

بررسی و شبیه‌سازی کاربرد نانوذرات در خنک‌کاری تجهیزات ماهواره استفاده همزمان نانوسیال و لوله حرارتی با سه اواپراتور

حمید فاضلی^۱، پیام رحیم‌مثنائی^۲، مهران شهریاری^۳، ساجده مدنی^۴

۱ دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران، fazeli@mut.ac.ir

۲ کارشناس ارشد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی^(ع) شهر ری، تهران

۳ مربی، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران

۴ کارشناس ارشد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۱۵

چکیده

مقاله حاضر به مطالعه تأثیر نانوسیال بر عملکرد لوله حرارتی با سه اواپراتور در کاربردهای خنک‌کاری تجهیزات ماهواره می‌پردازد. نانوذرات مورد استفاده اکسید مس و تیتانیوم می‌باشند. عبارت‌های توزیع دمایی سطح لوله حرارتی که با روش جداسازی متغیرهای به روش تحلیلی به دست می‌آیند شامل سری‌هایی نامتناهی است که به کمک نرم‌افزار متلب و اعمال خواص نانوسیال‌ها حل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیال به جای آب می‌واند سبب کاهش بیشتر دمای تجهیزات ماهواره و یکنواخت‌تر شدن دما گردد. همچنین ملاحظه شد که افزایش غلظت نانوذره و کاهش قطر آن تأثیر شگرفی در کاهش مقاومت حرارتی و در پی آن بهبود عملکرد لوله حرارتی دارد. در بهترین حالت افزایش غلظت نانوذره ۱۰ نانومتری اکسید مس تا ۸ درصد باعث افزایش ضریب انتقال حرارت لوله حرارتی تا ۷۵ درصد می‌گردد. به کارگیری نانوسیال باعث می‌شود سطح انتقال حرارت کمتری مورد نیاز باشد، لذا وزن لوله حرارتی در بهترین شرایط (نانوذرات اکسید مس ۸ درصد با قطر ۱۰ نانومتر) تا ۳۵ درصد کاهش می‌یابد. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد نانوذرات اکسید فلزات می‌توانند پتانسیل بالایی در کاربردهای خنک‌کاری تجهیزات فضایی داشته باشد.

واژگان کلیدی

نانوسیال، لوله حرارتی، تجهیزات ماهواره، خنک‌کاری

۱. مقدمه

تبدیل‌کننده‌های فرکانس، تقویت‌کننده‌ها، مولد قدرت و جز این‌ها باید از سیستم خارج گردد تا شرایط دمایی مناسب برای عملکرد

از جمله عوامل مؤثر در عملکرد صحیح ماهواره‌ها کنترل حرارت در آنهاست. گرمای تولیدشده توسط تجهیزات الکترونیکی مانند

آنها فراهم شود. لوله‌های حرارتی به دلیل انتقال حرارت بالا و عدم نیاز به انرژی خارجی یکی از مبدل‌های حرارتی رایج در دفع حرارت تولیدشده می‌باشند که معمولاً در ماهواره‌ها با چند اواپراتور (منبع حرارتی) طراحی می‌گردند. عملکرد لوله حرارتی توسط برخی پژوهشگران در کاربردهای فضایی مطالعه شده است [۱-۳]. پارک (۱۹۹۷) لوله حرارتی استوانه‌ای با دو منبع حرارتی را به صورت عددی و آزمایشگاهی مطالعه کرد و نشان داد که باید منبع حرارتی با دمای بالاتر در مجاورت کندانسور قرار گیرد تا توزیع دمای یکنواخت‌تر روی سطح لوله حرارتی و تجهیزات ماهواره فراهم شود [۱]. ها و همکاران (۲۰۰۳) لوله حرارتی شیاری را برای کنترل دمای تجهیزات ماهواره آزمایش کردند و نشان دادند که ویژگی‌های لوله حرارتی می‌تواند در خنک‌کاری این تجهیزات مفید باشد [۲]. استفاده همزمان لوله حرارتی و ماده تغییر فاز در فضاپیما توسط کیم و همکاران (۲۰۱۳) به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. این پژوهشگران نشان دادند که حداکثر و حداقل دما در فضاپیما می‌تواند به ترتیب کاهش و افزایش یابد و در نتیجه توزیع یکنواخت‌تری از دما حاصل شود [۳].

استفاده از سیالات خنک‌کننده متداول مانند آب و آمونیاک به دلیل خواص گرمایی ضعیف همواره یکی از عوامل محدودکننده عملکرد لوله‌های حرارتی مطرح بوده است [۴]. از جمله روش‌های مقابله با این محدودیت افزودن نانوذره به سیال پایه است که سبب افزایش ضریب هدایت آنها می‌گردد. چنین سوسپانسیونی برای نخستین بار توسط چوی مطرح و نام نانوسیال بر آن نهاده شد [۵]. به سبب چنین ویژگی ممتاز نانوسیال، پژوهشگران تلاش کردند تا کاربرد آن را در عملکرد لوله حرارتی مطالعه کنند. بسیاری از این مطالعات توسط علوی و همکاران [۶] و سروشکومار و همکاران [۷] مرور شده است. اولین تحقیق آزمایشگاهی در این زمینه توسط چین و همکاران (۲۰۰۳) انجام شد [۸]. این پژوهشگران نانوذرات طلا با قطر متوسط ۱۷ نانومتر را در آب مخلوط کردند و نشان دادند که نانوسیال آب - طلا می‌تواند سبب کاهش مقاومت حرارتی در لوله حرارتی دیسکی شکل شود. شفاهی و همکاران (۲۰۱۰) به کمک حل تحلیلی تأثیر سه نوع نانوذره آلومینا، اکسید تیتانیوم و اکسید مس را بر عملکرد لوله‌های حرارتی استوانه‌ای و دیسکی مورد ارزیابی قرار دادند [۹]. نتایج آنها نشان داد که استفاده از نانوذرات در سیال

