



بررسی آزمایشگاهی تاثیر نانوسیال کربوکسیل نانولوله‌های کربنی چند جداره در لوله حرارتی نوسانی سه بعدی

مسعود خسروداد، حمید رضا گشایشی، علیرضا عزیزاده جاجرم*، حسین محسنی فدردی، کاظم بشیرنژاد

دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۷

بازنگری: ۱۳۹۹/۵/۲۵

پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۹/۷

کلمات کلیدی:

لوله حرارتی نوسانی سه بعدی

نانوسیال

کربوکسیل نانولوله کربنی چندجداره

شیاردار

خلاصه: لوله حرارتی نوسانی، فناوری نوینی است که با وجود ساختاری ساده، نرخ انتقال گرمای بسیار بالایی دارد. به دلیل وجود جوشش و چگالش در حین کارکرد، لوله حرارتی نوسانی قابلیت انتقال گرما با اختلاف دمای کم، بدون نیاز به توان خارجی، انتقال گرمای بالا و حجم کوچک را دارا است. هدایت حرارتی معادل لوله حرارتی نوسانی می‌تواند تا چند صد برابر بهترین رساناها مانند مس برسد. در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی اثر نانوسیال کربوکسیل نانو لوله‌های کربنی چندجداره با سیال پایه آب با کسر حجمی ۰/۱ درصد با اواپراتوری شیاردار در لوله حرارتی نوسانی سه بعدی با ساختاری جدید پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از این نانوسیال، مقاومت حرارتی حدود ۱۳٪ کاهش می‌یابد. همچنین در نسبت پرشدگی ۶۰٪ در مقایسه با ۵۰٪ اختلاف دمای کندانسور و اواپراتور ۸ درجه سانتیگراد کاهش یافته و مقاومت حرارتی نیز ۶/۴٪ کمتر شده است. شیاردار کردن اواپراتور باعث اختلاط و آشفتگی جریان درون لوله و افزایش انتقال حرارت شده است. نتایج نشان داد با افزایش بار حرارتی ورودی، مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش اختلاف دمای اواپراتور و کندانسور مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

پیشرفت فناوری‌های الکترونیکی و افزایش گرمای تولیدشده در محصولات الکترونیکی، پژوهشگران را بر آن داشته تا به روش‌های خنک‌کاری به وسیله مایعات مناسب تمرکز کنند. نیاز به مایعی با خواص حرارتی بالا موجب شد پژوهشگران به سمت نانوسیالات گرایش پیدا کنند. نانوسیالات حاوی نانوذرات پراکنده در یک سیال پایه‌اند که افزودن درصد کمی از نانوذرات باعث افزایش چشم‌گیر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه می‌شود [۱-۴]. در این میان نانولوله‌های کربنی به علت دارا بودن ضریب هدایت گرمایی بسیار بالا نسبت به نانوذرات فلزی اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند. دو شکل مختلف نانولوله کربنی شناخته شده است، نانو لوله‌های چندجداره^۱ و تک‌جداره^۲ که به ترتیب در سال ۱۹۹۱ و ۱۹۹۳ کشف شدند. نانوسیالات در مبدل‌های حرارتی مختلفی به کار رفته‌اند از جمله در

لوله‌های حرارتی نوسانی^۳. لوله‌های حرارتی نوسانی نسل جدیدی از لوله‌های حرارتی هستند که مانند لوله حرارتی معمولی، از سه بخش اواپراتور، کندانسور و آدیاباتیک تشکیل شده‌اند [۵]. طراحی و ساخت لوله حرارتی نوسانی به صورت مهندسی توسط هیستارو آکاچی [۵] در سال ۱۹۹۰ انجام شد. لوله حرارتی نوسانی یک مبدل حرارتی است که با تغییر فاز نوسانی یک سیال عامل کار می‌کند. لوله حرارتی نوسانی شامل یک رشته از تکه‌های مایع و حباب‌های بخار^۴ است که در مسیر ماریچی لوله‌های مویین یا کانال‌های به هم پیوسته مرتب شده‌اند [۶]. از موارد کاربرد آن می‌توان به خنک‌کننده میکروچیپ‌ها و واحدهای پردازش مرکزی^۵ و گرافیکی^۶، باتری‌های لیتیوم-یون، تجهیزات هواپیما و ماهواره‌ای اشاره نمود. این لوله‌ها از یک لوله باریک با تعدادی خم U شکل ساخته شده‌اند که توسط یک سیال عامل با نسبت پرشدگی مناسب پر می‌شوند و هوای باقیمانده توسط

- 3 Oscillating Heat Pipe (OHP)
- 4 Liquid slugs and vapor plugs
- 5 Central Processing Unit (CPU)
- 6 Graphic Processing Unit (GPU)

- 1 Multi Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs)
- 2 Single Walled Carbon Nanotubes (SWCNTs)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: aalizadeh@mshdiau.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.

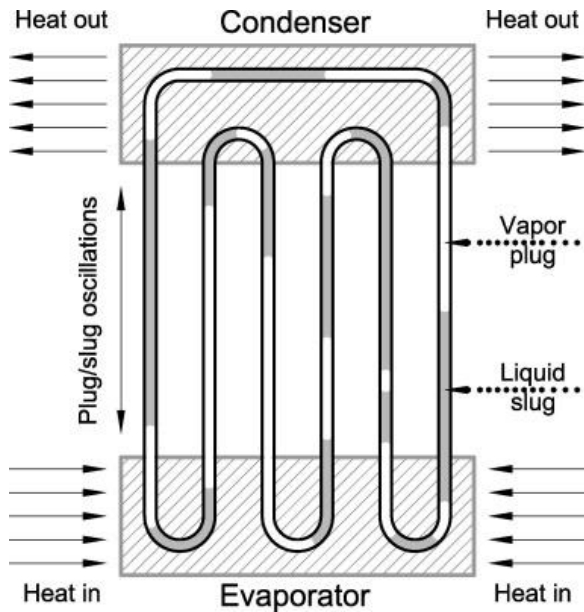


میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. آنها همچنین اثر جنس لوله در حضور میدان مغناطیسی بر روی عملکرد حرارتی لوله حرارتی نوسانی را بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده این بود که لوله حرارتی نوسانی ساخته‌شده از جنس مس، عملکرد حرارتی بهتری بویژه در شارهای حرارتی بالاتر و در حضور میدان مغناطیسی نسبت به لوله شیشه‌ای دارد [۱۳]. اگرچه لوله حرارتی نوسانی در زمینه‌های متعددی مورد استفاده قرار گرفته ولی تاکنون لوله حرارتی نوسانی سه بعدی^۴ به طور گسترده به کار نرفته است. اسموت و همکاران [۱۴] چندین لوله حرارتی نوسانی سه بعدی مسطح^۵ با طرح‌های هندسی مختلف ساخته و عملکرد حرارتی آن را تحت شرایط مختلف آزمایش کردند. نتایج تجربی بیانگر آن بود که لوله حرارتی نوسانی سه بعدی مسطح عملکرد بهتری نسبت به لوله حرارتی نوسانی مسطح^۶ دارد. کیو^۷ و همکاران [۱۵]، اثر سرعت هوای خنک‌کننده، جهت قرارگیری دستگاه و توان حرارتی روی عملکرد حرارتی لوله حرارتی نوسانی سه بعدی را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش سرعت هوای خنک‌کننده و کاهش زاویه‌ی دستگاه نسبت به راستای عمود بر افق، دمای راه‌اندازی کاهش یافته و خشک‌شدگی دیرتر رخ می‌دهد و به طور کلی مقاومت حرارتی دستگاه با افزایش توان ورودی، کاهش می‌یابد. کیو^۸ و همکاران [۱۶]، مطالعات تجربی بر روی اثر توان حرارتی، تعداد لایه‌ها، جهت قرارگیری دستگاه و نسبت پرشدگی در لوله حرارتی سه بعدی چندلایه^۹ را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد، دمای راه‌اندازی با افزایش تعداد لایه از ۱ به ۴، کاهش می‌یابد اما در حالت ۵ لایه، دمای شروع بکار و نوسان بالاتر رفته است. لوله حرارتی نوسانی ۳ بعدی ۴ لایه دارای پایین‌ترین توان و دمای راه‌اندازی در بین لوله حرارتی نوسانی سه بعدی‌ها از تک‌لایه تا پنج‌لایه است. همچنین آنها دریافتند که مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی سه بعدی با افزایش تعداد لایه از ۱ به ۴، کاهش می‌یابد اما در حالت ۵ لایه، مقاومت حرارتی افزایش یافته است. لوله حرارتی سه بعدی در مقایسه با لوله حرارتی دوبعدی، به دلیل ساختار چندلایه آن، برتری‌های چشمگیری داشت. کیو و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۹

