J. Energy Conversion
Volume: 13, Issue:2, 2026: 35-45

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص: ۴۵-۳۵

مطالعه تجربی تأثیر غلظت نانوسیال نیکل/آب-گلیسرول و زاویه قرارگیری بر عملکرد لوله حرارتی نوسانی

فرزاد لطفی‌زاده[۱]، اشکان غفوری [۲و*]

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲و*- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، ashkan.ghafouri@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۳/۳۱ ، بازنگری: ۱۴۰۵/۵/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۲۷

چکیده

لوله‌های حرارتی نو سانی به‌عنوان فناوری نوین در انتقال حرارت، کاربرد گ سترده‌ای در خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی و آب‌گرم‌کن‌های خورشیدی دارند. در پژوهش حاضر، تأثیر نانوسیال نیکل با پایه آب-گلیسرول (۷۵٪-۲۵٪ حجمی) بر عملکرد یک لوله حرارتی نوسانی با سه خم، به‌صورت تجربی بررسی شده است. لوله حرارتی با نانوسیال در سه غلظت حجمی ۰/۵، ۱ و ۲ درصد و نسبت پرشدگی ۵۰ درصد شـــارژ گردید و مقاومت حرارتی در توان‌های ورودی مختلف اندازه‌گیری شـــد. هم‌چنین، تأثیر زاویه قرارگیری (۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه) بر عملکرد لوله با اســتفاده از آب خالص و بهترین غلظت نانوســیال مطالعه گردید. نتایج نشــان داد که اســتفاده از نانوســیال نیکل، مقاومت حرارتی را تا ۳۰ در صد نسبت به آب کاهش می‌دهد. غلظت ۱ در صد حجمی به‌عنوان بهترین غلظت شنا سایی شد که در آن، ر سانش حرارتی و لزجت به‌ترتیب ۷ و ۶ درصد نسبت به آب افزایش یافت. هم‌چنین مشخص گردید که با افزایش زاویه لوله، عملکرد بهبود یافته و زاویه ۹۰ درجه بهترین عملکرد را دارد. کاهش زاویه به ۳۰ درجه، وقوع پدیده خشک‌شدگی را در توان‌های پایین‌تر تسریع می‌کند. به‌طور کلی، استفاده از نانوسیال نیکل با غلظت ۱ درصد در زاویه عمودی، بیش‌ترین بهبود عملکرد لوله حرارتی نوسانی را به‌همراه دارد.

کلمات کلیدی: لوله حرارتی نوسانی، نانوسیال نیکل، مقاومت حرارتی، غلظت نانوذرات، زاویه قرارگیری

***عهده‌دار مکاتبات:** ashkan.ghafouri@iau.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله: فرزاد لطفی‌زاده، اشکان غفوری. مطالعه تجربی تأثیر غلظت نانوسیال نیکل/آب-گلیسرول و زاویه قرارگیری بر عملکرد لوله حرارتی نوسانی. **مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۵؛ ۱۳ (۲) : ۴۵-۳۵.**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

