

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۵

تعیین بازده انرژی و انرژی کلکتور خورشیدی صفحه تخت عمل کننده تحت جریان آشفته نانوسیال با نانوذرات دی سولفید مولیبدن در موفولوژی های مختلف برای مناطق گرمسیری ایران

علیرضا آقایی^۱، امین دزفولی زاده^{۲*}، علیرضا فدائی دهر^۳، محمد سپهری راد^۴، حسین مظاهری^۵

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

a.aghaei@kashanu.ac.ir

^۲ گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

amin.dezfulizadeh@gmail.com

^۳ گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

mhossein.fadaei@yahoo.com

^۴ گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

sepehrirad57@gmail.com

^۵ استادیار، گروه مهندسی شیمی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

h_mazaheri2001@yahoo.com

چکیده: در این مطالعه به بررسی آنالیز انرژی و انرژی کلکتور خورشیدی صفحه تخت که در جزیره ابوموسی (خلیج فارس) در استان هرمزگان (منطقه گرمسیری) قرار گرفته است، پرداخته می شود. هدف از انجام این مطالعه بررسی اثر شکل نانوذرات دی سولفید مولیبدن (MoS₂) برای چهار شکل مختلف از نانوذرات (تیغه ای، صفحه ای، آجری و استوانه ای) بر انتقال حرارت و تولید آنتروپی است. نتایج خروجی شامل عدد ناسلت متوسط، دمای سیال خروجی، افت فشار، ضریب اصطکاک، ضریب عملکرد هیدرولیکی حرارتی (PEC) و تولید آنتروپی برای شکل های مختلف نانوذرات و کسر حجمی صفر تا ۰.۴٪ از نانوذرات در جریان آشفته با دبی های جرمی ۰/۵ و ۰/۷۵ کیلوگرم بر ثانیه ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده و با توجه به معیار ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حرارتی، بهترین حالت در دبی جرمی ۰/۵ کیلوگرم بر ثانیه مربوط به نانوذرة آجری، در کسر حجمی ۰/۳٪ می باشد که مقدار آن ۱/۲۶۹ است؛ در حالی که در دبی جرمی ۰/۷۵ کیلوگرم بر ثانیه بهترین حالت مربوط به نانوذرات آجری، در کسر حجمی ۰/۴٪ است و مقدار آن ۱/۱۸۲ می باشد. همچنین برای جریان با دبی جرمی ۰/۵ کیلوگرم بر ثانیه افزودن نانوذرة آجری و تیغه ای به سیال پایه از نظر بهبود بازده انرژی اثری ندارد. این در حالی است که برای جریان با دبی جرمی ۰/۷۵ کیلوگرم بر ثانیه استفاده از کسر حجمی ۱ تا ۰/۴٪ از نانوذرات آجری و تیغه ای می توانند سرعت تولید آنتروپی را به اندازه ۸٪ در مقایسه با سیال پایه کاهش دهند.

واژه های کلیدی: خلیج فارس، کلکتور خورشیدی، معیار ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حرارتی (PEC)، تولید آنتروپی، نانوسیال، اثر شکل نانوذرات، دی سولفید مولیبدن (MoS₂).

۱. مقدمه

کاربرد دارد. حدود دو دهه است که اصطلاح نانوسیال به جامعه علمی معرفی شده است. در نانوسیالات، وجود هدایت حرارتی بالای نانوذرات باعث افزایش انتقال حرارت در سیستم می شود [۱-۳]. افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات به پارامترهای مختلفی نظیر کسر حجمی، دما، نوع ماده، اندازه و شکل بستگی دارد. مطالعات بسیاری برای تأثیر پارامترهای فوق بر میزان افزایش انتقال حرارت صورت گرفته است.

با توجه به پیشرفت مهندسی و رشد صنعت، همچنین نگرانی های زیست محیطی و انرژی، سیستم های مبدل حرارتی باید با بازده بالا در انتقال حرارت به کار گرفته شوند. از فناوری های مختلفی برای افزایش بازده انتقال حرارت در مبدل های حرارتی استفاده می شود. ذرات جامد دارای هدایت حرارتی بالایی هستند، لذا استفاده از آنها در سیالات معمولی برای تقویت عملکرد انتقال حرارت این سیالات

جدول (۱): فهرست پژوهش های مختلف با محوریت مدل سازی اثر شکل نانوذرات و جریان تک فاز در مسائل مختلف

نویسندگان	نوع مطالعه	نانوسیال مورد استفاده	شکل نانوذرات مورد بررسی	کسر حجمی نانوذرات	شیب سازی جریان و نتایج (بهترین شکل نانوذره از نظر انتقال حرارت)
عباسیان آرانی و همکاران [۴]	عددی	اکسید آلومینوم/ آب - اتیلن گلیکول	کروی، کروی صاف، کروی کشیده، تیغه ای، صفحه کوچک، استوانه ای و آجری	$0 \leq \phi \leq 4\%$	بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به نانوذره کروی است.
ونکی و همکاران [۵]	عددی	اکسید سیلیسیم / اتیلن گلیکول	تیغه ای، صفحه ای، استوانه ای، آجری و کروی	$0 \leq \phi \leq 4\%$	بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به نانوذره صفحه ای است.
ماهیان و همکاران [۶]	عددی	اکسید آلومینوم / آب - اتیلن گلیکول	صفحه ای، تیغه ای، استوانه ای و آجری	$0 \leq \phi \leq 4\%$	بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به نانوذره صفحه ای است.
اووی و پروپو [۷]	عددی	مس / آب	دایروی و کروی	$0 \leq \phi \leq 4\%$	بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به نانوذره کروی است.
الیاس و همکاران [۸]	عددی	اکسید آلومینوم / آب	استوانه ای، آجری، تیغه ای، صفحه ای و کروی	$0 \leq \phi \leq 0.1\%$	بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به نانوذره استوانه ای است.
الیاس و همکاران [۹]	عددی	اکسید آلومینوم / آب	استوانه ای، آجری، تیغه ای، پلاکت و کروی	$0 \leq \phi \leq 0.1\%$	بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به نانوذره استوانه ای است.

همچنین با مرور ادبیات مشاهده می شود که مطالعات بسیاری برای بررسی سیستم های خورشیدی به کمک آنالیز قوانین ترمودینامیکی انجام شده است (۱۰-۱۶).

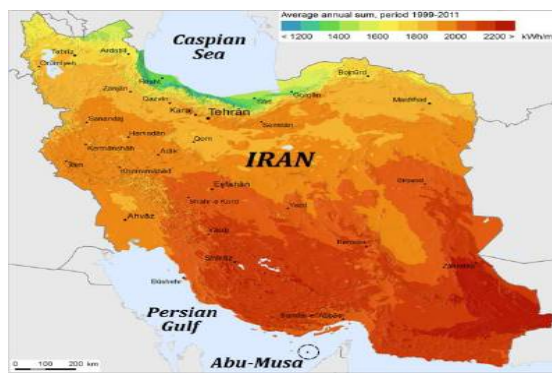
جدول (۲): فهرست پژوهش های مختلف با محوریت مدل سازی سیستم های خورشیدی

نویسندگان	نوع مطالعه	روش عددی	هندسه مورد مطالعه	نانوسیال مورد بررسی	نتایج (تأثیر مطالعات بر میزان انتقال حرارت)
صدری پور [۱۰]	عددی	حجم محدود	کلکتور خورشیدی	نانولوله کربنی چندجداره / آب	استفاده از میکسر باعث افزایش دمای خروجی، راندمان انرژی و انرژی می شود.
صدری پور و همکاران [۱۱]	عددی	حجم محدود	کلکتور خورشیدی	آروسول - کربن سیاه / آب	استفاده از نانوسیالات و افزایش عدد رینولدز باعث کاهش دمای خروجی می شود.
خراسانی زاده و همکاران [۱۲]	عددی	حجم محدود	کلکتور خورشیدی هوا گرم	-	برای تمامی طول سال بالاترین عملکرد حرارتی در هنگام استفاده از مدل کنگره دار سنیوسی است.
تاکور و همکاران [۱۳]	تجربی	-	-	نانولوله کربنی چندجداره / آب	ضریب هدایت حرارتی و لزجت با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می یابند.
دولتی اصل و بخشان [۱۴]	عددی	حجم محدود	کلکتور خورشیدی	-	بیشترین تابش دریافتی در مناطق استان های یزد و اصفهان اتفاق می افتد.
جماعتی و مهری [۱۵]	تجربی	-	-	نانولوله کربنی تک جداره / آب	با افزایش طول نانولوله تمایز حاصل از دو پتانسیل مورد نظر بیشتر آشکار می شود.
کریم پور و بهشتی [۱۶]	عددی	حجم محدود	کلکتور و دودکش خورشیدی	-	نتایج نشان می دهد که کلکتور بهبود یافته و دودکش بهبود یافته به ترتیب ۱۳۹ و ۶۸٪ توان نیروگاه را افزایش می دهند.

[۲۳]. کاتو و همکاران [۲۴] و ماو و همکاران [۲۵] انجام شد. ظرفیت گرمایی، هدایت حرارتی و ضریب انبساط حرارتی حجمی به‌طور تجربی توسط لیو و همکاران [۲۶] و دینگ و سیائو [۲۷] مورد بررسی قرار گرفت. اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی دی‌سولفید مولیبدن در کانال با محیط متخلخل توسط خان [۱۷] مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعه خان از نانوذرات دی‌سولفید مولیبدن در سیال پایه آب استفاده شد. از نانوذرات دی‌سولفید مولیبدن در شکل‌های مختلف مانند پلاکت، تیغه، استوانه، آجر و کروی استفاده شد. مشخص شد که نانوذرات دی‌سولفید مولیبدن با شکل تیغه‌ای و صفحه‌ای بالاترین میزان انتقال حرارت را نسبت به شکل‌های استوانه و آجری دارند. همچنین در ادامه، مطالعات سال اخیر در جدول (۳) نشان داده شده است.

