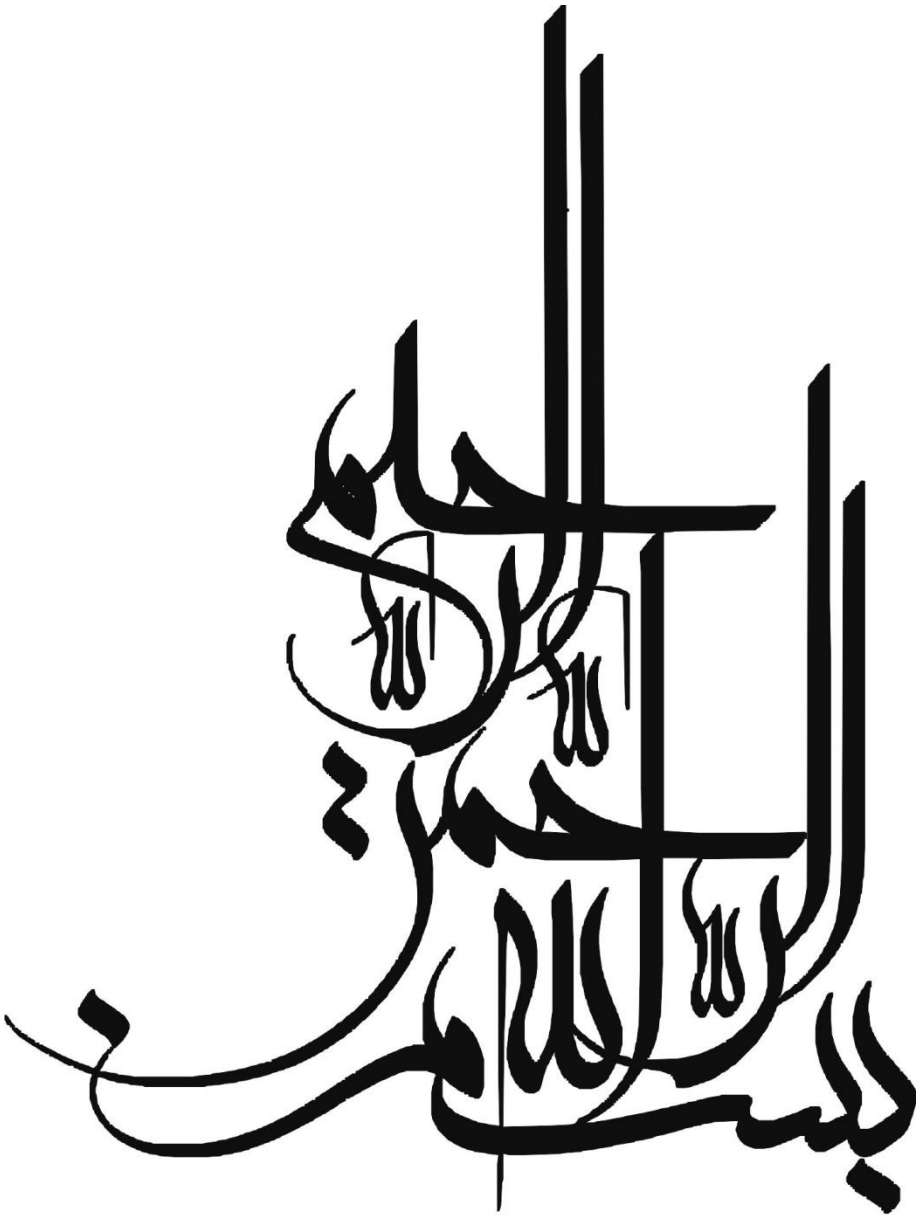

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی تجربی عملکرد کلکتور خورشیدی به روش جذب مستقیم

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی

محسن خشنودی

استاد راهنما
دکتر علی اکبر عالم رجبی

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی آقای محسن خشنودی

تحت عنوان

بررسی تجربی عملکرد کلکتور خورشیدی به روش جذب مستقیم

در تاریخ ۹۲/۱۰/۲۵ توسط کمیته ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرارگرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر علی اکبر عالم رجبی
۲- استاد مشاور پایان نامه	دکتر سید غلامرضا اعتماد
۳- استاد داور	دکتر احمد صابونچی
۴- استاد داور	دکتر احمد صداقت
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمدرضا سلیم پور

شکر و سپاس خداوند بلند مرتبه که بزرگترین امید و یاور در لحظه لحظه زندگیمان است.
با سپاس از زحمات جناب **آقای دکتر علی اکبر عالم رجبی** که در طول انجام این پروژه متحمل شدند و همچنین خانواده و همسرم که در این مدت موجبات آرامش روحی و فکری مرا فراهم کردند تا بتوانم به نحو احسن این پروژه را به اتمام برسانم.

کلیه ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم اثر

به همسر فداکارم که انگیزه و امید مرا برای رسیدن به اهدافم دو چندان کرد.

فهرست

چکیده ..... نه

فصل اول: کلیات

۱-۱مقدمه ۱۰

۱.۱.تعریف مسئله ۱۲

۱-۳- مزایای استفاده از نانوسیالات ۱۴

فصل دوم: مروری بر کارهای انجام شده

۲-۱- مروری بر مطالعات تجربی وتئوری انجام شده انتقال حرارت نانوسیالات ۱۶

۲-۲- مروری بر مطالعات تجربی و تئوری انجام شده بر روی کلکتورهای حاوی نانوسیالات ۱۹