۱- مقدمه

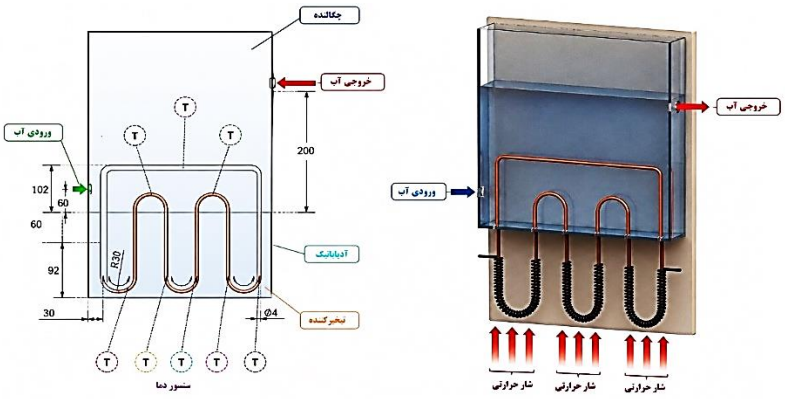
امروزه با توجه به پیشرفت صنایع مختلف و نیاز روزافزون به دفع گرما در سیستم‌های الکترونیکی، نیروگاهی و تجدیدپذیر، بهبود عملکرد سیستم‌های انتقال حرارت به چالشی مهم برای پژوهشگران تبدیل شده است [۱]. لوله‌های حرارتی از جمله وسایل پربازده در حوزه انتقال حرارت هستند که به‌دلیل رسانش حرارتی بالا، عدم نیاز به قطعات مکانیکی متحرک و قابلیت کار در شرایط مختلف، کاربرد گسترده‌ای در صنایع گوناگون یافته‌اند[۲،۳]. لوله‌های حرارتی نوسانی (PHP) برای اولین بار در سال ۱۹۹۰ توسط آکاچی ابداع گردیدند [۴]. این لوله‌ها از یک لوله موئین با قطر نازک تشکیل می‌شوند که به‌صورت چندین خم درآمده است. برخلاف لوله‌های حرارتی متداول، در PHP از ساختار فتیله‌ای استفاده نمی‌شود و حرکت سیال درون لوله به کمک نوسانات فشاری ناشی از تغییرفاز سیال، نیروی مویینگی و کشش سطحی انجام می‌گیرد [۵]. انتقال حرارت در این لوله‌ها به صورت ترکیبی از انتقال حرارت محسوس و نهان صورت می‌پذیرد که موجب عملکرد مطلوب آن‌ها در شرایط کاری مختلف می‌شود [۶]. عملکرد لوله‌های حرارتی نوسانی تحت تأثیر پارامترهای متعددی از جمله قطر داخلی، نسبت پرشدگی، تعداد دور، شار حرارتی، زاویه قرارگیری و نوع سیال کاری قرار دارد [۷، ۸]. در میان این پارامترها، سیال کاری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد لوله حرارتی شناخته می‌شود. خواص ترموفیزیکی سیال مانند رسانش حرارتی، ظرفیت گرمایی، کشش سطحی و لزجت، تأثیر مستقیمی بر نرخ انتقال حرارت و پایداری عملکرد لوله دارند[۹]. در سال‌های اخیر، استفاده از نانوسیالات به‌عنوان سیال کاری در لوله‌های حرارتی نوسانی موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است. نانوسیالات با پراکنده‌سازی نانوذرات با رسانش حرارتی بالا در سیال پایه، موجب افزایش رسانش حرارتی مؤثر سیال می‌شوند [۱۰]. هم‌چنین حضور نانوذرات می‌تواند با افزایش نقاط هسته‌زایی در فرآیند جوشش و ایجاد اختلاط بیش‌تر در جریان، عملکرد انتقال حرارت را بهبود بخشد[۱۱]. پژوهش‌های متعددی در زمینه استفاده از نانوسیالات در لوله‌های حرارتی نوسانی انجام شده است. لین و همکاران [۱۲] با استفاده از نانوسیال نقره، عملکرد لوله حرارتی را بهبود دادند و نشان دادند که افزایش غلظت نانوذرات لزوماً به معنای کاهش مقاومت حرارتی نیست و لزجت نیز تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد دارد. جیا [۱۳] با استفاده از نانوسیال SiO_2 به‌عنوان سیال کاری، بهترین عملکرد را در غلظت ۰/۱ درصد جرمی گزارش کرد. نازاری و همکاران [۱۴] با استفاده از نانوصفحات گرافن‌اکساید در لوله حرارتی نوسانی، بهبود ۳۰ درصدی عملکرد را در غلظت ۰/۲۵ گرم بر لیتر مشاهده کردند. حیدریان و همکاران [۱۵] با استفاده از نانوکپسول‌های پارافین، مقاومت حرارتی را تا ۴۱ درصد کاهش دادند و زاویه عمودی را به‌عنوان بهترین زاویه عملکردی معرفی کردند. رودرشا و همکاران [۱۶] با بررسی نانوسیالات Al_2O_3 ، TiO_2 و CuO در لوله حرارتی نوسانی حلقه بسته، کاهش مقاومت حرارتی و شروع عملکرد سریع‌تر را گزارش نمودند. پژوهش‌های مروری اخیر نیز نشان داده‌اند که استفاده از نانوسیالات می‌تواند مقاومت حرارتی لوله‌های حرارتی نوسانی را بین ۳۴ تا ۵۷ درصد کاهش دهد [۱۷]. یکی از کاربردهای نوظهور و مهم لوله‌های حرارتی نوسانی، مدیریت حرارتی باتری‌های خودروهای الکتریکی است. با توجه به تولید گرمای قابل‌توجه در باتری‌ها حین شارژ و دشارژ سریع و اهمیت حفظ دمای یکنواخت و در محدوده ایمن برای افزایش عمر و جلوگیری از فرار حرارتی، سیستم‌های خنک‌کننده مؤثر ضروری هستند. لوله‌های حرارتی نوسانی به‌دلیل ساختار ساده، عدم نیاز به نیروی محرکه خارجی و قابلیت انتقال حرارت بالا در فضاهای محدود، گزینه مناسبی برای این کاربرد به شمار می‌روند. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که استفاده از نانوسیالات در این لوله‌ها می‌تواند عملکرد حرارتی را در شرایط کاری واقعی خودروهای الکتریکی، از جمله تحت ارتعاشات و شیب‌های مختلف، بهبود بخشد [۱۸].

با وجود پژوهش‌های گسترده در زمینه استفاده از نانوسیالات مختلف در لوله‌های حرارتی نوسانی، تاکنون تأثیر نانوذرات نیکل با پایه آب-گلیسرول بر عملکرد این لوله‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. نیکل به‌عنوان یک فلز با رسانش حرارتی بالا می‌تواند گزینه مناسبی برای بهبود خواص حرارتی سیال پایه باشد. از طرفی، استفاده از سیال پایه آب-گلیسرول به‌دلیل نقطه جوش بالاتر و کاهش خطر خشک‌شدگی در توان‌های حرارتی بالا، می‌تواند مزیت‌های عملیاتی قابل‌توجهی به‌همراه داشته باشد. در پژوهش حاضر، اثر هم‌زمان سه غلظت مختلف نانوسیال و سه زاویه قرارگیری بر مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی به‌صورت تجربی مطالعه شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