پایه امکان افزایش عملکرد لوله حرارتی را با کاهش مقاومت حرارتی در ناحیه متخلخل فراهم می‌آورد. عزیزاد و همکاران (۲۰۱۲) عملکرد حرارتی، رفتار گذرا و شاخصه‌های راه‌اندازی لوله حرارتی را برای لوله حرارتی دیسکی در حضور نانوذرات بررسی و گزارش کردند که نانوسیال می‌تواند سبب بهبود عملکرد لوله حرارتی در فرایند گذرا گردد [۱۰]. سای و همکاران (۲۰۰۴) نشان دادند که افزودن نانوذرات طلا به آب می‌تواند مقاومت حرارتی لوله حرارتی استوانه‌ای را بین ۲۰ تا ۳۷ درصد کاهش دهد [۱۱]. عملکرد لوله حرارتی با محیط متخلخل پودری در حضور نانوسیال آب - اکسید مس توسط کومرسن و همکاران (۲۰۱۴) به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که افزودن ۱ درصد حجمی نانوذره مقاومت حرارتی را تا ۶۶/۱ درصد کاهش می‌دهد [۱۲]. کانگ و همکاران (۲۰۰۹) کاربرد نانوذرات نقره در لوله حرارتی استوانه‌ای را مطالعه و گزارش کردند سوسپانسیون آب - نقره می‌تواند اختلاف دمای کندانسور و اواپراتور را در محدوده حرارت دریافتی ۳۰ تا ۵۰ وات به مقدار ۰/۵۶ تا ۰/۶۵ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد [۱۳]. هانگ و همکاران (۲۰۱۲) آزمایش‌هایی را با لوله حرارتی استوانه‌ای در حضور نانوسیال آلومینا با غلظت‌های حجمی مختلف (۰/۵، ۱ و ۳ درصد) انجام دادند [۱۴]. قطر خارجی لوله حرارتی ۹/۵۲ میلی‌متر بود و طول‌های مختلف ۰/۳، ۰/۴۵ و ۰/۶۵ متر آزمایش شدند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که بهبود عملکرد لوله حرارتی به طول لوله حرارتی وابسته است و بهترین افزایش عملکرد با مقدار ۵۶/۳ درصد مربوط به لوله حرارتی با طول ۰/۴۵ متر است. پوترا و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر انواع نانوسیال (آب - آلومینا، اتیلن گلیکل - آلومینا، آب - اکسید تیتانیوم، اتیلن گلیکل - اکسید تیتانیوم و اتیلن گلیکل - اکسید مس) را با غلظت‌های حجمی متفاوت ۱ تا ۵ درصد بر لوله حرارتی با محیط متخلخل سیمی ارزیابی و مشاهده کردند بهترین عملکرد لوله حرارتی با استفاده از نانوذره آب - اکسید آلومینا با غلظت ۵ درصد به دست می‌آید [۱۵]. همچنین آزمایش‌ها نشان دادند که استفاده از نانوذره سبب شکل‌گیری لایه بسیار نازکی از نانوذرات بر شبکه سیمی و به بهبود خواص موئینگی محیط متخلخل منجر می‌شود.

پژوهشگرانی عملکرد لوله حرارتی را با داشتن چند اواپراتور (منبع حرارتی) و سیال کاری آب به صورت عددی، تحلیلی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۶-۱۸]. شبرگرد و فخری

سطح، ضریب انتقال حرارت، مقاومت حرارتی و اندازه لوله حرارتی در حضور نانوذره با غلظت‌ها و اندازه‌های مختلف محاسبه شدند و نشان داده شد که می‌توان از نانوسیال به‌عنوان جایگزین مناسب سیالات معمولی در کاربردهای خنک‌کاری تجهیزات ماهواره استفاده کرد.

۲. بیان مسئله

لوله حرارتی با سه اویپراتور در بخش الف از شکل ۱ نمایش داده شده است. هر یک از اویپراتورها می‌توانند محل قرارگیری یکی از تجهیزات ماهواره باشند که باید گرمای خود را تخلیه نمایند. گرمای ایجادشده در این تجهیزات سبب افزایش دما و فشار مایع در ناحیه متخلخل می‌شود. مایع پرفشار در سطح مشترک محیط متخلخل و ناحیه بخار به بخار پرفشار تبدیل می‌گردد و به‌سمت ناحیه کندانسور حرکت می‌کند. در این ناحیه، بخار گرمای خود را از دست می‌دهد و به‌صورت مایع به ناحیه متخلخل وارد می‌گردد. اختلاف فشار ایجادشده در اثر خاصیت موئینگی مایع را برای خنک‌کاری به‌سمت نواحی اویپراتورها سوق می‌دهد تا یک چرخه کاری لوله حرارتی تکمیل گردد. سیستم خنک‌کاری کندانسور با مایع خنک‌کاری به‌صورت شماتیک در بخش ب از شکل ۱ نمایش داده شده است. آب خنک‌کاری از انتهای کندانسور وارد ژاکت خنک‌کاری می‌شود و پس از دریافت حرارت از طرف دیگر خارج می‌شود. ژاکت خنک‌کاری یک استوانه هم‌طول با کندانسور می‌باشد که قطر قاعده بزرگتری دارد و عایق شده است.

طول قسمت‌های اویپراتور، آدیاباتیک و کندانسور در لوله مورد مطالعه به‌ترتیب ۷، ۳ و ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد. قطر داخلی لوله، قطر خارجی لوله و قطر ناحیه بخار به‌ترتیب ۱۵/۸، ۱۳/۸ و ۱۱/۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای توضیح یکنواخت‌تر دما، همان‌طور که پارک پیشنهاد داد [۱]، اویپراتورها با شار حرارتی بالاتر در فاصله نزدیک‌تر به کندانسور تعبیه شدند. به این منظور گرمای دریافتی اویپراتور سوم دو برابر اویپراتور دوم و گرمای دریافتی اویپراتور دوم دو برابر اویپراتور اول در نظر گرفته شد.

۳. فرضیات و معادلات حاکم

به‌منظور مدلسازی مسئله نکات ذیل به‌عنوان فرضیات اولیه در نظر گرفته می‌شود:

۱. فرایند انتقال حرارت در شرایط پایدار رخ می‌دهد.

