفر است که علت آن پائین بودن دمای لوله‌ی جاذب و کم بودن اتلافات است. ولی در دمای  $650 \text{ (K)}$ ، میزان کاهش هر دو راندمان تقریباً  $0.23\%$  درصد است.



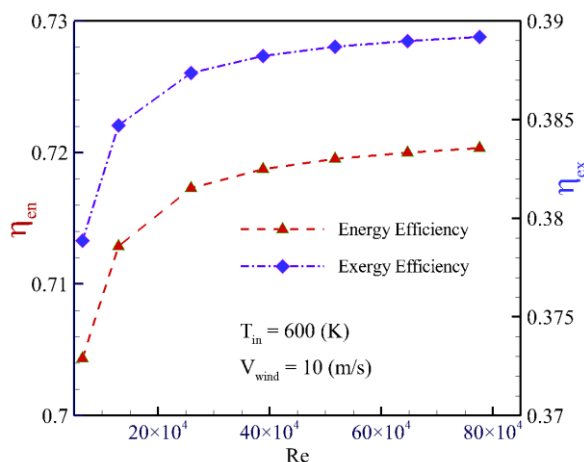
شکل ۱۱ - تغییرات راندمان انرژی کلکتور سهموی خطی بر حسب دمای ورودی سیال و با تغییر سرعت باد برای شرایط استفاده از ترمینول وی پی ۱ با  $V=200 \text{ L/min}$

به منظور بررسی جامع‌تر اثر سرعت باد بر عملکرد کلکتور خورشیدی سهموی خطی از ۲ سیال عامل دیگر یعنی سیلترم  $800$  و دوترم A نیز استفاده شده است. سیلترم  $800$  و دوترم A دو سیال رایج در کلکتورهای سهموی خطی هستند که در مطالعات زیادی از آنها به عنوان سیال عامل استفاده شده است [۲۸-۳۰]. مشخصات ترموفیزیکی سیلترم  $800$  و دوترم A تابعی از دما هستند و به ترتیب از [۳۱] و [۳۲] آورده شده‌اند.



شکل ۹ - تغییرات راندمان انرژی کلکتور سهموی خطی بر حسب دبی حجمی و با تغییر سرعت باد برای شرایط استفاده از ترمینول وی پی ۱ با  $T_{in}=600 \text{ (K)}$

در شکل ۱۰ تغییرات راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور بر حسب عدد رینولدز در در دمای ورودی  $600 \text{ (K)}$  و سرعت باد  $10 \text{ (m/s)}$  ترسیم شده است.

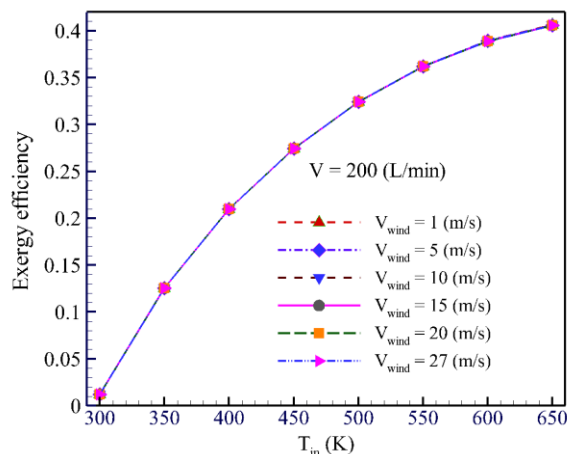


شکل ۱۰ - تغییرات راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور سهموی خطی بر حسب عدد رینولدز برای شرایط استفاده از ترمینول وی پی ۱ با  $T_{in}=600 \text{ (K)}$  و  $V_{wind}=10 \text{ (m/s)}$