نانوذرات دی‌سولفید مولیبدن در سیال پایه آب معمولاً با عنوان نانوسیالات مولیبدن دی‌سولفید شناخته می‌شوند [۱۷]. نانوذرات دی‌سولفید مولیبدن پایدار و همگن نیوتنی توسط ژانگ و همکاران ساخته شد [۱۸]. مانند گرافن دی‌سولفید مولیبدن دارای ورق‌های یک و چندلایه با ساختار باند بزرگ است. دی‌سولفید مولیبدن به‌دلیل کاربردهای متعدد در بسیاری از مناطق به‌خصوص در دستگاه‌های الکترونی دوعدی مانند ترانزیستورها، علاقه محققان را به خود جلب کرده است. با توجه به این ساختار ویژه، در مدارهای منطقی و دستگاه‌های تقویت‌کننده، کاربردهای گسترده‌ای اعمال شده است [۱۹] و [۲۰]. علاوه بر این از خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیالات دی‌سولفید مولیبدن مانند هدایت حرارتی، ظرفیت حرارتی و همچنین توانایی روغن‌کاری در کاربردهای مکانیکی استفاده می‌شود [۲۱ و ۲۲]. برخی از تلاش‌های دیگر در مورد دی‌سولفید مولیبدن توسط گو و همکاران

جدول (۳): فهرست پژوهش‌های مختلف با محوریت مدل‌سازی اثر نانوسیالات و جریان تک‌فاز در کلکتورهای خورشیدی					
نویسندگان	نوع مطالعه	هندسه مورد مطالعه	نانوسیال مورد استفاده	شبه‌سازی جریان و انتقال حرارت	نتایج (بهبود انتقال حرارت)
یان و همکاران [۲۸]	عددی	کلکتور خورشیدی پارابولیک	آب / کربوکسیل-متیل	تک‌فاز	٪۳۸
اوگونکو و همکاران [۲۹]	تجربی و عددی	کلکتور خورشیدی صفحه‌تخت	آب-آلومینا و آب-آلومینا-آهن	تک‌فاز	٪۱/۷۹
تانگ و همکاران [۳۰]	تجربی و عددی	کلکتور خورشیدی صفحه‌تخت	آب-اکسید آلومینوم، آب-اکسید مس، آب-نانولوله کربنی چندجداره و آب-نانوذره مغناطیسی	تک‌فاز	٪۸۷
کایا و همکاران [۳۱]	عددی	کلکتور خورشیدی U شکل	آب-اکسید آلومینوم	تک‌فاز	٪۶۷/۱
صفریان و همکاران [۳۲]	عددی	کلکتور خورشیدی صفحه‌تخت	آب-اکسید آلومینوم آب-اکسید مس	تک‌فاز	٪۷۸/۲۵



شکل (۱): توزیع تابش افقی در نقشه ایران [۳۶]

۲. جزیره ابوموسی

جزیره ابوموسی، جنوبی‌ترین منطقه استان هرمزگان در ایران، در شرق خلیج فارس در نزدیکی تنگه هرمز واقع شده است. از این نظر که تنها خط دریایی برای عبور نفت کش‌ها و کشتی‌های بزرگ در تنگه هرمز،

بر اساس مطالعات انجام‌شده مشاهده می‌شود که برخی از پژوهشگران به بررسی تأثیر استفاده از نانوذرات اکسید آلومینوم و اکسید سیلیسیم با اشکال مختلف نانوذرات بر انتقال حرارت، تولید آنتروپی و معیار ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حرارتی در کلکتورهای خورشیدی و مبدل‌های حرارتی پرداختند [۲-۸ و ۳۱-۳۲]. درحالی که تا به حال اثر استفاده از نانوذرات دی‌سولفید مولیبدن بر معیار ارزیابی عملکرد حرارتی و تولید آنتروپی در کلکتورهای خورشیدی صفحه‌تخت بررسی نشده است. همچنین در این مقاله برای اولین بار علاوه بر اثرات شکل نانوذرات دی‌سولفید مولیبدن در یک جاذب خورشیدی واقع در جزیره ابوموسی که به‌عنوان یکی از بهترین شهرهای گیرنده تابش خورشیدی در ایران می‌باشد (مطابق شکل ۱) [۳۶]، اثر استفاده از نانوسیال بر انتقال حرارت و تولید آنتروپی بررسی شده است.



شکل (۲): موقعیت جزیره ابوموسی در استان هرمزگان در نقشه ایران، که جنوبی ترین جزیره ایران در خلیج فارس است.

گذرگاه بین ابوموسی و جزایر تنب بزرگ و تنب کوچک است، ابوموسی یکی از استراتژیک ترین نقاط خلیج فارس است. از طرف دیگر به دلیل بالا بودن سالانه تابش انرژی در سطح افقی این جزیره یکی از بهترین شهرهای گیرنده تابش خورشیدی در ایران است [۳۷]. همچنین جدول (۴) داده های آب و هوایی جزیره ابوموسی را گزارش می دهد.

جدول (۴): داده های آب و هوا برای جزیره ابوموسی از سال ۱۹۸۴ تا به امروز [۳۷ و ۳۹]

سال	آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	ماه
۴۵/۰	۳۰/۰	۳۵/۰	۴۳/۰	۴۳/۰	۴۱/۴	۴۵/۰	۴۲/۰	۴۱/۸	۳۹/۶	۳۶/۰	۲۹/۵	۲۷/۸	ثبت بیشترین میزان دما (سانتی گراد)
۳۰/۴	۲۵/۴	۲۹/۶	۳۲/۲	۳۵/۴	۳۶/۷	۳۶/۳	۳۴/۵	۳۲/۵	۲۸/۹	۲۵/۵	۲۳/۶	۲۳/۰	میانگین بیشترین دما (سانتی گراد)
۲۷/۵	۲۲/۷	۲۶/۶	۳۰/۰	۳۲/۳	۳۳/۷	۳۳/۵	۳۱/۶	۲۹/۵	۲۶/۰	۲۲/۹	۲۱/۰	۲۰/۵	میانگین دمای روزانه (سانتی گراد)
۲۴/۷	۲۰/۰	۲۳/۷	۲۶/۸	۲۹/۲	۳۰/۸	۳۰/۶	۲۸/۸	۲۶/۵	۲۳/۱	۲۰/۳	۱۸/۵	۱۸/۰	میانگین کمترین دما (سانتی گراد)
۸/۰	۱۱/۰	۱۷/۰	۱۹/۰	۲۴/۰	۲۶/۸	۲۶/۲	۲۳/۴	۱۹/۲	۱۵/۸	۱۱/۶	۸/۰	۱۱/۰	ثبت میزان کمترین دما (سانتی گراد)
۱۲۶/۳	۳۳/۷	۵/۸	۱/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۲	۰/۰	۰/۰	۶/۸	۲۸/۱	۲۰/۱	۳۰/۰	میانگین بارش (میلی متر)
۱۱/۰	۲/۸	۰/۸	۰/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۷	۲/۳	۱/۹	۲/۴	میانگین بارش روزانه (میلی متر)
۶۷/۰	۶۲/۰	۶۰/۰	۶۵/۰	۶۹/۰	۷۰/۰	۷۱/۰	۷۴/۰	۷۲/۰	۷۱/۰	۶۹/۰	۶۶/۰	۶۱/۰	میزان رطوبت (درصد)
۳۲۲۶/۰	۲۲۹/۰	۲۶۳/۰	۲۹۴/۰	۲۸۱/۰	۲۹۵/۰	۲۸۵/۰	۳۱۶/۰	۳۱۲/۰	۲۶۷/۰	۲۳۲/۰	۲۲۶/۰	۲۲۷/۰	میزان ساعات آفتابی ماهانه

۳. مدل فیزیکی

۳.۱. هندسه کلکتور خورشیدی صفحه تخت

ادامه، کلکتور خورشیدی شبیه سازی می شود؛ سپس انرژی دریافتی مفید توسط سیال، دمای خروجی سیال، عدد ناسلت متوسط و تولید آنتروپی محاسبه می گردد. جریان داخل کانال در شرایط پایدار و رژیم جریان آشفتنه در نظر گرفته می شود. سرعت ورودی و فشار خروجی به عنوان شرط مرزی ورودی و خروجی برای کلکتور در نظر گرفته می شوند. کلکتور خورشیدی ارجاع داده شده تحت شار حرارتی یکنواخت است که با استفاده از خواص نوری و از دست دادن گرمای کلی کلکتور برای ماه های مختلف بر اساس نتایج اندازه گیری تجربی سبزی پرور [۳۷] می باشد.

طرحواره هندسه کلکتور خورشیدی صفحه تخت مورد بررسی در شکل (۳) نشان داده شده است. وجه هندسی این کلکتور مشابه کلکتور مورد استفاده در مرجع است [۳۸]. جدول (۵) ویژگی های هندسی این کلکتور خورشیدی را نشان می دهد. دلیل این انتخاب، وجود داده های تجربی برای اعتبارسنجی است. برای شبیه سازی، انرژی دریافتی مفید توسط کلکتور بر اساس تابش خورشیدی ورودی و از دست دادن گرمای کلی، با استفاده از روابط تحلیلی محاسبه و در

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\Gamma + \Gamma_r) \frac{\partial T}{\partial x_j}] \quad (3)$$

که در آن، ρ چگالی سیال، u_i سرعت محوری، μ و ν به ترتیب نشان دهنده ویسکوزیته سیال، سرعت نوسانی و سرعت محوری هستند.

