

## بررسی تجربی تأثیر نانوسیال اکسید مس بر میزان انتقال حرارت در شبکه لوله‌های حرارتی

روح‌الله احمدی<sup>۱\*</sup>، مصطفی گودرزی<sup>۲</sup>، حسین شکوهمند<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

ahmadi@iust.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

mosgo1989@gmail.com

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

h.shokouhmand@ut.ac.ir

**چکیده:** در این پژوهش، نوع جدیدی از لوله‌های حرارتی با عنوان شبکه لوله‌های حرارتی معرفی شده است. شبکه لوله‌های حرارتی طراحی، ساخته و سپس مورد ارزیابی عملکردی واقع شده است. این شبکه شامل ۴ لوله حرارتی عمودی است که از پایین به کلکتور تبخیرکننده و در بالا به کلکتور چگالنده متصل است. به منظور بررسی تأثیر نانوسیال بر میزان راندمان حرارتی و مقاومت حرارتی شبکه لوله‌های حرارتی، با استفاده از روش دومرحله‌ای، نانوسیال اکسید مس تهیه شد. شبکه لوله‌های حرارتی با پرشوندگی ۵۰٪ با سیال کاری آب و نانوسیال اکسید مس تحت آزمایش به‌ازای گرماهای ورودی مختلف قرار گرفته است. مشاهده شد که مقاومت کلی شبکه لوله‌های حرارتی با استفاده از نانوسیال با غلظت‌های حجمی ۱٪، ۳٪ و ۵٪ به ترتیب به مقادیر ۰/۹۵، ۰/۸۴ و ۰/۷۵ نسبت به سیال کاری آب کاهش می‌یابد. به علاوه، برای غلظت ۵٪ حجمی راندمان شبکه لوله‌های حرارتی تا میزان ۸۰٪ افزایش یافت.

**واژه‌های کلیدی:** شبکه لوله‌های حرارتی، اکسید مس، نانوسیال، مقاومت حرارتی.

## ۱. مقدمه

مفهوم «لوله حرارتی» را گاگلر در سال ۱۹۴۲ بیان کرد [۱] و سرانجام در سال ۱۹۶۳ گروور آن را ساخت. وی برای اولین بار از عبارت لوله حرارتی استفاده و آن را این‌گونه تعریف کرد: «لوله حرارتی یک ساختار مهندسی است که ضریب انتقال حرارت هدایت آن از تمام فلزات شناخته‌شده بیشتر است» [۲ و ۳].

لوله حرارتی وسیله‌ای است که بر مبنای تغییر فاز سیال عامل درونش عمل کرده و بدین وسیله می‌تواند شارهای حرارتی بالایی را در کمترین اختلاف دمای بین دو منبع گرمایی و با سرعت زیاد از نقطه‌ای به نقطه دیگر منتقل کند. از لوله‌های حرارتی به دلیل دارا بودن ظرفیت و نرخ بالای انتقال حرارت با تلفات حرارتی بسیار اندک به‌عنوان ابررسانای حرارتی یاد می‌شود [۴].

یک لوله حرارتی متداول از سه بخش اصلی تبخیرکننده، آدیباتیک و چگالنده تشکیل می‌شود. هنگامی که توان حرارتی  $\dot{Q}$  به قسمت تبخیرکننده اعمال می‌شود، سیال عامل درون لوله حرارتی که در حالت تعادلی با بخار اطراف خود قرار دارد، تبخیر شده و بخار به‌علت وجود اختلاف فشار بین بخش تبخیرکننده و بخش چگالنده، به سمت چگالنده حرکت کرده و در چگالنده به‌علت دمای کمتر نسبت به تبخیرکننده، چگالیده شده و گرمای نهان تبخیر سیال عامل آزاد می‌شود [۴].

تنوع لوله‌های حرارتی به‌لحاظ شکل هندسی، عملکرد و یا روش‌های انتقال سیال چگالیده‌شده از قسمت چگالنده به تبخیرکننده، بسیار زیاد است. لوله حرارتی نوسانی، ترموسیفون و لوله حرارتی حلقه‌ای از جمله شناخته‌شده‌ترین لوله‌های حرارتی هستند. از طرفی، انواع لوله‌های حرارتی دیگری نیز وجود دارد که در طول چندین دهه آنچنان گسترده و رایج نشده‌اند؛ به عبارتی دیگر، به آن‌ها به‌عنوان یک «لوله حرارتی خاص» توجه نشده است. برای مثال می‌توان به لوله‌های حرارتی صفحه صاف<sup>۱</sup> و لوله حرارتی اتاق‌های بخار<sup>۲</sup> اشاره کرد [۴].

چون انتقال حرارت در لوله‌های حرارتی به‌واسطه سیال عامل محبوس درون آن می‌باشد، لازم است سیال عامل به‌خوبی درون لوله حرارتی به گردش درآید. سیال عامل پس از چگالش در بخش چگالنده، برای تبخیر مجدد باید به سمت تبخیرکننده هدایت شود. چندین روش برای بازگرداندن سیال عامل چگالیده از چگالنده به تبخیرکننده ارائه شده که رابرتس [۵] مروری بر این روش‌ها داشته و کارهای ری [۶]، جیادون و همکاران [۷] و میدانیک [۸] نیز بررسی شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از نیروی جاذبه و نیروی موئینگی اشاره کرد. در واقع

عاملی که لوله‌های حرارتی را از ترموسیفون‌ها متمایز می‌کند، وجود ساختارهای موئین‌شکل درون لوله‌های حرارتی است که به‌اصطلاح فتیله<sup>۳</sup> نامیده شده و باعث ایجاد فشار موئینگی برای انتقال سیال عامل از چگالنده به تبخیرکننده می‌شود؛ درحالی‌که در ترموسیفون، مکانیزم برگرداندن سیال عامل چگالیده از قسمت چگالنده به تبخیرکننده بدون استفاده از فتیله و با استفاده از نیروی جاذبه است [۴].

از کاربردهای لوله‌های حرارتی می‌توان به به‌کارگیری در سیستم‌های ذخیره انرژی، راکتورهای شیمیایی و فضاپیما اشاره کرد. یکی از رایج‌ترین استفاده‌های لوله‌های حرارتی مرتبط با ذخیره‌سازی، جذب انرژی خورشیدی و گرمایش آب است [۴ و ۹]. آبگرمکن‌های خورشیدی نوعی از گردآورنده‌های صفحه تخت هستند که در کاربری‌های دمایی به‌خصوص در بخش خانگی، نقش مهمی ایفا می‌کنند [۱۰]. دو نوع آبگرمکن خورشیدی با گردآورنده‌های صفحه تخت<sup>۴</sup> و لوله خلاء<sup>۵</sup> وجود دارد [۱۱]. آبگرمکن خورشیدی لوله خلاء متشکل از چندین لوله حرارتی بوده که هر یک از آن‌ها شامل یک لوله شیشه‌ای، صفحه جاذب و لوله حرارتی است. ثابت شده که یک گردآورنده لوله خلاء نسبت به گردآورنده صفحه تخت مرسوم، عملکرد بهتری دارد [۱۲ و ۱۳]. گردآورنده‌های خورشیدی لوله خلاء که از لوله حرارتی بهره می‌برند حتی هنگامی که شدت تابش خورشید و دمای محیط کم است، راندمان بیشتری را نشان می‌دهند [۱۳ و ۱۴].

لوله‌های حرارتی برای انتقال حرارت از سیال عاملی بهره می‌برند که خواص این سیال نقش مهمی در عملکرد لوله حرارتی ایفا می‌کند. از طرفی نانوسیال‌ها با اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه با هدف بهبود خواص سیال پایه ساخته می‌شوند.