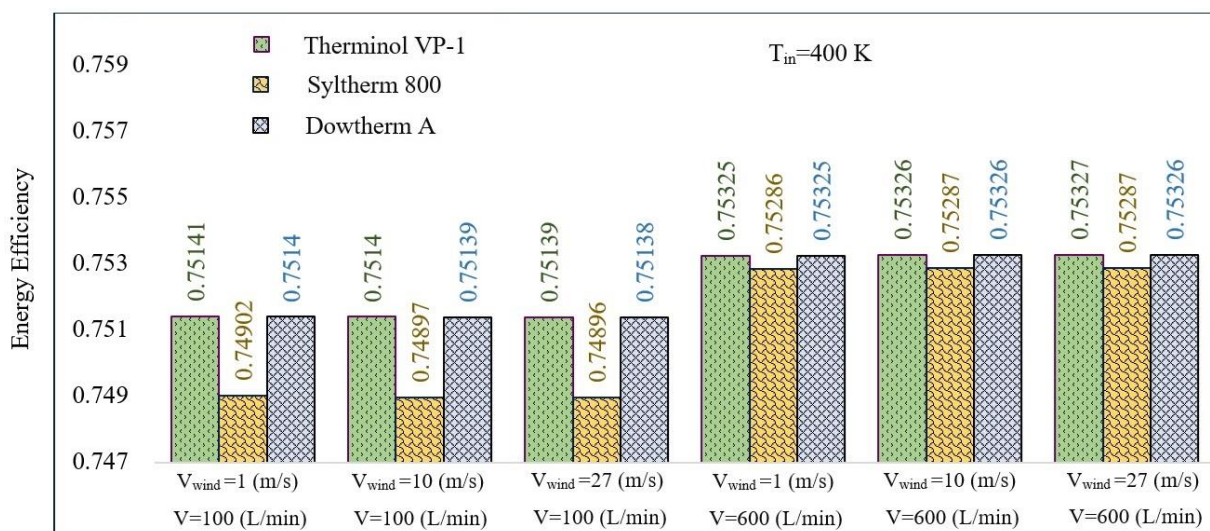
مطابق با شکل ۱۰ افزایش عدد رینولدز باعث افزایش راندمان‌های انرژی و انرژی می‌شود. از عدد رینولدز  $4 \times 10^4$  به بالا تغییرات راندمان‌ها کم است و نمودارها حالت مجانبی دارند. در حقیقت روند تغییرات راندمان‌ها بر حسب عدد رینولدز همانند دبی حجمی است. بر اساس روابط (۱۲) و (۱۴) عدد رینولدز تابعی از دمای ورودی و دبی حجمی است. مطابق با

در واقع هدف از ارائه مطالب در ادامه، مقایسه عملکرد انرژی و انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی با استفاده از سیال‌های عامل مختلف با تغییر سرعت باد، دبی حجمی و دمای ورودی سیال است.

در شکل ۱۳ راندمان انرژی کلکتور سهموی خطی برای ۳ سیال عامل ترمینول وی پی ۱، سیلترم ۸۰۰ و دوترم A برای سرعت‌های باد ۱، ۱۰ و ۲۷ (m/s) ترسیم شده است. دمای ورودی ۴۰۰ (K) و دبی حجمی دو مقدار (L/min) ۱۰۰ و ۶۰۰ در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۴ مشابه همین نتایج برای دمای ورودی ۶۰۰ (K) ارائه شده است.