۲- روش انجام پژوهش

در این پژوهش، یک لوله حرارتی نوسانی با سه خم از جنس مس (آلیاژ ٪۷۰ مس، ٪۳۰ برنج) ساخته شد. قطر داخلی لوله ۲/۴ میلی‌متر و قطر خارجی آن ۴ میلی‌متر انتخاب گردید. طول بخش‌های تبخیرکننده، آدیاباتیک و چگالنده به‌ترتیب ۹، ۹ و ۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. نسبت پرشدگی لوله در تمام آزمایش‌ها برابر ۵۰ درصد انتخاب گردید. در بخش چگالنده، از یک محفظه پلکسی‌گلاس با ورودی و خروجی آب خنک‌کننده استفاده شد. جریان جرمی آب سرد به‌گونه‌ای تنظیم گردید که دمای ورودی و خروجی محفظه تقریباً ثابت بماند و اختلاف دمای آب خنک‌کننده در حدود ۱ درجه سانتی‌گراد حفظ شود. به‌منظور کنترل شرایط آزمایش، بخش آدیاباتیک لوله با عایق حرارتی پوشانده شد تا تلفات حرارتی به حداقل برسد. دمای محیط آزمایشگاه در محدوده ۲۵ ± ۱ درجه سانتی‌گراد تثبیت گردید و تمامی آزمایش‌ها در شرایط پایدار انجام شد. دماها با فرکانس ۰/۵ هرتز به‌صورت پیوسته ثبت گردیدند تا رفتار گذرا و پایدار سیستم به‌طور کامل پایش شود. نانوسیال مورد استفاده در این پژوهش از پخش نانوذرات نیکل با اندازه متوسط کم‌تر از ۳۰ نانومتر در سیال پایه آب-گلیسرول (٪۷۵-٪۲۵ حجمی) تهیه گردید. نانوذرات نیکل محصول شرکت نانوفناوران سپهر شرق با خلوص بالا بودند. به‌منظور تهیه نانوسیال با غلظت‌های حجمی ۰/۵، ۱ و ۲ درصد، مقادیر مشخصی از نانوذرات به سیال پایه افزوده شده و سپس به‌مدت ۳۰ دقیقه در حمام فراصوت قرار داده شد تا پراکندگی یکنواختی حاصل گردد. پایداری نانوسیال‌های تهیه شده با اندازه‌گیری پتانسیل زتا تأیید گردید. برای گرمایش بخش تبخیرکننده، از هیتر نیکل-کروم با مقاومت ۲ اهم بر واحد طول استفاده شد. هیترها به‌صورت دولایه به دور لوله پیچیده شده و با چسب نسوز عایق‌کاری گردیدند. به‌منظور اندازه‌گیری دما، ۸ ترموکوپل نوع K (با دقت ۰/۵± درجه سانتی‌گراد) بر روی لوله نصب شد که ۶ عدد در بخش تبخیرکننده و ۲ عدد در بخش چگالنده قرار گرفتند. دماها توسط دیتالاگر مدل BTM-4208SD با فرکانس ۰/۵ هرتز ثبت گردیدند. لازم به‌ذکر است که پیش از انجام آزمایش‌ها، کالیبراسیون ترموکوپل‌ها و دیتالاگر با استفاده از یک حمام آب مرجع (با دقت ۰/۱± درجه سانتی‌گراد) انجام شد. ترموکوپل‌ها در دماهای مختلف (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) با یک ترمومتر مرجع کالیبره شده مقایسه گردیدند و دیتالاگر نیز با استفاده از سیگنال‌های شبیه‌سازی‌شده استاندارد صحت‌سنجی شد. نتایج کالیبراسیون نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول ابزارها با حداکثر خطای ۰/۵± درجه سانتی‌گراد برای ترموکوپل‌ها و ۱± درجه سانتی‌گراد برای دیتالاگر بود. توان ورودی به تبخیرکننده توسط منبع تغذیه DC تأمین و با مولتی‌متر کلمپ اندازه‌گیری شد. برای ایجاد خلأ نسبی داخل لوله، از پمپ خلأ استفاده گردید و لوله پس از تخلیه هوا، با استفاده از سرنگ و شیلنگ سیلیکونی شارژ شد. آزمایش‌ها در سه زاویه ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق انجام گردید. برای هر سیال کاری (آب خالص و نانوسیال با غلظت‌های ۰/۵، ۱ و ۲ درصد)، توان ورودی به تبخیرکننده از ۲۰ تا ۱۶۰ وات افزایش داده شد و دمای بخش‌های تبخیرکننده و چگالنده ثبت گردید. لازم به ذکر است که هر آزمایش سه بار تکرار گردید و میانگین نتایج به‌عنوان داده‌های نهایی مورد تحلیل قرار گرفت. میزان خطای کلی محاسبه‌شده برابر ۵ درصد بوده است. با توجه به هدف پژوهش که بررسی روند کلی تغییرات مقاومت حرارتی است، از رویکرد ارائه میانگین داده‌ها همراه با ذکر میزان خطا مشابه پژوهش‌های پیشین استفاده شده است. شکل (۱) شماتیک لوله حرارتی نوسانی ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱: شماتیک لوله حرارتی نوسانی ساخته شده

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

۳- معادلات حاکم

مقاومت حرارتی به‌عنوان معیار اصلی عملکرد لوله حرارتی نوسانی درنظر گرفته شده است. این پارامتر نشان دهنده میزان مقاومت در برابر انتقال حرارت از بخش تبخیرکننده به بخش چگالنده می‌باشد [۵]. مقاومت حرارتی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$R = \frac{T_e - T_c}{Q} \quad (۱)$$

که در آن، T_e دمای میانگین بخش تبخیرکننده، T_c دمای میانگین بخش چگالنده و Q توان حرارتی ورودی به لوله حرارتی است. دمای میانگین هر بخش از میانگین‌گیری دمای ترموکوپل‌های نصب شده در آن بخش به دست می‌آید:

$$T_e = \frac{\sum_{i=1}^{6} T_{e,i}}{6} \quad (۲)$$

$$T_c = \frac{\sum_{i=1}^{2} T_{c,i}}{2} \quad (۳)$$

توان حرارتی ورودی نیز از حاصلضرب ولتاژ و جریان الکتریکی عبوری از هیترها محاسبه می شود [۱۴]:

$$Q = V \times I \quad (۴)$$

به‌منظور مقایسه عملکرد لوله حرارتی با مواد جامد، ضریب رسانش حرارتی مؤثر نیز تعریف می‌گردد. این پارامتر نشان می‌دهد که لوله حرارتی در انتقال حرارت معادل چه ماده جامدی با رسانش حرارتی مشخص عمل می‌کند. رسانش حرارتی مؤثر از رابطه زیر محاسبه می شود [۱۴]:

$$k_{eff} = \frac{Q \times L_{eff}}{A \times (T_e - T_c)} \quad (۵)$$

که در آن، L_{eff} طول مؤثر لوله حرارتی است که از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$L_{eff} = L_{adia} + \frac{L_e + L_c}{2} \quad (۶)$$

که در آن L_{adia} طول بخش آدیاباتیک، L_e طول بخش تبخیرکننده و L_c طول بخش چگالنده است.