۲-۳- بررسی چند کار ۲۱

۲-۳-۱- بررسی تحقیق تایاگی و همکارانش ۲۱

۲-۳-۲- بررسی تحقیق تیلور و همکارانش ۲۲

فصل سوم: مبانی نظری حاکم بر مسئله

۳-۱- ارزیابی میزان تابش خورشید ۲۴

۳-۲ - خصوصیات و مزایای استفاده از نانوسیال ۲۸

۳-۲-۱- مفهوم نانوسیالات ۲۸

۳-۲-۲- مزایای بالقوه نانوسیال ۲۹

۳-۲-۳- تهیه نانوسیال ۳۱

۳-۲-۴- پایداری نانوذرات در نانوسیالات ۳۴

۳-۲-۵- انواع روش های پایدار کردن نانوذرات در درون نانوسیال ۳۷

۳-۳- خصوصیات نانوسیالات بهکار گرفته شده در کلکتورهای خورشیدی ۴۴

۳-۳-۱- خواص فیزیکی نانوسیال ۴۴

۳-۳-۲- ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ۴۷

۳-۳-۳- ویسکوزیته نانوسیال ۵۱

۳-۴- مفهوم کلکتورهای جذب مستقیم و کلکتورهای جذب سطحی ۵۲

۳-۵- آثار زیست محیطی استفاده از کلکتورهای جذب مستقیم خورشیدی.....۵۵
۳-۶- ارزیابی اقتصادی استفاده از کلکتورهای جذب مسقیم خورشیدی ۵۵
فصل چهارم: معرفی پایلوت ساخته شده
۴-۱- مشخصات پایلوت خورشیدی ۵۶
۴-۲- مشخصات نانوپودر استفاده شده ۶۲
۴-۳- روند تهیه نانوسیال ۶۴
فصل پنجم: تحلیل داده ها و نتیجه گیری
۵-۱- نتایج آزمایش ۶۵
۵-۲- اندازه گیری و محاسبه ضریب هدایت حرارتی ۶۸
۵-۳- محاسبه ویسکوزیته نانوسیال ۶۹
۵-۴- محاسبه بازدهی کلکتور ۷۱
۵-۵- محاسبه توان پمپاژ سیال ۷۵
۵-۶ تحلیل خطا ۷۷
۵-۶-۱- روش‌های اندازه‌گیری خطا.....۷۸
۵-۶-۲- خطاهای موجود در آزمایش ۷۸
۵-۷- نتیجه گیری و پیشنهادات.....۷۹
پیوست ۱.....۸۱
مراجع ۸۴

چکیده

بعد از انقلاب صنعتی مصرف انرژی به شدت افزایش یافت، از این رو کمبود انرژی دانشمندان را به سمت یافتن منابع جدید انرژی سوق داد. در طی دهه های گذشته (۱۹۷۰ به بعد) قیمت سوخت های فسیلی به طور حیرت انگیزی افزایش داشته است. همچنین تاثیرات نامطلوب استفاده از سوخت های فسیلی بر روی محیط زیست، سبب شده است که انرژی های تجدیدپذیر بخصوص انرژی خورشید بیش از قبل مورد توجه واقع شود. از آنجاییکه این انرژی به وفور یافت می شود و هزینه های استفاده از آن نسبتا کم می باشد، این منبع انرژی به طور گسترده در دنیا مورد استفاده قرار گرفته است .استفاده از تابش متمرکز شده خورشید به عنوان یک منبع گرمایی عظیم می تواند جایگزین مناسبی برای سوخت های فسیلی در واحدهای نیروگاهی باشد. البته هم اکنون بازدهی سوخت های فسیلی در نیروگاه های سیکل‌های ترکیبی بیش از ۵۰ ٪ است. این در حالی است که توان سیکل هایی که تابش متمرکز شده خورشید در آنها به عنوان منبع گرمایی استفاده می شود کمتر از ۲۰ ٪ است. امروزه اکثر سازوکارهای متمرکز کننده تابش خورشید از گیرنده هایی با صفحات جذب کننده برای تبدیل تابش خورشید به انرژی گرمایی بهره می برند. اگرچه کلکتورهایی که از نوع جذب سطحی هستند دارای سطوح مناسبی برای جذب تابش خورشید هستند ولی نحوه و عملکرد انتقال حرارت در آنها با افت زیادی همراه است. ولی در گیرنده های جذب حجمی تابش متمرکز شده به طور مستقیم جذب سیال شده و این تابش به طور یکنواخت تری در سیال توزیع می شود که این مسئله می تواند سبب کاهش اختلاف دمای بین سطح کلکتور و سیال عامل شود. یکی از شیوه های پیشنهاد شده برای افزایش بازدهی کلکتورهای خورشیدی در عین حفظ سادگی سیستم، جذب مستقیم انرژی خورشید توسط توده یا حجم سیال است .در این پژوهش در ابتدا با ارایه مدل سهموی شکل از کلکتورهای متمرکز کننده جذب مستقیم، به بررسی بازدهی سیستم با سیال آب مقطر پرداخته و سپس راندمان کلکتور حاوی نانوسیال اکسید آلومینیوم با جزء های حجمی ۰/۱ و ۰/۲ و ۰/۳ درصد بررسی و مقایسه می شود. با افزایش جزء حجمی نانوسیال بازده در دبی های بین ۱۰ تا ۵۰(L/hm^2) روند قابل قبولی دارد ولی در دبی های بیشتر بازدهی به شدت کاهش می یابد. بازدهی کلکتور با نانوسیال اکسید آلومینیوم با جزء حجمی۰/۳ ٪ به حدود ۰/۶۵ می رسد. با افزایش جزء حجمی نانوسیال ویسکوزیته نانوسیال نیز افزایش می یابد، این افزایش در مورد نانوسیال اکسید آلومینیوم به صورت نمایی می باشد. همچنین استفاده از نانوسیال با غلظت های حجمی پایین تاثیر چندانی بر توان پمپاژ سیال داخل سیکل ندارد. هر چه میزان جزء حجمی نانوسیال افزایش یابد میزان پایداری آن کاهش می یابد و ذرات با سرعت بیشتری کلوخه و ته نشین می شوند و باید به یک نقطه بهینه رسید. در تحقیقات انجام شده آمده است که با افزایش جزء حجمی بیش از ۰/۶ ٪ خواص حرارتی نانوسیال دیگر افزایش نیافته و ناپایداری نیز شدت پیدا می کند. در نهایت نیز راهکارهایی برای کاهش تلفات حرارتی و افزایش بازدهی سیستم ارائه می شود.