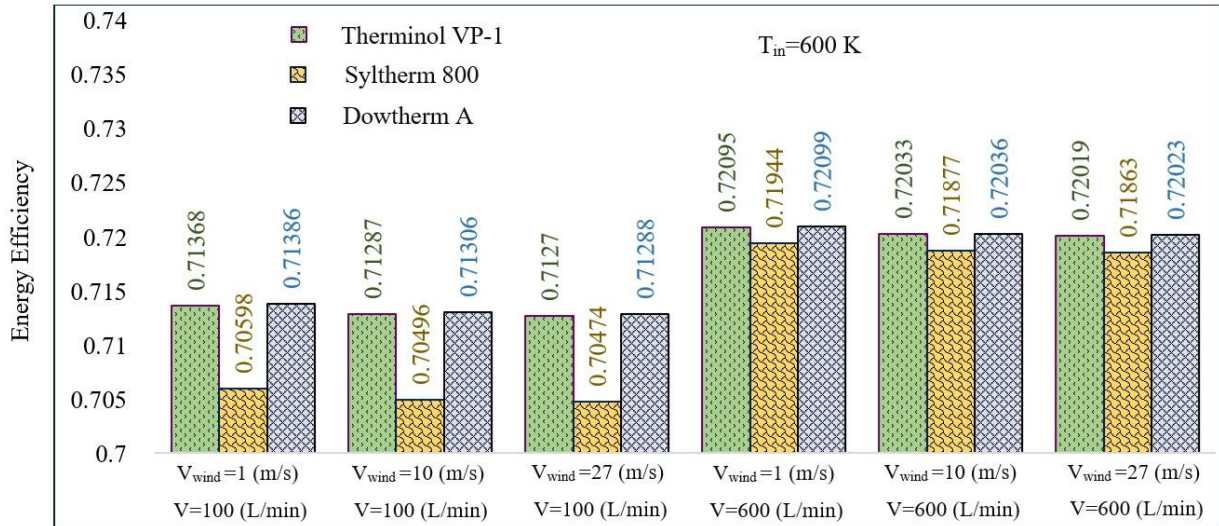
شکل ۱۲ - تغییرات راندمان انرژی کلکتور سهموی خطی بر حسب دمای ورودی سیال و با تغییر سرعت باد برای شرایط استفاده از ترمینول وی پی ۱ با  $V=200$  L/min



شکل ۱۳ - مقایسه راندمان انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی با استفاده از سیال‌های عامل مختلف با تغییر سرعت باد و دبی حجمی در  $T_{in}=400$  (K)

عملکرد کلکتور بیشتر نمایان می‌شود. مطابق با شکل ۱۴ در دبی حجمی (L/min) ۱۰۰ با افزایش سرعت باد از ۱ (m/s) تا ۱۰ (m/s) میزان کاهش راندمان انرژی برای سیال‌های عامل ترمینول وی پی ۱، سیلترم ۸۰۰ و دوترم A به ترتیب برابر با ۰/۱۱، ۰/۱۴ و ۰/۱۱ درصد است. از طرفی دیگر با افزایش سرعت باد از ۱۰ (m/s) به ۲۷ (m/s) تغییرات راندمان ناچیز است. همچنین در دبی حجمی (L/min) ۶۰۰ سرعت باد پارامتر تأثیرگذاری بر راندمان انرژی کلکتور نیست.

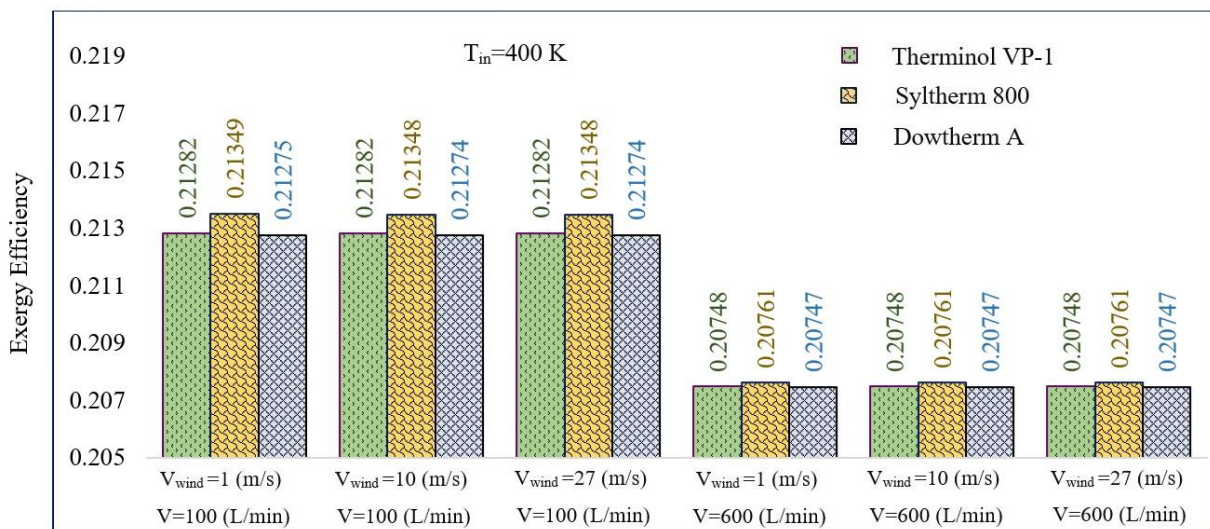
از شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که در حالت‌های مختلف، راندمان انرژی کلکتور هنگام استفاده از سیلترم ۸۰۰ کمتر از ترمینول وی پی ۱ و دوترم A است که چنین نتیجه‌ای در شکل ۱۴ در دمای ورودی (K) ۶۰۰ نیز مشاهده می‌شود. از طرفی دیگر با مشاهده شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که در دبی‌های حجمی مختلف برای سیال‌های عامل مختلف، تغییر سرعت باد تأثیری بر راندمان انرژی کلکتور ندارد که علت آن ناچیز بودن میزان اتلافات حرارتی است. با این وجود هنگامی که دمای ورودی افزایش می‌یابد و دبی حجمی کم است، چنانچه از شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، تأثیر سرعت باد بر کاهش