(۲۰۱۰) با کوپل‌کردن جریان داخل محیط متخلخل و هدایت حرارتی در دیواره، یک حل تحلیلی دوبعدی برای محاسبه میدان دما ارائه کردند [۱۶]. مدل آنها قادر بود منبع حرارتی گسسته را به‌عنوان اویپراتور در لوله حرارتی شبیه‌سازی کند. چن و فخری (۱۹۹۰) لوله حرارتی با چند اویپراتور را به‌صورت عددی مطالعه کردند [۱۷]. این پژوهشگران فرض کردند دمای ناحیه بخار ثابت است و تنها سازوکار انتقال حرارت در ناحیه متخلخل هدایت می‌باشد. لفور و لالماند (۲۰۰۶) یک مدل تحلیلی برای لوله حرارتی در مقیاس میکرو پیشنهاد دادند که قادر بود علاوه بر جریان مایع و بخار میدان دما را در دیواره لوله حرارتی پیش‌بینی کند [۱۸].

با توجه به مسئله مورد مطالعه که تأثیر نانوسیال در خنک‌کاری منابع حرارتی به‌کمک لوله حرارتی می‌باشد، چندین مطالعه در مورد کاربرد نانوسیال بر خنک‌کاری منابع حرارتی گسسته در ادبیات فن موجود است [۱۹-۲۴]. به‌عنوان یک مثال از این مطالعات، مشایی و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر نانوسیال آب - آلومینا را در خنک‌کاری منابع حرارتی گسسته در مجرای متخلخل به‌صورت عددی بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از نانوسیال به‌طور چشمگیری دمای نقاط داغ را کاهش می‌دهد و باعث ایجاد پروفیل دمای یکنواخت‌تری می‌شود [۲۴].

به‌تازگی کاربرد نانوسیال در عملکرد حرارتی لوله حرارتی با دو اویپراتور به‌صورت تحلیلی و عددی توسط مشایی و همکاران مطالعه شده [۲۵-۲۶]. نتایج نشان می‌دهد که دمای سطح دو اویپراتور کاهش می‌یابد و عملکرد لوله حرارتی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. هیچ‌یک از مطالعات ذکرشده به شبیه‌سازی تأثیر نانوسیال بر عملکرد لوله حرارتی با بیش از دو اویپراتور نپرداخته است. با توجه به ویژگی مفید نانوسیال به‌عنوان سیال خنک‌کننده و همچنین کاربرد لوله‌های حرارتی با چند اویپراتور در ماهواره‌ها، این مطالعه به بررسی عملکرد لوله حرارتی برای خنک‌کاری تجهیزات ماهواره می‌پردازد که به‌صورت گسسته با دیواره لوله حرارتی در قسمت اویپراتورها در تماس می‌باشند.

در مطالعه حاضر مدل دوبعدی، که توسط شبگرد و فخری ارائه شده است [۱۶]، توسعه داده شده و خواص نانوسیال آب - آلومینا و آب - اکسید تیتانیوم در آن ادغام شده است. به‌منظور اعتبارسنجی کد توسعه داده شده، مقایسه‌ای بین نتایج مطالعه حاضر با داده‌های آزمایشگاهی انجام شده است. پروفیل‌های دمای

۲. ناحیه متخلخل به‌طور کامل با مایع اشباع شده است، به‌عبارت دیگر فرض می‌شود پدیده خشک‌شدگی در این ناحیه به‌وقوع نمی‌پیوندد و تغییر فازها در سطح مشترک ناحیه بخار و متخلخل رخ می‌دهد.

۳. تنها سازوکار انتقال حرارت در ناحیه محیط متخلخل هدایت حرارتی می‌باشد.

۴. ضریب هدایت حرارتی نانوذره، سیال پایه و دیواره لوله حرارتی ثابت فرض می‌شود.

۵. بخار در سراسر لوله حرارتی اشباع در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین از تغییرات آن، که بسیار ناچیز است، چشم‌پوشی می‌شود [۳۰-۲۷].

۶. نانوذرات به‌صورت یکنواخت در ناحیه متخلخل حضور دارند و با سیال پایه در تعادل گرمایی می‌باشند [۴، ۱۰-۹].

قبل از مدل‌سازی مسئله مورد مطالعه، شبگرد و فخری [۱۶] از تغییر متغیر زیر برای متغیر دما استفاده کردند تا شرط مرزی دیواره - محیط متخلخل همگن گردد.

$$\theta = T - T_v \quad (1)$$

که متغیرهای θ و T_v به ترتیب دمای بخار اشباع و دمای نسبی می‌باشند. با توجه به فرضیات ذکر شده، معادله دیواره لوله حرارتی و شرایط مرزی مرتبط به‌صورت زیر می‌باشد [۱۶]:

معادله انرژی در بخش دیواره لوله حرارتی:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

شرایط مرزی:

$$At x = 0 \text{ and } x = L \rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$At r = r_w \rightarrow k_{wall} \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = \quad (4)$$

در روابط ۵، k ، q'' ، r_o ، r_w ، r_v ، Le ، La ، La ، Lc به ترتیب ضریب هدایت حرارتی، شار حرارتی، شعاع خارجی لوله، شعاع داخلی لوله، شعاع ناحیه بخار، طول ناحیه اواپراتور، طول ناحیه آدیاباتیک و طول ناحیه کندانسور می‌باشد. همچنین q''_c شار حرارتی خروجی از کندانسور است که از رابطه ۶ به‌دست می‌آید [۱۶]. همچنین هدایت حرارتی مؤثر محیط متخلخل با شبکه مسی (k_{wick}) از رابطه ۷ محاسبه می‌شود [۳۱]. باید توجه داشت که ε ، k_{nf} و k_s به ترتیب ضریب تخلخل، ضریب

هدایت حرارتی نانوسیال و ضریب هدایت حرارتی ماتریکس جامد محیط متخلخل می‌باشند. با در نظر گرفتن این فرض که نانوذرات به‌خوبی در سیال پایه مخلوط شده است، می‌توان از مدل ماکسول برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال استفاده کرد که با رابطه ۸ معرفی می‌گردد.