برای بررسی صحت نتایج آزمایشگاهی، تحلیل عدم قطعیت با استفاده از روش ارائه شده توسط هولمن انجام گردید [۱۵]. عدم قطعیت کل با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\delta T_e}{T_e - T_c}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_c}{T_e - T_c}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2} \quad (۷)$$

با توجه به دقت تجهیزات اندازه‌گیری شامل ترموکوپل‌ها با دقت ۰/۵± درجه سانتی‌گراد، دیتالاگر با دقت ۱± درجه سانتی‌گراد و مولتی‌متر با دقت ۰/۰۰۱± وات، حداکثر عدم قطعیت در محاسبه مقاومت حرارتی حدود ۵ درصد برآورد گردید [۶].

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تأثیر غلظت نانوسیال بر عملکرد لوله حرارتی

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی، مقاومت حرارتی آب خالص در شار حرارتی ۱۰ وات با نتایج پژوهشی مشابه مقایسه گردید. در پژوهش حاضر، مقاومت حرارتی آب خالص در شار ۱۰ وات برابر ۳/۱۴ K/W و در پژوهش نازاری و همکاران [۱۴] برابر ۳/۱۷ K/W گزارش شده است که تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد. وجه مشترک دو پژوهش شامل نسبت پرشدگی ۵۰٪، شار حرارتی مقایسه ۱۰ وات، مدل دیتالاگر ۴۲۰۸SD، فرکانس ثبت دمای ۰/۵ هرتز و قطر خارجی لوله ۴ میلی‌متر است. با وجود تفاوت جزئی در تعداد خم‌ها و قطر داخلی، این وجوه مشترک امکان مقایسه نسبی و صحت‌سنجی نتایج را فراهم می‌کند.

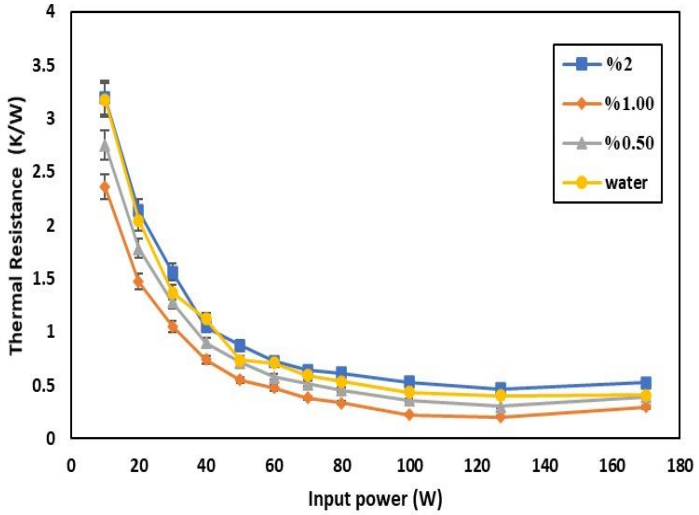
خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌های تهیه شده شامل رسانش حرارتی و لزجت دینامیکی در جدول (۱) ارائه شده است. با افزایش غلظت نانوسیال از ۰ تا ۲ درصد حجمی، رسانش حرارتی از ۰/۶۱۷ به W/m.K ۰/۶۹۱ افزایش می‌یابد که معادل ۱۲ درصد بهبود است. هم‌چنین لزجت دینامیکی از ۰/۸۸ به cP ۰/۹۸ افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش ۱۱ درصدی است. در بهترین غلظت (۱ درصد حجمی)، رسانش حرارتی و لزجت به‌ترتیب ۷ و ۶ درصد نسبت به آب خالص افزایش یافته است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی آب و نانوسیال نیکل با غلظت‌های مختلف

نام سیال، غلظت (٪ حجمی)	رسانش حرارتی(W/m.K) ، افزایش(٪)	لزجت دینامیکی(cP) ، افزایش (٪)
آب، ٪۰	۰/۶۱۷، ٪-	۰/۸۸، ٪-
نانوسیال نیکل/آب-گلیسرول، ٪۰/۵	۰/۶۴۰، ٪۴	۰/۹۱، ٪۳
نانوسیال نیکل/آب-گلیسرول، ٪۱	۰/۶۶۳، ٪۷	۰/۹۳، ٪۶
نانوسیال نیکل/آب-گلیسرول، ٪۲	۰/۶۹۱، ٪۱۲	۰/۹۸، ٪۱۱