همچنین ترم $-\rho u_i' u_j'$ در رابطه بالا مربوط به تنش برشی آشفتگی است. برای استفاده از رینولدز میانگین در مدل سازی میدان جریان و انتقال حرارت در رژیم جریان آشفته، نیاز به مدل سازی ترم تنش برشی در معادله (۲) است. برای بسته شدن معادلات، مدل آشفتگی $k-\epsilon$ انتخاب شده است. روش های متداول از تقریب بوزینسک استفاده می کند تا تنش رینولدز را با میانگین گرادیان سرعت به رابطه (۲) مرتبط کند:

$$(-\rho u_i' u_j') = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

برای مدل کردن ترم ویسکوزیته توربولانسی μ_t از یک مدل آشفتگی مناسب استفاده می شود. رابطه ویسکوزیته توربولانسی به صورت زیر است [۴]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

که k انرژی جنبشی آشفتگی است و از معادله زیر محاسبه می شود:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}[\rho k u_i] = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k - \rho \epsilon \quad (6)$$

نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی ϵ ، در معادله انرژی جنبشی آشفتگی به صورت زیر محاسبه می شود [۴]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}[\rho \epsilon u_i] = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] \quad (7)$$

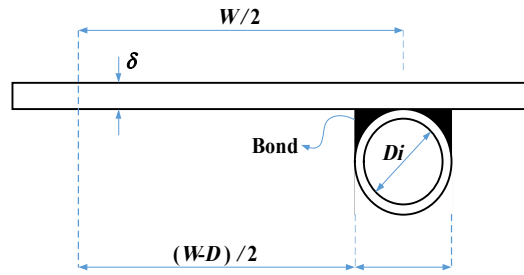
$$+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k + C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

نرخ تولید انرژی جنبشی آشفتگی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$G_k = -\rho u_i' u_j' \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (8)$$

برای بررسی رفتار در نزدیکی دیواره با فرض جریان آشفتگی در لوله از ثابت های تجربی از جمله $C_{2\epsilon}=1.92$, $C_{1\epsilon}=1.44$, $C_\mu=0.09$ و $Pr_t=0.90$ و $\sigma_\epsilon=1.30$, $\sigma_k=1.00$ [۴]. سیال رفتاری نیوتنی داشته و خواص ترموفیزیکی آن به دما وابسته است. از آنجا که تغییر دما بیشتر از ۳ درجه سلسیوس است، عبارت چند جمله ای زیر استفاده می شود [۱۰]:

$$\rho(T) = 5.37380 \cdot 10^{-10} T^5 - 9.59976 \cdot 10^{-7} T^4 + 6.93809 \cdot 10^{-4} T^3 - 0.255822 T^2 + 47.8074 T - 2584.53 \quad (9)$$



شکل (۳): طرحواره کلکتور خورشیدی شبیه سازی شده

جدول (۵): مشخصات کلکتور خورشیدی مورد مطالعه [۳۸]

واحد	مقدار/جزئیات	مشخصات
cm	۲۰×۹۴×۹/۵	منطقه اشغال شده
m ²	۱/۵۱	منطقه جذب
kg	۳۸/۵	وزن
-	آلمینیوم ۶۰۶۳	جنس
mm	t=۴	شیشه (شماره)
-	۰/۸۵	انتشار کارهای شیشه ای
-	۱	مقدار روکش شیشه ای
mm	Ø22, t=۰/۹	لوله هدر
mm	Ø10, t=۰/۹	پایه اتصال به جاذب
%	۷	انتشار گرما از جذب کننده
W·m ⁻¹ ·K	۲۱۱	هدایت حرارتی جاذب
mm	۲	ضخامت صفحه
degree	۴۵	شیب جمع کننده
%	۹۶/۲	جذب خورشیدی
-	خلاء	روش پوشش
W·m ⁻¹ ·K	۰/۰۵	هدایت حرارتی عایق ها
mm	۲۰	ضخامت عایق ها
%	۶۸	بازده نوری

۴. مواد و روش ها

۴.۱. روش عددی

سیستم معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت در کلکتور خورشیدی صفحه تخت در دستگاه مختصات کارتزین به صورت زیر است [۴]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho u_i' u_j') \quad (2)$$

که A_c مساحت صفحه جاذب، T_a درجه حرارت محیط و T_{pm} دمای متوسط صفحه است. در مطالعه حاضر شیب دما در اطراف لوله مورد توجه قرار گرفته و می توان میانگین دما را تا آنجا که لوله از طریق صفحه پخش شده است در نظر گرفت. همچنین هدایت حرارتی قسمت باند، هدایت حرارتی صفحه و ضریب انتقال حرارت جابه جایی سیال زیاد است. همچنین S بخشی از تشعشع خورشید در واحد سطح صفحه است که توسط صفحه جذب شده و به همان اندازه می باشد [۱۰]:

$$S = \eta_0 \cdot I_T \quad (۱۷)$$

که I_T متوسط تابش ساعتی است که روزانه به کلکتور وارد می شود. η_0 بازده نوری کلکتور است که به صورت زیر محاسبه می شود [۱۰]:

$$\eta_0 = (\tau\alpha) = 1.01\tau\alpha \quad (۱۸)$$

که α و τ به ترتیب انتقال خورشیدی و ضریب جذب خورشیدی می باشند. همچنین I_T از رابطه زیر محاسبه می شود [۱۰]:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \cdot \rho_{gr} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (۱۹)$$

که I_b و I_d به ترتیب در معرض تابش در سطح افقی، تابش پرتو و اشعه پراکنده هستند. همچنین R_b نسبت تابش پرتو در سطح کج به سطح افقی است و به شرح زیر محاسبه می شود [۱۰]:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (۲۰)$$

که φ عرض جغرافیایی محل جمع آوری، δ زاویه کاهش و ω زاویه ساعت است. علاوه بر این U_L در معادله (۵) ضریب افت گرمایی کلکتور خورشیدی است و به صورت زیر محاسبه می شود [۱۰]:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (۲۱)$$

$$U_t = \left(\frac{N}{C} \frac{T_{pm} - T_a}{N + f} + \frac{1}{h_w} \right)^{-1} + \frac{\sigma(T_{pm} - T_a)(T_{pm}^2 - T_a^2)}{1 + \frac{2N + f - 1 + 0.133\varepsilon_p}{\varepsilon_p + 0.0059N \cdot h_w} - N} \quad (۲۲)$$

$$f = (1 + 0.089h_w - 0.1166h_w \varepsilon_p)(1 + 0.07866N) \quad (۲۳)$$

$$C = 250(1 - 0.000051\beta^2) \quad (۲۴)$$

$$e = 0.430 \left(1 - \frac{100}{T_{pm}} \right) \quad (۲۵)$$

$$h_w = 2.8 + 3V_w \quad (۲۶)$$

در این روابط، N تعداد شیشه پوشانده، h_w ضریب انتقال حرارت باد، V_w سرعت باد و σ ثابت استفان بولتزمن است. همچنین ضریب افت پشت شیشه به صورت زیر محاسبه می شود [۱۰]:

$$U_b = \frac{k}{L} \quad (۲۷)$$

$$c_p(T) = -4.51782 \cdot 10^{-8} T^5 + 7.61613 \cdot 10^{-5} T^4 - 5.12699 \cdot 10^{-2} T^3 + 17.2363 T^2 - 2894.857 T + 198532 \quad (۱۰)$$

$$k(T) = 5.15307 \cdot 10^{-11} T^5 - 8.15212 \cdot 10^{-8} T^4 + 5.1380 \cdot 10^{-5} T^3 - 1.61344 \cdot 10^{-2} T^2 + 252692 T - 157.532 \quad (۱۱)$$

$$\mu(T) = -4.37087 \cdot 10^{-13} T^5 + 7.38482 \cdot 10^{-10} T^4 - 4.99292 \cdot 10^{-7} T^3 + 1.68946 \cdot 10^{-4} T^2 - 2.86313 \cdot 10^{-2} T + 1.94641 \quad (۱۲)$$

برای بستن سیستم معادلات حاکم، مجموعه ای از شرایط مرزی لازم است که عبارت اند از: شرط مرزی سرعت در ورودی و فشار در خروجی؛ همچنین دیوارها دارای شرط عدم لغزش می باشند.

معادله انتقال تابش طیفی (RTE) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{dI_v(r, s)}{ds} = -(K_{av} + K_{sv})I_v(r, s) + K_{av}I_b(v, T) + \frac{K_{sv}}{4\pi} \int_{4\pi} dI_v(r, s') \cdot \phi(s, s') d\Omega' + S \quad (۱۳)$$

که در آن I_v شدت اشعه طیفی است که به موقعیت r و جهت s بستگی دارد و از رابطه زیر محاسبه می شود [۱۰]:

$$I_v(r, s) = \varepsilon_v(r_w)I_b(v, T) + \frac{\rho_w(r_w)}{\pi} \int_{n \cdot s' < 0} I_v(r, s') \cdot |n \cdot s'| d\Omega' \quad (۱۴)$$

از نرم افزار انسیس فلونت ورژن ۱۵ برای حل معادلات حاکم استفاده شده است. معادلات حاکم به صورت تک فاز مدل شده و با استفاده از روش حجم محدود شبیه سازی شده اند. برای مدل کردن جریان آشفتۀ از مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ استفاده شده، همچنین رفتار در نزدیکی دیواره به صورت استاندارد در نظر گرفته شده است. ترم پخش، ترم جابه جایی و انرژی از روش جریان بالادست تقریب زده شده اند. معیار همگرایی برای تمامی معادلات 10^{-6} می باشد.

۲.۴. روش تحلیلی

انرژی دریافتی مفید توسط سیال در کلکتور خورشیدی به صورت زیر محاسبه می شود [۱۰]:

$$\dot{Q}_{u,f} = \dot{m}_f c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (۱۵)$$

که \dot{m} نرخ دبی جریان، c_p ظرفیت گرمایی ویژه سیال، T_{out} و T_{in} به ترتیب متوسط دمای ورودی و خروجی هستند.