سیستم خلا تخلیه می‌گردد. مقدار بهینه نسبت پرشدگی در لوله‌های گرمایی نوسانی بین ۶۰٪-۴۰٪ است [۱۷]. پارامترهای مختلفی بر کارکرد لوله حرارتی نوسانی تاثیرگذارند از قبیل: قطر داخلی لوله، شار گرمایی، نسبت پرشدگی، تعداد دوره‌های لوله، گرانش، خواص ترموفیزیکی و غلظت سیال عامل، جنس لوله و ... [۶]. در دهه اخیر تلاش‌های بسیاری جهت بررسی عملکرد لوله‌های گرمایی نوسانی تحت شرایط مختلف انجام شده است. سوהל^۱ و همکاران [۸] به صورت تجربی نشان دادند که با افزایش غلظت حجمی نانوسیال Al_2O_3 / H_2O از ۰٫۱٪ به ۰٫۲۵٪، عملکرد حرارتی در همه‌ی دبی‌ها افزایش یافته است. نظری و همکاران [۹]، پژوهشی تجربی روی خنک‌کننده CPU با استفاده از آب به عنوان سیال پایه و نانو لوله‌های کربنی و نانوسیال آلومینیوم انجام دادند. با مقایسه نتایج آزمایش‌ها با آب دریافتند که در کسر جرمی ۰٫۲۵٪ و ۰٫۵۰٪، ضریب انتقال گرمای جابجایی به ترتیب ۱۳٪ و ۶٪ افزایش می‌یابد. دیزاجی و همکاران [۱۰]، چندین لوله شیاردار محدب و مقعر را در یک لوله دوتایی مبدل گرما مقایسه کردند. آنها دریافتند که مبدل حرارتی با لوله بیرونی شیاردار مقعر و لوله درونی شیاردار محدب بهترین کارایی انتقال گرما را دارند. ژو^۲ و همکاران [۱۱]، لوله حرارتی نوسانی تک حلقه‌ای با ساختار شیاردار در بخش اواپراتور، آدیاباتیک و کندانسور را به طور عددی و تجربی بررسی کردند. پژوهش آنها تحت شرایط مختلف بار حرارتی ورودی در محدوده ۵ تا ۴۰ وات و نسبت پرشدگی ۳۰٪ تا ۶۰٪ انجام گرفت. آنها دریافتند لوله حرارتی نوسانی با ساختار شیاردار در بخش اواپراتور دارای بهترین کارایی در زمان راه‌اندازی می‌باشد. نتایج آنها نشان داد به دلیل استفاده از ساختار شیاردار در اواپراتور، زمان راه‌اندازی ۲۶٫۹۶٪ و مقاومت حرارتی ۳۷٫۵۷٪ کاهش داشته است. گشایشی و همکاران [۱۲] اثر میدان مغناطیسی را بر نرخ انتقال حرارت یک لوله حرارتی نوسانی با نانوسیال نفت/ Fe_2O_3 بررسی کردند. آنها یک لوله حرارتی نوسانی بسته^۳ با تعداد ۵ دور و قطر داخلی ۱٫۷۵ میلی‌متر را با نسبت پرشدگی ۵۰٪ آزمایش کردند. نتایج بیانگر این بود که افزودن نانوذرات باعث بهبود عملکرد حرارتی دستگاه بویژه تحت اثر میدان مغناطیسی می‌گردد و دمای اواپراتور نیز در حضور

4 Three Dimensional Oscillating Heat Pipe (3D-OHP)
5 3D FP-OHP
6 Flat Plate Oscillating Heat Pipe (FP-OHP)
7 Qu
8 Qu
9 Multi-layer 3D-OHP

1 SOHEL
2 Qiang Zhu
3 Closed loop Oscillating Heat Pipe (CLOHP)



شکل ۱. شماتیک لوله حرارتی نوسانی

Fig. 1. Schematic of oscillating heat pipe

توسط لوله مسی ساخته شده و آزمایشات با سیال عامل آب و نانوسیال کربوکسیل نانولوله‌های کربنی چندجداره با غلظت ۰٫۱٪ مورد بررسی قرار گرفته و خواص ترمودینامیکی همچون دما، مقاومت حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابجایی بررسی شده است. در ادامه سیال عامل آب و نانوسیال فوق‌الذکر، در شرایطی که جداره بخش اواپراتور شیاردار شده است، آزمایش‌ها تکرار شده است. نتایج حاصل از این کارها در ادامه شرح داده شده است.

۲- ساخت دستگاه

در این بخش مراحل و روش ساخت دستگاه لوله حرارتی نوسانی سه‌بعدی شرح داده شده است. شکل ۱ طرحواره دستگاه مورد آزمایش و نحوه عملکرد آن را نشان می‌دهد.

۱-۱- طراحی و ساخت دستگاه

در این آزمایش از لوله مسی با قطرهای داخلی و خارجی به ترتیب ۳٫۴ و ۴٫۸ میلی‌متر برای ساخت لوله حرارتی نوسانی استفاده شده است. این لوله حرارتی از نوع بسته و سه‌بعدی با ۱۱ خم در قسمت اواپراتور با طراحی نو می‌باشد. طول هر کدام از قسمت‌های اواپراتور، آدیاباتیک و کندانسور ۱۰۰ میلی‌متر است. قطر دایره سه‌بعدی مورد

عملکرد حرارتی مواد تغییرفازدهنده^۱ کوپل‌شده با لوله حرارتی نوسانی سه‌بعدی را بررسی کردند. آنها دو دستگاه لوله حرارتی نوسانی سه‌بعدی سه و چهار لایه را با یک دستگاه لوله حرارتی نوسانی دوبعدی^۲ آزمایش و با هم مقایسه کردند. بر اساس نتایج بدست آمده، هر دو نوع سیستم دارای تغییرات دمایی یکسان در طی فرایند ذوب بودند. سیستم پارافین/OHP-۳D نسبت به سیستم پارافین/OHP نیاز به زمان بیشتری برای ذوب کامل در حرارت ورودی یکسان می‌باشد. همچنین این سیستم دارای عملکرد سرمایه‌بندی بهتری است. یو^۳ و همکاران [۱۸]، عملکرد حرارتی لوله حرارتی نوسانی را با استفاده از آب خالص و نانوسیال هیدروکسیل نانولوله‌های کربنی چندجداره^۴ با بازه غلظت ۱-۰٫۱٪، بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که نانوسیال، بهترین ویژگی راه‌اندازی را در شرایطی که غلظت آن کمتر از ۰٫۳٪ باشد، از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که با استفاده از نانوسیال، در غلظت پایین‌تر، می‌توان عملکرد انتقال حرارت دستگاه را بهبود بخشید. هنگامی که توان حرارتی تا ۱۰۰ وات افزایش می‌یابد، مقاومت حرارتی نانوسیال با غلظت ۰٫۱٪ در مقایسه با آب خالص ۳۴٪ کاهش یافته است. مبادرثانی و همکاران [۱۹]، تاثیر میدان مغناطیسی یکنواخت، تولید آنتروپی و انتقال حرارت را بر عملکرد یک لوله حرارتی نوسانی به صورت عددی تحلیل و آنالیز کرده‌اند. آنها با حل معادلات حاکم از قبیل معادله مومنتوم، جرم و انرژی به روش صریح (به جز برای معادله انرژی تکه‌های مایع)، به این نتیجه رسیدند که عملکرد لوله حرارتی نوسانی با اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت کاهش می‌یابد. انتقال گرمای محسوس و نهان در لوله حرارتی نوسانی با افزایش قطر، بیشتر می‌شود، چون تکه‌های مایع با اندازه‌های بزرگتری نوسان می‌کنند. علاوه بر این با افزایش قطر لوله، تولید آنتروپی نیز بیشتر می‌شود.