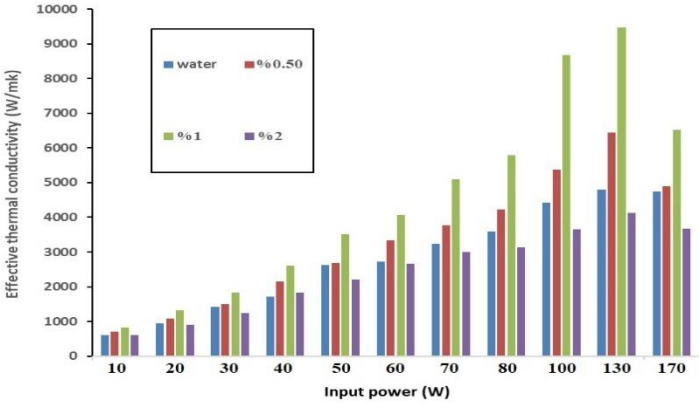
شکل (۲) مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی را بر حسب شار ورودی برای آب خالص و غلظت‌های مختلف نانوسیال نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش شار حرارتی، مقاومت حرارتی در تمام حالت‌ها کاهش می‌یابد. دلیل این امر افزایش نرخ جوشش و در نتیجه بهبود انتقال حرارت دوفاز درون لوله است. در شارهای پایین، کاهش مقاومت با شیب بیش‌تری رخ می‌دهد، اما در شارهای بالا (بیش‌تر از ۱۲۰ وات) این روند کاهشی ملایم‌تر می‌شود و در نهایت پدیده خشک‌شدگی رخ می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت نانوسیال از ۰ تا ۱ درصد حجمی، مقاومت حرارتی به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. این بهبود ناشی از سه عامل اصلی است: افزایش رسانش حرارتی سیال، افزایش نقاط هسته‌زایی در فرآیند جوشش و بهبود اختلاط جریان به‌دلیل حرکت تصادفی نانوذرات. با این حال، افزایش غلظت به ۲ درصد حجمی، عملکرد لوله حرارتی را نسبت به غلظت ۱ درصد تضعیف می‌کند. دلیل این امر، غلبه اثر منفی افزایش لزجت بر اثر مثبت افزایش رسانش حرارتی است. به‌عبارت دیگر، در غلظت‌های بالا، حرکت سیال درون لوله با دشواری بیش‌تری صورت می‌گیرد و در نتیجه انتقال حرارت محسوس کاهش می‌یابد.



شکل ۲: مقاومت حرارتی بر حسب شار ورودی برای غلظت‌های مختلف نانوسیال

شکل (۳) ضریب رسانش حرارتی مؤثر را برای آب خالص و غلظت‌های مختلف نانوسیال نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش شار حرارتی، رسانش حرارتی مؤثر در تمام حالت‌ها افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود انتقال حرارت دوفاز در شارهای بالاتر است. بیش‌ترین مقدار رسانش حرارتی مؤثر در غلظت‌های ۰/۵، ۱، ۲ درصد و آب خالص به‌ترتیب ۶۴۳۹، ۹۴۵۸، ۴۱۲۹ و ۴۸۰۴ W/m.K حاصل شد. این مقادیر در مقایسه با ضریب رسانش مس (حدود ۴۰۱ W/m.K) افزایش بسیار قابل‌توجهی را نشان می‌دهند و بیان‌گر عملکرد عالی لوله حرارتی نوسانی در انتقال حرارت هستند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

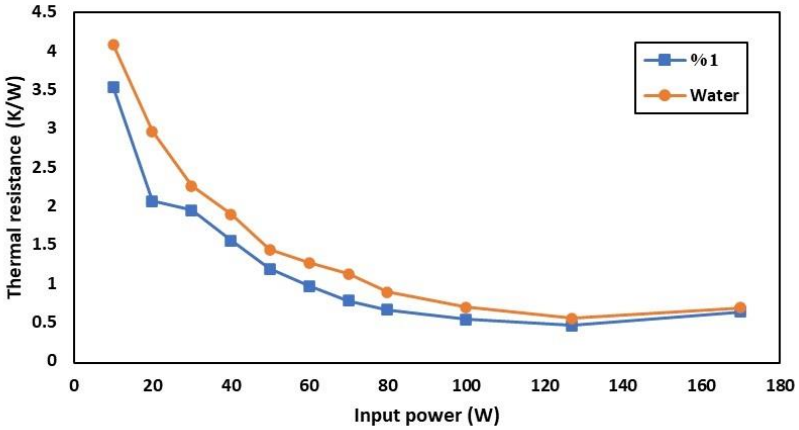


شکل ۳: ضریب رسانش حرارتی مؤثر برای آب و غلظت‌های مختلف نانوسیال

همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، بیشینه رسانندگی حرارتی مؤثر در کسر حجمی ۲ درصد برابر با W/m·K ۴۱۲۹ است که از مقدار متناظر برای آب خالص کم‌تر می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد که افزایش غلظت نانوذرات در این بازه الزاماً به بهبود عملکرد لوله حرارتی نوسانی منجر نمی‌شود. این افت را می‌توان به رقابت میان بهبود خواص حرارتی سیال و اثرات نامطلوب آن بر دینامیک جریان نسبت داد؛ به‌طوری‌که افزایش ۱۱ درصدی ویسکوزیته نانوسیال در غلظت ۲ درصد، موجب افزایش قابل‌توجه مقاومت اصطکاکی و ایجاد اثر میرایی بر نوسانات رفت‌وبرگشتی حباب‌ها و مایع درون لوله حرارتی نوسانی می‌شود. هم‌چنین، در صورت پایداری ناکافی نانوسیال، تجمع ذرات و رسوب‌گذاری ممکن است مقاومت جریان را بیش‌تر کرده و انتقال حرارت را مختل کند. از آن‌جا که عملکرد لوله حرارتی نوسانی به‌شدت به حرکت و نوسان مؤثر سیال وابسته است، این اثرات می‌توانند در کسر حجمی ۲ درصد بر مزایای افزایش رسانندگی ذاتی سیال غلبه کنند.