انرژی دریافتی مفید توسط کلکتور بر اساس تابش خورشیدی ورودی و از دست دادن گرمای کلی به صورت زیر است [۱۰]:

$$\dot{Q}_{u,c} = A_c (S - U_L (T_{pm} - T_a)) \quad (۱۶)$$

و صفحه جاذب است و به صورت زیر بیان می شود:

$$\dot{E}_{d,\Delta T_s} = \eta_0 G_i A_c T_a \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_s} \right) \quad (35)$$

میزان آگرژی از دست رفته به دلیل افت فشار در کلکتور از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\dot{E}_{d,\Delta P} = \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} \cdot \frac{T_a \ln\left(\frac{T_{out}}{T_a}\right)}{T_{out} - T_{in}} \quad (36)$$

همچنین $\dot{E}_{d,\Delta T_f}$ میزان آگرژی از دست رفته به دلیل جریان نانوسیالات در کلکتور و اختلاف دما بین صفحه جاذب و نانوذرات است و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\dot{E}_{d,\Delta T_f} = \dot{m} c_p \left(\ln\left(\frac{T_{out}}{T_a}\right) - \frac{T_{out} - T_{in}}{T_p} \right) \quad (37)$$

میزان آگرژی از دست رفته عبارت است از:

$$E_l = U_l A_c (T_p - T_a) \left(1 - \frac{T_a}{T_p} \right) \quad (38)$$

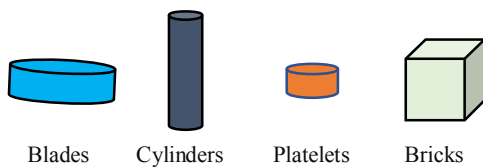
بنابراین شکل توسعه یافته رابطه (۳۰) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{gen} = & \eta_0 G_i A_c \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_s} \right) + \\ & \dot{m} c_p \left(\ln\left(\frac{T_{out}}{T_{in}}\right) - \frac{T_{out} - T_{in}}{T_p} \right) + U_l A_c \left(\frac{T_p}{T_a} - 1 \right) \left(1 - \frac{T_a}{T_p} \right) \\ & + \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} \cdot \frac{T_a \ln\left(\frac{T_{out}}{T_a}\right)}{T_{out} - T_{in}} \end{aligned} \quad (39)$$

که \dot{m} دبی جرمی کل برای نانوسیال است که بر حسب کیلوگرم بر ثانیه (kg/s) می باشد. ΔP افت فشار بر حسب پاسکال (Pa) و T_s دمای خورشید است. همان طور که در رابطه (۳۵) نشان داده شده آنتروپی در کلکتور خورشیدی با دو اثر ایجاد می شود. ابتدا با شیب دما و در نتیجه انتقال گرما، $\dot{S}_{gen,H}$ سپس گردادیان سرعت که منجر به اصطکاک سیال و افت فشار می گردد.

۳.۴. نانوسیال

برای محاسبه خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال با شکل مختلف (مطابق شکل ۴) معادلات زیر ارائه شده است.



شکل (۴): اشکال مختلف نانوذرات مورد مطالعه [۲]

به منظور تجزیه تحلیل و مقایسه خصوصیات جریان سیال و انتقال حرارت در بخش های مختلف و شکل های مختلف نانوذرات در کلکتور خورشیدی صفحه تخت، برخی تعاریف به صورت زیر آورده شده است. عدد رینولدز سیال به صورت زیر تعریف می شود [۴]:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot u_m \cdot D_i}{\mu_f} \quad (28)$$

که در آن u_m سرعت متوسط سیال است. عدد ناسلت نیز از رابطه ریز محاسبه می شود [۴]:

$$Nu = \frac{h_f \cdot D_i}{k_f} \quad (29)$$

که h_f ضریب انتقال حرارت جابه جایی و k_f ضریب هدایت حرارتی هستند.

افت فشار ورودی و خروجی به صورت زیر تعریف می شود [۴]:

$$\Delta P = P_{av,inlet} - P_{av,outlet} \quad (30)$$

ضریب اصطکاک برای جریان کاملاً توسعه یافته به صورت زیر محاسبه می شود [۴]:

$$f = \frac{2}{\left(\frac{L}{D_i}\right)} \frac{\Delta P}{\rho_{nf} \cdot u_m^2} \quad (31)$$

از معیار ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حرارتی (PEC) برای مقایسه عملکرد حرارتی و دینامیکی سیال در مبدل حرارتی خورشیدی با نانوسیالات استفاده می شود. با استفاده از محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک، معیار ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حرارتی به صورت زیر تعریف می شود [۴]:

$$PEC = \left(\frac{Nu_{av,nf}}{Nu_{av,f}} \right) \cdot \left(\frac{f_{nf}}{f_f} \right)^{-1/3} \quad (32)$$

که $Nu_{av,nf}$ و $Nu_{av,f}$ به ترتیب عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال و عدد ناسلت متوسط برای سیال پایه هستند. همچنین f_{nf} ضریب اصطکاک نانوسیال و f_f ضریب اصطکاک سیال پایه است. تولید آنتروپی کل، \dot{S}_{gen} (W/K) را در کلکتور خورشیدی با استفاده از کار از دست رفته قابل محاسبه است. \dot{W}_{los} مجموع (\dot{E}_d) و (\dot{E}_l) می باشد. نرخ تولید آنتروپی تولیدی کل به صورت زیر تعریف می شود [۴]:

$$\dot{S}_{gen} = \frac{\dot{W}_{lost}}{T_a} + \frac{\dot{E}_d + \dot{E}_l}{T_a} \quad (33)$$

میزان آگرژی از دست رفته را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد [۴]:

$$\dot{E}_d = \dot{E}_{d,\Delta P} + \dot{E}_{d,\Delta T_f} \quad (34)$$

که $\dot{E}_{d,\Delta T_s}$ میزان آگرژی از دست رفته به دلیل اختلاف بین خورشید

۵. استقلال از نتایج شبکه و اعتبارسنجی

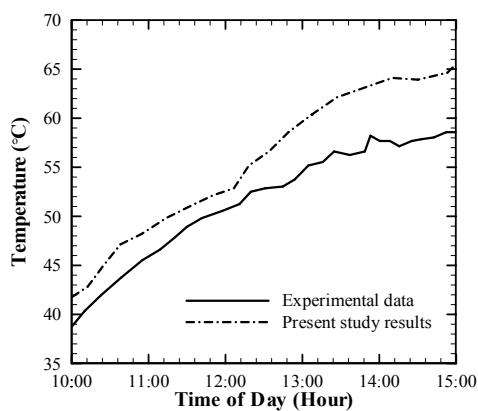
همان طور که در جدول (۹) نشان داده شده، آزمایش استقلال از شبکه برای هندسه کلکتور خورشیدی صفحه تخت انجام شده است که اثرات اندازه شبکه را در نتایج خروجی آنالیز می کند. طبق این جدول، آزمون در ۹ مرحله صورت گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده، شبکه با تعداد المان ۱,۹۲۴,۳۱۳ مناسب است زیرا از این تعداد شبکه به بعد، با بیشتر کردن نقاط شبکه تغییر محسوسی در نتایج حاصل نمی شود. همچنین در این تعداد شبکه خطا با دقت ۰/۰۳ قابل قبول است.

جدول (۹): استقلال از نتایج شبکه برای کلکتور خورشیدی صفحه تخت بر اساس داده های تجربی [۳۸] در ساعت ۱ بعد از ظهر

شماره	تعداد المان	دمای خروجی	خطا (%)
۱	۴۶۲/۲۲۷	۸۴/۴۵۷۹	۱۵/۵۱
۲	۸۵۶/۰۰۹	۷۱/۳۵۷۹	۶/۲۷
۳	۱/۲۹۳/۵۸	۶۶/۸۷۳۴	۹/۲۷
۴	۱/۵۵۵/۵۵۲	۶۰/۶۷۰۳	۳/۹۶
۵	۱/۷۴۴/۶۲۳	۵۸/۲۷۴۵	۰/۰۳
۶	۱/۹۲۴/۳۱۳	۵۸/۲۵۶۷	-

۶. اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی، نتایج شبیه سازی عددی کلکتور خورشیدی با داده های کار تجربی یوسفی و همکاران [۳۸] در همان ابعاد و شرایط مرزی مقایسه شد که در شکل (۵) آمده است. همان طور که مشاهده می شود، توافق قابل قبولی بین شبیه سازی عددی و داده های تجربی یوسفی و همکاران [۳۸] برقرار است و نتایج عددی حاصل از مطالعه حاضر با حداکثر خطای ۱۲/۵۷ ارائه شده است.



شکل (۵): اعتبارسنجی شبیه سازی عددی برای دمای خروجی بر اساس داده های تجربی [۳۸] برای سیال پایه آب

۷. نتایج و بحث

قبل از ارائه نتایج شایان ذکر است که همه ارقام گزارش شده مربوط

چگالی موثر ρ_{nf} و ظرفیت گرمایی $(c_p)_{nf}$ نانوسیال در دمای متوسط T_m از روابط زیر محاسبه می شوند [۱۵]:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (40)$$

$$(c_p)_{nf} = \frac{1}{\rho_{nf}}((1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_s) \quad (41)$$

در این مطالعه از مدل های همپلتون و کراسور برای محاسبه هدایت حرارتی و لزجت نانوسیال استفاده می شود. همچنین با استفاده از مشخصات موجود، شکل های مختلف نانوذره دی سولفید مولیبدن (MoS2) با سیال پایه آب مخلوط می شوند [۱۵].

$$k_{nf} = k_f \left(\frac{k_s + (n+1)k_f + (n-1)(k_s - k_f)\phi}{k_s + (n-1)k_f - (k_s - k_f)\phi} \right) \quad (42)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + a\phi + b\phi^2) \quad (43)$$

در این روابط، a و b ثابت های مربوط به شکل نانوذرات هستند و مقادیر آن ها برای تمام شکل نانوذرات در جدول (۳) آورده شده است. μ_f ، k_f و k_s به ترتیب لزجت، ضریب هدایت حرارتی سیال و ضریب هدایت حرارتی نانوذرات هستند. پارامتر n به صورت تجربی برای هر شکل نانوذرات متفاوت بوده و از رابطه $n = 3/\Psi$ محاسبه می شود. Ψ شاخص کروی بودن است. شاخص کروی بودن که در مدل همپلتون و کراسور ارائه شده، نسبت سطح کره به سطح ذرات واقعی با حجم مساوی است. مقادیر شاخص کروی بودن برای اشکال مختلف نانوذرات در جدول (۴) آورده شده است [۱۷]. خواص ترموفیزیکی نانوذره و سیال پایه در جدول (۵) آورده شده است.