این لوله‌ها علی‌رغم ساختار ساده‌ای که دارند، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند بگونه‌ای که مطالعات تئوری، عددی و تجربی بر روی این لوله‌ها همچنان ادامه دارد و البته به علت پیچیدگی‌های جریان و انتقال حرارت، ابعاد ناشناخته زیادی دارند. در پژوهش آزمایشگاهی حاضر، طرح جدیدی از لوله حرارتی نوسانی سه‌بعدی

- 1 Phase Change Material (PCM)
- 2 2D-OHP
- 3 Jianlin Yu
- 4 MWCNTs-OH



شکل ۲. دستگاه آزمایش و تجهیزات وابسته آن
 Fig. 2. Testing system and its related equipment

شده تا بیشترین تماس را با آن داشته باشد. برای به حداقل رساندن اتلاف حرارتی به محیط بیرون، پیرامون اواپراتور از سمت خارج و داخل دستگاه به طور کامل توسط پنبه نسوز به ضخامت یک اینچ عایق‌بندی شده است (شکل ب-۲).
 بخش آدیاباتیک دستگاه با هوای اطراف در ارتباط است که در مقایسه با اواپراتور که تحت توان گرمایی قرار گرفته و کندانسور که توسط یک فن تحت وزش هوا قرار دارد، می‌توان آن را آدیاباتیک فرض کرد. طول این قسمت همانند بخش‌های اواپراتور و کندانسور، ۱۰۰ میلی‌متر است.
 برای خنک‌کاری دستگاه از یک فن استفاده شده که لوله‌های

نظر ۳۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی هر خم نیز ۴۰ میلی‌متر است. شکل ۲ دستگاه مورد نظر و اجزای آن به همراه تجهیزات اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.
 این دستگاه در حقیقت شامل دو قسمت اصلی برای گرمایش و سرمایش است. بخش گرمایش از یک گرمکن الکتریکی تشکیل شده که شار حرارتی ثابتی را به دیواره لوله منتقل می‌کند. به منظور اعمال بار حرارتی مورد نظر به اواپراتور، از یک گرمکن الکتریکی تمام‌استیل صفحه‌ای که متناسب و هم‌اندازه با قالب لوله حرارتی مورد آزمایش ساخته شده و دارای حداکثر توان حرارتی ۱۳۰۰ وات با ولتاژ ۲۲۰ ولت، استفاده شده که توسط پیچ و مهره به اواپراتور متصل

جدول ۱. دقت تجهیزات آزمایشگاهی

Table 1. Accuracy of laboratory equipment

ابزار	دقت	واحد
مانومتر	۰٫۱	بار
اتوترانس	۱	ولت
ترمومتر دیجیتال	۰٫۰۱	درجه سانتیگراد
زمان سنج	۱	ثانیه
متر	۱	میلی متر
کولیس	۰٫۱	میلی متر
مولتی متر	۰٫۱	آمپر



شکل ۳. کندانسور و محل نصب سنسورهای ترموکوپل بر روی آن

Fig. 3 Condenser and place of installation of thermocouple sensors on it

در رابطه فوق، V ولتاژ اعمالی به گرمکن و I شدت جریان است که با قراردادن مولتی متر در مسیر جریان ورودی به گرمکن اندازه گیری می گردد.

به منظور ثبت دما در بخش های اواپراتور و کندانسور، از ترمومتر دیجیتالی نوع K با شش عدد سنسور دما استفاده شده که در سه قسمت مختلف اواپراتور و سه قسمت متفاوت کندانسور (شکل ۳) به صورت تماسی به لوله حرارتی نوسانی سه بعدی متصل شده است. جهت نمایش و ثبت دماهای احساس شده توسط سنسورهای دما در قسمت های اواپراتور و کندانسور، از دستگاه داده بردار مدل BTM-SD4208 استفاده شده که شش سنسور دمای مورد نظر، به این دستگاه وصل می شود. یک عدد کارت حافظه در داخل این دستگاه قرار داده می شود که قابلیت ثبت داده های دمایی را دارد. در این آزمایش، داده بردار طوری تنظیم شد تا دماها را هر پنج ثانیه یکبار در حافظه ثبت نماید.

دقت تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

کندانسور را در معرض جریان هوا با سرعت وزش ۸ متر بر ثانیه قرار داده است. برای جلوگیری از اتلاف حرارت جریان هوای اجباری، قسمت کندانسور به صورت کامل در داخل یک کانال عایق قرار داده شده است (شکل ج-۲). شکل ۲ شماتیک کلی دستگاه تحت آزمایش همراه با دیگر تجهیزات به کار برده شده نشان می دهد.

به منظور وکیوم نمودن دستگاه قبل از تزریق سیال، لوله حرارتی نوسانی توسط یک پمپ خلا با توان ۱۶ اسب بخار و خلا نهایی ۱۰ پاسکال به مدت ۲۰ دقیقه برای هر آزمایش تحت مکش قرار گرفته است. فشار خلا در پایان مکش حدود ۰٫۹ بار نشان داده شد.

اعمال بارهای حرارتی مختلف به بخش اواپراتور لوله حرارتی نوسانی، با تغییر ولتاژ توسط دستگاه واریاک انجام می گردد. محدوده تغییرات ولتاژ این دستگاه از صفر تا ۲۵۰ ولت است. توان حرارتی اعمال شده به بخش اواپراتور که به صورت گرمای تولید شده در گرمکن به لوله حرارتی نوسانی منتقل می شود، از رابطه ۱ محاسبه می شود.

$$q = VI \quad (1)$$

جدول ۲. خواص فیزیکی نانوذرات هیدروکسیل نانولوله‌های کربنی چندجداره

Table 2. Physical properties of hydroxyl nanoparticles of multi-walled carbon nanotubes

مشخصات	خاصیت
٪ ۹۵	خلوص
۲۰-۳۰ نانومتر	قطر نانوذرات
۵-۱۰ میکرومتر	طول نانوذرات
سیاه	رنگ
VCN Materials	شرکت سازنده



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی و ظرف محتوی نانوذره

Fig. 4. Electron microscope image and container containing nanoparticles

مدل ۵۵۱۰ ساخت شرکت برانسون^۲ استفاده شده است. به منظور بررسی اثر انحنای بر عملکرد گرمایی دستگاه، بر روی ۱۱ شاخه لوله در قسمت اوپراتور تعداد ۴ شیار به فواصل ۱۰ میلی‌متر از یکدیگر بر روی هر لوله مطابق شکل ۵ ایجاد شد تا لوله شیاردار شود. شیاردار کردن لوله، پس از اتمام آزمایشات بر روی لوله بدون شیار، بر روی آن ایجاد شده است.

۱-۲- روش انجام آزمایش و تکرارپذیری

پس از تهیه نانوسیالات و طراحی و ساخت دستگاه و نمونه‌های آزمایش، برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف و نصب ترموکوپل‌ها در دو بخش کندانسور و اوپراتور، دستگاه برای وکیوم آماده شد. پیش از مکش دستگاه، یک شیر سه راهه در ورودی دستگاه نصب شد که یک سمت آن به دستگاه وصل شده و سمت دیگر آن به پمپ خلاء

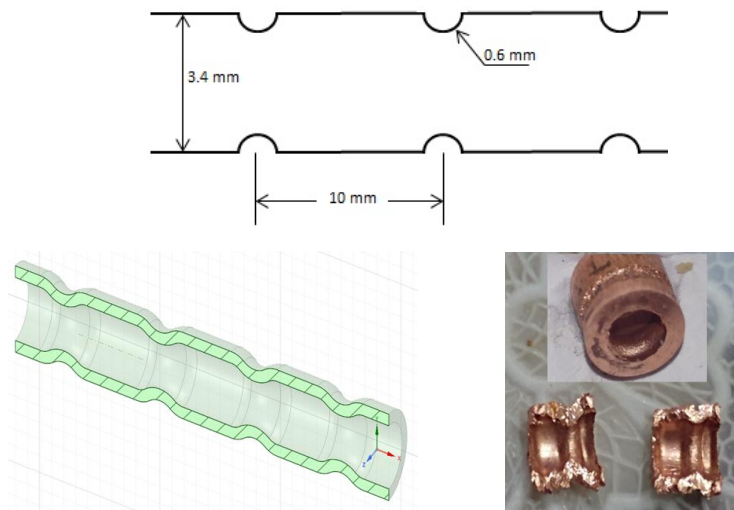
برای انجام آزمایشات از ترکیب آب مقطر به عنوان سیال پایه و هیدروکسیل نانو لوله‌های کربنی چندجداره^۱ برای ساخت نانوسیال استفاده شده که مشخصات آن در جدول ۲ و تصاویر آن در شکل ۴ آورده شده است.

برای پایداری نانوسیال و جلوگیری از ته‌نشینی، به جای نانولوله‌های کربنی چندجداره از کربوکسیل نانو لوله‌های کربنی چندجداره با غلظت ۱٪^۱ که از این پس به اختصار نانوسیال می‌نامیم، استفاده شده است. پیش از هر آزمایش، پس از چند تکان شدید، نانوسیال به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه حمام التراسونیک با توان ۸۰۰ وات، فرکانس ۳۰ کیلوهرتز قرار داده شد. پس از گذشت ۳ ساعت، نانوسیال همچنان پایدار بود و اثری از ته‌نشینی دیده نشد.