کلمات کلیدی: انرژی خورشید، کلکتور سهموی، جذب مستقیم، نانوسیال اکسید آلومینیوم، بازدهی

فصل اول
کلیات

۱-۱ مقدمه

تولید انرژی پایا و تجدید پذیر از مهمترین دغدغه های جوامع امروزی است. بعد از انقلاب صنعتی مصرف انرژی به شدت افزایش یافت، از این رو کمبود انرژی دانشمندان را به سمت یافتن منابع جدید انرژی سوق داد [۱-۲]. در طی دهه های گذشته و بویژه بعد از بحران سیاسی دهه ۱۹۷۰، قیمت سوخت های فسیلی به طور حیرت انگیزی افزایش داشته است. همچنین تاثیرات نامطلوب این گونه سوخت های فسیلی بر روی محیط زیست، سبب شده است که انرژی های تجدیدپذیر بخصوص انرژی خورشید بیش از پیش مورد توجه واقع شود.

بر خلاف سوختهای فسیلی مرسوم، انرژی خورشید در هر نقطه از کره زمین در دسترس است. می‌دانیم انرژی خورشیدکه در یک ساعت به سطح زمین برخورد می کند از کل مصرف انرژی بشر در یک سال بیشتر است[۳]. از آنجاییکه این انرژی به وفور یافت می شود و هزینه های استفاده از آن نسبتا کم می باشد، این منبع انرژی به طور گسترده در دنیا مورد استفاده قرار گرفته است[۴-۵]. این انرژی در زمینه های مختلفی از جمله تولید الکتریسیته، تهویه هوا و... مورد استفاده قرار می گیرد[۶]. کلکتورهای خورشیدی به عنوان دستگاهی برای تبدیل انرژی خورشید به انرژی گرمایی به کار می رود.

استفاده از تابش متمرکز شده خورشید به عنوان یک منبع گرمایی عظیم برای تولید الکتریسیته ی می تواند جایگزین مناسبی برای سوخت های فسیلی در واحدهای نیروگاهی باشد. البته هم اکنون بازدهی سوختهای فسیلی در نیروگاه های سیکل های ترکیبی بیش از ۵۰٪ است. این در حالی است که توان سیکل هایی که تابش متمرکز شده خورشید در آنها به عنوان منبع گرمایی استفاده می شود یا همان CSP[۱] کمتر از ۲۰٪ است. این امر سبب کاهش مطلوبیت سیکل های

[۱] Concentrated Solar Power

خورشیدی می شود. از این رو توسعه تکنولوژی تبدیل تابش خورشید به انرژی گرمایی در درجه حرارت های بالا یک امر ضروری برای افزایش بازدهی سیکل های خورشیدی CSP می باشد.

رایج ترین نوع کلکتورهای خورشیدی از یک سطح سیاه به عنوان جذب کننده استفاده می کنند و حرارت را به سیال درون لوله های کلکتور منتقل می کنند. در این حالت بازدهی نه تنها به نحوه جذب موثر انرژی خورشید، بلکه به چگونگی انتقال حرارت به سیال عامل محدود می شود. یکی از شیوه های پیشنهاد شده برای افزایش بازدهی کلکتورها در عین حفظ سادگی آنها، جذب مستقیم انرژی خورشید توسط توده یا حجم سیال است که در اصطلاح به آن روش DASC[۱] می گوییم [۷].

امروزه اکثر ساز و کارهای متمرکز کننده تابش خورشید از گیرنده هایی با صفحات جذب کننده برای تبدیل تابش خورشید به انرژی گرمایی بهره می برند. اغلب این سطوح یا جسم سیاه هستند و یا سطوحی هستند که طیف تابش خورشید را به خوبی جذب کرده و نسبت به طیف پرتوهای مادون قرمز دارای خاصیت بازتابندگی کمی هستند (Bofaerto and Lampert,۱۹۸۳). اگرچه کلکتورهایی که از نوع جذب سطحی هستند دارای سطوح مناسبی برای جذب تابش خورشید هستند ولی نحوه و عملکرد انتقال حرارت در آنها با افت زیادی همراه است، به خصوص زمانی که اختلاف دمای بین کلکتور و سیال زیاد باشد. ولی در گیرنده های جذب حجمی تابش متمرکز شده به طور مستقیم جذب سیال شده و این تابش به طور یکنواخت تری در سیال توزیع می شود که این مسئله می تواند سبب کاهش اختلاف دمای بین سطح کلکتور و سیال عامل می شود.

در ابتدا شیوه DASC در دهه ۱۹۷۰ به عنوان یک راه ساده برای جذب انرژی خورشید طراحی شده بود[۷]. در این دهه مفاهیم بنیادی استفاده از نانو سیال برای جذب انرژی خورشیدی توسط Hant [۸] و Abdurrahman [۹] ارائه شد. مشخص شد سیالات معمولی که در کلکتورهای خورشیدی استفاده می شد، دارای خواص به شدت ضعیفی برای جذب طیف های خورشید هستند و لزوم استفاده از گونه خاصی از ذرات، برای افزایش خاصیت جذب سیال روشن شد. علم نانو نقش بسزایی در پیشرفت تکنولوژی داشته است. نانوسیالات ترکیباتی از یک سیال پایه و یک ماده در ابعاد نانومتر می باشند [۱۰-۱۱]. نانوسیالات دارای خواص ترموفیزیکی بهتری مثل ویسکوزیته، نفوذ حرارتی[۲]، هدایت حرارتی[۳] [۱۲-۱۳] ، نفوذ جرم [۱۴] و همچنین ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبت به سیالات رایج دیگر هستند [۱۵]. یکی از راه های جدید و ساده برای بهبود کارایی کلکتورهای خورشیدی استفاده از نانوسیالات به جای استفاده از سیالات معمول دیگر است [۱۶]. برای مثال در این روش با اضافه کردن کمتر از ۱٪ حجمی نانوذره خواص هدایت حرارتی بیش از ۲ برابر افزایش می یابد [۱۷]. در حال حاضر انواع مختلفی از نانوذرات از جمله:

---

[۱] Direct Absorption Solar Collector
[۲] thermal diffusivity
[۳] thermal conductivity

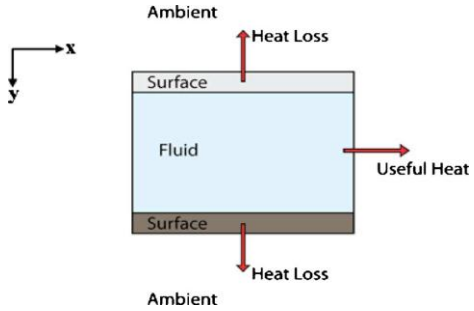
- اکسیدهای سرامیک (مثل CuO و Al_2O_3)
- کاربیدهای فلزی (Sic)
- نیتریدها (Sin و An)
- عناصر فلزی (Alو Cu)
- مواد غیر فلزی (گرافیت، Carbon annotate)
- Layered (Cu+C , Al+Al_2O_3)

سیالات متنوعی از جمله آب، اتیلن گلایکول، روغن و دیگر روان کننده ها، سیالات بیو، حالت ها پلیمری و ... به عنوان سیال پایه استفاده می شود. در سال های اخیر نیز تاثیر استفاده از نانو ذرات در جذب انرژی تشعشعی خورشید مورد توجه بسیاری از صنایع مختلف قرار گرفته است. از آنجایی که انرژی خورشید تجدید پذیر بوده و با طبیعت سازگاری خوبی دارد باعث لطمه به آن نمی شود، اغلب در صنایع مختلف از قبیل تولید الکتریسیته، انرژی گرمایی و فرایندهای شیمیایی مورد استفاده قرار می گیرد.

۱.۱. تعریف مسئله

مطالعات اخیر نشان می دهد اضافه شدن ذرات نانو به سیال عامل، می تواند تاثیر چشمگیری در جذب انرژی خورشید و انتقال حرارت داشته باشد، همچنین تنظیم اندازه و مقدار نانو ذرات می تواند موجب افزایش بازدهی جذب سیستم شود. جزء حجمی ذرات نانو در داخل سیال باید به دقت انتخاب شود تا به یک نانو سیال ایده آل دست پیدا کنیم. اگر غلظت نانو ذرات خیلی بالا باشد تمام نور خورشید در لایه نازک نزدیک سطح کلکتور جذب می شود و جذب انرژی در کل حجم سیال یکنواخت نیست. اگر غلظت خیلی پایین باشد، سهم زیادی از نور خورشید از میان سیال به بیرون عبور می کند. به صورت تئوری نشان داده شده است زمانی که از نانو سیال در صفحات کلکتور با جذب مستقیم استفاده شود، بازدهی در حدود ۱۰٪ افزایش می یابد. افرادی از قبیل T.R. Otanicar، R.A. Taylor ، P.E. Phelan [۱۸] به صورت تئوری نشان داده اند که در کلکتورهای خورشیدی دما پایین (کمتر از ۱۰۰°C) استفاده از نانو سیالات موجب بهبود بازدهی می شود. ولی در عمل تا به حال در مقیاس آزمایشگاهی، یا آزمایش صورت نگرفته و یا گزارش نشده است.

بر اساس نتایج تئوری بدست آمده انتظار داریم جذب حجمی از جذب سطحی معمول بازدهی بالاتری داشته باشد[۱۸-۱۹]. دلیل این فرضیه این است که در جذبی که توسط حجم سیال اتفاق می افتد، ماکزیمم دمای سیال در نقطه ای دورتر از سطحی که با محیط تبادل حرارت می کند اتفاق می افتد. شکل (۱-۱) تبادل حرارت یک سیستم جذب مستقیم با محیط را نشان می دهد.

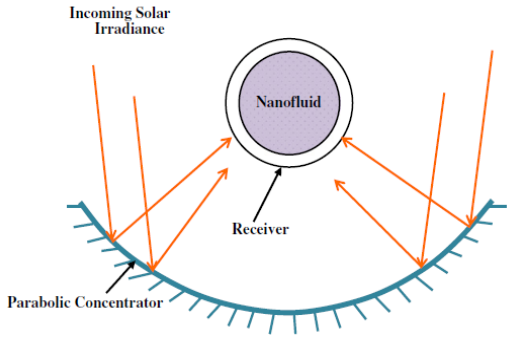


شکل ۱-۱ : شماتیک انتقال حرارت یک سیستم جذب مستقیم

از آنجایی که هدف ما به حداکثر رساندن گرمای دریافتی از خورشید است، دمای متوسط سیال در کلکتور نسبتاً زیاد خواهد شد. در کلکتورهای رایج معمولی این گرما توسط سطح رویی کلکتور که بیشترین دمای سیستم در آنجا است، جذب می شود. همانطور که در شکل قابل مشاهده است این سطح حرارت را به محیط دفع می کند که در صورت وجود عایق در زیر سطح پایینی این اتلاف حرارتی کاهش می یابد. چندین نوع کلکتور خورشیدی برای استفاده از انرژی خورشید وجود دارد. رایج ترین نوع آنها کلکتور Flat-Plate با صفحه جاذب سیاه است که انرژی خورشید را توسط یک سطح جامد جذب می کند[۲۰]. مقرون به صرفه ترین گرمکن های خورشیدی نوع Flat-Plate آن هستند که دو عیب دارند، یکی بازدهی نسبی کم و دیگری دمای خروجی پایین. نوع دیگری از کلکتورها کلکتورها ی متمرکز کننده هستند که از جمله آنها می توان به کلکتورهای سهموی اشاره کرد.