شکل ۱۴ - مقایسه راندمان انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی با استفاده از سیال‌های عامل مختلف با تغییر سرعت باد و دبی حجمی در  $T_{in}=600\text{ (K)}$

سه سیال عامل ترمینول وی پی ۱، سیلترم ۸۰۰ و دوترم A ترسیم شده است. همانطور که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است برای هر سه سیال عامل با افزایش دمای ورودی سیال، راندمان آگزرژی کلکتور روند افزایشی دارد. افزایش سرعت باد در دمای ورودی سیال (K) ۴۰۰ تأثیری بر راندمان آگزرژی ندارد (شکل ۱۵). ولی بر اساس شکل ۱۶ در دمای ورودی سیال (K) ۶۰۰ با افزایش دما، تغییراتی در راندمان آگزرژی کلکتور مشاهده می‌شود.

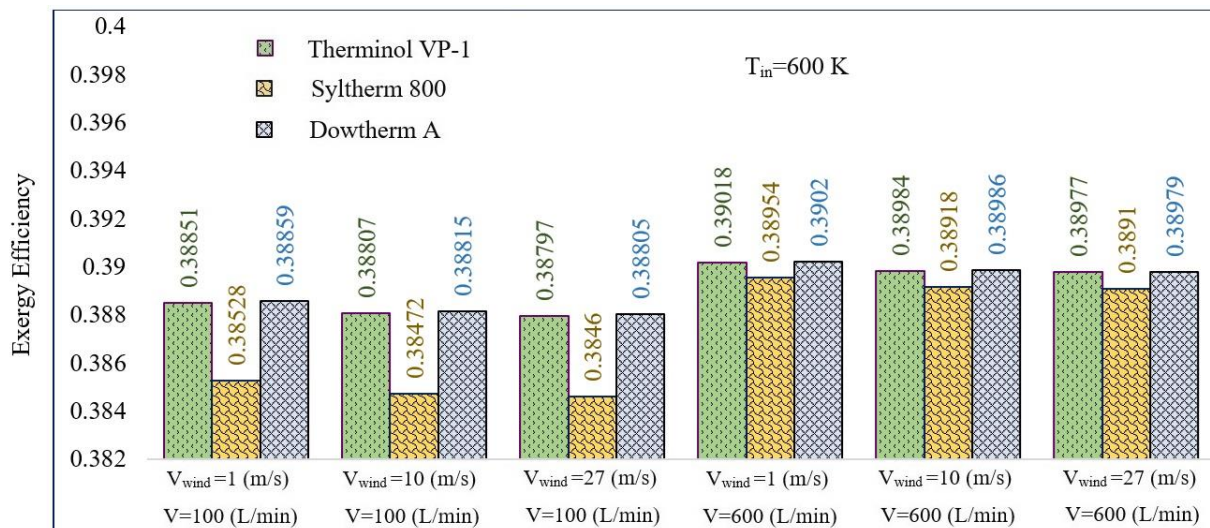
از سوی دیگر، بر اساس شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود که با افزایش دبی حجمی راندمان انرژی افزایش می‌یابد و همانطور که در قبل نیز بحث شد، علت افزایش راندمان انرژی با افزایش دبی حجمی بیشتر شدن اغتشاشات جریان و افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی است. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ راندمان آگزرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی برای حالت‌های مختلف سرعت باد، دمای ورودی سیال و دو دبی حجمی (L/min) ۱۰۰ و (L/min) ۶۰۰ برای