به منظور پایداری و همگن کردن نانوسیال از حمام التراسونیک

2 BRANSON

1 MWCNTs-COOH



شکل ۵. برشی از لوله شیاردار شده اوپراتور به همراه شماتیک لوله برش خورده

Fig. 5. A section of the evaporator grooved tube with a schematic of the cut tube

ترموکوپل از نوع K نصب شد. این ترموکوپل‌ها به دستگاه داده‌بردار وصل شده است و داده‌ها هر ۵ ثانیه یک بار در حافظه دستگاه ثبت شده‌اند. طبق رابطه‌های (۲) و (۳) به ترتیب میانگین دمای اوپراتور و کندانسور بدست می‌آید [۱۱].

$$T_e = \frac{T_{e1} + T_{e2} + T_{e3}}{3} \quad (2)$$

$$T_c = \frac{T_{c1} + T_{c2} + T_{c3}}{3} \quad (3)$$

مقاومت حرارتی دستگاه طبق رابطه (۴) محاسبه می‌گردد [۱۱].

$$R = \frac{T_e - T_c}{q} \quad (4)$$

که در آن R مقاومت گرمایی بر حسب K/W، T_e دمای میانگین اوپراتور، T_c دمای میانگین کندانسور و q مقدار گرمای ورودی بر حسب W است.

یکی از اهداف پژوهش‌ها محاسبه میزان ضریب انتقال حرارت جابجایی و یافتن روش‌هایی برای افزایش آن است. این کمیت مطابق رابطه‌ی

وصل شده است. خط سوم آن به سرنگ تزریق حاوی نانوسیال وصل گردید. سپس به وسیله پمپ خلاء دستگاه به مدت ۲۰ دقیقه با فشار ۰٫۸۵ بار تحت مکش قرار داده شد. آنگاه مسیر پمپ خلاء بسته و مسیر تزریق باز شد. آزمایشات با دو نسبت پرشدگی ۵۰ و ۶۰٪ با سیالات آب و نانوسیال با غلظت ۰٫۱٪ انجام شد. ولتاژ از اتوترانس و جریان از آمپرتر خوانده شده و از حاصلضرب آنها مقدار حرارت تولیدشده در گرمکن بدست می‌آید. با توجه به عایق‌بودن اوپراتور و با چشم‌پوشی از خطاهای آزمایشگاهی همگی حرارت تولیدشده در گرمکن به اوپراتور منتقل می‌شود. آزمایش‌ها از توان ورودی ۳۰ وات تا ۳۰۰ وات با افزایش ۳۰ وات در هر نوبت با گام زمانی ۱۵ دقیقه انجام شده است. ابتدا چند بار آزمایش در گام‌های زمانی متفاوت انجام شد که معلوم گردید که وقتی شار حرارتی افزایش داده می‌شود، بعد از حدود ۱۵ دقیقه، نشانگر دما (دیتالاگر) عدد ثبتي را در همان شار حرارتی به صورت ثابت نشان می‌دهد. در حقیقت تغییرات کمتر از ۰٫۱٪ درجه سانتیگراد در دما در مدت معین به عنوان حالت پایدار در نظر گرفته شده است. پس از آن توان ورودی یک گام به اندازه ۳۰ وات افزایش داده می‌شود تا عملکرد حرارتی دستگاه ارزیابی گردد. این فرایند برای توان‌های ۳۰ وات تا ۳۰۰ وات تکرار گردیده و نتایج آن در این تحقیق آورده شده است
برای ثبت دما در هر یک از بخش‌های کندانسور و اوپراتور سه

(۵) محاسبه می‌شود.

$$\frac{\Delta q}{q} = \sqrt{\left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2} \quad (۸)$$

$$h = \frac{q}{A \cdot \Delta T} \quad (۵)$$

$$\frac{\Delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\Delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2} \quad (۹)$$

در این رابطه q میزان انتقال حرارت بر حسب W ، A سطح تبادل حرارت بر حسب m^2 و ΔT اختلاف دمای بین اواپراتور و کندانسور بر حسب K است. مقدار A از رابطه‌ی (۶) بدست می‌آید.

$$A = n\pi DL \quad (۶)$$

معادله زیر نیز برای محاسبه حداکثر عدم قطعیت مقاومت حرارتی استفاده شده است:

$$\frac{\Delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2} \quad (۱۰)$$

که n تعداد دور لوله، D قطر لوله و L طول اواپراتور است.

دستگاه بعد از هر بار آزمایش تا رسیدن به شرایط عادی در محیط آزمایشگاه، متوقف می‌گردد. سپس دستگاه برای تکرار آزمایش آماده می‌گردد. نتایج آزمایشات اختلاف چندانی با یکدیگر نداشتند. تکرارپذیری می‌تواند به این واقعیت منجر شود که حرکات تصادفی نانوذرات تحت تاثیر نیروی شناوری در سیال اصلی می‌تواند یک نانو سیال یکنواخت تولید کنند بعد از اینکه نانوذرات ثابت نگه داشته شوند برای مدت طولانی. نتایج آزمایش می‌تواند به خوبی برای نانو سیالی که به صورت یکنواخت دیسپرس شده تکرار شود.

با توجه به اینکه در آزمایشات برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان الکتریکی از مولتی‌متر دیجیتال استفاده شده، بنابراین از اطلاعات موجود در کتابچه راهنمای آن برای محاسبه عدم قطعیت اسفاده گردید. عدم قطعیت ولتاژ و جریان به ترتیب برابر با $\pm 0.4\%$ و $\pm 0.15\%$ می‌باشد. همچنین عدم قطعیت اندازه‌گیری دما در ترمومتر دیجیتالی $K \pm 1$ می‌باشد.

در شارهای حرارتی کم، بیشترین خطا در اندازه‌گیری شار حرارت ورودی کمتر از 5.7% است. با افزایش شار حرارت ورودی، میزان خطا تا 2.4% کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار اندازه‌گیری شده قابل اطمینان می‌باشد. همچنین عدم قطعیت در ضریب انتقال حرارت و مقاومت حرارتی به ترتیب 4.1% و 3.29% می‌باشند.

۳- صحت داده‌ها و عدم قطعیت

مطالعات تجربی بدون خطا نیستند. به طور کلی، این خطاها باعث ایجاد تفاوت بین مقادیر واقعی و مقادیر مشاهده شده می‌گردد. بنابراین ارزیابی خطاهای اصلی مهم است. براساس روش هولمن [۲۰]، [۲۱]، توان ورودی از اختلاف ولتاژ بدست آمد. همچنین شار حرارتی و جریان بر مبنای مساحت اواپراتور و توان ورودی محاسبه شد. ضریب انتقال حرارت متوسط به صورت زیر محاسبه می‌شود:

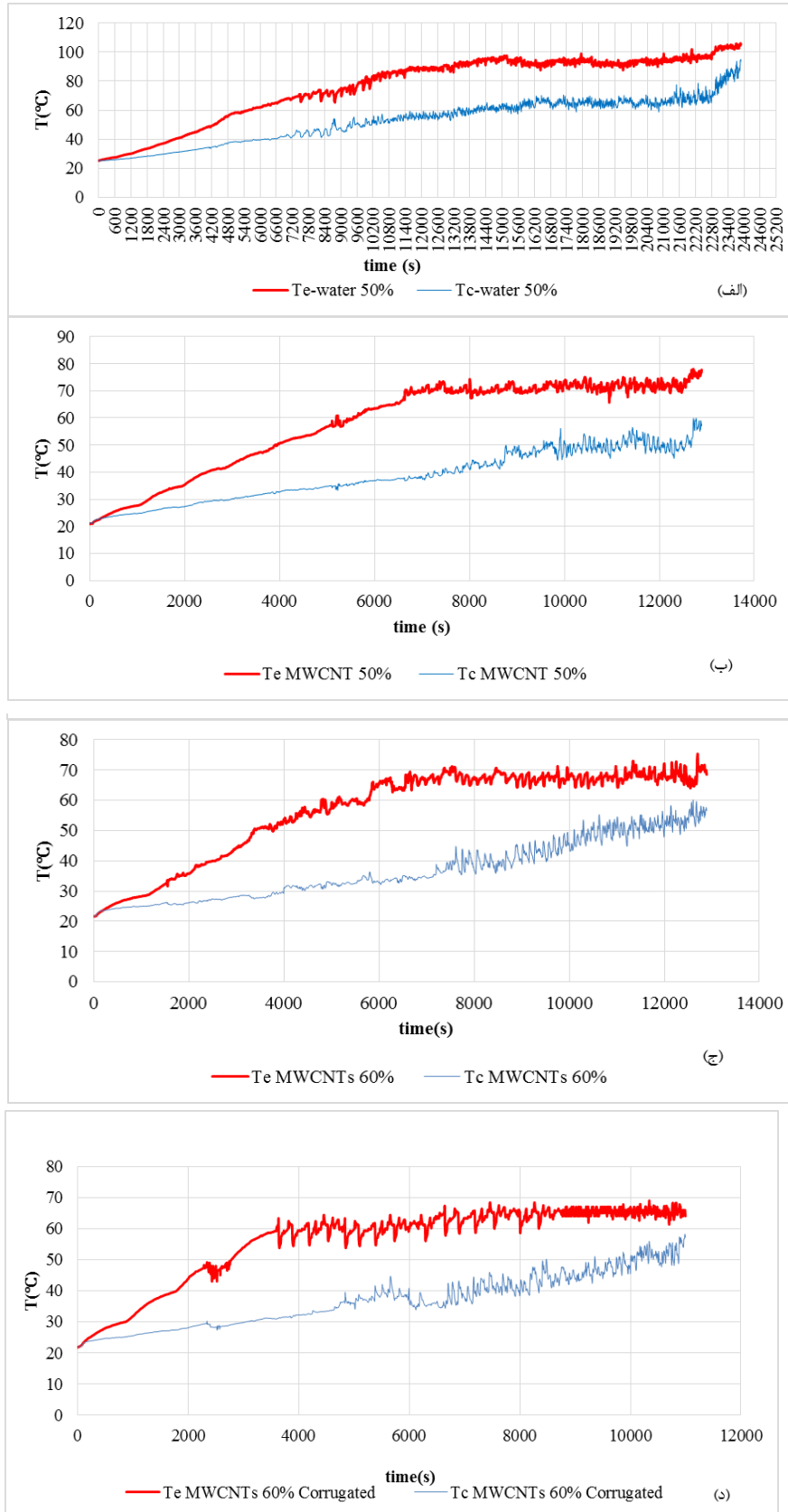
$$h = \frac{q}{\Delta T} = \frac{Q}{A \Delta T} \quad (۷)$$