$$at r = r_o \rightarrow q''_o(x) = -k_{wall} \frac{\partial \theta}{\partial r} =$$

$$\begin{aligned} q''_{e1} & 0 \leq x \leq Le_1 \\ q''_{e2} & Le_1 + La \leq x \leq Le_1 + La + Le_2 \\ q''_{e3} & Le_1 + 2La + Le_2 \leq x \leq \\ & Le_1 + 2La + Le + Le_3 \end{aligned} \quad (5)$$

$$q''_{e3} \quad Le_1 + 3La + Le_2 + Le_3 \leq x \leq \\ Le_1 + 3La + Le_2 + Le_3 + Lc$$

$$0 \quad others \\ q''_c = \frac{q''_{e2} Le_2 + q''_{e3} Le_2 + q''_{e3} Le_2}{Lc} \quad (6)$$

$$k_{eff} = \frac{k_{nf} [(k_{nf} + k_s) - (1 - \varepsilon)(k_{nf} - k_s)]}{(k_{nf} + k_s) - (1 - \varepsilon)(k_{nf} - k_s)} \quad (7)$$

$$k_{maxwell} = \left[\frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\varphi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\varphi} \right] k_f \quad (8)$$

به‌طوری‌که در این رابطه k_p و k_f به ترتیب ضریب هدایت حرارتی نانوذره و سیال پایه و φ کسر حجمی نانوذره است. در حالت واقعی هر نانوسیال با قطر d_p توسط نانولایه با قطر t احاطه می‌شود. لذا مدل اصلاح شده ماکسول با رابطه ۹ معرفی می‌شود [۳۲]:

$$k_{nf} = \left[\frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)(1 + \beta)^3 \varphi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)(1 + \beta)^3 \varphi} \right] k_f \quad (9)$$

که در آن β از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود:

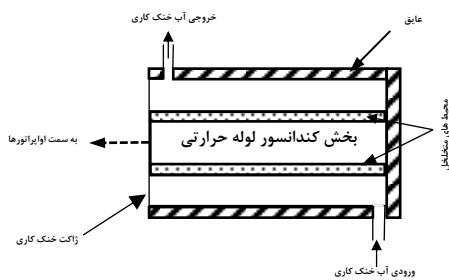
$$\beta = 2t / d_p \quad (10)$$

مزیت مدل اصلاح شده این است که می‌تواند اثر قطر نانوذره را بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال و در پی آن رفتار انتقال حرارت آنها پیش‌بینی نماید.

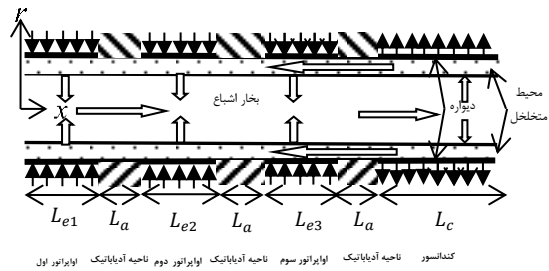
۴. حل تحلیلی و اعتبارسنجی

شبگرد و فخری [۱۶] معادله انرژی و شرایط مرزی وابسته به آن را با روش جداسازی متغیرها حل نمودند. در مطالعه حاضر حل

براساس فرضیات مطرح‌شده در بخش قبل، میدان دمای دیواره لوله حرارتی با رابطه ۱۱ داده می‌شود [۱۶]:



تحلیلی این محققان برای لوله حرارتی با سه اواپراتور بازنویسی و روابط مربوط به محاسبات ضریب هدایتی نانوسیال اعمال می‌شود.



شکل ۱. نمایش از الف) لوله حرارتی با سه اواپراتور (منبع حرارتی)، ب) شماتیک خنک کاری کندانسور

۱۱ بررسی شود. بنابراین یک لوله حرارتی با طول ۰/۴۵ متر و سه اواپراتور در نظر گرفته و پروفیل دمای دیواره لوله حرارتی برای تعداد مختلف گره در راستای طول رسم شد که در شکل ۲ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از ۱۰ گره در امتداد لوله حرارتی نمی‌تواند مقدار دما را در بعضی از نقاط سطح به‌طور صحیح پیش‌بینی کند؛ در حالی که وقتی تعداد گره‌ها از ۲۰ فراتر می‌رود نتایج به‌دست آمده تقریباً مستقل از تعداد گره‌ها می‌شوند. واضح است هرچه تعداد جملات در سری بیشتر شود، نتایج دقت بیشتری دارند، اما هزینه محاسباتی نیز افزایش پیدا می‌کند. به‌همین منظور مثال مطرح شده در استقلال گره‌ها برای بررسی استقلال تعداد جملات سری نیز در نظر گرفته می‌شود تا مقدار بهینه برای تعداد آنها تعیین شود. شکل ۳ تأثیر تعداد جملات سری را بر دمای دیواره لوله حرارتی در مثال مطرح شده نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که استفاده از ۲۰ جمله در سری می‌تواند نتایج را با دقت خوبی پیش‌بینی نماید.

به‌منظور حصول اطمینان از مدلسازی صورت گرفته مقایسه‌ای بین نتایج مطالعه حاضر و داده‌های موجود در ادبیات فن انجام شده است. با توجه به فقدان اطلاعات در مورد کاربرد نانوسیال در لوله حرارتی با چند اواپراتور، مدل توسعه‌یافته برای لوله حرارتی با یک اواپراتور اجرایی شد. این امر با صفر قرار دادن گرمای اعمالی بر اواپراتورهای دوم و سوم محقق شد (معادله ۵). نتایج آزمایشگاهی لیو و زوو [۳۳] برای اعتبارسنجی مدلسازی انجام شده مورد استفاده قرار گرفت. در آزمایش‌های آنها، طول، قطر بیرونی، ضخامت دیواره لوله حرارتی به ترتیب ۳۵۰، ۸ و ۰/۶ میلی‌متر و طول هر یک از بخش‌های اواپراتور و کندانسور ۱۰۰

$$T(r, x) = \sum_{n=0}^m \cos(\lambda_n z) \{ C_n [I_0(\lambda_n r) + E_n K_0(\lambda_n r)] \} + T_v \quad (11)$$