با این وجود این قبیل کلکتورها نقایصی از قبیل محدودیت در چگالی شار دریافتی، اتلاف حرارتی به نسبت بالا و آثار خوردگی محسوس دارند. از جمله فواید استفاده از سیال حاوی نانوذرات این است که حضور ذرات کوچک سبب توزیع و پخش تشعشع دریافتی شده که خود منجر به افزایش جذب تابش و در نتیجه بالا رفتن بازدهی کلکتور می شود. بنابراین برای یک طراحی مناسب کلکتور حاوی نانوذرات، شناخت اصول و مفاهیم پایه ای تابش به سیال حاوی نانوذرات اهمیت دوچندان پیدا می کند.

کلکتورهای سهموی خورشیدی نوع خاصی از مبدل های حرارتی هستند که انرژی تابشی نور خورشید را مستقیما به انرژی گرمایی تبدیل می کنند. این مبدل ها تشعشع رسیده به سطح کلکتور را به گرما تبدیل کرده و این حرارت را به سیال در حال گردش در داخل کلکتور منتقل می کنند. این گرما توسط سیال عامل یا مستقیما صرف گرم کردن آب مصرفی می شود و یا به تجهیزات ذخیره کننده گرما منتقل می شوند تا در مواقعی که تابش خورشید در دسترس نیست، مانند مواقعی که هوا ابری است و یا هنگام شب مورد استفاده قرارگیرد[۲۱].



شکل۱-۲ : شماتیکی از کلکتورهای خورشیدی متمرکز کننده سهموی حاوی نانوسیال (NCPSC)

در کل استفاده از نانوسیال به عنوان یک واسطه جذب در کلکتورهای خورشیدی موضوع جدیدی است. کوچک بودن ابعاد ذرات نانو و خصوصیات منحصر به فرد فیزیکی آنها، سبب پیچیدگی تحلیل انتقال حرارت تابشی آنها می شود.

۱-۳- مزایای استفاده از نانوسیالات [۱۹]

مزایای استفاده از نانوذرات را به طور خلاصه عبارتند از:

۱. اندازه بسیار کوچک نانو ذرات به آنها اجازه عبور راحت از پمپ ها و لوله ها بدون هیچ اثر نامساعدی را می دهد.

۲. افزایش نرخ انتقال حرارت به واسطه افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی و جابه جایی موجب بالا رفتن کارایی کلکتور خورشیدی به روش جذب مستقیم می شود.

فصل دوم
مروری بر کارهای انجام شده

در این بخش قصد داریم به مطالعات و تحقیقات قبلی انجام شده بر روی انتقال حرارت نانوسیالات بپردازیم. این مطالعات که هم به صورت تئوری و عددی و هم به صورت آزمایشها تجربی بوده است، به صورت طبقه بندی شده و خلاصه وار در جداول (۲-۱)، (۲-۲)، (۲-۳) تنظیم شده است و همچنین نتایج و نکات ارزشمندی که از هر کدام بدست آمده ذکر شده است.

۲-۱- مروری بر مطالعات تجربی وتئوری انجام شده انتقال حرارت نانوسیالات

جدول ۲-۱ : مروری گذرا بر مطالعات انجام شده تجربی روی انتقال حرارت جابه جایی انواع نانوسیالات

نویسنده	سیال پایه	نانوذره	اندازه ذرات	جزء حجمی (Vol%)	ابعاد	رژیم جریان، رینولدز	نتایج و پیشنهادات
Pak و Cho [۲۲]	آب	Al_2O_3 و TiO_2	nm۱۳ nm۲۷	۳-۱ ۳-۱	قطر داخلی: ۱/۰۶۶ cm طول:۴۸۰ cm لوله استیل	رینولدز= ۱۰۴- ۱۰۵ (جریان آشفته)	با افزایش جزء حجمی و عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش می یابد.
Eastman و همکارانش [۲۳]	آب	CuO	< ۱۰۰ nm	۰/۹	-	(جریان آشفته)	در مقایسه با آب خالص، ضریب انتقال حرارت بیش از ۱۵ درصد افزایش می یابد.
Xuan و Li [۲۴]	آب	Cu	< ۱۰۰ nm	۰/۳-۰/۵- ۰/۸-۱-۱/۲- ۱/۵-۲	قطر داخلی: ۱۰میلیمتر طول: ۸۰۰ میلیمتر لوله برنجی	رینولدز= ۱۰۰۰۰-۱۰۰۰۰- ۲۵۰۰۰ (جریان آشفته)	با افزایش سرعت جریان و جزء حجمی، ضریب انتقال حرارت جابه جایی افزایش می یابد.
Xuan و Li [۲۵]	آب	Cu	nm۲۶	۰/۵-۱-۱/۵-۲	هیدرولیک قطر: ۱/۲۹ میلیمتر	رینولدز=۲۰۰- ۲۰۰۰ (جریان آرام)	عدد ناسلت نانوسیال هایی با جزء حجمی ۲٪، ۳۹٪ بیشتر از آب خالص است.
Wen و Ding [۲۶]	آب	Al_2O_3	nm ۵۶ – ۲۶	۰/۶-۱-۱/۶	قطر داخلی: ۴/۵ میلیمتر طول: ۹۷۰ میلیمتر لوله مسی	رینولدز= ۵۰۰ – ۲۱۰۰ (جریان آرام)	در جزء حجمی ۱۶٪، ضریب انتقال حرارت ۴۱٪ بیشتر از سیال پایه است.
Zhou [۲۷]	استون	Cu	nm ۱۰۰-۸۰	g/l ۴-۰/۰	قطر داخلی: ۱۶میلیمتر طول: ۲۰۰ میلیمتر لوله مسی	-	ضریب انتقال حرارت جابه جایی با اضافه کردن نانوذره مس افزایش می یابد.
Faulkner و همکارانش [۲۸]	آب	CNT	< ۱۰۰ nm	۱/۱-۲/۲-۴/۴	هیدرولیک قطر: ۳۵۵ میکرومتر	رینولدز= ۲- ۱۷	در غلظت های بالاتر، ضریب انتقال حرارت بالاتر می باشد.
Xuan و Li [۲۹]	آب	Cu	nm۲۶	۰/۵-۱-۱/۵-۲	قطر داخلی: ۱۰میلیمتر طول: ۸۰۰ میلی متر لوله برنجی	رینولدز= ۱۰۰۰ – ۴۰۰۰ (جریان آرام و آشفته)	وقتی جزء حجمی از۰/۵به ۲٪ افزایش می یابد، ناسلت از ۱/۰۶ به ۱/۳۹ افزایش می یابد.