عدم قطعیت ضریب انتقال حرارت و شار حرارتی به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

۴- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل شکل‌های دماهای ثبت‌شده بر حسب زمان

پس از تزریق سیال عامل، توان گرمایی به اواپراتور را از 30 وات شروع کرده و هر 15 دقیقه به اندازه 30 وات افزایش داده شده است. برای هر آزمایش، دمای قسمت اواپراتور و کندانسور توسط داده‌بردار بوسیله تعدادی حسگر دما که به لوله حرارتی نوسانی سه‌بعدی متصل هستند، ثبت گردیده و پس از میانگین‌گیری دمای اواپراتور و کندانسور، ترسیم آن‌ها مطابق شکل ۶ انجام شد. در این شکل‌ها،



شکل ۶. دماهای اواپراتور و کندانسور بر حسب زمان برای سیال عامل (الف) آب با نسبت پرشدگی ۵۰٪، (ب) نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪، (ج) نانوسیال با نسبت پرشدگی ۶۰٪، (د) نانوسیال با نسبت پرشدگی ۶۰٪ با لوله‌های اواپراتور شیاردار

Fig. 6. Evaporator and condenser temperatures over time for operating fluid (a) water with 50% filling ratio, (b) nanofluid with 50% filling ratio, (c) nanofluid with 60% filling ratio, (d) nanofluid with 60% filling ratio with Grooved evaporator tubes

تا میزان گرما مقدار ثبات باقی بماند. شکل ۷-ب مقایسه نانوسیال را در دو نسبت پرشدگی ۵۰٪ و ۶۰٪ نشان می‌دهد. با افزایش نسبت پرشدگی از ۵۰٪ به ۶۰٪، دمای اواپراتور و کندانسور حدود 8°C کاهش می‌یابد. شکل ۷-ج، مقایسه دمای اواپراتور و کندانسور را با نانوسیال با نسبت پرشدگی ۶۰٪ در دو حالت اواپراتور بدون شیار و با شیار، نشان می‌دهد. شیاردار کردن اواپراتور موجب کاهش دماهای اواپراتور و کندانسور می‌گردد. با مقایسه همه حالت‌های فوق می‌توان گفت دمای اواپراتور و کندانسور در حالت استفاده از نانوسیال با نسبت پرشدگی ۶۰٪ و اواپراتور شیاردار، از همه حالت‌ها پایین‌تر است.

همانطور که شکل‌ها نشان می‌دهند افزودن نانوذرات به دلیل ضریب هدایت حرارتی بالای آن باعث می‌شود نانوسیال در فشار پایین‌تری نسبت به سیال آب به جوش آید و شروع به نوسان کند لذا دمای کارکرد دستگاه پایین‌تر می‌آید. همچنین شیاردار کردن اواپراتور باعث افزایش آشفستگی، افزایش انتقال حرارت و کارایی دستگاه شده است.

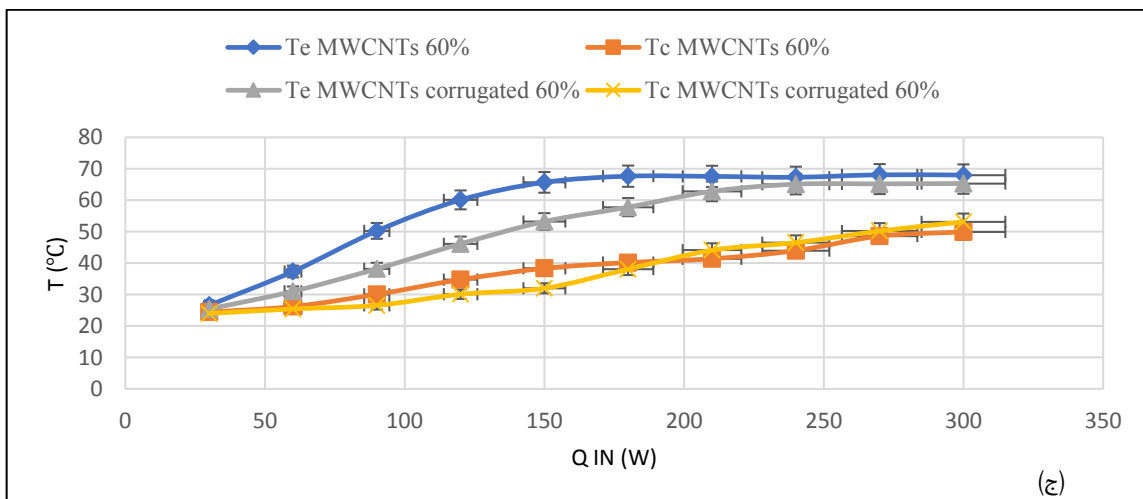
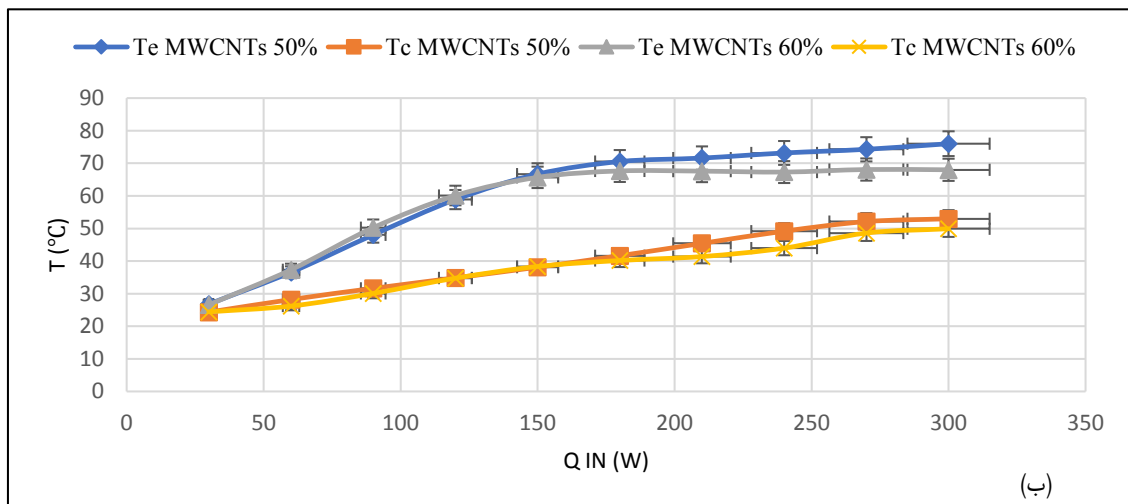
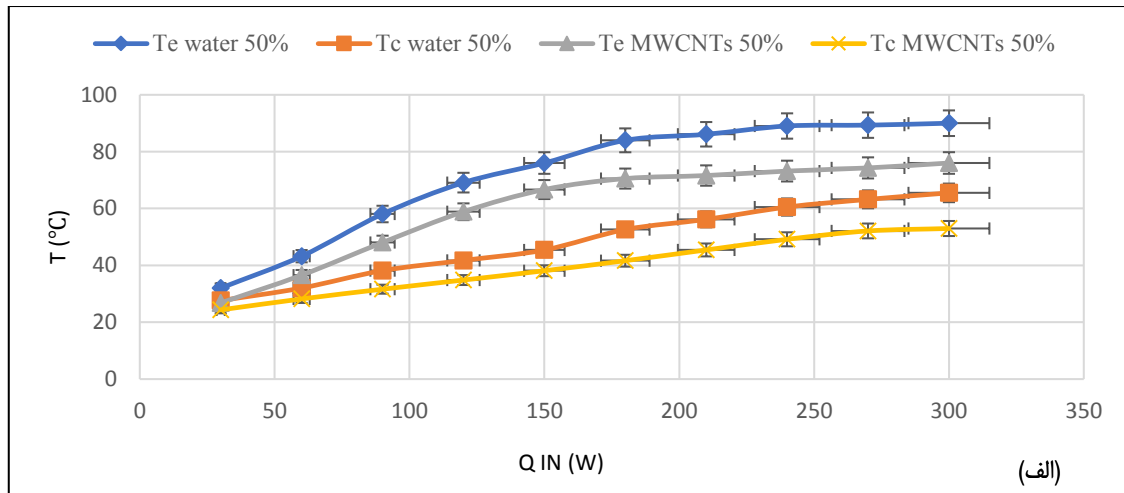
۱-۵- بحث درباره تلفات