شکل ۱۵ - مقایسه راندمان آگزرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی با استفاده از سیال‌های عامل مختلف با تغییر سرعت باد و دبی حجمی در  $T_{in}=400\text{ (K)}$

بر راندمان انرژی کلکتور دارد. نکته جالب توجه روند تغییرات راندمان انرژی با افزایش دبی حجمی است. همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود در دمای (K) ۴۰۰ با افزایش دبی حجمی راندمان انرژی کاهش می‌یابد و بر اساس شکل ۱۶ در دمای (K) ۶۰۰ افزایش دبی حجمی باعث افزایش آن می‌شود.

با افزایش سرعت باد از (m/s) ۱ تا (m/s) ۱۰ و در دبی حجمی (L/min) ۱۰۰ هنگامی که از ترمینول وی پی ۱ به عنوان سیال عامل استفاده شود، راندمان انرژی کلکتور به میزان ۰/۱۱ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در این حالت میزان کاهش راندمان انرژی کلکتور با استفاده از سیال‌های عامل سیلترم ۸۰۰ و دو ترم A به ترتیب برابر با ۰/۱۴ و ۰/۱۱ درصد است. افزایش سرعت بیشتر از (m/s) ۱۰ تأثیر ناچیزی



شکل ۱۶ - مقایسه راندمان انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی با استفاده از سیال‌های عامل مختلف با تغییر سرعت باد و دبی حجمی در  $T_{in}=600$  (K)

استفاده شود، میزان کاهش راندمان‌های انرژی و انرژی با افزایش سرعت باد از صفر تا (m/s) ۲۷ برای سیال‌های عامل ترمینول وی پی ۱، سیلترم ۸۰۰ و دو ترم A به ترتیب برابر با ۰/۷۱ و ۰/۸۵ درصد است. اگر از دبی حجمی کمتری استفاده شود، کاهش راندمان‌ها بیشتر خواهد شد. این موضوع در جدول ۳ برای سه سیال عامل پیش گفته شده در دمای ورودی (K) ۶۵۰ و دبی حجمی (L/min) ۵۰ ارائه شده است.

جدول ۳ - میزان کاهش راندمان‌های انرژی و انرژی با افزایش

سرعت باد تا (m/s) ۲۷ در  $T_{in}=650$  (K) و  $V=50$  L/min

نوع سیال عامل	میزان کاهش راندمان انرژی %	میزان کاهش راندمان انرژی %
ترمینول وی پی ۱	۰/۸۷	۰/۸۸
سیلترم ۸۰۰	۱/۱۶	۱/۱۸
دو ترم A	۰/۸۵	۰/۸۶

از شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود که در همه حالت‌ها راندمان انرژی کلکتور با استفاده از سیال‌های عامل ترمینول وی پی ۱ و دو ترم A بیشتر از سیلترم ۸۰۰ است. راندمان انرژی کلکتور با استفاده از سیال‌های عامل مختلف در دمای کم تقریباً ثابت است (شکل ۱۵)، ولی در دماهای بالا مقدار راندمان انرژی کلکتور هنگام استفاده از ترمینول وی پی ۱ و دو ترم A به عنوان سیال عامل بیشتر از سیلترم ۸۰۰ است (شکل ۱۶). با توجه به اینکه کلکتورهای خورشیدی سهموی خطی در دماهای بالا کارکرد دارند استفاده از ترمینول وی پی ۱ و دو ترم A نسبت به سیلترم ۸۰۰ به عنوان سیال عامل ارجحیت دارد.