ادامه جدول (۲-۱)

نویسنده	سیال پایه	نانوذره	اندازه ذرات	جزء حجمی (Vol%)	ابعاد	رژیم جریان، رینولدز	نتایج و پیشنهادات
Yang و همکارانش [۳۰]	روغن	گرافیت	۴۰- nm۲۰	۱-۰/۷	قطر داخلی: ۴/۵۷ میلیمتر لوله با سطح صاف	رینولدز= ۵ < ۱۱۰ (جریان آرام)	ضریب انتقال حرارت با جزء حجمی ۲/۵٪، در دمای $50^{\circ}C$ حدود ۲۲٪ و در دمای $70^{\circ}C$ حدود ۱۵٪ افزایش می یابد.
Lai و همکارانش [۳۱]	آب	Al_2O_3	nm۲۰	۱-۰	قطر داخلی: ۱ میلیمتر لوله استیل	رینولدز< ۲۷۰	عدد ناسلت نانوسیال Al_2O_3 با جزء حجمی ۱٪ و رینولدز ۲۷۰، ۸٪ افزایش می یابد.
Ding و همکارانش [۳۲]	آب	MWCNT	۱۰۰ nm	۱-۰/۱	قطر داخلی:۴/۵ میلیمتر طول: ۹۷۰ میلیمتر لوله مسی	رینولدز= ۸۰۰ – ۱۲۰۰ (جریان آرام)	افزایش ۳۵۰٪ عدد ناسلت در جزء حجمی ۰/۵٪ با رینولدز ۸۰۰ مشاهده شده است.
Heris و همکارانش [۳۳]	آب	Al_2O_3 Cu	nm۲۰ -۶۰ nm۵۰	۳-۰/۲ ۳-۰/۲	قطر داخلی: ۶ میلیمتر لوله مسی	رینولدز= ۶۵۰ – ۲۰۵۰ (جریان آرام)	وقتی جزء حجمی Al_2O_3 افزایش می یابد، ضریب انتقال حرارت و ناسلت بالا می باشد.
Esfahany و همکارانش [۳۴]	آب	Al_2O_3	nm۲۰	۲-۱/۵-۱-۰/۵-۰/۲ ۲/۵-۲	قطر داخلی: ۶ میلیمتر طول: ۱ متر لوله مسی	رینولدز= ۷۰۰ – ۲۰۵۰ (جریان آرام)	با افزایش جزء حجمی و افزایش ۲۲٪ عدد پکلت، ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد.
Yulong و همکارانش [۳۵]	اتیلن گلایکول	TiO_2 CNT	-	-	-	-	در اثر افزایش جزء حجمی و عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت جابه جایی افزایش می یابد.
Zeinali و همکارانش [۳۶]	آب	Al_2O_3		۲-۱/۵-۱-۰/۵-۰/۲ ۲/۵-۲	۱ متر لوله دایروی مسی قطر داخلی: ۶ میلیمتر	رینولدز= ۷۰۰ – ۲۰۵۰ (جریان آرام)	در اثر افزایش عدد پکلت، ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد.
Williams و همکارانش [۳۵]	آب	ZrO_2	nm۴۶ nm۶۰	۳/۶-۰/۹ ۰/۹-۰/۲	قطر خارجی: ۱.۲۷ سانتیمتر ضخامت: ۱/۶۵ میلیمتر	۶۳۰۰۰<رینولدز<۹۰۰۰۰ (جریان آشفته)	افزایش قابل توجه انتقال حرارت مشاهده می شود.
Jung و همکارانش [۳۷]	آب	Al_2O_3	۱۰ nm	۱/۸-۰/۵	میکروکانال مستطیلی (۵۰ میکرومتر- ۵۰ میکرومتر)	۵<رینولدز<۳۰۰	در جزء حجمی ۱/۸٪، ضریب انتقال حرارت جابه جایی ۳۲٪ افزایش یافت . عدد ناسلت همراه با عدد رینولدز افزایش می یابد.

جدول۲-۲ : مروری گذرا بر مطالعات تئوری و عددی انجام شده روی انتقال حرارت جابه جایی انواع نانوسیالات