به‌طوری که m ، I_0 و K_0 به ترتیب تعداد جملات سری، توابع بسل اصلاح شده نوع اول و دوم از مرتبه صفر می‌باشند. همچنین ثابت λ_n ، C_n و E_n از روابط زیر حاصل می‌شوند [۱۶]:

$$\lambda_n = \frac{n\pi}{L} \quad (12)$$

$$E_n = \frac{\lambda_n I_1(\lambda_n r_w) - k_{wick}}{\lambda_n I_1(\lambda_n r_w) + k_{wall} r_w \log(r_w / r_v)} \times \frac{K_0(\lambda_n r_w)}{k_{wick} K_0(\lambda_n r_w)} \quad (13)$$

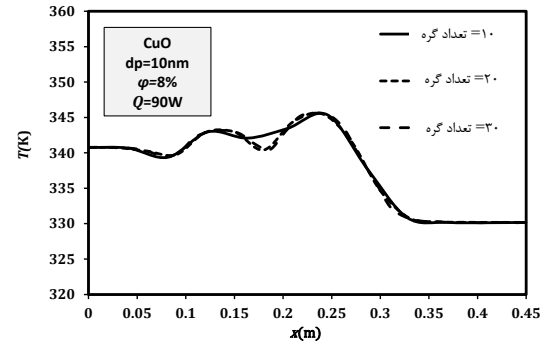
$$C_n = \frac{1}{-k_{wall} \left(\frac{L}{2} \right) \lambda_n [I_1(\lambda_n r_w) - E_n K_0(\lambda_n r_w)]} \times \left\{ \int_0^{L_{e1}} q_{e1}'' \cos(\lambda_n x) dx + \int_{L_{e1}+L_a}^{L_{e1}+L_a+L_{e2}} q_{e2}'' \cos(\lambda_n x) dx \right. \quad (14)$$

$$\left. \int_{L_{e1}+2L_a+L_{e2}}^{L_{e1}+2L_a+L_{e2}+L_{e3}} q_{e2}'' \cos(\lambda_n x) dx + \int_{L_{e1}+3L_a+L_{e2}+L_{e3}}^{L_{e1}+3L_a+L_{e2}+L_{e3}+L_c} q_{e3}'' \cos(\lambda_n x) dx \right.$$

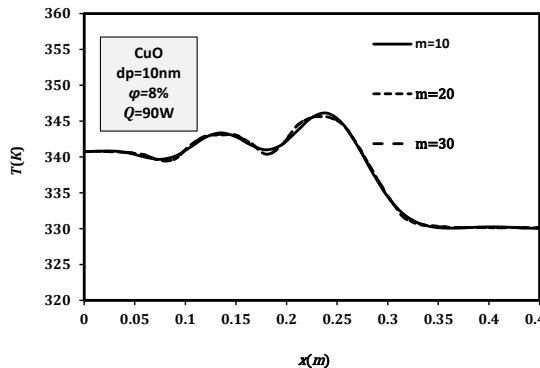
به‌منظور حل مسئله کد کامپیوتری با زبان برنامه‌نویسی متلب توسعه داده شده است تا علاوه بر محاسبات روابط ۱۱ تا ۱۴ ضریب انتقال حرارت نانوسیال را نیز براساس قطر و غلظت نانوذره محاسبه و در عبارات‌های حل تحلیلی اعمال کند. قبل از ارزیابی کد نوشته‌شده، باید استقلال نتایج از تعداد گره‌های در نظر گرفته شده در امتداد طول لوله حرارتی و جملات لازم در سری رابطه

میلی‌متر بود. همچنین نانوسیال آب - اکسید مس با غلظت حجمی ۱ درصد به‌عنوان سیال کاری مورد استفاده قرار گرفت. نمودار دمای سطح لوله حرارتی که بر مبنای نتایج مطالعه حاضر و داده‌های آزمایشگاهی لیو و زوو [۳۳] حاصل شد، در شکل ۴

نشان داده شده است. نانوذره مورد استفاده اکسید مس با غلظت ۱ درصد می‌باشد و اعتبارسنجی برای سه شار حرارتی مختلف انجام گرفت. همان‌طور که دیده می‌شود نتایج همپوشانی خوبی با هم دارند که مبین درستی فرضیات و مدل‌سازی انجام شده می‌باشد.



شکل ۲. نمودار اثر تعداد گره‌ها در راستای طولی لوله حرارتی بر دمای سطح



شکل ۳. بررسی استقلال دمای دیواره لوله حرارتی از تعداد جملات موجود در سری رابطه ۱۱

۵. نتایج

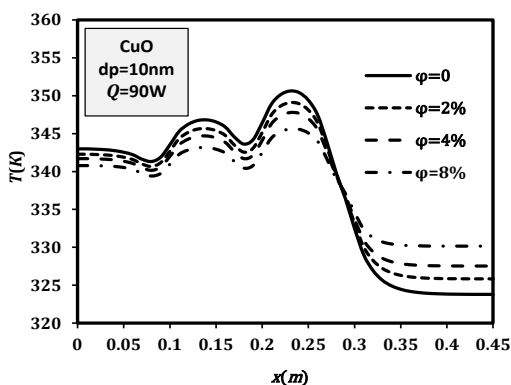
به‌منظور بررسی کاربرد نانوسیال در خنک‌کاری تجهیزات ماهواره، شاخص‌های حرارتی لوله حرارتی با سه اواپراتور در حضور نانوسیالات آب - اکسید مس و آب - اکسید تیتانیوم ارزیابی می‌شود و مقایسه‌هایی با سیال پایه (آب) انجام می‌پذیرد. این شاخص‌ها شامل دمای سطح لوله حرارتی، ضریب انتقال حرارت و مقاومت حرارتی می‌باشند. در انتها نیز اثر حضور نانوذره بر اندازه لوله حرارتی بحث می‌گردد.