جدول (۶): ثابت های a و b [۶]

مدل	صفحه ای	تیغه ای	سیلندری	آجری
a	۳۷/۱	۱۴/۶	۱۳/۵	۱/۹
b	۶۱۲/۶	۱۲۳/۳	۹۰۴/۴	۴۷۱/۴

جدول (۷): مقدار Ψ برای اشکال مختلف نانوذره [۶]

مدل	صفحه ای	تیغه ای	سیلندری	آجری
Ψ	۰/۵۲	۰/۳۶	۰/۶۲	۰/۸۱

جدول (۸): خواص ترموفیزیکی آب و نانوذرات دی سولفید مولیبدن

خواص	واحد	آب	دی سولفید مولیبدن
چگالی	$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	۳۷/۱	۶۱۲/۶
ظرفیت گرمایی ویژه	$(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	۱۴/۶	۱۲۳/۳
ضریب هدایت حرارتی	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	۱۳/۵	۹۰۴/۴
لزجت	$(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	۱/۹	-

کلکتور خورشیدی با استفاده از نانوسیال دی سولفید مولیبدن (MoS₂) - آب در کسر حجمی $\phi=3\%$ ، نانوذرات با شکل آجری بهترین مدل در بین اشکال مختلف نانوذره هستند که مقدار آن تقریباً ۱/۲۶۹ است. بر اساس نتایج به دست آمده برای تمام نانوسیالات با اشکال نانوذرات غیر از کروی مقدار ضریب عملکرد هیدرولیکی بیشتر از ۱ است. این بدان معناست که از لحاظ معیار هیدرولیکی حرارتی استفاده از نانوسیال نسبت به سیال پایه عملکرد بهتری دارد.

شکل (۸-۸) نشان دهنده تغییرات عدد ناسلت متوسط نسبت به کسر حجمی نانوذرات برای شکل های مختلف نانوذرات، در دبی جرمی $\dot{m}=0/75 \text{ kg/s}$ می باشد. همان طور که مشاهده می شود برای اشکال مختلف نانوذره روند تغییرات عدد ناسلت متوسط مشابه یکدیگر و افزایشی است. مطابق شکل عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال با شکل نانوذرات آجری در کسر حجمی ۴٪ نسبت به سیال پایه، ۳۱٪ افزایش داشته است. همچنین افزایش نرخ دبی جرمی باعث افزایش عدد ناسلت متوسط در کلکتور خورشیدی صفحه تخت مورد مطالعه می شود (با توجه به شکل های ۶-۸ و ۸-۸).

تغییرات دمای خروجی نسبت به کسر حجمی نانوذرات برای اشکال مختلف نانوذره در شکل (۸-۸) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش کسر حجمی دمای خروجی افزایش پیدا می کند زیرا ظرفیت گرمایی نانوسیال کاهش می یابد [۴]. مقدار دمای خروجی نانوذرات با شکل صفحه ای پایین تر از مدل های دیگر است زیرا حداقل ضریب انتقال حرارت به این شکل از تعلق دارد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده از شکل های (۸-۶) و (۸-۸)، در کسر حجمی های پایین، افزایش دبی جرمی باعث کاهش دمای خروجی در کلکتور خورشیدی می گردد. این در حالی است که در کسر حجمی های بالا، افزایش دبی جرمی باعث افزایش دمای کلکتور خورشیدی می شود. اما این کاهش و افزایش بسیار اندک است. تغییرات افت فشار نسبت به کسر حجمی نانوذرات برای اشکال مختلف نانوذره در شکل (۸-۸) نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که نانوسیالات با شکل نانوذرات صفحه ای و آجری به ترتیب بالاترین و کمترین مقدار افت فشار را در بین تمامی مدل ها دارند. همچنین مشاهده می شود که روند تغییرات افت فشار در نرخ های جرمی مختلف متفاوت است.

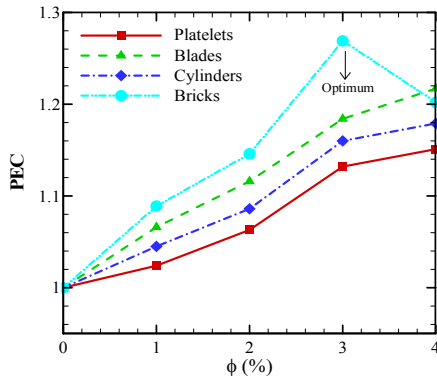
افت فشار در جریان با دبی جرمی بالا بیشتر از افت فشار با دبی جرمی پایین است. شکل ۸-۸ تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به کسر حجمی نانوذرات برای شکل های مختلف نانوذرات در طول کانال را نشان می دهد.

به ساعت ۱۰ صبح می باشد. این ساعت ضعیف ترین زمان روز از نظر دمای سیال خروجی است. همچنین دو دبی جرمی مختلف از جمله $\dot{m}=0/50 \text{ kg/s}$ و $\dot{m}=0/75 \text{ kg/s}$ در نظر گرفته شده است و اثرات دبی جرمی بر خصوصیات مختلف مورد بررسی قرار می گیرد.

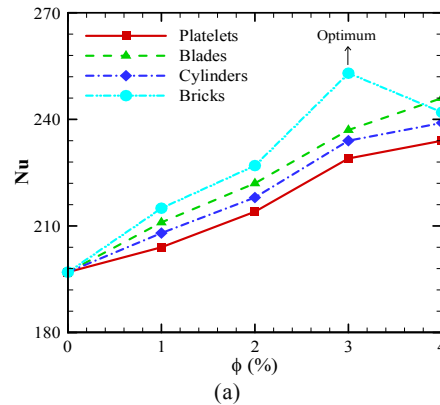
شکل (۶) نشان دهنده تغییرات عدد ناسلت نسبت به کسر حجمی برای شکل های مختلف نانوذرات، در دبی جرمی $\dot{m}=0/50 \text{ kg/s}$ است. همان طور که مشاهده می شود، برای شکل های مختلف نانوذرات، تغییرات عدد ناسلت متوسط مشابه یکدیگر بوده و روندی افزایش دارد؛ در حالی که در نانوذره آجری با افزایش کسر حجمی عدد ناسلت متوسط کاهش می یابد. عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال با نانوذره آجری در کسر حجمی ۳٪ به مقدار ۲۸٪ نسبت به سیال پایه افزایش داشته است. از طرف دیگر گفتنی است که افزایش لزجت بسیار بیشتر از هدایت حرارتی است. بنابراین انتظار می رود که در کسر حجمی بالا ضریب انتقال حرارت کاهش یابد. تغییرات دمای خروجی نسبت به کسر حجمی نانوذرات برای اشکال مختلف نانوذره در شکل (۶-۸) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش کسر حجمی نانوذرات دمای خروجی افزایش می یابد، زیرا ظرفیت گرمایی نانوسیال کاهش می یابد. به معادله زیر توجه کنید [۶].

$$T_{out} = T_{in} + \frac{\dot{Q}_u}{\dot{m} \cdot (c_p)_{nf}} \quad (44)$$

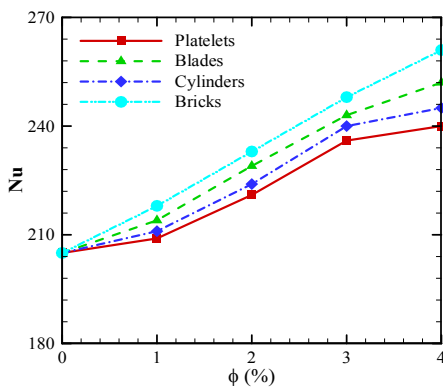
نانوذرات صفحه ای نسبت به شکل های دیگر کمترین دمای خروجی را دارند زیرا حداقل ظرفیت انتقال حرارت به این شکل از نانوذرات تعلق دارد. برای یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت، کاهش ضریب انتقال حرارت باعث کاهش بازده کلکتور می شود. تغییرات افت فشار نسبت به کسر حجمی نانوذرات برای اشکال مختلف نانوذره در شکل (۶-۸) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، نانوسیالات با شکل نانوذرات صفحه ای و آجری به ترتیب بالاترین و کمترین مقدار افت فشار را در بین اشکال مختلف دارند. شکل (۶-۸) تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به کسر حجمی نانوذرات را برای شکل های مختلف نانوذرات در طول کانال نشان می دهد. مقدار ضریب اصطکاک برای نانوسیالات با نانوذرات آجری در مقایسه با سایر شکل های دیگر کمترین میزان را دارد. شکل (۷) نشان دهنده مقادیر ضریب ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حرارتی نسبت به کسر حجمی نانوذرات برای اشکال مختلف نانوذره است. همان طور که مشاهده می شود کسر حجمی بهینه برای نانوسیالات با شکل نانوذرات صفحه ای، تیغه ای و استوانه ای، $\phi=4\%$ می باشد؛ در حالی که کسر حجمی بهینه برای نانوسیال با نانوذرات آجری، $\phi=3\%$ است. با توجه به بررسی های انجام شده، از لحاظ ضریب عملکرد ارزیابی هیدرولیکی حرارتی در



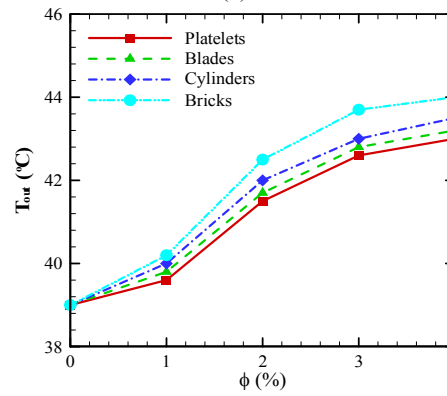
شکل (V): تغییرات ضریب ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حرارتی نسبت به کسر حجمی نانوذرات برای اشکال مختلف نانوذرات برای جریان با دبی جرمی $\dot{m}=0.50 \text{ kg/s}$