امروزه با پیشرفت فناوری‌ها می‌توان ذرات فلزی یا غیرفلزی با ابعاد نانو و سیالات حاوی این نانوذرات را تولید کرد. نانو سیالات از طریق معلق کردن نانوذرات با ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر در سیالاتی مانند آب، روغن یا اتیلن گلیکول تهیه می‌شوند. اضافه شدن مقدار بسیار کمی از ذرات نانو در سیال عامل به‌صورت یکنواخت و پایدار، افزایش چشمگیری در خواص حرارتی سیال به وجود می‌آورد [۱۵]. در دو مطالعه عددی صورت‌گرفته توسط شیخ‌زاده و همکاران [۱۶ و ۱۷] اثر مثبت استفاده از نانوذرات مس و آلومینا در آب گزارش شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان داد که با استفاده از نانوسیال آب-مس با افزایش کسر حجمی نانوذرات عدد ناسلت و نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

3. Wick

4. Flat Plate Collector

5. Evacuated Tube Collector

1. Flat Plate Heat Pipe

2. Vapor Chambers Heat Pipe

پژوهش‌های اخیر نشان داده است که حضور نانوذرات در لوله‌های حرارتی و ترموسیفون‌ها خواص گرمایی‌شان را بهبود داده است. نانوذرات مختلف مانند نقره، اکسید مس، آلومینیوم، تیتانیوم، نیکل، اکسید، طلا و اکسید آهن در سیال کاری لوله‌های حرارتی و ترموسیفون‌ها به کار گرفته شده‌اند. با بهره‌گیری از این نانوسیال‌ها، بهبود عملکرد گرمایی از طریق کاهش مقاومت گرمایی، افزایش بازدهی و افزایش ضریب انتقال حرارت کلی مشاهده شده است [۲۶].

با توجه به رسانایی گرمایی بالای لوله‌های حرارتی، در این پژوهش نوع جدیدی از لوله‌های حرارتی با عنوان «شبكة لوله‌های حرارتی» ارائه شده است که از آن می‌توان در گردآورنده‌های خورشیدی بهره برد. در این دستگاه، ۴ لوله بین دو کلکتور قرار داده شده است. در کلکتور چگالنده، مبدل حرارتی قرار داده شده است که به‌طور مستقیم گرمای نهان را جذب و به بیرون هدایت می‌کند. یکی از نانوسیالاتی که تأثیر چشمگیری در افزایش انتقال حرارت دارد، نانوسیال اکسید مس است. به‌منظور بررسی تجربی تأثیر این نانوسیال بر میزان انتقال حرارت در شبکه لوله‌های حرارتی این نانوسیال نیز تهیه شده و به‌عنوان سیال کاری به داخل شبکه لوله‌های حرارتی شارژ شده و تأثیر این نانوسیال بر میزان انتقال حرارت نسبت به سیال پایه که آب یون‌زدایی شده است، در شبکه لوله‌های حرارتی بررسی شد.

## ۲. توصیف شبکه لوله‌های حرارتی و نانوسیال

شبكة لوله‌های حرارتی مورد بررسی در این تحقیق، نوع خاصی از لوله‌های حرارتی ترموسیفون است و برگشت مایع چگالنده به تبخیرکننده با استفاده از جاذبه بوده، بنابراین در آن از فنیله استفاده نمی‌شود. حرارت توسط المنت‌های الکتریکی به تبخیرکننده اعمال می‌شود و برداشت آن توسط یک مبدل حرارتی در قسمت چگالنده این شبکه لوله‌های حرارتی صورت می‌گیرد.

### ۱.۲. هندسه و طرح شبکه لوله‌های حرارتی

شبكة لوله‌های حرارتی متشکل از چهار لوله است که به‌طور موازی در کنار هم و در یک صفحه قرار گرفته‌اند. درون این لوله‌ها یک سیال کاری وجود دارد که این لوله‌ها وظیفه دارند پس از دریافت گرما و انتقال آن به سیال کاری، بخار ایجادشده را به‌سمت بخش چگالنده هدایت کنند. پس از رسیدن بخار سیال کاری به بخش چگالنده و تماس با مبدل حرارتی که در بالای لوله‌های حرارتی قرار دارند، گرمای خود را به مبدل منتقل کرده و پس از چگالیدن با ریزش روی سطوح شیبدار تعبیه شده در زیر مبدل حرارتی، از طریق جداره همان لوله‌ها به‌سمت پایین و به قسمت تبخیرکننده برای تکرار مجدد چرخه هدایت می‌شود.

چوبی و ایستمن اولین کسانی بودند که با معلق کردن نانوذرات فلزی در آب، رسانایی گرمایی سیال را افزایش دادند و از عبارت نانوسیال برای سوسپانسیون‌های حاوی نانوذرات استفاده کردند. همچنین آن‌ها ادعا کردند که این دسته از سیالات از نظر تهیه و خواص پایداری و انتقال حرارت در مقایسه با سوسپانسیون‌های معمول جامد-مایع و سیالات مایکرو تفاوت فراوانی دارند [۱۸].

وانگ و همکاران با پخش کردن  $\text{CuO}$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در آب، افزایش رسانایی گرمایی نانوسیالات حاوی این نانوذرات را مشاهده و درباره مکانیزم‌های افزایش آن بحث کردند [۱۹]. لیو و همکاران پژوهش‌هایی روی نانو تیوب کربن با سیالات پایه مختلف انجام دادند که مشاهده آن‌ها حاکی از افزایش قابل توجهی در رسانایی گرمایی‌شان بود. همچنین آن‌ها افزایش ۲۲/۴٪ رسانایی گرمایی اتیلن گلیکول شامل نانوذرات  $\text{CuO}$  را مشاهده کردند و نشان دادند که در نسبت‌های حجمی پایین، رسانایی گرمایی نانوسیال‌ها تقریباً با درصد حجمی سیال به‌صورت خطی تغییر می‌کند [۲۰ و ۲۱].

در پژوهش‌های تجربی انجام‌شده روی ضریب رسانایی گرمایی نانوسیالات تأثیر عوامل مختلفی مانند درصد حجمی نانوسیالات، جنس، شکل و اندازه نانوذرات، جنس سیال پایه، دما و PH محلول بر ضریب رسانایی گرمایی آن بررسی شده‌اند. میزان افزایش ضریب رسانایی گرمایی با استفاده از روش سیم داغ<sup>۱</sup> برای اندازه‌گیری رسانایی گرمایی نانو سیال حاوی نانوذرات مس، طلا، نانوتیوب کربن، نانو تیوب کربن با دیواره چندگانه<sup>۲</sup>، اکسید مس، دی اکسید سیلیسیم، و نقره با روش‌های مختلف سنتز انجام شده است و نتایج به‌دست‌آمده به‌خوبی با یکدیگر مقایسه شده‌اند [۲۲ و ۲۳].

داس و همکاران به بررسی اثر دما بر ضریب رسانایی گرمایی نانوسیال آب و اکسید مس و اکسید آلومینیوم پرداختند و متوجه شدند که تغییرات دما بر ضریب رسانایی گرمایی تأثیر زیادی دارد. نتیجه مطالعه آن‌ها این بود که با افزایش دما میزان ضریب انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند که بر اثر افزایش حرکات براونی می‌باشد [۲۴].

نتاراجن و ساتیش [۲۵] تأثیر اضافه کردن نانو تیوب کربن به سیال پایه و همچنین استفاده از ماده فعال‌کننده سطحی سدیم دودسیل سولفات به‌عنوان پایدارکننده، به‌منظور افزایش عملکرد حرارتی آبگرمکن خورشیدی را بررسی کردند. هدایت حرارتی با استفاده از روش سیم داغ اندازه‌گیری شد. به‌طور قطع، افزایش هدایت حرارتی وابسته به کسر حجمی ذرات معلق و رسانایی گرمایی ذره‌ها و سیال پایه بستگی دارد و بررسی‌ها نشان می‌دهد نانوسیال مؤثرتر از سیالات مرسوم است.