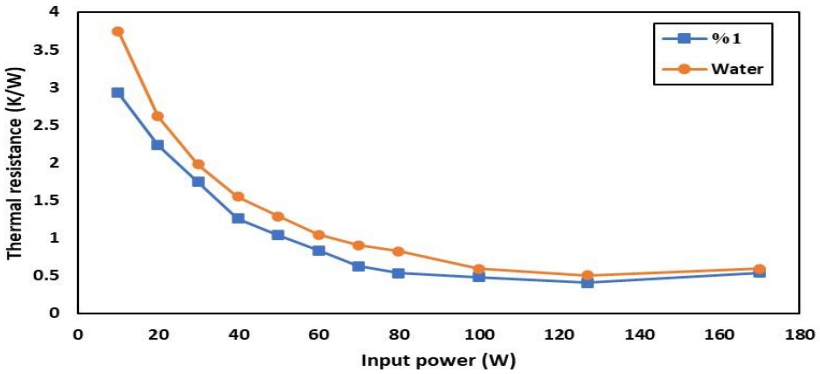
۴-۲- تأثیر زاویه قرارگیری بر عملکرد لوله حرارتی

شکل‌های (۴) تا (۶) مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی را برای آب خالص و بهترین غلظت نانوسیال (۱ درصد حجمی) در زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق نشان می‌دهند. در تمامی زوایا، استفاده از نانوسیال با غلظت ۱ درصد نسبت به آب خالص مقاومت حرارتی کم‌تری دارد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت نانوسیال در هر زاویه است.

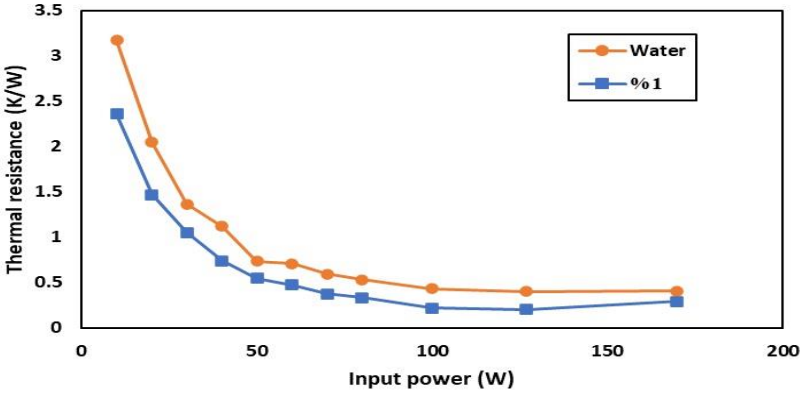


شکل ۴: مقاومت حرارتی بر حسب شار ورودی برای آب و بهترین غلظت نانوسیال در زاویه ۳۰ درجه

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

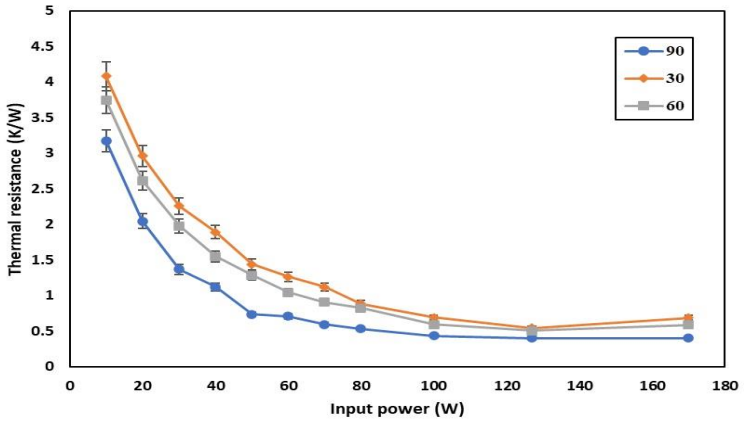


شکل ۵: مقاومت حرارتی بر حسب شار ورودی برای آب و بهترین غلظت نانوسیال در زاویه ۶۰ درجه



شکل ۶: مقاومت حرارتی بر حسب شار ورودی برای آب و بهترین غلظت نانوسیال در زاویه ۹۰ درجه

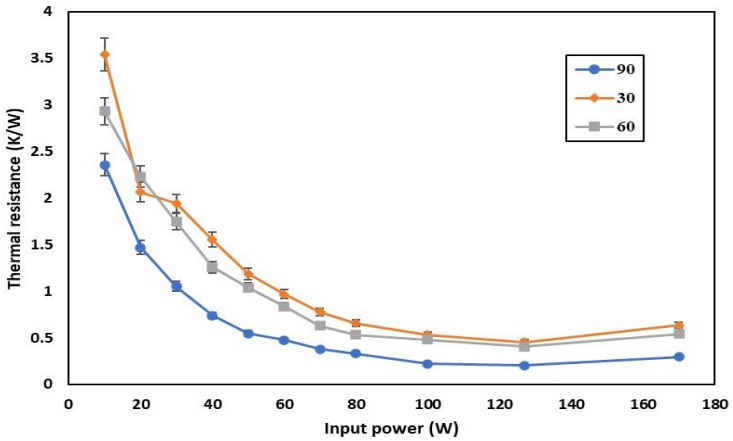
همان‌گونه که در شکل‌های (۴) تا (۶) مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه لوله نسبت به افق، پدیده خشک‌شدگی در توان‌های بالاتری رخ می‌دهد. در زاویه ۳۰ درجه، خشک‌شدگی در حدود ۱۲۰ وات شروع می‌شود، در حالی‌که در زاویه ۹۰ درجه، لوله تا ۱۶۰ وات عملکرد پایدار خود را حفظ می‌کند. دلیل این امر، تأثیر مثبت نیروی گرانش در بازگشت سیال چگالیده از چگالنده به تبخیرکننده در حالت عمودی است. در زوایای پایین، نیروی گرانش به اندازه کافی برای بازگشت مؤثر سیال عمل نمی‌کند و در نتیجه احتمال خشک‌شدگی افزایش می‌یابد. شکل (۷) مقاومت حرارتی آب خالص را در سه زاویه مختلف مقایسه می‌کند. مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه، مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد و زاویه ۹۰ درجه بهترین عملکرد را دارد. هم‌چنین اختلاف عملکرد بین زاویه ۳۰ و ۶۰ درجه بیش‌تر از اختلاف بین زاویه ۶۰ و ۹۰ درجه است.