به طور کلی تغییرات سرعت باد بر عملکرد کلکتور خورشیدی سهموی خطی در دماهای بالاتر و دبی‌های حجمی کمتر ملموس‌تر است. بر این اساس اگر دمای ورودی سیال عامل برابر با (K) ۶۵۰ باشد و از دبی حجمی (L/min) ۱۰۰

در دمای ورودی (K) ۶۵۰ و دبی حجمی (L/min) ۵۰، میزان کاهش راندمان انرژی با افزایش سرعت باد از صفر تا ۲۷ (m/s) برای سه سیال عامل ترمینول وی پی ۱، سیلترم ۸۰۰ و دوترم A به ترتیب برابر با ۰/۸۷، ۱/۱۶ و ۰/۸۵ درصد بدست آمد. همچنین در این حالت میزان کاهش راندمان انرژی برای سه سیال پیش گفته شده به ترتیب برابر با ۰/۸۸، ۱/۱۸ و ۰/۸۶ درصد نتیجه شد. از طرفی دیگر، با بررسی میزان کاهش راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور در اثر افزایش سرعت باد با میزان افزایش آنها در مطالعات گذشته با راهکارهای مختلف از قبیل استفاده از نانوسیال و توربولاتور، نتیجه گرفته می‌شود که سرعت بالای باد پارامتر مهمی در عملکرد کلکتور خورشیدی سهموی خطی محسوب می‌شود. همچنین بر اساس مقایسه نتایج مشخص شد که استفاده از روغن‌های ترمینول وی پی ۱ و دوترم A نسبت به سیلترم ۸۰۰ به عنوان سیال انتقال حرارت در کلکتورهای خورشیدی سهموی خطی مناسب‌تر است.

#### منابع و مراجع

- [1]. Wang, Y., Xu, J., Liu, Q., Chen, Y., Liu, H., "A new composite energy absorbing system for aircraft and helicopter", Applied Thermal Engineering, Vol. 107, pp. 469-478, 2016.
- [2]. Bellos, E., Tzivanidis, C., Tsimpoukis, D., "Thermal enhancement of parabolic trough collector with internally finned absorbers", Solar Energy, Vol. 157, pp. 514-531, 2017.
- [3]. Ghasemi, S.E., Ranjbar, A.A., "Effect of using nanofluids on efficiency of parabolic trough collectors in solar thermal electric power plants", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, pp. 21626-21634, 2017.
- [4]. Bellos, E., Tzivanidis, C., "Thermal analysis of parabolic trough collector operating with mono and hybrid nanofluids", Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 26, pp. 105-115, 2018.
- [5]. Allouhi, A., Amine, M.B., Saidur, R., Kousksou, T., Jamil, A., "Energy and exergy analyses of a parabolic trough collector operated with nanofluids for medium and high temperature applications", Energy Conversion and Management, Vol. 155, pp. 201-217, 2018.

در دمای ورودی (K) ۶۵۰ و دبی حجمی (L/min) ۵۰، میزان کاهش راندمان انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی با افزایش سرعت باد از صفر تا ۲۷ (m/s) برای سیال‌های عامل ترمینول وی پی ۱، سیلترم ۸۰۰ و دوترم A به ترتیب برابر با ۰/۸۷، ۱/۱۶ و ۰/۸۵ درصد و میزان کاهش راندمان انرژی برابر با ۰/۸۸، ۱/۱۸ و ۰/۸۶ درصد است.

برخی از مطالعات گذشته که با استفاده از تغییر ساختار لوله‌ی جاذب و یا استفاده از توربولاتور و همچنین استفاده از نانوسیال به جای سیال رایج تلاش برای بهبود عملکرد کلکتور داشته‌اند، مقدار افزایش راندمان انرژی را حداکثر ۱/۸ درصد عنوان کرده‌اند [۴]، لذا کاهش راندمان انرژی در سرعت‌های بالای باد (۱/۱۶ درصد با استفاده از سیلترم ۸۰۰ به عنوان سیال عامل) قابل توجه است.