1. Hot Wire Technique  
2. Multi-Walled Carbon Nanotube

فتیله در ترموسیفون وجود ندارد. با این حال ممکن است افت دما محسوس باشد که در این صورت باید سیالی انتخاب شود که آن را کمینه کند. معیاری که به کمک آن سیال عامل با توجه به ویژگی‌های بالا انتخاب می‌شود، عدد مریت<sup>۱</sup> است. برای سیال کاری ترموسیفون، یک شکل از عدد مریت  $M'$  که بعد آن  $(kg.K^{-3/4}.s^{-5/2})$  است وجود دارد که به صورت زیر تعریف شده است [۴]:

$$M' = \left[ \frac{L_{fg} k_f^3 \sigma_f}{\mu_f} \right]^{1/4} \quad (1)$$

که در آن،  $L_{fg}$  گرمای نهان تبخیر سیال عامل،  $k_f$  رسانایی گرمایی سیال عامل،  $\sigma_f$  کشش سطحی سیال عامل و  $\mu_f$  لزجت دینامیکی سیال عامل است.

معمولاً برای دماهای پایین از فریون به عنوان سیال عامل و برای دماهای متوسط از آب و برای دماهای بالاتر از هیدروکربن‌های آروماتیک استفاده می‌شود [۴]. شایان ذکر است برای عملکرد بهینه باید عدد مریت ( $M'$ ) بیشینه شود.

بیشترین مقدار  $M'$  برای چند سیال کاری در دماهای مشابه در جدول (۱) آورده شده است. با توجه به استفاده از شبکه لوله‌های حرارتی در گردآورنده‌های خورشیدی به منظور تأمین آب گرم مصرفی (آب خروجی کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) و با توجه به جدول (۱) از بین دو سیال آب و متانول، آب که عدد مریت بالاتری دارد، به عنوان سیال کاری انتخاب می‌شود. عدد مریت ترموسیفون نسبتاً به دما حساس نیست. برای مثال عدد مریت آب در بازه دمایی ۰/۱-۳۰۰°C بالای ۴۰۰۰ می‌ماند [۴].

جدول (۱): بیشینه عدد مریت ترموسیفون برای سیالات انتخاب شده

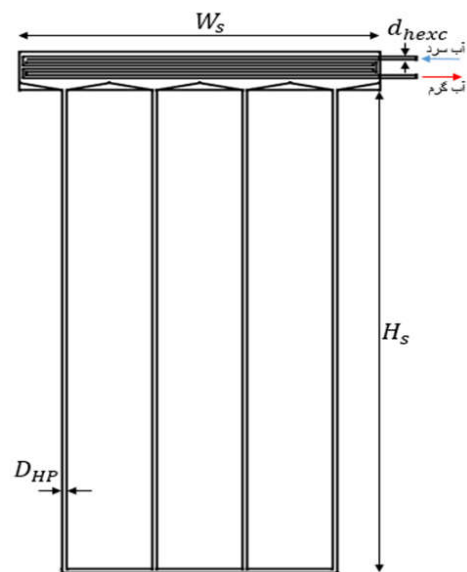
سیال	دما (°C)	$M'_{max} \left( \frac{kg}{K^{4/3} s^{5/2}} \right)$
آب	۱۸۰	۷۵۴۲
آمونیاک	-۴۰	۴۷۹۰
متانول	۱۴۵	۱۹۴۸
استون	۰	۱۴۶۰
تولون	۵۰	۱۰۵۵

### ۳.۲. محفظه آب‌بندی

یکی دیگر از اجزای مهم لوله‌های حرارتی محفظه آن است که سیال عامل را از محیط خارج جدا می‌کند. بنابراین باید به خوبی آب‌بندی شود و توانایی تحمل اختلاف فشار در راستای دیواره‌اش را داشته باشد. انتخاب جنس مناسب برای محفظه به عواملی همچون سازگاری با محیط داخلی لوله و شرایط محیطی، نسبت توان به وزن، هدایت

همچنین به منظور ایجاد توازن در پرشوندگی مجموعه لوله‌های حرارتی، شبکه لوله‌های حرارتی در قسمت پایین به وسیله یک لوله جمع‌کننده افقی به یکدیگر متصل شده‌اند. طرح واره شبکه لوله‌های حرارتی در شکل (۱) نمایش داده شده است.

همان گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، سیال کاری پس از تبخیر و هدایت به سمت مبدل حرارتی که در بالای شبکه لوله‌های حرارتی قرار داده شده، گرمای خود را از طریق یک مبدل (در اینجا یک مبدل چهار پاس) به آب سرد می‌دهد و از طرف دیگر آب گرم خارج می‌شود. با توجه به اینکه مکانیزم برگشت مایع به تبخیرکننده در شبکه لوله‌های حرارتی با استفاده از جاذبه و نیروی ثقلی بوده، نیازی به استفاده از فتیله ندارد.



شکل (۱): طرح واره شبکه لوله‌های حرارتی

برای طراحی و تحلیل این شبکه لوله‌های حرارتی فرض شده است که هر یک از لوله‌های حرارتی این شبکه مانند یک ترموسیفون مستقل عمل کرده و از برهم‌کنش بین قسمت‌های مختلف بین لوله‌های این شبکه لوله‌های حرارتی صرف‌نظر شده است.

### ۲.۲. انتخاب سیال کاری

سیال عامل که داخل لوله‌های گرمایی است، گرما را از قسمت گرم‌تر دریافت می‌کند و به طرف سردتر انتقال می‌دهد. سیال عامل باید دارای ویژگی‌هایی همچون سازگاری با لوله موئین و جنس دیواره، پایداری گرمایی مناسب، قابلیت مرطوب کردن دیواره و مسیر عبور جریان، عدم فشار بخار خیلی بالا یا اندک، گرمای نهان تبخیر بالا، رسانایی گرمایی بالا، گرانش کم در حالت بخار و مایع، کشش سطحی بالا، نقطه انجماد پایین، قیمت مناسب و در دسترس بودن باشد [۴ و ۲۷].

واضح است معادلی برای نبود محدودیت موئینگی ناشی از نبود

اگر توان حرارتی  $\dot{Q}$  به شبکه لوله‌های حرارتی برسد، پس از تبخیر سیال عامل و انتقال حرارت به مبدل حرارتی، با توجه به فرضیات فوق میزان توان حرارتی انتقال یافته به مبدل برابر است با [۲۶]:

$$\dot{Q} = UA_{hec} FDT_{lm,CF} \quad (2)$$

که  $U$  ضریب کلی انتقال گرما،  $A_{hec}$  سطح تبادل گرما و  $\Delta T_{lm,CF}$  اختلاف دمای لگاریتمی جریان متقاطع بوده و از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$\Delta T_{lm,CF} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad (3)$$

که  $\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$  و  $\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o}$  نیز ضریب تصحیح بوده و با توجه به اینکه در یک طرف مبدل سیال چگالیده می‌شود، این ضریب برابر ۱ می‌شود [۲۸].

مرحله اصلی در طراحی و تحلیل مبدل گرمایی تعیین و تخمین ضریب کلی انتقال گرماست. این ضریب برحسب مقاومت گرمایی کل بین دو سیال تعریف می‌شود [۲۸].

برای مبدل‌های گرمایی لوله‌ای و بدون پره و در حالت تمیز ضریب کلی انتقال گرما را به صورت رابطه (۴) می‌توان بیان کرد [۲۸]:

$$U_o A_{o,hec} = U_i A_{i,hec} = \frac{1}{R_{tot,hec}} = \quad (4)$$

که در آن  $D$  و  $h$  به ترتیب قطر لوله و ضریب جابه‌جایی سیال بوده و اندیس‌های  $o$  و  $i$  به ترتیب برای سطوح خارجی اندیس‌های  $o$  و  $i$  به ترتیب قطر لوله و ضریب جابه‌جایی سیال بوده و  $(A_o,hec = \pi D_o,hec L_{hec})$  و داخلی‌اند  $(A_i = \pi D_{i,hec} L_{hec})$  که ممکن است در معرض سیال گرم یا سرد باشند، طول مشخصه مبدل حرارتی و  $k_w$  رسانایی گرمایی دیواره لوله است [۲۸].

از عبارت مقاومت رسانش دیواره در رابطه (۴) اغلب می‌توان در مقایسه با مقاومت جابه‌جایی صرف نظر کرد؛ زیرا از یک دیواره نازک مسی با رسانایی گرمایی بزرگ استفاده شده است [۲۸]. ضریب کلی انتقال گرما را از اطلاعات مربوط به ضرایب جابه‌جایی سیال گرم و سرد می‌توان تعیین کرد.