نویسنده	موضوع تحقیق تئوری	مدل مورد استفاده	نتایج
Xuan و Li [۳۸]	بررسی انتقال حرارت در نانوسیالات روغن- مس و آب – مس	سیال تک فازی	افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت با کاهش اندازه ذرات (نه تنها به علت افزایش هدایت حرارتی)
Xuan و Rotzel [۳۹]	انتقال حرارت نانوسیال	۱. سیال تک فازی ۲. مدل انتشار (پراکندگی)	ذرات معلق هدایت حرارتی را افزایش می دهند حرکات نامنظم ذرات بسیار ریز و انتشار حرارت، فرایند تبادل انرژی را تسریع می کند
Maiga و همکارانش [۴۰]	جریان جابجایی اجباری نانوسیال (آب/AL_2O_3 و اتیلن گلایکول/ AL_2O_3) در لوله	سیال تک فازی	افزایش ۶۰ درصدی در HTC مشاهده شده است و با افزایش عدد رینولدز جریان آشفته تر می شود.
Roy و همکارانش [۴۱]	بررسی جریان حرارتی و هیدرودینامیک سیستم سرمایش در نانوسیال آب و اکسید آلومینیوم در جریان آرام	-	همراه باافزایش غلظت ذرات و تنش برشی دیواره، ضریب انتقال حرارت ۲ برابر افزایش می یابد.
Ding و Wen [۴۲]	بررسی تاثیر حرکت نانوذرات در جریان آرام	قانون پایستگی جرم و تعادل مومنتم	تنش برشی تغییرات ویسکوزیته و همچنین اثر خود پخشی باعث حرکت ذرات می شود. پروفیل هدایت حرارتی کاملا غیریکنواختی بدست می آید.
Buongiorno [۴۳]	انتقال حرارت جابه جایی نانوسیال	مدل تعادل غیرهمگن دو جزئی	حرکت براونی و ترموفورسیس دو مکانیزم اصلی نانوذرات- سیال پایه هستند.
Maiga و همکارانش [۴۴]	جریان جابجایی اجباری نانوسیال (آب/AL_2O_3 و اتیلن گلایکول/ AL_2O_3) در لوله و در بین یک جفت دیسک روکش دار موازی	سیال تک فازی	در اثر افزایش تنش برشی دیواره در اثر بارهای جزئی ، انتقال حرارت و ویسکوزیته دینامیکی افزایش می یابد.
Palm و همکارانش [۴۵]	قابلیت انتقال حرارت و خواص وابسته به دما نانوسیال در سیستم های خنک کننده جریان شعاعی	سیال تک فازی	خواص وابسته به دما با کاهش تنش برشی دیواره میزان انتقال حرارت را بیشتر می کند.
Behzadmehr و همکارانش [۴۶]	جریان جابجایی اجباری با رژیم آشفته در لوله ای که به طور یکنواخت گرم می شود	مدل مخلوط دو فازی	با افزایش جزء حجمی و Re، HTC نیز افزایش می یابد. در رینولدزهای بالاتر پروفیل سرعت یکنواخت تر می شود.
Mansour و همکارانش [۴۷]	بازدهی حرارتی و هیدرودینامیکی هم برای جریان آرام و هم آشفته در جریان جابجایی اجباری در لوله با شار حرارتی یکنواخت در دیواره ها	سیال تک فازی	هر دو مدل پیش بینی می کند HTC با افزایش غلظت نانوذرات افزایش می یابد.
Prakash و Giannelis [۴۸]	هدایت حرارتی نانوسیال AL_2O_3 با استفاده از دما و غلظت وابسته به ویسکوزیته	-	هدایت حرارتی به اندازه ذرات، دما، ویسکوزیته و غلظت ذرات وابسته است.

۲-۲- مروری بر مطالعات تجربی و تئوری انجام شده بر روی کلکتورهای حاوی نانوسیالات

جدول۲-۳ : خلاصه ای بر مطالعات تجربی و تئوری انجام شده روی انواع کلکتورهای خورشیدی حاوی نانوسیال

نویسنده	نوع تحقیق	نانوسیال	اندازه ذارت و جز حجمی	نوع کلکتور	نتایج و پیشنهادات
He و همکارانش [۴۹]	تجربی	CuO و آب مقطر(سورفکتانت)	D=۲۵،۵۰ nm, ۰/۰۱-۰/۰۲-۰/۰۴- ۰/۱-۰/۲wt%	جذب مستقیم	- با افزایش اندازه نانوذرات، جزء جرمی و فاصله کانونی کلکتور، انتقال حرارت کاهش می یابد. - نانوسیال $Cu-H_2O$ در مقایسه با آب مقطر قابلیت جذب بالاتری از انرژی خورشید را دارد و انتقال حرارت آن نیز کمتر می باشد.
Liu و همکارانش [۵۰]	تجربی	CuO و آب	D=۵۰ nm ۱/۲ wt%	لوله ای خلاء	- در اثر استفاده از نانوسیال، ماکزیمم و میانگین بازدهی کلکتور با منبع ترموسیفون باز به ترتیب ۶/۶٪ و ۱۲/۴٪ افزایش می یابد.
Risi و همکارانش [۵۱]	عددی	CuO+Ni/گاز نیتروژن	۰/۳-۰/۰۱ vol%	سهموی	- افزایش بازدهی دمای کلکتور ۶۲/۵٪ می باشد. - در جزء حجمی بیش از ۰/۳٪، اثر منفی افت فشار بر اثر مثبت خواص حرارتی غلبه می کند.
Nasrin و همکارانش [۵۲]	عددی	آلومینیوم/آب	۵ vol%	صفحه شیشه ای همراه با جاذب سینوسی	- تاثیر عدد Pr بالاتر روی افزایش انتقال حرارت در AL_2O_3 بیشتر از سیال پایه آب است. - با افزایش پرانتل از ۱.۷۳ تا ۶.۶۲، میزان انتقال حرارت همرفتی به ترتیب برای AL_2O_3/آب و آب ۲۶٪ و ۱۸٪ افزایش می یابد. - در شرایط یکسان، میزان افزایش تابش تنها ۸٪ می باشد.
Nasrin و همکارانش [۵۳]	عددی	آلومینیوم/آب	۵ vol%	صفحه شیشه ای همراه با جاذب سینوسی	- نرخ انتقال حرارت همرفتی در نانوسیال و سیال پایه به ترتیب ۱۹٪ و ۱۲٪ افزایش می یابد. - میانگین انتقال حرارت بدست آمده برای جابجایی بیشتر از تابش است.
Tiwari و همکارانش [۵۴]	تئوری	AL_2O_3/آب	۲-۰/۵ vol%	صفحه تخت	- AL_2O_3 با جزء حجمی ۱/۵٪، بازدهی حرارتی را به میزان ۳۱/۶۴٪ افزایش می یابد.
Yousefi و همکارانش [۵۵]	تجربی	AL_2O_3/آب (سورفکتانت: Triton X-۱۰۰)	D=۱۵ nm, ۰/۴-۰/۲ wt%	صفحه تخت	- استفاده از نانوذره با جزء حجمی ۰/۲٪، میزان بازدهی ۲۸/۳٪ افزایش می یابد. - در صورت استفاده از سورفکتانت، ماکزیمم بازدهی ۱۵/۶۳٪ می شود.
Yousefi و همکارانش [۵۶]	تجربی	MWCNT[۱]/ آب (سورفکتانت: Triton X-۱۰۰)	D=۳۰-۱۰ nm, ۰/۴-۰/۲ wt%	صفحه تخت	- بازدهی کلکتور با نانوسیال ۰/۴٪ حجمی به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد، در حالی که استفاده از نانوسیال ۰/۲٪ حجمی سبب کاهش قابل ملاحظه در مقایسه با آب می شود. - بازدهی کلکتوری حاوی نانوسیال با ۰/۲٪ حجمی و سورفکتانت از آب بیشتر است.
Yousefi و همکارانش [۵۷]	تجربی	MWCNT/ آب	D=۳۰-۱۰ nm, ۰/۲ wt%	صفحه تخت	- هر چه از PH نقطه ایزوالکتریک فاصله بگیریم بازدهی بیشتر می شود.