۵-۱. میدان دما

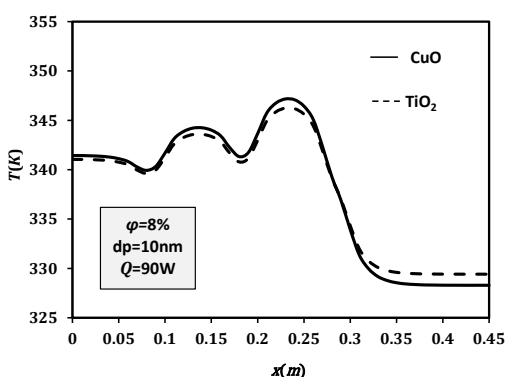
با توجه به علاقه‌مندی موجود به کاهش دمای تجهیزات ماهواره، مهمترین بخش از میدان دما در لوله حرارتی دمای سطح آن می‌باشد که با این تجهیزات در تماس است. لذا پروفیل‌های دمای سطح لوله حرارتی برای نانوسیال آب - اکسید مس با غلظت‌های مختلف در شکل ۵ رسم شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، استفاده از نانوسیال دمای سطح در نواحی اواپراتورها را کاهش می‌دهد در حالی که باعث افزایش دما در قسمت کندانسور می‌گردد. این امر توسط لیو و زوو [۳۳] نیز برای لوله حرارتی با یک اواپراتور گزارش شده است. بنابراین می‌توان ملاحظه کرد که افزودن نانوذره به سیال معمولی باعث می‌گردد پروفیل‌های دمای یکنواخت‌تری حاصل گردد. نکته قابل توجه دیگر در شکل ۵

کاهش قابل ملاحظه دمای نقاط داغ با افزایش کسر حجمی نانوذره است. مثلاً افزایش غلظت نانوذرات اکسید مس با قطر ۱۰ نانومتر تا ۸ درصد می‌تواند بالاترین دمای سطح لوله حرارتی را، که به اواپراتور سوم مربوط می‌شود، تا ۵ کلون کاهش دهد. تأثیر قطر نانوذره بر توزیع دمای سطح لوله حرارتی در شکل ۶ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش اندازه نانوذره باعث افزایش دما در ناحیه کندانسور می‌شود، در حالی که دمای سطح در نواحی اواپراتورها را کاهش می‌دهد. لذا نقش کاهش قطر نانوذره در دمای دیواره همانند نقش افزایش کسر حجمی است که هر دو ناشی از افزایش ضریب هدایت حرارتی موثر سیال می‌باشند. نکته دیگر که می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد این است که با افزودن نانوذرات با قطرهای بزرگ، دمای دیواره لوله حرارتی نسبت به حالتی که سیال پایه استفاده می‌شود، به‌نحوی که کاهش قطر نانوذره تا این اندازه مؤثر نیست. دلیل این امر را می‌توان ناشی از افزایش ضریب هدایت حرارتی مؤثر ناحیه متخلخل در اثر رسوب نانوذرات در این ناحیه دانست. با توجه به شکل ۶ می‌توان ملاحظه کرد که تأثیر حضور نانوذره بر دمای سطح نواحی کندانسور و اواپراتورها، که انتقال حرارت بیشتر مورد نیاز است، چشمگیرتر از نواحی آدیاباتیک است. به‌عنوان مثال در حالی که استفاده نانوسیال آب - اکسید مس با غلظت ۸ درصد و قطر ۱۰ نانومتر باعث می‌شود حداکثر دمای اواپراتور سوم و کندانسور

مقایسه با اکسید تیتانیوم می‌شود، بر کاهش دمای نواحی اواپراتورها نیز مؤثرتر است. این در حالی است که نوع نانوذره تأثیر محسوسی بر دمای سطح نواحی آدیباتیک ندارد. با توجه به شکل ۷ و مقایسه آن با شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود نوع نانوذره در مقایسه با قطر و کسر حجمی تأثیر کمتری بر دمای سطح دارد. به‌عنوان مثال بیشترین اختلاف بین دو نمودار در شکل ۷ کمتر از ۱ کلوین می‌باشد که در میانه اواپراتور سوم دیده می‌شود.



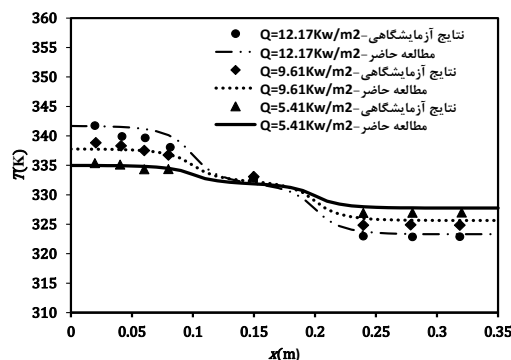
شکل ۵. اثر غلظت نانوذره بر دمای سطح لوله حرارتی



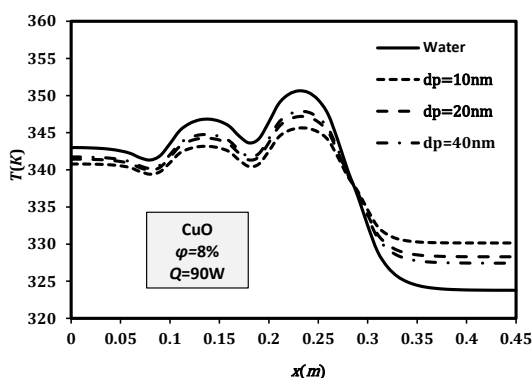
شکل ۷. اثر نوع نانوذره بر دمای سطح لوله حرارتی