در شبکه لوله‌های حرارتی سیال عامل بعد از دریافت حرارت، تبخیر شده و پس از برخورد به مبدل حرارتی چگالیده می‌شود. چگالش هنگامی روی می‌دهد که دمای بخار کمتر از دمای اشباعش شود. در وسایل صنعتی، این فرایند معمولاً بر اثر تماس بین بخار و یک سطح سرد به وجود می‌آید. انرژی نهان بخار آزاد می‌شود، گرما به

گرمایی بالا (برای کاهش افت درجه حرارت)، ساده بودن ساخت و تولید، و قابلیت مرطوب شدن بستگی دارد.

بدنه یک لوله حرارتی باید از یک رسانای حرارتی بسیار خوب ساخته شود تا انتقال حرارت بین محیط اطراف و لوله حرارتی بهتر انجام شود. به همین دلیل معمولاً در ساخت بدنه از مس، آلومینیوم و فولاد ضد زنگ استفاده می‌شود.

با توجه به اینکه سیال کاری آب انتخاب شد، به منظور رسانایی حرارتی بهتر در قسمت تبخیرکننده، جنس لوله‌ها را از مس انتخاب کرده‌اند؛ همچنین جنس پوسته در قسمت چگالنده با توجه به نحوه جوش کاری آن و اتصال به لوله‌های مسی ورقی از جنس برنج که هم رسانایی کمتری دارد و نسبت به مس ارزان‌تر است، استفاده شده است. همچنین مبدل داخلی نیز برای انتقال حرارت بهتر از لوله‌های مسی ساخته شده است.

#### ۴.۲. مبدل حرارتی

از آنجا که بخش‌های تبخیرکننده و چگالنده یک لوله حرارتی به‌طور مستقل عمل می‌کنند، سطح ورود حرارت به تبخیرکننده از نظر شکل و اندازه می‌تواند با سطح خروج حرارت در قسمت چگالنده متفاوت باشد به شرط آنکه نرخ تبخیر سیال عامل در قسمت تبخیرکننده با نرخ تقطیر آن در قسمت چگالنده برابر باشد. بنابراین، شار حرارتی زیادی را که در سطوح کوچک تولید می‌شوند، می‌توان با استفاده از یک لوله حرارتی و از طریق یک سطح چگالنده وسیع با شار حرارتی کم دفع کرد [۴]. در جایی که بخار سیال عامل چگالیده می‌شود یک مبدل لوله‌ای تعبیه شده است، لذا باید برای آن محاسبه طراحی مبدل انجام شود.

مبدل‌های گرمایی معمولاً برحسب آرایش جریان و نوع ساخت رده‌بندی می‌شوند. در این پژوهش از نوعی مبدل پوسته-لوله‌ای استفاده می‌شود که در آن، بخار سیال عامل پس از عبور به صورت عرضی و تماس با لوله‌های آن چگالیده می‌شود.

دو روش معمول  $LMTD$  و روش  $NTU$  برای طراحی و تحلیل مبدل‌های حرارتی به کار می‌رود. در اینجا محاسبه طراحی مبدل حرارتی با استفاده از روش  $LMTD$  انجام می‌شود. برای طراحی مبدل حرارتی فرضیات زیر در نظر گرفته شد:

۱. انتقال گرما بین مبدل و اطراف و تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل ناچیزند؛

۲. شرایط گرمایی و جریان داخلی کاملاً فراگیرند؛

۳. مقاومت گرمایی لوله و اثر رسوب ناچیزند؛

۴. خواص ثابت‌اند.

در مسائل طراحی باید کل نرخ انتقال گرما در تمامی طول مجرا با استفاده از مقدار متوسط ضریب انتقال گرما بر مبنای مقدار متوسط عدد نوسلت که به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود، محاسبه شود:

$$\bar{Nu}_D = \frac{h_i D_i}{k_f} \quad (10)$$

با  $\bar{Nu}_D$  معلوم می‌توان ضریب جابه‌جایی  $h_i$  را تعیین کرد. عدد نوسلت برای جریان داخلی لایه‌ای، کاملاً فراگیر و دمای سطح یکنواخت و  $Pr \geq 0.6$  از رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

$$Nu_D = 3.66 \quad (11)$$

و برای جریان داخلی متلاطم، کاملاً فراگیر،  $0.6 \leq Pr \leq 160$ ،  $Re_D \geq 10000$ ،  $(L/D) \geq 10$  و زمانی که دمای سطح از دمای سیال بیشتر باشد، از رابطه (۱۲) به دست می‌آید [۲۸]:

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} \quad (12)$$

## ۵.۲. محدودیت در شبکه لوله‌های حرارتی

در لوله‌های حرارتی، چرخش سیال مسئله مهمی است. بیشترین گردش، بیشترین مقدار انتقال حرارت را در لوله حرارتی به دنبال دارد. در یک لوله حرارتی استوانه‌ای دبی جرمی محوری در طول تبخیرکننده هرچه از انتهای آن فاصله گرفته می‌شود، بیشتر می‌شود تا به بیشترین مقدار خود برسد. به دلیل تبخیر در طول تبخیرکننده، سرعت جریان در طول تبخیرکننده نیز با فاصله گرفتن از انتهای بسته آن افزایش یافته تا به بیشترین مقدار خود برسد. بنابراین، فشار بخار رفته‌رفته از بیشترین مقدار خود در انتهای تبخیرکننده کاهش می‌یابد. به همین ترتیب در چگالنده با پیشروی جریان سیال، دبی جرمی بخار کمتر می‌شود. در نتیجه تشابه‌هایی بین این جریان و جریان گاز در یک نازل همگرا-واگرا وجود دارد و محدودیتی مشابه نازل همگرا-واگرا برای لوله حرارتی وجود دارد. بیشترین سرعت بخاری که در هنگام خروج از تبخیرکننده می‌تواند وجود داشته باشد برابر یک ماخ است [۲۷].

وقتی عدد ماخ در خروجی تبخیرکننده برابر یک باشد، سرعت بخار به حد صوت می‌رسد و محدودیت صوتی در تبخیرکننده رخ می‌دهد. رابطه (۱۳) حد صوتی درون لوله حرارتی را نشان می‌دهد [۲۷].

$$\dot{Q}_{S_{max}} = A_g \rho_g L_{fg} \sqrt{\frac{R_g T_g \gamma}{2(\gamma + 1)}} \quad (13)$$

که در آن،  $\gamma$  ضریب اتمیسیته گاز،  $T_g$  دمای گاز،  $R_g$  ثابت گاز،  $A_g$  سطح مقطع عرضی بخار است.

اگر  $\dot{Q}_{max}$  توسط  $n_{HP}$  لوله (به قطر  $D_{HP}$  و طول  $L_{HP}$ ) به قسمت چگالنده منتقل شود، میزان شار حرارتی انتقالی توسط هریک از لوله‌ها

سطح انتقال می‌یابد و مایع چگالیده به وجود می‌آید. چگالش می‌تواند به یکی از دو طریق روی دهد و این بستگی به شرایط سطح دارد. نوع غالب چگالش این است که فیلم مایع تمام سطح را می‌پوشاند و تحت تأثیر گرانش به‌طور پیوسته روی سطح جریان می‌یابد.

مایع چگالیده به شکل فیلم باشد یا قطره، مقاومتی در برابر انتقال گرما بین بخار و سطح به وجود می‌آورد. چون این مقاومت برحسب ضخامت مایع، که در جهت جریان افزایش می‌یابد زیاد می‌شود، از نقطه نظر آهنگ انتقال گرما و چگالش زیاد، چگالش قطره‌ای بر چگالش فیلمی برتری دارد. در چگالش قطره‌ای بیشتر از طریق قطره‌ها با قطر کمتر از  $100 \mu m$  روی می‌دهد و آهنگ انتقال گرما بیش از ده برابر آهنگ انتقال گرما در چگالش فیلمی است.