با بررسی میزان افزایش راندمان‌های انرژی و انرژی در مطالعات گذشته با استفاده از راهکارهای مختلف مشاهده می‌شود که در بعضی از آنها میزان افزایش راندمان انرژی حتی کمتر از ۱/۱۶ درصد است، یعنی از میزان کاهش این راندمان‌ها در اثر سرعت باد زیاد که در این مطالعه نشان داده شد حتی کمتر است. بنابراین اثر سرعت باد در عملکرد کلکتورهای خورشیدی سهموی خطی بسیار مهم است و وجود بادهای با سرعت زیاد در نقاط مختلف کشور، به ویژه در مناطقی که دارای میزان تابش انرژی خورشیدی سالانه قابل قبولی نیز می‌باشند، اهمیت آن را دو چندان می‌کند.

#### نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر عملکرد کلکتور خورشیدی سهموی خطی در سرعت‌های بالای باد مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور از سرعت باد صفر تا ۲۷ (m/s)، دبی حجمی ۵۰ تا ۶۰۰ (L/min) و دمای ورودی سیال ۳۰۰ تا ۶۵۰ (K) برای بررسی میزان تغییرات راندمان‌های انرژی و انرژی کلکتور استفاده شده است. همچنین، از سه نوع روغن انتقال حرارت ترمینول وی پی ۱، سیلترم ۸۰۰ و دوترم A به عنوان سیال عامل استفاده شده است. نتایج نشان داد که میزان تغییرات راندمان‌های انرژی و انرژی با تغییر سرعت باد، در دماهای کم و دبی‌های حجمی زیاد ناچیز است. همچنین، میزان کاهش راندمان‌ها در دبی‌های حجمی کمتر و دماهای سیال ورودی بالاتر با تغییر سرعت باد بیشتر است، به طوری که در دمای