اگرچه در این تحقیق با استفاده از پنبه نسوز به ضخامت یک اینچ پیرامون اواپراتور از سمت داخل و خارج به طور کامل عایق شده است و قسمت کندانسور نیز توسط کانال از بقیه قسمت‌ها مجزا شده تا هوای ورودی توسط فن به طور کامل روی لوله‌های کندانسور بدمد، اما تلفات حرارتی به محیط می‌تواند روی توزیع دما تا حدودی موثر باشد. برای بررسی دقیق‌تر توزیع دمای لوله حرارتی نوسانی و تعیین اختلاف دمای بین دو نقطه متوالی، نیاز به استفاده از دماسنج‌های بیشتر می‌باشد. اما با توجه به محدودیت تعداد دماسنج‌ها، انجام این موضوع مقدور نبوده است. به عبارت دیگر چنانچه از تعداد بیشتری دماسنج به ویژه برای قسمت میانی دستگاه (بخش آدیاباتیک که اواپراتور و کندانسور را از یکدیگر تفکیک کرده) استفاده می‌گردید، توزیع دمای دقیق‌تری حاصل می‌شد. اما با این وجود، چون شرایط انجام آزمایش و نحوه عایق‌کاری در تمام حالت‌های آزمایش، ثابت و مشابه یکدیگر بوده‌اند و تغییری در ساختار دستگاه صورت نگرفته، بنابراین تمام حالت‌ها از شرایط یکسان آزمایشگاهی برخوردار بوده و داده‌های حاصل شده در مقایسه با یکدیگر قابل قبول هستند و خدشه‌ای بر آن وارد نیست.

دماهای میانگین اواپراتور (T_e) و کندانسور (T_c) برحسب زمان ترسیم شده است. مطابق این شکل؛ (الف) با افزایش توان گرمایی، آب (با نسبت پرشدگی ۵۰٪) گرم شده و پس از حدود ۲ ساعت در دمای 68°C اولین نشانه‌های نوسان دما مشاهده می‌شود. ۳ ساعت پس از زمان شروع آزمایش، نوسان در دمای 90°C همچنان ادامه دارد. (ب) با نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪، شروع نوسان پس از گذشت حدود یک ساعت و ۳۰ دقیقه و در دمای 63°C رخ می‌دهد. بنابراین نسبت به آب با نسبت پرشدگی ۵۰٪، نوسانات ۳۰ دقیقه زودتر و 5°C پایین‌تر شروع شده است. پس از گذشت سه ساعت، نوسان در دمای 76°C همچنان ادامه دارد. (ج) در آزمایش با نانوسیال با نسبت پرشدگی ۶۰٪، نوسان دما یک ساعت پس از شروع گرمادهی و در دمای 52°C اتفاق می‌افتد که در مقایسه با نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪، ۳۰ دقیقه زودتر و 11°C پایین‌تر شروع به نوسان کرده است و در مقایسه آب با نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪، اختلاف چشمگیری از خود نشان داده است. ۳ ساعت پس از شروع آزمایش، نوسان در دمای 72°C همچنان ادامه دارد. (د) دمای اواپراتور و کندانسور بر حسب زمان برای نانوسیال با نسبت پرشدگی ۶۰٪ است با این تفاوت که بخش اواپراتور، شیاردار شده است (شکل ۵). شعاع شیارها $0/6$ میلی‌متر و روی هر شاخه ۴ شیار به فاصله یک سانتیمتر از هم اجرا شده است. از شکل دیده می‌شود که نوسانات ۴۰ دقیقه پس از گرمادهی و در دمای 47°C شروع شده است که در مقایسه با حالت قبل، ۲۰ دقیقه زودتر و 5°C پایین‌تر، نوسانات شروع شده است. حدود ۳ ساعت پس از شروع آزمایش نوسان در دمای 68°C همچنان ادامه دارد.

۱-۴- تحلیل دما بر حسب توان ورودی

در شکل ۷-الف میانگین دمای اواپراتور و کندانسور در حالت‌هایی که از سیال عامل آب و نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪ استفاده شده باشد، در توان‌های گرمایی مختلف رسم شده است. همانطور که دیده می‌شود وقتی از نانوسیال استفاده می‌شود دمای اواپراتور و کندانسور (در توان ورودی ۳۰۰ وات) کاهش قابل توجهی در حدود 14°C داشته‌اند. این کاهش دما طبق رابطه انتقال حرارت جابجایی یعنی رابطه (۵) قابل تحلیل است. به علت افزایش ضریب انتقال حرارت به علت استفاده از نانوسیال، طبعاً باید اختلاف دما کاهش یابد



شکل ۷. دماهای اواپراتور و کندانسور بر حسب توان گرمایی برای سیال عامل (الف) آب و نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪، (ب) نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪ و ۶۰٪، (ج) نانوسیال با اواپراتور شیاردار و بدون شیار با نسبت پرشدگی ۶۰٪.

Fig. 7. Evaporator and condenser temperatures in terms of heat output for operating fluid (a) water and nanofluid with 50% filling ratio, (b) nanofluid with 50% and 60% filling ratio, (c) nanofluid with grooved and non-grooved evaporator % with filling ratio 60

۱-۶- تحلیل مقاومت حرارتی

برای بررسی عملکرد حرارتی لوله حرارتی نوسانی در حالات مختلف باید مقاومت حرارتی آنها را بررسی نمود. مقاومت حرارتی طبق رابطه (۴) بدست می‌آید. در شکل ۸-الف، مقاومت حرارتی دستگاه بر حسب توان ورودی برای سیال آب و نانو سیال در نسبت پرشدگی ۵۰٪، نشان داده شده است. مطابق این شکل مقاومت حرارتی دستگاه با نانوسیال در مقایسه با آب ۱۳٫۱٪ کاهش داشته است. پرواضح است که کاهش مقاومت حرارتی به معنای افزایش نرخ انتقال حرارت می‌باشد. مقاومت حرارتی دستگاه با نانوسیال با نسبت پرشدگی ۶۰٪ در مقایسه با نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪ نیز مطابق آنچه که در شکل ۸-ب نمایش داده شده، ۶٫۴٪ کاهش داشته است. بنابراین افزایش نسبت پرشدگی موجب کاهش مقاومت حرارتی می‌گردد. افزایش نسبت پرشدگی به معنی افزایش میزان نانوسیال می‌باشد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که افزایش نسبت پرشدگی منجر به کاهش مقاومت حرارتی و در نتیجه افزایش عملکرد حرارتی دستگاه گردد.

مقاومت حرارتی نانوسیال با پرشدگی ۶۰٪ در اوپراتور شیاردار شده، ۵٫۳٪ نسبت به اوپراتور بدون شیار کاهش داشته است و می‌توان نتیجه گرفت که شیاردار کردن اوپراتور باعث آشفته شدن جریان داخل لوله و افزایش نرخ انتقال حرارت شده است (۸-ج). با مقایسه مقاومت حرارتی در تمامی حالت‌ها در شکل ۸-د مشاهده می‌شود که بیشترین کاهش مقاومت حرارتی، زمانی است که به جای آب از نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪، استفاده شده است و کاهش مقاومت در دو حالت پرشدگی ۶۰٪ و شیاردار کردن اوپراتور نتیجه ضعیف‌تری داشته است.