در تحلیل بدترین حالت، عدد نوسلت را برای چگالش فیلمی لایه‌ای روی سطح خارجی لوله افقی بسط داده و ضریب جابه‌جایی متوسط به صورت زیر بیان می‌شود [۲۸]:

$$\bar{h}_D = 0.729 \left( \frac{g \rho_f (\rho_f - \rho_g) k_f^3 L_{fg}}{\mu_f (T_{sat} - T_w) D_o} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

که در آن،  $T_w$  دمای دیواره لوله،  $T_{sat}$  دمای بخار اشباع،  $\rho_g$  چگالی بخار اشباع و  $\rho_f$  چگالی مایع اشباع،  $D_o$  قطر خارجی لوله و  $g$  شتاب گرانش است.

همچنین از میان سیستم‌های مختلف سطح-سیال بررسی شده، بیشتر داده‌ها برای چگالش بخار آب روی سطوح مسی هستند [۲۹-۳۱] و ضریب جابه‌جایی چگالش قطره‌ای را با روابط (۶) و (۷) می‌توان بیان کرد [۳۱].

$$\bar{h}_{dc} = 51104 + 2044 T_{sat} \quad 22^\circ C < T_{sat} < 100^\circ C \quad (6)$$

$$\bar{h}_{dc} = 25510 \quad 100^\circ C < T_{sat} \quad (7)$$

که ضریب انتقال گرما دارای بُعد  $W/m^2.K$  است.

برای محاسبه ضریب جابه‌جایی سیالی که درون مبدل گرمایی جریان دارد، ابتدا باید نوع جریان از نظر آرام یا معشوش بودن بررسی شود. عدد رینولدز جریان در لوله دایره‌ای به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود:

$$Re_D = \frac{4\dot{m}_c}{\pi D_i \mu_f} \quad (8)$$

که در آن،  $\dot{m}_c$  آهنگ جریان جرمی سیال،  $\mu_f$  لزجت دینامیکی سیال و  $D_i$  قطر داخلی لوله است.

در جریان کاملاً فراگیر عدد رینولدز بحرانی برای شروع تلاطم عبارت است از:

$$Re_{D,c} \approx 2300 \quad (9)$$

به صورت رابطه (۱۴) خواهد بود:

$$\dot{q}_{\max} = \dot{Q}_{\max} / n_{HP} \quad (14)$$

که باید  $\dot{q}_{\max} < \dot{Q}_{S_{\max}}$  باشد.

## ۶.۲. آماده‌سازی نانوسیال اکسید مس

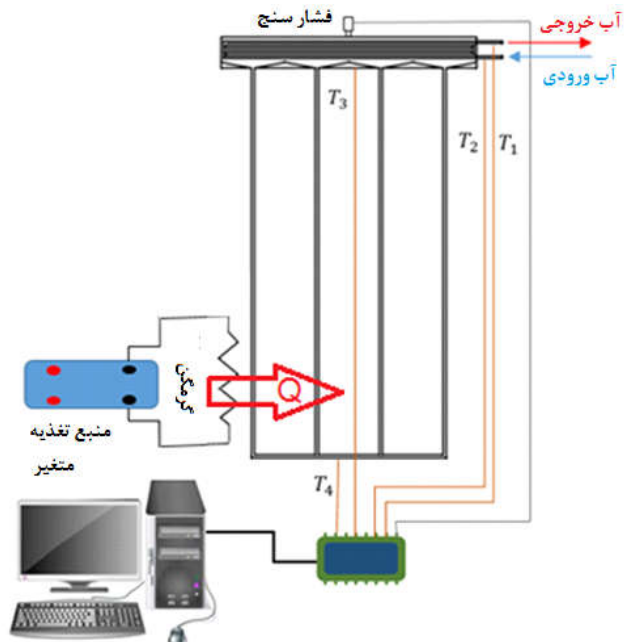
مطالعات فراوانی روی چگونگی تهیه نانوذرات و روش‌های پخش آن‌ها در سیال پایه انجام شده است. روش یک‌مرحله‌ای و روش دومرحله‌ای دو روش رایج برای تهیه نانوسیال است. در روش یک‌مرحله‌ای، تبخیر نانوذرات، چگالش و پراکنش در سیال پایه، همگی در یک مرحله انجام می‌شود. در این روش، منبع فلزی تحت شرایط خلأ تبخیر می‌شود و در مرحله بعد با چگالش پودر نانو از فاز بخار درون یک سیال با فشار کم، نانوسیال تولید می‌شود. در این روش، تراکم توده نانوذرات به حداقل می‌رسد. مزیت اصلی روش یک‌مرحله‌ای، کنترل بسیار مناسب روی اندازه و توزیع اندازه ذرات است. در این روش، تراکم توده نانوذرات به حداقل خود می‌رسد، اما فشار بخار پایین سیال یکی از معایب این فرایند محسوب می‌شود؛ با این حال روش‌های شیمیایی تک‌مرحله‌ای مختلفی برای تهیه نانوسیال به وجود آمده است که از آن جمله می‌توان به روش احیای نمک فلزات و تهیه سوسپانسیون آن در حلال‌های مختلف برای تهیه نانوسیال فلزات اشاره کرد [۳۲].

یکی دیگر از روش‌های متداول تهیه نانوسیال، روش دومرحله‌ای است. در این روش ابتدا نانوذره معمولاً به وسیله روش رسوب بخار شیمیایی در فضای گاز بی‌اثر به صورت پودر خشک تهیه می‌شود. در مرحله بعد نانوذره در داخل سیال پراکنده می‌شود. هنگامی که نانوذرات به صورت پودر خشک تهیه می‌شوند، احتمال به هم چسبیدن ذرات در اثر نیروهای جاذبه قوی واندروالس بین ذرات وجود دارد. بنابراین ساختن نانوسیالات با استفاده از روش دومرحله‌ای با این مشکل مواجه است. ذرات قبل از پراکنش به هم می‌چسبند و سپس ذرات کلوخه شده در مایع ته‌نشین می‌شوند. مخلوط‌های کاملاً پایدار نانوذرات هنگامی تولید می‌شوند که توده‌های به هم چسبیده نانوذرات در سیال به طور کامل از بین بروند. در بسیاری از نانوسیالاتی که با روش دومرحله‌ای تولید شده‌اند، توده‌های به هم چسبیده نانوذرات به طور کامل از هم جدا نمی‌شوند. برای دستیابی به بهبود قابل توجهی در خواص حرارتی نانوسیالات، بایستی توده‌های به هم چسبیده نانوذرات به طور کامل از بین بروند [۳۲].

تهیه نانوسیال به سادگی مخلوط کردن نانوذرات و سیال پایه نبوده بعضی شرایط اساسی مانند جفت شدن ذرات معلق درون

سوسپانسیون، پایداری و دوام سوسپانسیون، کاهش کلوخه شدن ذرات، عدم تغییرات شیمیایی سیال و... لازم است. بدین منظور از تکنیک‌های به‌کارگیری فعال‌کننده‌های سطحی، تغییر میزان اسیدیته (pH) سوسپانسیون و استفاده از لرزاننده‌های فراصوتی در تهیه نانوسیال استفاده می‌شود [۳۳]. این روش‌ها خواص سطح ذرات معلق را تغییر داده و از تشکیل خوشه‌های نانوذرات جلوگیری کرده که باعث پایداری مخلوط می‌شوند. استفاده از این روش‌ها بستگی به کاربرد نانوسیالات دارد. انتخاب فعال‌کننده یا پراکنش‌گر مناسب به خواص مخلوط و ذرات بستگی دارد. بعضی از محققان از تکنیک لرزاننده‌های فراصوت برای پراکنش ذرات در مایع استفاده می‌کنند. این در حالی است که عده‌ای از محققان از هیچ پراکنشگری برای پایدار کردن مخلوط استفاده نمی‌کنند. دلیل آن‌ها این است که اضافه کردن پراکنش‌گر می‌تواند رسانایی گرمایی سیال پایه را تغییر دهد و افزایش حقیقی رسانایی گرمایی در اثر افزایش نانوذرات تحت تأثیر قرار می‌گیرد. روش دومرحله‌ای برای بعضی موارد مانند اکسید فلزات در آب یون زدایی شده بسیار مناسب است و برای نانوسیالات شامل نانوذرات فلزی سنگین، خیلی موفق نبوده است [۳۴ و ۳۵]. نانوسیال مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از روش دومرحله‌ای تهیه شده و در ساخت آن، از نانوذره‌های اکسید مس با ابعاد متوسط ۴۰ nm استفاده شده است. شکل (۲) تصویر SEM و TEM نانوذره اکسید مس مورد استفاده در این نانوسیال را نشان داده است. همان‌طور که در تصویر نیز مشاهده می‌شود، اندازه این نانوذره کمتر از ۵۰ نانومتر است. نانوسیال در ۳ درصد حجمی ۰.۱٪، ۰.۳٪ و ۰.۵٪ تهیه شده است. همان‌طور که گفته شد، استفاده از فعال‌کننده سطحی، از روش‌های پایدارسازی سوسپانسیون‌های حاوی نانوذرات است. بدین منظور از ماده فعال‌کننده سطحی سدیم دودسیل سولفات به‌عنوان پایدارکننده و به میزان ۰.۱٪ وزنی به نانوسیال اضافه شده است.