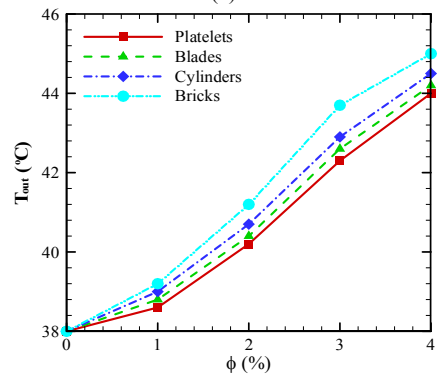
(a)



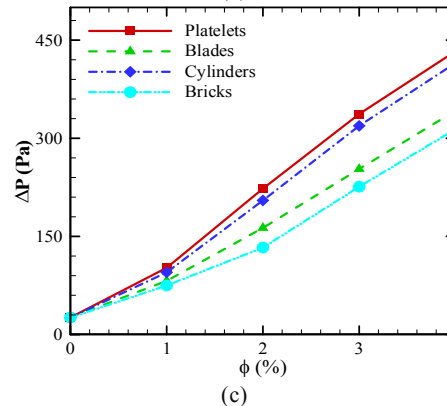
(a)



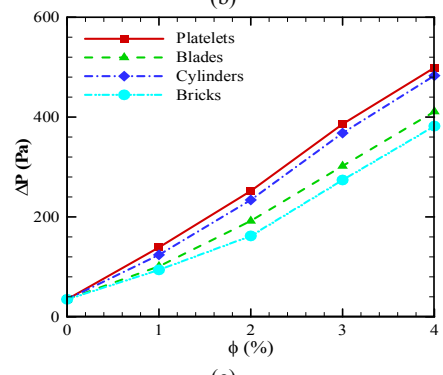
(b)



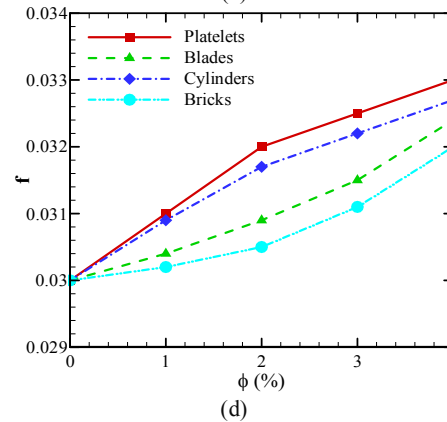
(b)



(c)



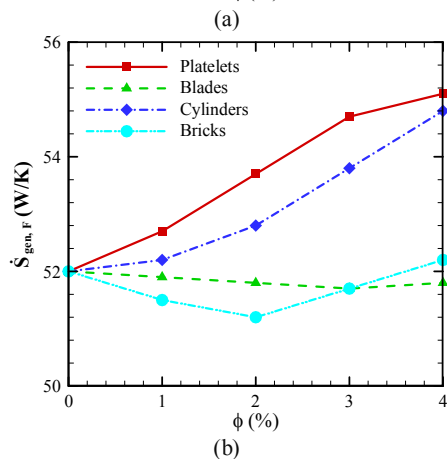
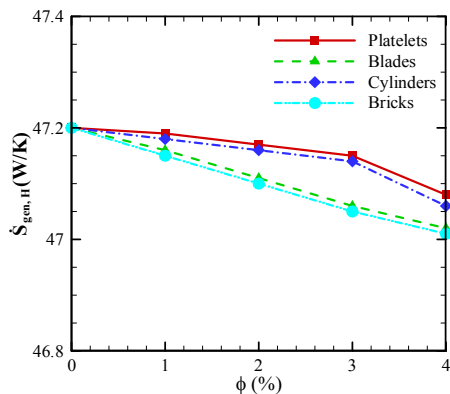
(c)



(d)

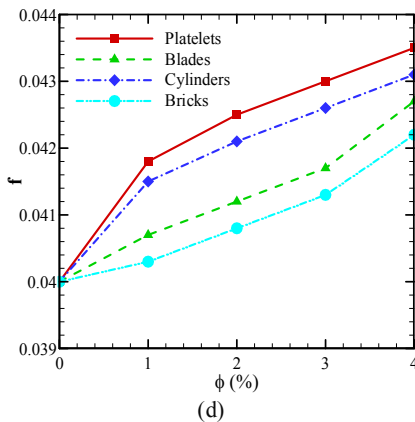
شکل (۶): تغییرات (a) عدد ناسلت متوسط، (b) دمای خروجی، (c) افت فشار و (d) ضریب اصطکاک نسبت به کسر حجمی نانوذرات برای اشکال مختلف نانوذره در دبی جرمی $\dot{m}=0.50 \text{ kg/s}$

همان طور که مشاهده می‌شود، تولید آنتروپی به‌طور خطی و با افزایش کسر حجمی نانوذرات در تمامی مدل‌های مختلف به دلیل انتقال حرارت کاهش می‌یابد. اگرچه این مقدار ناچیز است، مهم‌ترین ترم تعیین‌کننده میزان انتقال حرارت در تولید آنتروپی می‌باشد. بنابراین دمای جذب‌کننده بزرگ، سرعت تولید آنتروپی را با انتقال گرما کاهش می‌دهد. دمای صفحه جاذب با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد. از این تولید آنتروپی به دلیل انتقال حرارت کاهش می‌یابد. در این مطالعه، نانوذرات صفحه‌ای بیشترین میزان تولید آنتروپی را دارند.



شکل (۱۰): تغییرات (a) تولید آنتروپی به دلیل انتقال حرارت و (b) تولید آنتروپی به دلیل اصطکاک سیال نسبت به کسر حجمی نانوذرات برای شکل‌های مختلف نانوذرات در دبی جرمی $\dot{m}=0/50 \text{ kg/s}$

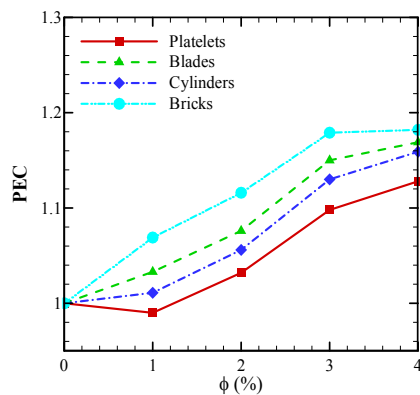
شکل (۱۰) تغییرات تولید آنتروپی نسبت به کسر حجمی نانوذرات به علت اصطکاک برای اشکال مختلف نانوذرات را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، تولید آنتروپی به دلیل اصطکاک سیال برای نانوذرات صفحه‌ای و سیلندری با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد؛ در حالی که تولید آنتروپی برای نانوذرات تیغه‌ای با یک شیب کوچک و به صورت خطی کاهش می‌یابد. همچنین حالت بهینه برای تولید آنتروپی در نانوذرات آجری کسر حجمی ۳٪ می‌باشد که در این حالت اصطکاک به حداقل می‌رسد. علاوه بر این، همان طور که در شکل (۱۰-b) نشان داده شده، در بعضی از موارد (مانند تیغه‌ای و آجری)



شکل (۸): تغییرات (a) عدد ناسلت متوسط، (b) دمای خروجی، (c) افت فشار و (d) ضریب اصطکاک نسبت به کسر حجمی نانوذرات برای اشکال مختلف نانوذره در دبی جرمی $\dot{m}=0/75 \text{ kg/s}$

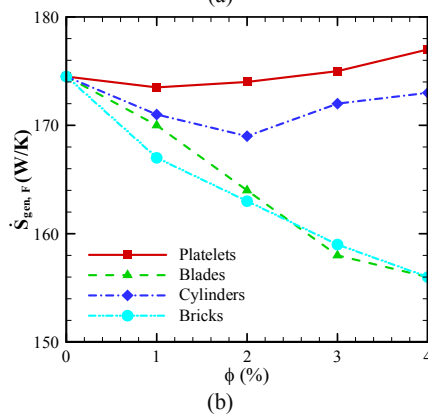
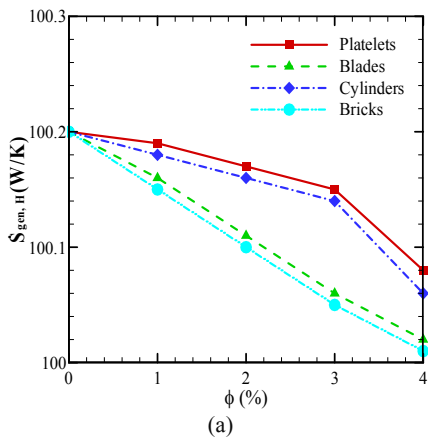
مطابق نتایج به دست آمده در شکل‌های (۶-d) و (۸-d) روند تغییرات ضریب اصطکاک در دبی‌های جرمی مختلف مشابه یکدیگر است. ضریب اصطکاک برای نانوسیال با شکل نانوذرات آجری در مقایسه با سایر مدل‌ها کمترین مقدار را دارد. همان طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، حالت بهینه کسر حجمی برای نانوذرات با شکل‌های مختلف، در $\phi=4\%$ است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، از لحاظ ضریب عملکرد ارزیابی هیدرولیکی حرارتی در کلکتور خورشیدی با استفاده از نانوسیال دی‌سولفید مولیبدن (MoS₂)-آب در کسر حجمی $\phi=4\%$ ، نانوذرات با شکل آجری بهترین مدل در بین اشکال مختلف نانوذره هستند که مقدار آن تقریباً $1/182$ است. همچنین ضریب عملکرد ارزیابی هیدرولیکی حرارتی برای نانوذرات با صفحه‌ای شکل در کسر حجمی ۱٪، کمتر از ۱ است. لذا استفاده از نانوسیال به عنوان جایگزینی برای سیال پایه باعث بهبود عملکرد هیدرولیکی حرارتی خواهد بود. شکل (۱۰) نشان‌دهنده تغییرات تولید آنتروپی نسبت به کسر حجمی نانوذرات به علت انتقال حرارت برای اشکال مختلف نانوذرات است.