۲۱ کلوین می‌باشد در حالی که این مقدار برای نانوسیال آب - اکسید مس با غلظت‌های ۲، ۴ و ۸ درصد به ترتیب ۱۸/۲، ۱۵/۸ و ۱۲ کلوین می‌باشد. تأثیر قطر نانوذره بر اختلاف دمای کندانسور و اواپراتور در غلظت ثابت و شارهای مختلف در شکل ۹ نمایش داده شده است. رفتار نمودارها حاکی است که ذرات با قطر کوچکتر تأثیر بیشتری بر یکنواختی دمای سطح لوله حرارتی دارند. اختلاف دمای کندانسور و اواپراتورها برای سیال کاری آب و شار حرارتی ۹۰ وات از ۲۱ کلوین فراتر می‌رود در حالی که افزودن ۸ درصد نانوذره با قطر ۱۰ نانومتر باعث می‌گردد تا این مقدار حدود ۴۸ درصد کاهش یابد. شکل ۱۰ اثر نوع نانوذره را بر یکنواختی دما

به ترتیب ۵/۰۱ و ۶/۳۶ کلوین تغییر کند، دمای نواحی آدیباتیک بیشتر از ۳ کلوین دستخوش تغییر نمی‌شود. شکل ۷ نمودارهای دمای سطح لوله حرارتی را برای دو نوع نانوذره اکسید مس و اکسید تیتانیوم با کسر حجمی و قطر ذره مشابه در شرایط حرارتی یکسان نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اثرگذاری نوع نانوذره بر دمای سطح به نواحی لوله حرارتی بستگی دارد. حضور نانوذره اکسید مس علاوه بر اینکه سبب افزایش بیشتر دمای کندانسور در



شکل ۴. اعتبارسنجی نتایج مطالعه حاضر با داده‌های آزمایشگاهی [۳۳]



شکل ۶. اثر قطر نانوذره بر دمای سطح لوله حرارتی

به‌منظور بررسی تأثیر نانوسیال بر یکنواختی دمای سطح لوله حرارتی، اختلاف دمای نواحی کندانسور و اواپراتورها مورد بررسی قرار می‌گیرد که برای لوله حرارتی با سه اواپراتور از رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود. شکل ۸ اختلاف دمای نواحی کندانسور و اواپراتور را در شارهای حرارتی مختلف برای نانوذره اکسید مس با کسرهای حجمی مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف دمای اواپراتور و کندانسور با افزایش کسر حجمی نانوذره برای تمام شارهای حرارتی کاهش می‌یابد که حاکی از یکنواخت شدن دمای سطح لوله حرارتی و بهبود عملکرد آن دارد. به‌عنوان مثال اختلاف دمای نواحی کندانسور و اواپراتورها برای آب حدود

نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، استفاده از نانوذره اکسید مس در مقایسه با اکسید تیتانیوم باعث اختلاف دمای کمتری در سطح لوله حرارتی برای تمام کسرهای حجمی می‌گردد و هرچه کسر حجمی افزایش می‌یابد، تفاوت تأثیر نانوذرات اکسید مس با اکسید تیتانیوم بیشتر نمایان می‌شود.

$$\Delta T = \frac{\int_0^{Le_1} T dx}{Le_1 + Le_2 + Le_3} + \frac{\int_0^{Le_1} T dx + \int_0^{Le_1+La+Le_2} T dx}{Le_1 + Le_2 + Le_3} \quad (15)$$

$$+ \frac{\int_0^{Le_1+2La+Le_2+Le_3} T dx}{Le_1 + Le_2 + Le_3} - \frac{\int_0^{Le_1+3La+Le_2+Le_3+Lc} T dx}{Le_1 + Le_2 + Le_3}$$

۲-۵. ضریب انتقال حرارت

ضریب انتقال حرارت در هر ناحیه لوله حرارتی به صورت نسبت شار حرارتی به اختلاف دمای بخار و سطح همان ناحیه تعریف می‌شود که برای یک لوله حرارتی با سه اواپراتور از رابطه ۱۶ حاصل می‌شود:

$$h = \frac{\frac{q''_{e1}}{(T_{e1} - T_v)} Le_1 + \frac{q''_{e2}}{(T_{e2} - T_v)} Le_2}{Le_1 + Le_2 + Le_3 + Lc} + \frac{\frac{q''_{e3}}{(T_{e3} - T_v)} Le_3 + \frac{q''_c}{(T_c - T_v)} Lc}{Le_1 + Le_2 + Le_3 + Lc} \quad (16)$$

ضرایب انتقال حرارت در شکل ۱۱ برای دو نانوسیال آب - اکسید مس و آب - اکسید تیتانیوم با غلظت و قطرهای مختلف نانوذره به نمایش در آمده است. مشاهده می‌شود که ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت نانوذره افزایش پیدا می‌کند. مهمترین دلیل افزایش انتقال حرارت افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال است که باعث بهبود ضریب هدایت مؤثر محیط متخلخل سیمی شکل می‌شود. دلائل دیگر نظیر تأثیر نانوذره بر حباب بخار در سطح مشترک محیط متخلخل و بخار و شکل‌گیری لایه (در مقیاس میکرو) در محیط متخلخل نیز بر افزایش بهبود عملکرد لوله حرارتی می‌تواند مؤثر باشد که به‌طور آزمایشگاهی گزارش شده است [۳۴-۳۵]، اما در مطالعه حاضر شبیه‌سازی نمی‌شود. لذا می‌توان انتظار داشت تأثیر نانوسیال بر افزایش انتقال حرارت در لوله حرارتی کمی بیشتر از آنچه باشد که در مطالعه حاضر بررسی می‌گردد. نکات دیگر که در شکل ۱۱ می‌توان

مشاهده نمود افزایش انتقال حرارت با کاهش قطر نانوذره و همچنین تأثیر بیشتر نانوذره اکسید مس بر بهبود انتقال حرارت در مقایسه با نانوذره اکسید تیتانیوم می‌باشد. بنابراین بهترین ضریب انتقال حرارت در بین تمام موارد بررسی شده مربوط به نانوذرات اکسید مس با قطر ۱۰ نانومتر و غلظت ۸ درصد می‌باشد که حدود ۱۷۵۸ وات بر متر مربع کلین می‌باشد. به‌منظور بررسی تأثیر استفاده از نانوسیال بر افزایش انتقال حرارت نسبت به سیال پایه، ضریب انتقال حرارت نسبی به صورت ضریب انتقال حرارت نانوسیال به ضریب انتقال حرارت سیال پایه معرفی می‌گردد که نمودارهای آن در شکل ۱۲ برای هر دو نانوسیال مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به اینکه تمام مقادیر موجود در شکل ۱۲ از واحد بیشتر می‌باشد، می‌توان به اثر مثبت استفاده از نانوسیال بر انتقال حرارت در لوله حرارتی پی برد. از طرف دیگر ضریب انتقال حرارت نسبی تقریباً به صورت خطی با غلظت نانوذره افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال با افزودن ۲، ۴ و ۸ درصد نانوذره اکسید آلومینیوم با قطر ۱۰ نانومتر به سیال پایه انتقال حرارت در لوله حرارتی به ترتیب حدود ۱۵/۶، ۳۲/۹۱ و ۷۴/۲۶ درصد افزایش یابد.