- collectors*”, International Journal of Heat and Technology, 36, 13, pp. 147–158, 2018.
- [14]. Bellos, E., Tzivanidis, C., Said, Z., “A systematic parametric thermal analysis of nanofluid-based parabolic trough solar collectors”, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 39, pp. 100714, 2020.
- [15]. Moloodpoor, M., Mortazavi, A., Ozbalta, N., “Thermal analysis of parabolic trough collectors via a swarm intelligence optimizer”, Solar Energy, 181, pp. 264–275, 2019.
- [16]. Zhang, Z., Sun, J., Wang, L., Wei, J.J., “Multiphysics-coupled study of wind load effects on optical performance of parabolic trough collector”, Solar Energy, 207, pp. 1078–1087, 2020.
- [17]. Bellos, E., Tzivanidis, C., “A detailed exergetic analysis of parabolic trough collectors”, Energy Conversion and Management, Vol. 149, pp. 275–292, 2017.
- [18]. Mullick, S.C., Nanda, S.K., “An improved technique for computing the heat loss factor of a tubular absorber”, Solar Energy, Vol. 42, pp. 1–7, 1989.
- [19]. Duffie, J.A., Beckman, W.A., Blair, N., “Solar Engineering of Thermal Processes”, Photovoltaics and Wind, John Wiley & Sons, 2020.
- [20]. Forristall, R., “Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver”, pp. 164, 2003.
- [21]. Vahidinia, F., Khorasanizadeh, H., Aghaei, A., “Comparative energy, exergy and CO<sub>2</sub> emission evaluations of a LS-2 parabolic trough solar collector using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>-Syltherm 800 hybrid nanofluid”, Energy Conversion and Management, Vol. 245, pp. 114596, 2021.
- [22]. Bergman, T.L., Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Lavine, A.S., “Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons”, 2011.
- [23]. Swinbank, W.C., “Long-wave radiation from clear skies”, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 89(381), 339-348., 1963.
- [6]. Bellos, E., Tzivanidis, C., Tsimpoukis, D., “Thermal, hydraulic and exergetic evaluation of a parabolic trough collector operating with thermal oil and molten salt based nanofluids”, Energy Conversion and Management, Vol. 156, pp. 388–402, 2018.
- [7]. Yılmaz, İ.H., Mwesigye, A., Göksu, T.T., “Enhancing the overall thermal performance of a large aperture parabolic trough solar collector using wire coil inserts”, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 39, pp. 100696, 2020.
- [8]. Al-Oran, O., Lezsovits, F., Aljawabrah, A., “Exergy and energy amelioration for parabolic trough collector using mono and hybrid nanofluids”, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 140, pp. 1–18, 2020.
- [9]. Gong, J., Wang, J., Lund, P.D., Zhao, D., Xu, J., Jin, Y., “Comparative study of heat transfer enhancement using different fins in semi-circular absorber tube for large-aperture trough solar concentrator”, Renewable Energy, Vol. 169, pp. 1229–1241, 2021.
- [10]. Abdullatif, Y.M., Okonkwo, E.C., Al-Ansari, T., “Thermal performance optimization of a parabolic trough collector operating with various working fluids using copper nanoparticles”, Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 13, pp. 51011, 2021.
- [11]. Naveenkumar, R., Ravichandran, M., Stalin, B., Ghosh, A., Karthick, A., Aswin, L.S.R.L., Priyanka, S.S.H., Kumar, S.P., Kumar, S.K., “Comprehensive review on various parameters that influence the performance of parabolic trough collector Environ”, Environmental Science and Pollution Research, 28, pp. 1–24, 2021.
- [12]. Mwesigye, A., Bello-Ochende, T., Meyer, J.P., “Heat transfer and thermodynamic performance of a parabolic trough receiver with centrally placed perforated plate inserts”, Applied Energy, 136, pp. 989–1003, 2014.
- [13]. Sadaghiyani, O.K., Boubakran, M.S., Hassanzadeh, A., “Energy and exergy analysis of parabolic trough

- [24]. Petela, R. "Exergy of undiluted thermal radiation", *Solar Energy*, Vol. 74, pp. 469–488, 2003.
- [25]. F-Chart Software, Engineering Equation Solver (EES) Professional V10.090-3D (6/15/16), <http://www.fchartsoftware.com/ees/>, 2016.
- [26]. Dudley, V.E., Kolb, G.J., Mahoney, A.R., Mancini, T.R., Matthews, C.W., Sloan, M., Kearney, D., "Test results: SEGS LS-2 solar collector, Sandia National Lab.(SNL-NM)", Albuquerque, NM (United States), 1994.
- [27]. Vp- T.: 12 to 400 C T. [https://www.therminol.com/sites/therminol/files/documents/TF09A\\_Therminol\\_VP1.pdf](https://www.therminol.com/sites/therminol/files/documents/TF09A_Therminol_VP1.pdf).
- [28]. Mwesigye, A., Huan, Z., "Thermal and thermodynamic performance of a parabolic trough receiver with Syltherm800-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid as the heat transfer fluid", *Energy Procedia*, 75, pp. 394-402, 2015.
- [29]. Kaloudis, E., Papanicolaou, E., Belessiotis, V., "Numerical simulations of a parabolic trough solar collector with nanofluid using a two-phase model", *Renewable Energy*, Vol. 97, pp. 218–229, 2016.
- [30]. Khakrah, H., Shamloo, A., Kazemzadeh, Hannani, S., "Determination of parabolic trough solar collector efficiency using nanofluid: a comprehensive numerical study", *Journal of Solar Energy Engineering*, 139, 2017.
- [31]. <https://www.loikitsdistribution.com/files/syltherm-800-technical-data-sheet.pdf>.
- [32]. [http://samyangoil.com/new/catalog/1/2\\_Dow\\_Chemical/DOWTHERM\\_A\\_en.pdf](http://samyangoil.com/new/catalog/1/2_Dow_Chemical/DOWTHERM_A_en.pdf).