شکل ۷: مقایسه مقاومت حرارتی آب در زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

شکل (۸) مقاومت حرارتی بهترین غلظت نانوسیال (۱ درصد حجمی) را در سه زاویه مختلف نشان می‌دهد. مشابه آب خالص، زاویه ۹۰ درجه بهترین عملکرد را دارد و با کاهش زاویه، مقاومت حرارتی افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که تأثیر بهبوددهنده نانوسیال در تمام زوایا مشهود است، اما بیش‌ترین کاهش مقاومت حرارتی نسبت به آب خالص در زاویه ۹۰ درجه (حدود ۳۰ درصد) و کم‌ترین آن در زاویه ۳۰ درجه (حدود ۲۲ درصد) رخ داده است. این موضوع نشان می‌دهد که اثر مثبت نانوسیال و اثر مثبت زاویه عمودی، همدیگر را تقویت می‌کنند.



شکل ۸: مقایسه مقاومت حرارتی بهترین غلظت نانوسیال در زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه

افزایش زاویه قرارگیری لوله نسبت به افق، به‌دلیل کمک نیروی گرانش به بازگشت سیال از چگالنده به تبخیرکننده، موجب بهبود عملکرد و کاهش مقاومت حرارتی می‌شود. در زاویه ۹۰ درجه (عمودی)، بهترین عملکرد حرارتی مشاهده گردید و پدیده خشک‌شدگی در توان‌های بالاتری رخ داد. در مقابل، در زاویه ۳۰ درجه، احتمال وقوع خشک‌شدگی در توان‌های پایین‌تر افزایش یافت که نشان‌دهنده حساسیت بالای لوله حرارتی نوسانی به زاویه قرارگیری است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تجربی، عملکرد یک لوله حرارتی نوسانی سه‌خم با استفاده از نانوسیال نیکل/آب-گلیسرول در سه غلظت حجمی ۰٫۵، ۱ و ۲ درصد و نسبت پرشدگی ۵۰ درصد مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین تأثیر زاویه قرارگیری لوله در سه سطح ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه بر مقاومت حرارتی سیستم مطالعه گردید. مهم‌ترین یافته‌های پژوهش به شرح زیر است:

- استفاده از نانوسیال نیکل/آب-گلیسرول به‌عنوان سیال کاری، مقاومت حرارتی لوله حرارتی نوسانی را تا ۳۰ درصد نسبت به آب خالص کاهش می‌دهد.
- در میان غلظت‌های مورد بررسی (۰/۵، ۱ و ۲ درصد حجمی)، غلظت ۱ درصد حجمی به‌عنوان بهترین غلظت شناسایی شد. در این غلظت، رسانش حرارتی و لزجت به‌ترتیب ۷ و ۶ درصد نسبت به آب خالص افزایش یافت.
- افزایش غلظت نانوسیال تا ۲ درصد حجمی، اگرچه رسانش حرارتی را تا ۱۲ درصد افزایش می‌دهد، اما به‌دلیل افزایش ۱۱ درصدی لزجت و در نتیجه دشواری حرکت سیال، عملکرد لوله حرارتی نسبت به غلظت ۱ درصد کاهش می‌یابد.
- بیش‌ترین مقدار رسانش حرارتی مؤثر در غلظت‌های ۰/۵، ۱، ۲ درصد و آب خالص به‌ترتیب ۶۴۳۹، ۹۴۵۸، ۴۱۲۹ و ۴۸۰۴W/m.K حاصل شد که در مقایسه با ضریب رسانش مس حدود (۴۰۱W/m.K) افزایش قابل‌توجهی را نشان می‌دهد.
- با افزایش زاویه قرارگیری لوله نسبت به افق، عملکرد لوله حرارتی بهبود می‌یابد و زاویه ۹۰ درجه (عمودی) بهترین عملکرد را به‌همراه دارد. در زوایای پایین‌تر (۳۰ درجه)، پدیده خشک‌شدگی در توان‌های حرارتی پایین‌تری رخ می‌دهد.
- اثر بهبوددهنده نانوسیال در تمام زوایای مورد آزمایش (۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه) مشهود است، اما بیش‌ترین کاهش مقاومت حرارتی در زاویه عمودی حاصل می‌شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نانوسیال نیکل/آب-گلیسرول با غلظت بهینه ۱ درصد حجمی در زاویه عمودی، می‌تواند به‌عنوان سیال کاری کارآمد در لوله‌های حرارتی نوسانی مورد استفاده قرار گیرد و بهبود قابل‌توجهی در عملکرد انتقال حرارت این سیستم‌ها ایجاد نماید. با وجود دستاوردهای این مطالعه، محدودیت‌هایی نیز وجود داشت؛ از جمله تعداد محدود خم‌ها (سه خم)، عدم اندازه‌گیری مستقیم و تجربی رفتار دینامیکی سیال و عدم بررسی پایداری بلندمدت نانوسیال. برای ادامه این پژوهش، پیشنهاد می‌شود پایداری بلندمدت نانوسیال نیکل/آب-گلیسرول و میزان رسوب‌گذاری نانوذرات در دوره‌های زمانی طولانی‌تر بررسی شود، آزمایش‌ها در توان‌های حرارتی بالاتر از ۱۶۰ وات و نسبت‌های پرشدگی مختلف انجام گیرد و تأثیر تعداد خم‌های بیش‌تر بر عملکرد لوله حرارتی مورد مطالعه قرار گیرد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی		ولتاژ، V	V
مساحت، m^2	طول مؤثر، m	طول مؤثر، m	L_{eff}
قطر داخلی لوله، m	D	**علائم یونانی**	
جریان الکتریکی، A	I	زاویه شیب لوله، °	β
رسانش حرارتی، W/m.K	k	لزجت دینامیکی، Pa.s	μ
رسانش حرارتی مؤثر، W/m.K	k_{eff}	چگالی، kg/m^3	ρ
توان حرارتی، W	Q	اختلاف دما، °C	ΔT
مقاومت حرارتی، K/W	R	کسر حجمی نانوذرات، ٪	φ
دما، °C	T		

مراجع

[1] M. A. Nazari et al., A review on pulsating heat pipes: from solar to cryogenic applications, Applied Energy, 222 (2018) 475-484.