بعد از کالیبره کردن pH متر دیجیتال به وسیله ۳ محلول بافر با PH استاندارد ۴، ۷ و ۱۰، PH محلول اندازه‌گیری می‌شود. برای بالا بردن PH نانوسیال از سدیم هیدروکسید با ۰.۱ نرمالیه استفاده شد، که پس از افزودن تدریجی آن، PH محلول به ۱۰/۵ افزایش می‌یابد. در پایان مخلوط به مدت یک ساعت در حمام التراسونیک در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و یک ساعت در دستگاه التراسونیک میله‌ای با فرکانس موج ۲۴ کیلوهرتز، دامنه موج ۱۰۰٪ و توان خروجی ۴۰۰ وات قرار داده می‌شود. در اکثر کارهای صورت گرفته، به منظور جلوگیری از کلوخه شدن میزان نگهداری نانوسیال در حمام و دستگاه التراسونیک هر یک حداقل یک ساعت پیشنهاد شده است.



شکل (۳): طرح‌واره تجهیزات آزمایش شبکه لوله‌های حرارتی

به‌منظور راه‌اندازی و بررسی عملکرد این شبکه لوله‌های حرارتی، سیستم را به میزان مشخص از سیال کاری شارژ کرده و هوای درون آن را با استفاده از یک پمپ و کیوم تخلیه کرده تا خلأ به میزان ۱ کیلوپاسکال در سیستم ایجاد شود. بعد از ایجاد خلأ شیر شارژ لوله‌های حرارتی بسته می‌شود و سیستم آماده انجام آزمایش است.

مقاومت حرارتی که به‌عنوان معیار بررسی عملکرد لوله‌های حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، طبق رابطه (۱۵) تعریف می‌شود:

$$R_{tot} = \frac{T_e - T_c}{\dot{Q}} \quad (15)$$

که  $T_c$  و  $T_e$  به ترتیب دمای قسمت تبخیرکننده و چگالنده هستند که از متوسط داده‌های ترموکوپل‌های نصب‌شده در هر طرف به دست می‌آیند.

راندمان شبکه لوله‌های حرارتی  $\eta$  نیز از رابطه (۱۷) به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_e} \quad (17)$$

که در آن،  $\dot{Q}_c$  میزان حرارت برداشت‌شده در بخش چگالنده و  $\dot{Q}_e$  میزان حرارت ورودی در بخش تبخیرکننده شبکه لوله‌های حرارتی است.

### ۳. نتایج و بحث

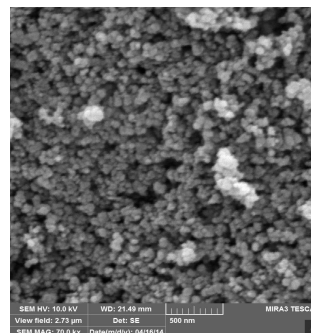
به‌منظور بررسی عملکرد این شبکه لوله‌های حرارتی و تأثیر نانوسیال بر میزان انتقال حرارت آن، ابتدا این شبکه لوله‌های حرارتی با استفاده از آب یون‌زدایی‌شده به‌عنوان سیال کاری شارژ شده و مقادیر مختلف

### ۷.۲. روش آزمایش و داده برداری

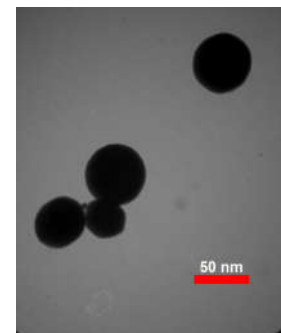
طرح‌واره تجهیزات آزمایش شبکه لوله‌های حرارتی خورشیدی در شکل (۳) آورده شده است. به‌منظور انتقال گرما به شبکه لوله‌های حرارتی سه المنت حرارتی با ظرفیت حد اکثر ۵۰۰ وات در تماس مستقیم با این لوله‌های حرارتی تعبیه شده و اطراف آن با عایق‌های نسوز پوشانده شده است. با استفاده از یک دستگاه واریاک و مولتی‌متر ولتاژ، جریان کنترل‌شده به دو سر این المنت‌ها اعمال می‌شود. به این ترتیب، میزان توان ورودی به بخش تبخیرکننده قابل تنظیم و محاسبه است. در این مطالعه، عملکرد شبکه لوله‌های حرارتی در ۴ توان مختلف ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ وات بررسی شد. دمای قسمت تبخیرکننده و چگالنده شبکه لوله‌های حرارتی و همچنین دمای ورود و خروج سیال خنک‌کننده در بخش چگالنده توسط ترموکوپل‌های تعبیه‌شده در این قسمت‌ها حس شده و به‌وسیله دستگاه ثبت داده به کامپیوتر منتقل و ثبت می‌شود. میزان حرارت برداشت‌شده در بخش چگالنده با استفاده از دماهای ورود و خروج آب خنک‌کننده و دبی آن به دست می‌آید. اگر آب سرد ورودی به مبدل حرارتی تغییر حالت ندهد و گرمای ویژه ثابت باشد، میزان تبادل گرمای آب سرد از رابطه (۱۶) به دست می‌آید:

$$\dot{q} = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (16)$$

که در آن،  $c_{p,c}$  گرمای ویژه آب،  $T_{c,i}$  و  $T_{c,o}$  به ترتیب دمای آب سرد ورودی و خروجی هستند. دبی آب در همه آزمایش‌ها ثابت و برابر با  $\dot{m}_c = 29.2 \text{ kg/h}$  است. اندازه‌گیری دبی با استفاده از استوانه مدرج و تایمر، به میزان ۱۰ بار تکرار و متوسط‌گیری داده‌ها حاصل شده است.



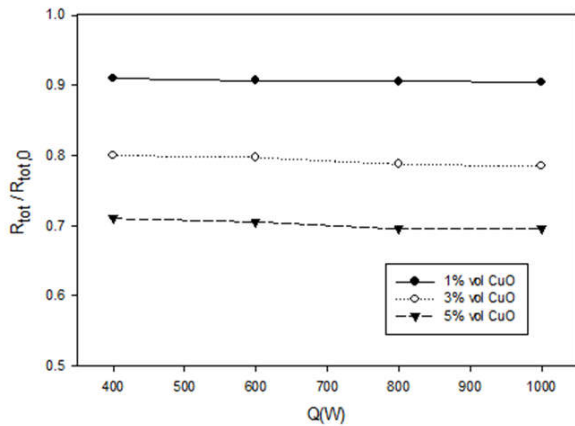
ب. TEM



الف. SEM

شکل (۲): الف. SEM؛ ب. TEM نانوذره اکسید مس

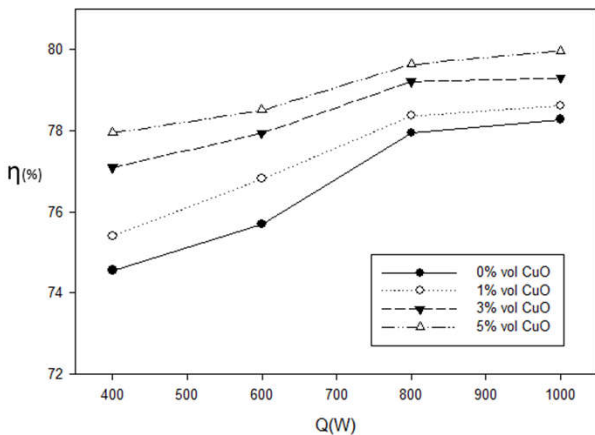




شکل (۵): مقاومت کلی شبکه لوله‌های حرارتی با سیال کاری نانوسیال اکسید مس نسبت به مقاومت کلی شبکه لوله‌های حرارتی با سیال کاری آب یونزدایی شده برحسب گرمای ورودی

با استفاده از روابط (۱۶) و (۱۷) و همچنین معین بودن گرماهای ورودی راندمان شبکه لوله‌های حرارتی محاسبه شده است. در شکل (۶) راندمان شبکه لوله‌های حرارتی برحسب گرمای ورودی نشان داده شده است.