[۱] Multi Wall Carbon Nano Tube

ادامه جدول (۲-۳)

نویسنده	نوع تحقیق	نانوسیال	اندازه ذارت و جزء حجمی	نوع کلکتور	نتایج و پیشنهادات
Chougule و همکارانش [۵۸]	تجربی	CNT/ آب	D=۱۲-۱۰ nm L=۱۰-۰/۱μm, ۰/۱۵ vol%	صفحه تخت	- میانگین بازدهی آب و نانوسیال در شیب ۳۱.۵ درجه به ترتیب ۲۵٪ و ۴۵٪ است. - میانگین بازدهی آب و نانوسیال در شیب ۵۰ درجه به ترتیب ۳۶٪ و ۶۱٪ است.
Lenert و همکارانش [۵۹]	تجربی و تحلیلی	کربن با پوشش کبالت/ترمینول VP-۱	D=۲۸ nm, ۲/۵-۱۰vol%	متمرکز کننده	- مدل های عددی نشان می دهد که میزان بازدهی دریافتی با افزایش ارتفاع نانوسیال و شار حرارتی افزایش می یابد.
Saidur و همکارانش [۶۰]	تحلیلی	آلومینیوم/آب	D=۲۰-۱۰-۵-۱ nm, ۲ vol%	جذب مستقیم	- ضریب اطفاء به صورت خطی با جزء حجمی متناسب است. و اندازه ذرات اثر کمی بر روی خواص ظاهری نانوسیال دارند.
Kullar و Tyagi [۶۱]	تئوری	آلومینیوم/آب	D=۱۰ nm, ۰/۰۱ vol%	جذب مستقیم متمرکز کننده	- جذب تابش خورشید تا ۹۹٪ افزایش می یابد. - دمای خروجی بالاتری بدست می آید.
Khullar و همکارانش [۶۲]	تئوری	آلومینیوم/ ترمینول VP-۱	D=۵ nm	سهموی متمرکز کننده	- در شرایط جوی مشابه بازدهی کلکتورهای خورشیدی سهموی متمرکزکننده که از نانوسیال استفاده می کنند حدود ۵-۱۰٪ بیشتر است.
He و همکارانش [۶۳]	تجربی	TiO_2، CNT/ آب	D=۱۰-۵ nm,D=۵۰-۱۰ nm and L=۱۰۰۰-۱۰۰ nm	لوله خلاء	- استفاده از CNT/آب در کلکتورهای خورشیدی لوله ای خلاء مناسب تر از TiO_2 است.
Li و همکارانش [۶۴]	تجربی	ZnO،AL_2O_3، MgO/ آب	D<۲۰ nm	لوله ای	- بهترین نانوسیال برای کلکتورهای خورشیدی ZnO/آب با جز حجمی ۰/۲٪ است.
Lu و همکارانش [۶۵]	تجربی	CuO و آب	D=۵۰ nm -۱-۰/۸ ۱/۵-۱/۲ wt%	لوله ای خلاء	- نانوذرات CuO پتانسیل افزایش ضریب انتقال حرارت تبخیر را تا ۳۰٪ دارد. - به دلیل استفاده از نانوسیال CuO دمای دیواره منبع ترموسیفون باز کاهش می یابد.
Taylor و همکارانش [۶۶]	تجربی و تئوری	گرافیت، آلومینیوم،نقره، مس/ ترمینول -VP ۱	D=۲۰ nm, ۰/۱ vol%	جذب مستقیم متمرکز کننده	- نانوسیال سبب افزایش بازدهی بین ۵-۱۰٪ می شود.
Otanicar و همکارانش [۱۸]	تجربی و تئوری	گرافیت، نقره،کربن نانوتیوب/آب	D=۴۰-۳۰-۲۰nm ,D=۲۰ and L=۵-۱*10^{-3} nm, ۱-۰ vol%	جذب مستقیم غیر متمرکز کننده	- زمانی که اندازه ذرات در نانوسیال نقره/آب از ۴۰ نانومتر نصف می شود، بازدهی ۶٪ افزایش می یابد. - جز حجمی بهینه ۰.۵٪ می باشد.
Tyagi و همکارانش [۶۷]	تئوری	آلومینیوم/آب	D=۲۰-۰ nm, ۵-۰/۱ vol%	جذب مستقیم غیر متمرکز کننده در ابعاد میکرو	- بازدهی نانوسیال تا غلظت ۲٪ به صورت نمایی افزایش می یابد و در غلظت های بیش از ۲٪ تقریبا ثابت می ماند. - میزان بازدهی مطلق زمانی که از نانوسیال استفاده می شود حدودا ۱۰٪ بیشتر است.
Otanicar و Golden[۶۸]	تئوری	گرافیت/ آب + پروپیلن گلایکول	۰/۱ vol%	جذب مستقیم	- کلکتورهایی که حاوی نانوسیال هستند نسبت به کلکتورهای خورشیدی معمولی، حدودا ۳٪ کمتر Co_2 تولید می کنند.