شکل (۹): تغییرات ضریب ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حرارتی نسبت به کسر حجمی نانوذرات برای اشکال مختلف نانوذرات برای جریان با دبی جرمی $\dot{m}=0/75 \text{ kg/s}$

آنتروپی برای جریان با دبی جرمی $0.75/\dot{m}$ و 0.5 کیلوگرم بر ثانیه یکسان نیست. در جریان با دبی جرمی $0.75/\dot{m}$ با افزایش کسر حجمی، نرخ تولید آنتروپی در نانوذرات صفحه‌ای کاهش می‌یابد. با افزایش نرخ دبی جرمی، عدد رینولدز افزایش می‌یابد. لذا اثرات اصطکاک و ویسکوزیته کاهش یافته و باعث می‌شود که نرخ تولید آنتروپی در نانوذرات صفحه‌ای در کسر حجمی‌های 0.2 و 0.4 کمتر از سیال پایه گردد. طبق نتایج به دست آمده در هر دو دبی جریان، میزان نرخ آنتروپی تولیدی در کسر حجمی‌های مشخص برای نانوسیال با نانوذرات تیغه‌ای و آجری نسبت به سیال پایه کمتر است. در حقیقت برای جریان با دبی جرمی $0.50/\dot{m}$ حداقل نرخ تولید آنتروپی مربوط به نانوذرات آجری، و در کسر حجمی 0.2 می‌باشد؛ در حالی که برای جریان با دبی جرمی $0.75/\dot{m}$ حداقل نرخ تولید آنتروپی مربوط به نانوذرات آجری و تیغه‌ای، و در کسر حجمی 0.4 است. همچنین در جریان با دبی جرمی $0.50/\dot{m}$ از نظر آنالیز انرژی افزودن نانوذرات آجری و تیغه‌ای به سیال پایه اثرگذار نیست. در حالی که در جریان با دبی جرمی $0.75/\dot{m}$ استفاده از نانوذرات آجری و تیغه‌ای باعث کاهش تولید آنتروپی در کسر حجمی‌های 0.1 و 0.4 می‌شوند.



شکل (۱۱): تغییرات (a) تولید آنتروپی به دلیل انتقال حرارت و (b) تولید آنتروپی به دلیل اصطکاک سیال نسبت به کسر حجمی نانوذرات برای شکل‌های مختلف نانوذرات در دبی جرمی $\dot{m}=0.75$ kg/s

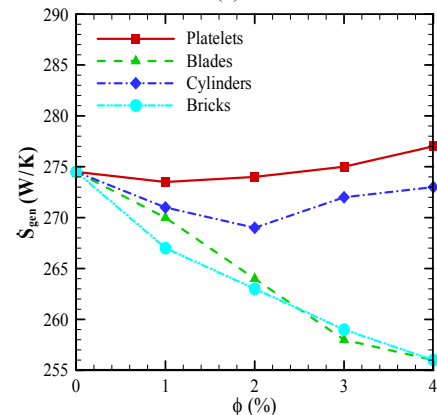
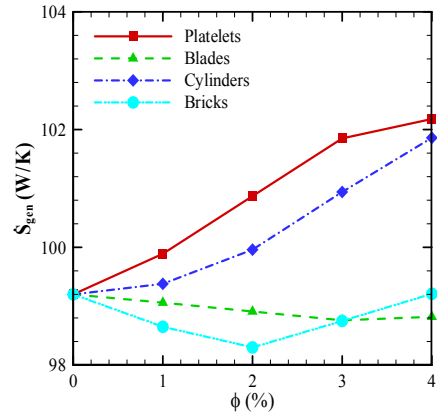
تولید آنتروپی به دلیل اصطکاک سیال، برای نانوسیال کمتر از سیال پایه است. شایان ذکر است که برای نانوسیالات با افزایش کسر حجمی، لزجت افزایش یافته، لذا $S_{gen,F}$ افزایش می‌یابد. از طرفی چون چگالی نانوسیال از چگالی سیال پایه بیشتر است، $S_{gen,F}$ کاهش می‌یابد. افزایش لزجت در نانوذرات آجری و تیغه‌ای در مقایسه با افزایش چگالی کمتر است. از این رو $S_{gen,F}$ برای هر دو شکل نانوذره کاهش می‌یابد. شکل (۱۱-a) نشان دهنده تغییرات تولید آنتروپی نسبت به کسر حجمی نانوذرات به علت انتقال حرارت برای اشکال مختلف نانوذرات در دبی جرمی $0.50/\dot{m}$ kg/s می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تولید آنتروپی به دلیل انتقال حرارت به صورت خطی با افزایش کسر حجمی برای همه اشکال نانوذرات کاهش می‌یابد که مقدار آن ناچیز است. شکل (۱۱-b) تغییرات تولید آنتروپی نسبت به کسر حجمی نانوذرات به علت اصطکاک برای اشکال مختلف نانوذرات را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تولید آنتروپی به دلیل اصطکاک سیال برای نانوذرات صفحه‌ای و سیلندری به ترتیب با افزایش کسر حجمی به 0.2 و 0.3 کاهش می‌یابد و با افزایش کسر حجمی به 0.4 مقدار آن افزایش می‌یابد؛ در حالی که برای نانوذرات آجری و تیغه‌ای، تولید آنتروپی همیشه با افزایش کسر حجمی کاهش می‌یابد. همچنین همان‌طور که در شکل (۱۱-b) نشان داده شده، در دبی جرمی $0.75/\dot{m}$ kg/s بعضی از موارد تولید آنتروپی به دلیل اصطکاک سیال، برای نانوسیال کمتر از سیال پایه است. تغییرات تولید آنتروپی نسبت به کسر حجمی برای شکل‌های مختلف نانوذرات در دبی جرمی $0.50/\dot{m}$ و $0.75/\dot{m}$ kg/s در شکل (۱۲) نشان داده شده است. این نتیجه حاصل شد که به دلیل اصطکاک، روند تغییرات مشابه با تولید آنتروپی است. با توجه به نتایج به دست آمده زمانی که در کلکتور خورشیدی صفحه تخت دبی جریان $0.50/\dot{m}$ kg/s است، کمترین تولید آنتروپی مربوط به نانوذرات آجری در کسر حجمی 0.2 می‌باشد؛ در حالی که در کلکتور خورشیدی صفحه تخت دبی جریان $0.75/\dot{m}$ kg/s، کمترین تولید آنتروپی مربوط به نانوذره تیغه‌ای در کسر حجمی 0.4 است.

همچنین طبق مشاهدات در جریان با دبی جریان $0.50/\dot{m}$ kg/s میزان تولید آنتروپی برای نانوذرات صفحه‌ای و استوانه‌ای با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد؛ در حالی که تولید آنتروپی در جریان با دبی جریان $0.75/\dot{m}$ kg/s، برای نانوذرات تیغه‌ای و آجری با افزایش کسر حجمی کاهش می‌یابد. در واقع شکل (۱۲) برای بررسی تأثیر افزایش دبی جرمی از 0.5 به 0.75 کیلوگرم بر ثانیه بر نرخ تولید آنتروپی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دبی جرمی میزان تولید آنتروپی افزایش می‌یابد. روند تغییرات در نرخ تولید

خلیج فارس پرداخته شد. نتایج این تحقیق بدین شرح است:

- با افزایش کسرحجمی نانوذرات، دمای خروجی افزایش می‌یابد. همچنین بیشترین و کمترین مقدار دمای خروجی به ترتیب هنگام استفاده از نانوذرات آجری و صفحه‌ای است.
- برای هر دو دبی جریان، بیشترین و کمترین افت فشار به ترتیب مربوط به نانوذرات صفحه‌ای و آجری در بین تمام مدل‌هاست. در نتیجه کمترین مقدار ضریب اصطکاک برای نانوسیال با نانوذرات آجری است.
- با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در جریان با دبی جرمی $\dot{m}=0/50$ kg/s از لحاظ ضریب عملکرد ارزیابی هیدرولیکی حرارتی در کلکتور خورشیدی بهترین مدل در بین اشکال مختلف نانوذره، مربوط به نانوذره آجری در کسرحجمی $\phi=3\%$ هستند که مقدار آن تقریباً $1/269$ است؛ درحالی‌که در جریان با دبی جرمی $\dot{m}=0/75$ kg/s بهترین مدل در بین اشکال مختلف نانوذره مربوط به نانوذره آجری در کسرحجمی $\phi=4\%$ ، نانوذرات با شکل هستند که مقدار آن تقریباً $1/182$ است.
- با افزایش کسرحجمی نانوذرات، سرعت تولید آنتروپی به دلیل انتقال حرارت برای تمام شکل‌های نانوذرات کاهش می‌یابد.
- روند تولید آنتروپی کلی و تولید آنتروپی به دلیل اصطکاک سیال در تمام شکل‌های نانوذرات مشابه یکدیگر است.

- روند تولید آنتروپی برای جریان با دبی جرمی $0/5$ و $0/75$ کیلوگرم بر ثانیه با یکدیگر متفاوت است. با توجه به نتایج در جریان با دبی جرمی $\dot{m}=0/50$ kg/s از نظر آنالیز آگرژی افزودن نانوذرات آجری و تیغه‌ای به سیال پایه اثرگذار نیست؛ درحالی‌که در جریان با دبی جرمی $\dot{m}=0/75$ kg/s استفاده از نانوذرات آجری و تیغه‌ای باعث کاهش تولید آنتروپی در کسرحجمی‌های ۱ و ۴٪ می‌شوند.



شکل (۱۲): تغییرات تولید آنتروپی کل نسبت به کسرحجمی نانوذرات برای شکل‌های مختلف نانوذره در (a) $\dot{m}=0/75$ kg/s و (b) $\dot{m}=0/50$ kg/s

۸. نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی اثر شکل نانوذرات دی‌سولفید مولیبدن در سیال پایه آب بر عملکرد کلکتور خورشیدی صفحه‌تخت واقع در

مراجع

[1] Timofeeva, E.V., Routbort, J.L., and Singh, D., "Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids", Journal of Applied Physics, Vol. 106, pp.298-304, 2009.