همان طور که در شکل (۶) نیز مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت حجمی نانوذره، راندمان شبکه لوله‌های حرارتی افزایش یافته است.



شکل (۶): راندمان شبکه لوله‌های حرارتی برحسب گرمای ورودی برای سیال کاری آب یونزدایی شده و نانوسیال اکسید مس

#### ۴. نتیجه‌گیری

لوله‌های حرارتی که از آن‌ها به‌عنوان ابررسانای حرارتی نیز یاد می‌شود، وسیله‌ای برای انتقال حرارت سریع است و طیف وسیعی از کاربردها در ماهواره‌ها، راکتورها، خنک‌سازی تراشه‌ها، گردآورنده‌های خورشیدی و آبگرمکن‌های خورشیدی را شامل می‌شود. همچنین گفته شد که این لوله‌های حرارتی به‌لحاظ شکل هندسی، نحوه گردش سیال کاری، انواع مختلفی دارند. در این پژوهش برای نخستین بار یک نوع

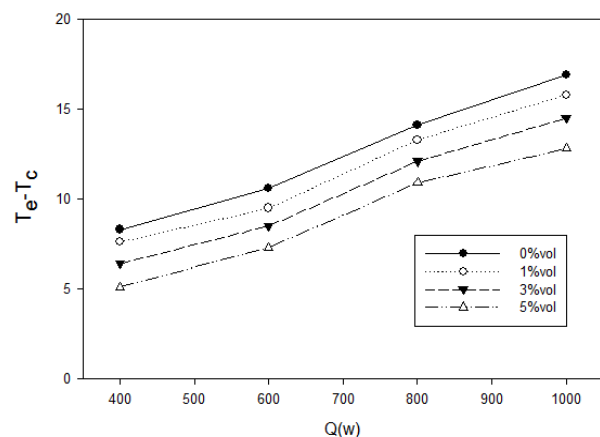
توان گرمایی به آن داده شده است.

بعد از تخلیه شبکه لوله‌های حرارتی از آب یونزدایی شده و تمیز کردن آن، با نانوسیالات تهیه‌شده شارژ شده و تست‌ها با همان مقادیر گرمای قبل، مجدداً تکرار شد. در هر بار تخلیه و شارژ مجدد شبکه لوله‌های حرارتی سیال کاری قبلی کاملاً تخلیه شده است.

با استفاده از نرم‌افزار LabView دمای اندازه‌گیری‌شده قسمت‌های مختلف شبکه لوله‌های حرارتی توسط ترموکوپل‌ها پس از آنکه عملکرد شبکه لوله‌های حرارتی به حالت یکنواخت رسید ثبت شده‌اند.

در شکل (۴)، اختلاف دمای تبخیرکننده و چگالنده برحسب گرمای ورودی برای آب یونزدایی‌شده و نانوسیالات اکسید مس به‌ازای غلظت حجمی ۱٪، ۳٪ و ۵٪ نشان شده است. شکل (۴) نشان می‌دهد با افزایش غلظت نانوذره اختلاف دمای تبخیرکننده و چگالنده به‌ازای یک گرمای ورودی یکسان کاهش پیدا می‌کند و به‌عبارتی دیگر، مقاومت کلی درون شبکه لوله‌های حرارتی کاهش یافته است.

با استفاده از رابطه (۱۵) و با خواندن دماهای تبخیرکننده و چگالنده و همچنین معین بودن گرمای ورودی به شبکه لوله‌های حرارتی، مقاومت گرمایی برای هر سیال کاری و به‌ازای هر گرمای ورودی به دست آمده است. در شکل (۵)، مقاومت کلی شبکه لوله‌های حرارتی با سیال کاری نانوسیال با غلظت حجمی ۱٪، ۳٪ و ۵٪ نسبت به مقاومت کلی شبکه لوله‌های حرارتی با سیال کاری آب یونزدایی‌شده برحسب گرمای ورودی ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ وات نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت حجمی نانوسیال این نسبت مقاومت نانوسیال به سیال پایه تا میزان ۰/۷ کاهش یافته است.



شکل (۴): اختلاف دمای تبخیرکننده و چگالنده برحسب گرمای ورودی

از شبکه لوله‌های حرارتی معرفی، طراحی و ساخته شد که قابلیت به‌کارگیری در گردآورنده‌های خورشیدی را دارد.

بهره‌گیری از نانوسیالات به‌عنوان نسل جدیدی از مبردها با ضریب هدایت بالا می‌تواند راندمان مبدل‌های حرارتی را ارتقا دهد. به‌طور معمول، دو روش عمده آماده‌سازی نانوسیال وجود دارد که در اینجا نانوسیال اکسید مس به روش دو مرحله‌ای با استفاده از نانوذرات اکسید مس با ابعاد متوسط ۴۰nm تهیه شد. در این پژوهش، سه غلظت حجمی ۱٪، ۳٪ و ۵٪ نانوسیال اکسید مس به همراه پایدارکننده سطحی سدیم دو سیل سولفات با ۰/۱ درصد وزنی مورد آزمایش قرار گرفت.

شبکه لوله‌های حرارتی ابتدا با آب یون‌زدایی‌شده به‌اندازه ۵۰٪ حجم تیخیرکننده شارژ شده و بعد از تخلیه کامل هوای درون شبکه لوله‌های حرارتی با استفاده از پمپ خلأ، به‌وسیله المنت‌های تعبیه‌شده در قسمت تیخیرکننده و واریاک، انرژی حرارتی به میزان ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ وات به این شبکه منتقل می‌شود. دمای قسمت‌های تیخیرکننده، چگالنده، آب سرد ورودی و خروجی به‌وسیله ترموکوپل‌های قرارداده شده در نقاط مختلف اندازه‌گیری و توسط دستگاه ثبت داده ثبت می‌شوند. سپس برای ارزیابی عملکرد حرارتی شبکه با استفاده از نانوسیال، تست‌های فوق در غلظت‌های مختلف نانوسیال تکرار می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده افزایش راندمان شبکه لوله‌های حرارتی تا حدود ۸۰٪ با استفاده از نانوسیال با غلظت حجمی ۵٪ است. همچنین نسبت مقاومت کلی شبکه لوله‌های حرارتی با استفاده از نانوسیال نسبت به سیال پایه آن یعنی آب، برای غلظت‌های حجمی ۱٪، ۳٪ و ۵٪ به‌ترتیب برابر با ۰/۹۱، ۰/۷۹ و ۰/۷۰ به دست آمد که نشان‌دهنده کاهش مقاومت کلی شبکه لوله‌های حرارتی است.