[2] A. Faghri, Heat pipe science and technology, Global Digital Press, 1995.

[3] C. Chan, E. Siqueiros, J. Ling-Chin, M. Royapoor, and A. Roskilly, Heat utilisation technologies: A critical review of heat pipes, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 50 (2015) 615-627.

[4] Z. J. Zuo, M. T. North, and K. L. Wert, High heat flux heat pipe mechanism for cooling of electronics, IEEE Transactions on components and Packaging Technologies, 24(2) (2001) 220-225.

[5] S. Khandekar, Thermo-hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipes, Ph.D. Dissertation, Universität Stuttgart, 2004.

[6] H. N. Chaudhry, B. R. Hughes, and S. A. Ghani, A review of heat pipe systems for heat recovery and renewable energy applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(4) (2012) 2249-2259.

[7] P. Charoensawan, S. Khandekar, M. Groll, and P. Terdtoon, Closed loop pulsating heat pipes: Part A: parametric experimental investigations, Applied Thermal Engineering, 23(16) (2003) 2009-2020.

[8] J. Li and L. Yan, Experimental research on heat transfer of pulsating heat pipe, Journal of Thermal Science, 17(2) (2008) 181-185.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

[9] B. S. Taft, A. D. Williams, and B. L. Drolen, Review of pulsating heat pipe working fluid selection, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 26(4) (2012) 651-656.

[10] M. H. Mosavian, S. Z. Heris, S. G. Etemad, and M. N. Esfahany, Heat transfer enhancement by application of nano-powder, Journal of Nanoparticle Research, 12(7) (2010) 2611-2619.

[11] Y. Hwang et al., Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids, Powder Technology, 186(2) (2008) 145-153.

[12] Y.-H. Lin, S.-W. Kang, and H.-L. Chen, Effect of silver nano-fluid on pulsating heat pipe thermal performance, Applied Thermal Engineering, 28(11-12) (2008) 1312-1317.

[13] H. Jia, L. Jia, and Z. Tan, An experimental investigation on heat transfer performance of nanofluid pulsating heat pipe, Journal of Thermal Science, 22(5) (2013) 484-490.

[14] M. A. Nazari, R. Ghasempour, M. H. Ahmadi, G. Heydarian, and M. B. Shafii, Experimental investigation of graphene oxide nanofluid on heat transfer enhancement of pulsating heat pipe, International Communications in Heat and Mass Transfer, 91 (2018) 90-94.

[15] R. Heydarian, M. B. Shafii, A. R. Shirin-Abadi, R. Ghasempour, and M. A. Nazari, Experimental investigation of paraffin nano-encapsulated phase change material on heat transfer enhancement of pulsating heat pipe, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 137(5) (2019) 1603-1613.

[16] S. Rudresha and V. Kumar, CFD analysis and experimental investigation on thermal performance of closed loop pulsating heat pipe using different nanofluids, International Journal of Advanced Research, 2(8) (2014) 753-760.

[17] F.L. Rashid, Z.A.K. Alkhekany, H.I. Mohammed et al., A comprehensive review on the use of nanofluids to increase the efficiency of pulsating heat pipe, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 150 (2025) 20373-20401.

[18] N.S. Mane, V. Hemadri, and S. Tripathi, Investigation of effects of vibrations on nanofluid-filled pulsating heat pipe for efficient electric vehicle battery thermal management, International Journal of Thermophysics, 46(1) (2026) 6.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

Experimental Study of the Effects of Nickel/Water-Glycerol Nanofluid Concentration and Inclination Angle on the Performance of a Pulsating Heat Pipe

Farzad Lotfi-zadeh[1], Ashkan Ghafouri [2*]

[1]M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
[2*] Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Received: Spring 2026 Accepted: Summer 2026

Abstract

Pulsating heat pipes (PHPs) are highly efficient two-phase heat transfer devices with extensive applications in electronics cooling, solar water heaters, and heat recovery systems. This study experimentally investigates the effects of nickel/water-glycerol (75%-25% by volume) nanofluid on the thermal performance of a three-turn pulsating heat pipe. The PHP was charged with the nanofluid at three volume concentrations of 0.5%, 1%, and 2%, with a filling ratio of 50%, and thermal resistance was measured at various heat inputs. Additionally, the influence of inclination angle (30°, 60°, and 90°) on PHP performance was examined using distilled water and the optimal nanofluid concentration. Results demonstrated that the nickel nanofluid reduces thermal resistance by up to 30% compared to water. Among the tested concentrations, 1% volume fraction was identified as optimal, at which thermal conductivity and viscosity increased by 7% and 6%, respectively. Increasing the inclination angle improves performance, with the vertical orientation (90°) yielding the best results. Reducing the angle to 30° accelerates dry-out at lower heat inputs. Overall, the nickel/water-glycerol nanofluid at 1% concentration in vertical orientation provides the most significant performance enhancement.

Keywords: Pulsating heat pipe, Nickel nanofluid, Thermal resistance, Nanoparticle concentration, Inclination angle.

*corresponding author: ashkan.ghafouri@iau.ac.ir

Cite this article as: Farzad Lotfi-zadeh, Ashkan Ghafouri, Experimental Study of the Effects of Nickel/Water-Glycerol Nanofluid Concentration and Inclination Angle on the Performance of a Pulsating Heat Pipe. **Journal of Energy Conversion, 2026, 13(2), 35-45**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]