[2] خراسانی‌زاده، حسینی، مسچی، سید مرتضی، «تعیین زاویه شیب بهینه ماهیانه، فصلی، شش ماهه و سالانه کلکتورهای خورشیدی تخت در کاشان»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۳، شماره ۴، صفحه ۳۳-۴۹، ۱۳۹۲.

[3] شیخ‌زاده، قنبرعلی، نظیفی فرد، محمد، مداحیان، رضا، کاظمی، خدیجه، «بررسی تغییرات هیدرودینامیکی حرارتی یک نانوسیال در یک لوله مجهز به نوار پیچشی»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۸، شماره ۴، صفحه ۸۶-۹۹، ۱۳۹۷.

[4] Abbasian-Arani, A.A., Sadripour, S., and Kermani, S., "Nanoparticle shape effects on thermal-hydraulic performance of boehmite alumina nanofluids in a sinusoidal-wavy mini-channel with phase shift and variable wavelength", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 128-129, pp. 550-563, 2017.

[5] Vanaki, Sh.M., Mohammed, H.A., Abdollahi, A., and Wahid, M.A., "Effect of nanoparticle shapes on the heat transfer enhancement in a wavy channel with different phase shifts", Journal of Molecular Liquids, Vol. 196, pp. 32-42, 2014.

[6] Mahian, O., Kianifar, A., Heris, S.Z., and Wongwises, S., "First and second laws analysis of a minichannel-based solar collector using boehmite alumina nanofluids: Effects of nanoparticle shape and tube materials", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 78, pp. 1166-1176, 2014.

[7] Ooi, E.H., and Popov, V., "Numerical study of influence of nanoparticle shape on the natural convection in Cu-water nanofluid", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 65, pp. 178-188, 2013.

[8] Elias, M.M., Miqdad, M., Mahbulbul, I.M., Saidur, R., Kamalisarvestani, M., Sohel, M.R., Hepbasli, A., Rahim, N.A., and Amalina, M.A., "Effect of nanoparticle shape on the heat transfer and thermodynamic performance of a shell

- and tube heat exchanger", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp. 93–99, 2013.
- [9] Elias, M.M., Shahrul, I.M., Mahbul, I.M., Saidur, R., and Rahim, N.A., "Effect of different nanoparticle shapes on shell and tube heat exchanger using different baffle angles and operated with nanofluid", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 70, pp. 289–297, 2013.
- [10] Sadripour, S., "First and second laws analysis and optimization of a solar absorber; using insulator mixers and MWCNTs nanoparticles", Global Journal of Researches in Engineering A: Mechanical and Mechanics, Vol. 17, pp. 37–48, 2017.
- [11] Sadripour, S., Adibi, M., and Sheikhzadeh, G.A., "Two different viewpoints about using aerosol-carbon nanofluid in corrugated solar collectors: Thermal-hydraulic performance and heating performance", Global Journal of Researches in Engineering A: Mechanical and Mechanics, Vol. 17, pp. 19–36, 2017.
- [12] Khorasanizadeh, H., Sadripour, S., and Aghaei, A., "Numerical investigation of thermo-hydraulic characteristics of corrugated air-heater solar collectors", Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, pp. 42–46, 2016.
- [13] Thakur, M., Gangacharyulu, D., and Singh, G., "An experimental study on thermophysical properties of multiwalled carbon nanotubes", International Journal of Engineering Transaction B: Applications, Vol. 30, pp. 1223–1230, 2017.
- [14] DolatiAsl, K. and Bakhshan, Y., "Estimating solar radiation and developing Iran's atlas map of optimum monthly tilt angle", International Journal of Engineering Transaction B: Applications, Vol. 30, pp. 1197–1204, 2017.
- [15] Jamaati, M., and Mehri, A., "Role of interatomic potentials in simulation of thermal transport in carbon nanotubes", International Journal of Engineering Transaction B: Applications, Vol. 30, pp. 1231–1237, 2017.
- [16] Karimipour-Fard, P., and Beheshti, H., "Performance enhancement and environmental impact analysis of a solar chimney power plant: Twenty-four-hour simulation in climate condition of Isfahan province, Iran", International Journal of Engineering Transaction B: Applications, Vol. 30, pp. 1260–1269, 2017.
- [17] Khan, I., "Shape effects of MoS_2 nanoparticles on MHD slip flow of molybdenum disulphide nanofluid in a porous medium", Journal of Molecular Liquids, Vol. 233, pp. 442–451, 2017.
- [18] Zhang, Y., Gu, S., Yan, B., and Ren, J., "Solvent-free ionic molybdenum disulphide (MoS_2) nanofluids", Journal of Materials Chemistry, Vol. 22, 14843–14846, 2012.
- [19] Das, S., Chen, H.Y., Penumatcha, A.V., and Appenzeller, J., "High performance multilayer MoS_2 transistors with scandium contacts", Nano Letters, Vol. 13, pp. 100–105, 2012.
- [20] Dankert, A., Langouche, L., Kamalakar, M.V., and Dash, S.P., "High-performance molybdenum disulfide field-effect transistors with spin tunnel contacts", ACS Nano, Vol. 8, pp. 476–482, 2014.
- [21] Radisavljevic, B., Radenovic, A., Brivio, J., Giacometti, V., and Kis, A., "Single-layer MoS_2 transistors", Nature Nanotechnology, Vol. 6, pp. 147–150, 2011.
- [22] Radisavljevic, B., Whitwick, M.B., and Kis, A., "Integrated circuits and logic operations based on single-layer MoS_2 ", ACS Nano, Vol. 5, pp. 9934–9938, 2011.
- [23] Gu, S., Zhang, Y., and Yan, B., "Solvent-free ionic molybdenum disulfide (MoS_2) nanofluids with self-healing lubricating behaviors", Materials Letters, Vol. 97, pp. 169–172, 2013.
- [24] Kato, H., Takama, M., Iwai, Y., Washida, K., and Sasaki, Y., "Wear and mechanical properties of sintered copper-tin composites containing graphite or molybdenum disulfide", Wear, Vol. 255, pp. 573–578, 2013.
- [25] Mao, C., Huang, Y., Zhou, X., Gan, H., Zhang J., and Zhou, Z., "The tribological properties of nanofluid used in minimum quantity lubrication grinding", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 71, pp. 1221–1228, 2014.
- [26] Liu, J., Choi, G.M., and Cahill, D.G., "Measurement of the anisotropic thermal conductivity of molybdenum disulfide by the time-resolved magneto-optic Kerr effect", Journal of Applied Physics, Vol. 116, No. 23, pp. 107–122, 2014.
- [27] Ding, Y., and Xiao, B., "Thermal expansion tensors, Grüneisen parameters and phonon velocities of bulk MT_2 ($M = W$ and Mo ; $T = S$ and Se) from first principles calculations", RSC Advances, Vol. 5, pp. 18391–18400, 2015.
- [28] RongYan, S., Golzar, A., Sharifpur, M., PMeyer, J., HuaLiu, D., and Afrand, M., "Effect of U-shaped absorber tube on thermal-hydraulic performance and efficiency of two-fluid parabolic solar collector containing two-phase hybrid non-Newtonian nanofluids", International Journal of Mechanical Sciences, Vol 185, pp. 130–139, 2020.
- [29] C.Okonkwo, E., Osho, I., Kavaz, D., Abid, M., Ansari, T., "Thermodynamic evaluation and optimization of a flat plate collector operating with alumina and iron mono and hybrid nanofluids", Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol 37, pp. 1146–1159, 2020.
- [30] Tong, Y., Chi, X., Kang, W., Cho, W., "Comparative investigation of efficiency sensitivity in a flat plate solar collector according to nanofluids", Applied Thermal Engineering, Vol 174, pp. 123–132, 2020.
- [31] Kaya, H., Alkasem, M., Arslan, K., "Effect of nanoparticle shape of Al_2O_3 /Pure water nanofluid on evacuated U-Tube solar collector efficiency", Renewable Energy, Vol. 162, pp. 267–284, 2020.
- [32] Saffarian, M., Moravej b, M., Doranehgard, M., "Heat transfer enhancement in a flat plate solar collector with different flow path shapes using nanofluid", Renewable Energy, Vol 163, pp. 480–494, 2020.
- [33] Sadripour, S., "3D numerical analysis of atmospheric-aerosol/carbon-black nanofluid flow within a solar air heater located in shiraz, iran", International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, The article is published in Early Cite section of journal. Vol. 29, pp. 1378–1402, 2018.
- [34] Sadripour, S., and Chamkha, A.J., "The effect of nanoparticle morphology on heat transfer and entropy generation of supported nanofluids in a heat sink solar collector", Thermal Science and Engineering Progress, Vol. 9, pp. 266–280, 2019.
- [35] S. Sadripour, M. Estajloo and S.A. Ghorashi, "Investigation of flow characteristics and heat transfer enhancement of a corrugated duct using nanofluid", Diffusion Foundations: Computational Aspects of Heat Transfer and Entropy Generation of Nanofluids, Vol. 59, pp. 37–52, 2018.
- [36] SolarGis S.R.O, Slovakia, <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download>, Date: 10/13/2016.
- [37] Sabziparvar, A.A., "General formula for estimation of monthly mean global solar radiation in different climates on the south and north coasts of Iran", International Journal of Photoenergy, Vol. 145, pp. 94–116, 2007.
- [38] Yousefia, T., Veysia, F., Shojaeizadeha, E., and Zinadinib, S., "An experimental investigation on the effect of $Al_2O_3-H_2O$ nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors", Renewable Energy, Vol. 39, pp. 293–298, 2012.
- [39] I.R. Iran Meterogicat Organizaton, Hormozgan Province, <http://www.hormozganmet.ir>, Date: 10/13/2016.