### فهرست علائم

$A$	سطح مقطع ( $m^2$ )
$A_g$	سطح مقطع عرضی بخار ( $m^2$ )
$D$	قطر لوله ( $m$ )
$L_{fg}$	گرمای نهان تبخیر ( $kJ/kg$ )
$k$	رسانایی گرمایی ( $W/m.K$ )
$T$	دما ( $K$ )
$M'$	عدد مریت ( $kg.K^{-3/4}.s^{-5/2}$ )
$\dot{m}_c$	دبی جرمی ( $kg/s$ )
$Nu_D$	عدد نوسلت
$n_{HP}$	تعداد لوله‌های شبکه لوله حرارتی
$h$	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ( $W/m^2.K$ )
$\dot{Q}$	توان حرارتی ( $W$ )
$\dot{Q}_{s_{max}}$	بیشینه گرمای حد صوتی ( $W$ )
$p_r$	عدد پرائتل
$R$	مقاومت گرمایی ( $K/W$ )
$R_g$	ثابت گاز ( $kJ/kg.K$ )
$Re_D$	عدد رینولدز
$U$	ضریب کلی انتقال حرارت ( $W/m^2.K$ )

### علائم یونانی

$\rho$	چگالی ( $kg/m^3$ )
$\mu_f$	لزجت دینامیکی سیال ( $N.s/m^2$ )
$\sigma_f$	کشش سطحی سیال ( $N/m$ )
$\gamma$	ضریب اتمیسیتة گاز

### زیرنویس‌ها

$i$	داخلی
$o$	خارجی
$hec$	مبدل حرارتی
$HP$	لوله حرارتی
$f$	سیال مایع
$tot$	کلی
$e$	تیخیرکننده
$c$	چگالنده، سیال سرد، بحرانی

- [1] Gaugler, R.S., *US Patent 2350348*. Appl. 21 Dec, Published 6 June 1944.
- [2] Grover, G.M., *US Patent 3229759*. Filed 1963.
- [3] Grover, G.M., Cotter, T.P., and Erickson, G.F., "Structures of Very High Thermal Conductance", *J. App. Phys.* Vol. 35, pp. 1990, 1964.
- [4] Reay, D.A., Kew, P.A., *Heat Pipes*, Fifth Edition 2006.
- [5] Roberts, C.C., "A Review of Heat Pipe Liquid Delivery Concepts. *Advances in Heat Pipe Technology*", Proceedings of IV International Heat Pipe Conference. Pergamon Press, Oxford, 1981.
- [6] Reay, D.A., *Microfluidics Overview*, Paper presented at Microfluidics Seminar, East Midlands Airport, UK, TUV-NEL, East Kilbride, April 2005.
- [7] Jeyadevan, B., Koganezawa, H., Nakatsuka, K., "Performance Evaluation of Citric Ion-Stabilised Magnetic Fluid Heat Pipe", *J. Magnetism and Magn. Mater.* Vol. 289, pp. 253–256, 2005.
- [8] Maydanik, Yu.F., "Loop heat pipes", Review article, *Appl. Therm. Eng.* Vol. 25, pp. 635–657, 2005.
- [9] Twidell, J., Weir, T., *Renewable Energy Resources* Second edition, 2006.
- [10] Jaisankar, S., Radhakrishnan, T.K., Sheeba, K.N., "Experimental Studies on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of Thermosyphon Solar Water Heater System Fitted with Spacer at the Trailing Edge of Twisted Tapes", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 1224–1231, 2009.
- [11] Alogirou, S., "The potential of Solar Industrial Process Heat Applications", *Appl Energy*, Vol. 76, pp. 337-61, 2003.
- [12] Speyer, E., "Solar Energy Collection with Evacuated Tubes", *Trans. ASME J. Eng. Power*, Vol. 87, pp. 270–277, 1965.
- [13] Daghighi, R., Shafieian, A., "Theoretical and Experimental Analysis of Thermal Performance of a Solar Water Heating System with Evacuated Tube Heat Pipe Collector", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 103, pp. 1219–1227, 2016.
- [14] Brunold, S., Frey, R., Frei, U., *A Comparison of Three Different Collectors for Process Heat Applications*, in: Solarenergie Prufund Forschungsstelle Ingenieurschule ITR, 2007.
- [15] Zhang, Zhuomin M, *Nano/Microscale Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, 2007.
- [۱۶] شیخزاده، قنبرعلی، اربابان، مریم، «جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-مس بین دو استوانه هم‌محور افقی با وجود شش پره شعاعی روی استوانه داخلی»، *مهندسی و مدیریت انرژی*، شماره ۲، جلد ۲، صفحه ۵۲-۶۱، ۱۳۹۱.
- [۱۷] شیخزاده، قنبرعلی، نظیفی فرد، محمد، مداحیان، رضا، کاظمی، خدیجه، «بررسی تغییرات هیدرودینامیکی-حرارتی یک نانوسیال در یک لوله مجهز به نوار پیچشی»، *مهندسی و مدیریت انرژی*، شماره ۸، جلد ۴، صفحه ۹۹-۸۶، ۱۳۹۷.
- [18] Choi, S.U.S., Eastman, J.A., "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles", *FED-231/MD 66*, ASME, New York, pp. 99–103, 1995.
- [19] Xinwei, Wang, Xianfan, Xu. Stephen, U.S.Choi., "Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol.13, pp. 474–480, 1999.
- [20] Liu, M.S., Ching-Cheng Lin, M., Huang, I.T., Wang, C.C., "Enhancement of Thermal Conductivity with Carbon Nanotube for Nanofluids", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 1202–1210, 2015.
- [21] Liu, M.S., Lin, M.C.C., Huang, I.T., Wang, C.C., "Enhancement of Thermal Conductivity with Cu for Nanofluids", *Chemical Engineering and Technology*, Vol. 29, pp. 72–77, 2006.
- [22] Jana, S., Salehi-Khojin, A., Zhong, W.H., "Enhancement of Fluid Thermal Conductivity by the Addition of Single and Hybrid Nano-Additives", *Thermochimica Acta* Vol. 462, pp. 45–55, 2007.
- [23] Hwang, Y., Park, H.S., Lee, J.K., Jung, W.H., "Thermal Conductivity and Lubrication Characteristics of Nanofluids", *Current Applied Physics* 6 (Supplement 1) pp. e67–e71, 2006.
- [24] Kumar Das, S., Putra, N. Thiesen, P. Roetzel, W., "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 567-574, 2003.
- [25] Natarajan, E., Sathish, R., "Role of Nanofluids in Solar Water Heater", *Int J Adv Manuf Technol* DOI 10.1007/s00170-008-1876-8.
- [26] Huminic, G., Huminic, A., Morjan, I., Dumitrache, F., "Experimental Study of the Thermal Performance of Thermosyphon Heat Pipe Using Iron Oxide Nanoparticles", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 656–661, 2011.
- [27] Brennan, P.J., Kroliczek E.J., *Heat Pipe Design Handbook*, Vol. 1, 1979.
- [۲۸] فرانک بی. اینکروپرا، دیوید پی. دویت، مقدمه‌ای بر انتقال گرما، ترجمه بهرام پوستی، تهران: نشر کتاب دانشگاهی، ۱۳۸۲.
- [29] Tanner, D.W., Pope, D., Potter, C. J., West, D., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 11, 181, 1968.
- [30] Rose, J.W., *Proc. Instn. Mech. Engrs. A: Power and Energy*, 216, 115, 2001.
- [31] Griffith, P., in Hewitt, G.F., Exec. Ed., *Heat Exchanger Design Handbook*, Section 2.6.5, Hemisphere Publishing, New York, 1990.
- [32] Dhinesh K.D., Valan A. A., "A Review on Preparation, Properties and Applications of Nanofluids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60, pp. 21–40, 2016.
- [33] Yimin, X., Qiang, L., "Heat Transfer Enhancement of Nanofluids", *International Journal of Heat and Fluid Flow* Vol. 21, pp. 58-64, 2000.
- [34] Patel, H.E., Das, S.K., Sundararagan, T., Nair, A.S., Geoge, B., Pradeep, T., "Thermal Conductivities of Naked and Monolayer Protected Metal Nanoparticle based Nanofluids: Manifestation of Anomalous Enhancement and Chemical Effects", *Journal of Applied Physics Letters*, Vol.83, No. 14, pp. 2931–2933, 2003.

- [35] Li.Y. Zhou, J., Tung, S., Schneider, E., Xi, S., "*A review on development of nanofluid preparation and characterization*", Journal of Powder Technology, Vol. 196, No. 2, pp. 89-101, 2009.