به طور معمول بهترین عملکرد یک لوله حرارتی نوسانی در نسبت پرشدگی ۴۰٪ تا ۷۰٪ فرار دارد. در آزمایش‌هایی که در این تحقیق در نسبت‌های پرشدگی ۵۰٪ و ۶۰٪ انجام شده، نسبت پرشدگی ۶۰٪ دارای عملکرد بهتری بوده است. با این حال به طور قطع نمی‌توان گفت که بهترین عملکرد دستگاه در بین تمام نسبت‌های پرشدگی در این نسبت ۶۰٪ قرار دارد. در تحقیقی که توسط محمدی و همکاران [۲۲]، درباره تاثیر میدان مغناطیسی بر روی عملکرد لوله حرارتی نوسانی با نانوسیال فروفلوید انجام گرفته به این نتیجه رسیده‌اند که در نبود میدان مغناطیسی، بهترین نسبت پرشدگی ۵۵٪ می‌باشد در

حالی که نسبت بهینه در حضور میدان مغناطیسی ۷۰٪ است.

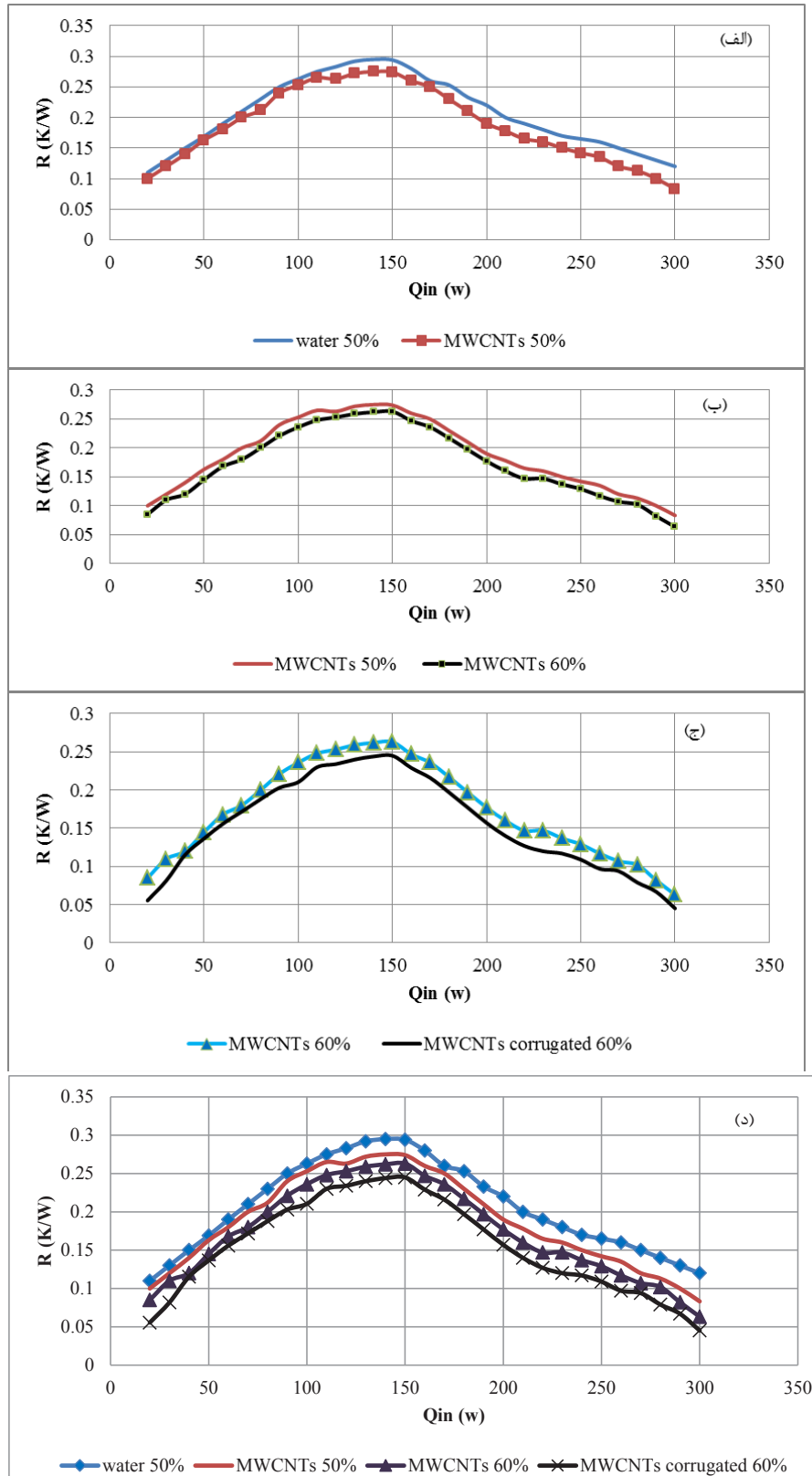
۱-۷- تحلیل ضریب انتقال حرارت جابجایی

در شکل ۹ ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال عامل بر حسب توان ورودی نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود ضریب انتقال حرارت از توان ورودی ۱۵۰ وات به بالا، شروع به افزایش می‌کند. در شکل ۹-الف، ضریب انتقال حرارت جابجایی آب و نانوسیال با پرشدگی ۵۰٪ نشان داده شده است. مطابق این شکل، ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال نسبت به آب به اندازه ۷۴٪ افزایش داشته است. مطابق شکل ۹-ب، ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال با پرشدگی ۶۰٪، حدود ۴۷٪ نسبت به نانوسیال با پرشدگی ۵۰٪، افزایش داشته است. در شکل ۹-ج، ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال با پرشدگی ۶۰٪ و اوپراتور شیاردار با اوپراتور بدون شیار مقایسه شده که نشان‌دهنده افزایش ضریب انتقال حرارتی جابجایی به اندازه ۱۳٪ است.

۵- نتیجه‌گیری

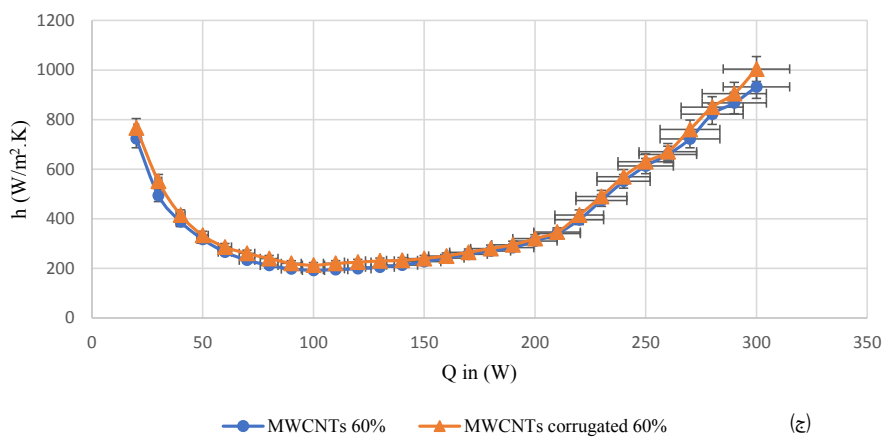
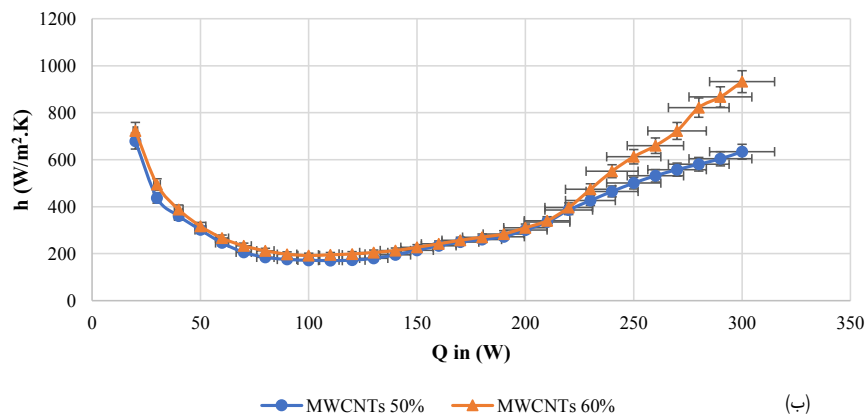
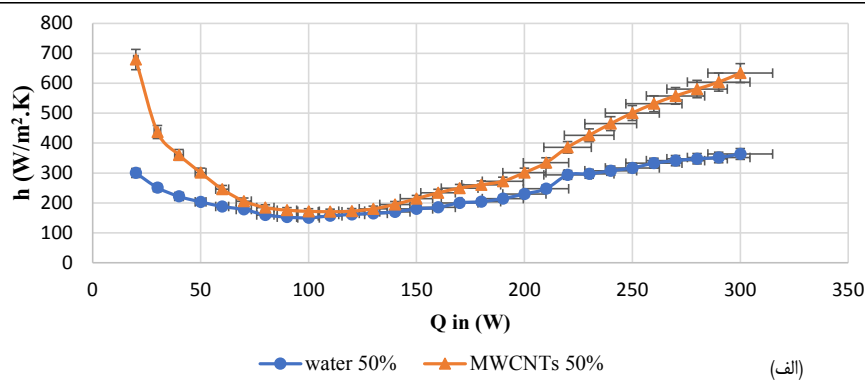
امروزه لوله‌های حرارتی نوسانی را، به عنوان مبدل‌های حرارتی پیشرفته در صنایع به ویژه صنعت الکترونیک می‌شناسند که به‌رغم حجم کوچکی که دارند به دلیل استفاده از ظرفیت حرارتی بالای جوشش و چگالش، قادر به انتقال مقادیر بالای انتقال حرارت هستند. مطالعات مختلف نشان داده است عواملی همچون استفاده از نانوسیالات و اصلاح ساختار لوله جهت اختلاط بیشتر سیال در لوله، باعث افزایش انتقال حرارت شده است. در این پژوهش به مقایسه سیال عامل آب با نانوسیال کربوکسیل نانولوله‌های کربنی با غلظت ۰٫۱٪ با نسبت پرشدگی ۵۰ و ۶۰٪ پرداخته شده است. همچنین اوپراتور را شیاردار نموده و اثر آن روی انتقال حرارت و مقاومت حرارتی بررسی شده است. نتایج نشان داد که:

۱. نسبت پرشدگی ۶۰٪ در همه آزمایشات نتایج بهتری داده است.
۲. استفاده از نانوسیال در مقایسه با آب هر دو در نسبت پرشدگی ۵۰٪، عملکرد حرارتی همچون ضریب انتقال حرارت جابجایی و مقاومت حرارتی، به طرز چشمگیری بهبود یافته است.
۳. عملکرد حرارتی نانوسیال با پرشدگی ۶۰٪ در مقایسه با نانوسیال با پرشدگی ۵۰٪، افزایش داشته است.



شکل ۸. مقاومت حرارتی بر حسب توان گرمایی برای سیال عامل (الف) آب و نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪، (ب) نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪ و ۶۰٪، (ج) نانوسیال با اواپراتور شیاردار و بدون شیاردار و بدون شیاردار با نسبت پرشدگی ۶۰٪، (د) مقایسه تمام حالت‌های آزمایش با یکدیگر

Fig. 8. Thermal resistance in terms of heat output for the operating fluid (a) water and nanofluid with 50% filling ratio, (b) nanofluid with 50% and 60% filling ratio, (c) nanofluid with grooved and non-grooved evaporator with 60% filling ratio, (D) Compare all test modes with each other



شکل ۹. ضریب انتقال حرارت جابجایی برای سیال عامل (الف) آب و نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪، (ب) نانوسیال با نسبت پرشدگی ۵۰٪ و ۶۰٪، (ج) نانوسیال با اواپراتور شیاردار و بدون شیار با نسبت پرشدگی ۶۰٪

Fig. 9. Convection heat transfer coefficient for operating fluid (a) water and nanofluid with 50% filling ratio, (b) nanofluid with filling ratio of 50% and 60%, (c) nanofluid with grooved evaporator and without groove with filling ratio of 60%

Thermal characteristics of closed loop pulsating heat pipe with nanofluids, *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 18(3) (2011).

- [8] M. Sohel, S. Khaleduzzaman, R. Saidur, A. Hepbasli, M. Sabri, I. Mahbubul, An experimental investigation of heat transfer enhancement of a minichannel heat sink using Al₂O₃-H₂O nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 74 (2014) 164-172.
- [9] M. Nazari, M. Karami, M. Ashouri, Comparing the thermal performance of water, Ethylene Glycol, Alumina and CNT nanofluids in CPU cooling: Experimental study, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 57 (2014) 371-377.
- [10] H.S. Dizaji, S. Jafarmadar, F. Mobadersani, Experimental studies on heat transfer and pressure drop characteristics for new arrangements of corrugated tubes in a double pipe heat exchanger, *International Journal of Thermal Sciences*, 96 (2015) 211-220.
- [11] J. Wang, H. Ma, Q. Zhu, Y. Dong, K. Yue, Numerical and experimental investigation of pulsating heat pipes with corrugated configuration, *Applied Thermal Engineering*, 102 (2016) 158-166.
- [12] H. Goshayeshi, M. Goodarzi, M. Dahari, Effect of magnetic field on the heat transfer rate of kerosene/Fe₂O₃ nanofluid in a copper oscillating heat pipe, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68 (2015) 663-668.
- [13] H.R. Goshayeshi, I. Chaer, Comparison of copper and glass oscillating heat pipes with Fe₂O₃ under magnetic field, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 11(4) (2016) 455-459.
- [14] C. Smoot, H. Ma, Experimental investigation of a three-layer oscillating heat pipe, *Journal of Heat Transfer*, 136(5) (2014) 051501.
- [15] J. Qu, J. Zhao, Z. Rao, Experimental investigation on the thermal performance of three-dimensional oscillating heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109 (2017) 589-600.
- [16] J. Qu, J. Zhao, Z. Rao, Experimental investigation on thermal performance of multi-layers three-dimensional oscillating heat pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115 (2017) 810-819.

۴. با شیاردار کردن اواپراتور، عملکرد حرارتی افزایش یافته است اما این افزایش در مقایسه با حالت دوم تغییر آنچنانی نداشته است.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مساحت، m^2
D	قطر، mm
h	ضریب انتقال گرمای جابجایی، $W/m^2.K$
I	شدت جریان، A
L	طول، m
q	نرخ انتقال گرمای ورودی، W
R	مقاومت حرارتی، K/W
T	دما، K
v	ولتاژ، V

زیرنویس

c	کندانسور
e	اواپراتور

۷- مراجع

- [1] S. Choi, Z. Zhang, W. Yu, F. Lockwood, E. Grulke, Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions, *Applied physics letters*, 79(14) (2001) 2252-2254.
- [2] G. Paul, J. Philip, B. Raj, P.K. Das, I. Manna, Synthesis, characterization, and thermal property measurement of nano-Al₁₉S₅Zn₀₅ dispersed nanofluid prepared by a two-step process, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(15-16) (2011) 3783-3788.
- [3] X. Wang, X. Xu, S.U. S. Choi, Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, *Journal of thermophysics and heat transfer*, 13(4) (1999) 474-480.
- [4] Y. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of heat and fluid flow*, 21(1) (2000) 58-64.
- [5] H. Akachi, Structure of a heat pipe, in: Google Patents, 1990.
- [6] H. Ma, *Oscillating heat pipes*, Springer, 2015.
- [7] H. Jamshidi, S. Arabnejad, M.B. Shafii, Y. Saboohi,

- Unlooped Pulsating Heat Pipe, Journal of Heat Transfer, 140(8) (2018).
- [20] J.P. Holman, Solutions manual to accompany heat transfer, McGraw-Hill, 1976.
- [21] M. Hisoda, S. Nishio, R. Shirakashi, Study of Meandering Closed-Loop Heat-Transport Device: Vapor-Plug Propagation Phenomena, JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering, 42(4) (1999) 737-744.
- [22] M. Mohammadi, M. Mohammadi, A.R. Ghahremani, M.B. Shafii, N. Mohammadi, Experimental investigation of thermal resistance of a ferrofluidic closed-loop pulsating heat pipe, Heat transfer engineering, 35(1) (2014) 25-33.
- [17] J. Qu, Z. Ke, A. Zuo, Z. Rao, Experimental investigation on thermal performance of phase change material coupled with three-dimensional oscillating heat pipe (PCM/3D-OHP) for thermal management application, International Journal of Heat and Mass Transfer, 129 (2019) 773-782.
- [18] M. Xing, J. Yu, R. Wang, Performance of a vertical closed pulsating heat pipe with hydroxylated MWNTs nanofluid, International Journal of Heat and Mass Transfer, 112 (2017) 81-88.
- [19] M. Farrokh, T. Goodarz, J. Samad, N. Javid, H. Amin, Analysis of Entropy Generation of a Magneto-Hydrodynamic Flow Through the Operation of an

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Khosrodad, H. R. Goshayeshi, A. R. Alizadeh, H. Mohseni Fadardi, K. Bashirnezhad . Experimental investigation on MWCNTs-COOH nano fluid on 3D oscillating heat pipe ,Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 5)(2021) 3401-3416.

DOI: [10.22060/mej.2020.17872.6684](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17872.6684)