با مقایسه شکل‌های الف و ب از شکل ۱۲ می‌توان دریافت که تأثیر نانوذره اکسید مس بر انتقال حرارت بیشتر از اکسید تیتانیوم است، اما در مجموع اثر نوع نانوذره بر افزایش انتقال حرارت در مقایسه با آثار قطر و غلظت نانوذره به‌طور محسوسی کمتر است و در بیشترین حالت در بین تمام موارد مورد مطالعه تفاوت بین ضریب انتقال حرارت نسبی لوله حرارتی برای اکسید مس و تیتانیوم از ۱۲ درصد فراتر نمی‌رود. یکی دیگر از نکات مهم که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود تأثیر قطر نانوذره بر بهبود انتقال حرارت لوله حرارتی در حضور نانوسیال است. مشاهدات نشان می‌دهد اگرچه با افزایش قطر نانوذره مقدار ضریب انتقال حرارت نسبی کاهش می‌یابد، اما عملاً در قطر نانوذرات بالاتر از ۲۰ نانومتر تأثیر قطر نانوذره کم می‌شود. این نکته همچنین توسط عزیزاده و همکاران [۱۰] برای لوله حرارتی دیسکی شکل در زمان راه‌اندازی گزارش شده است.

۳-۵. مقاومت لوله حرارتی

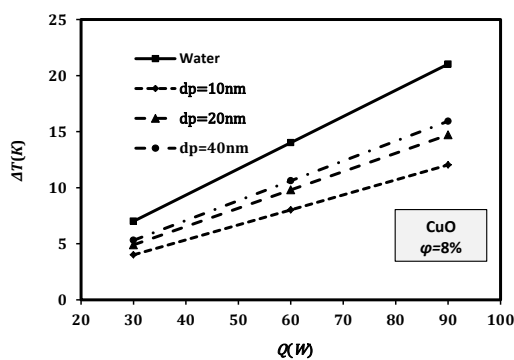
از جمله معیارهای اصلی که برای عملکرد لوله حرارتی مورد بررسی قرار می‌گیرد، مقاومت حرارتی است که به صورت نسبت

حرارتی به صورت تقریباً خطی کاهش پیدا کند. مثلاً برای نانوذره اکسید مس با قطر ۱۰ نانومتر، غلظت‌های ۲، ۴ و ۸ درصد به ترتیب باعث کاهش حدود ۱۴، ۲۵ و ۴۳ درصد در مقاومت حرارتی می‌شود. نکته جالب توجه در شکل ۱۳ اثر افزایش قطر نانوذره بر کاهش مقاومت حرارتی است. برخلاف تأثیر غلظت نانوذره بر مقاومت حرارتی که به صورت تقریباً خطی می‌باشد، تأثیر قطر نانوذره به صورت لگاریتمی است؛ این بدان معناست که اگرچه با افزایش قطر نانوذره مقاومت حرارتی افزایش می‌یابد، اما تأثیر این تغییرات در قطرهای بالاتر محسوس نیست. مثلاً چنانچه در شار حرارتی ۹۰ وات از نانوذرات ۱۰ نانومتری اکسید مس با غلظت ۸ درصد استفاده شود، مقاومت حرارتی نسبی لوله حرارتی حدود ۵۷٪ می‌باشد، در حالی که نانوذرات ۲۰ و ۴۰ نانومتری در شرایط مشابه به ترتیب باعث مقاومت حرارتی نسبی ۷۰٪ و ۷۵٪ می‌شوند. از نکات قابل ملاحظه دیگر که با مقایسه شکل‌های الف و ب ۱۳ قابل استنتاج می‌باشد، اختلاف کم در مقاومت حرارتی نسبی برای دو نوع نانوذره است، چنانکه حداکثر اختلاف بین نتایج متناظر در همه حالات از ۵ درصد فراتر نمی‌رود.

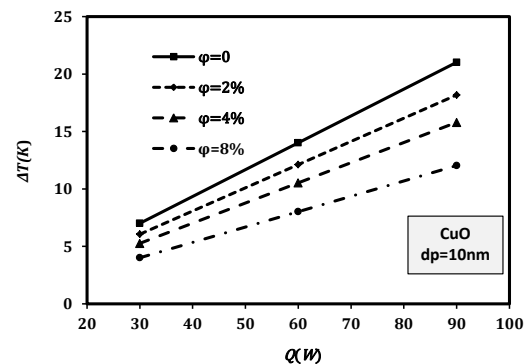
حرارت منتقل شده در لوله حرارتی به اختلاف دمای بین نواحی کندانسور و اواپراتورها معرفی و از رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \quad (17)$$

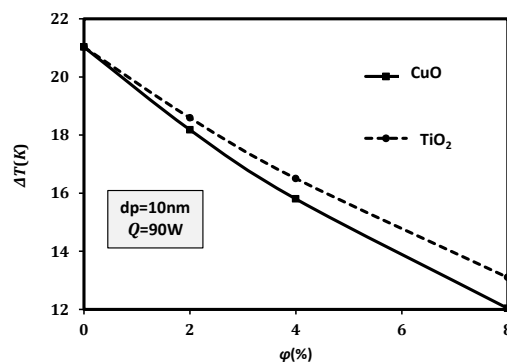
هر اندازه مقاومت حرارتی لوله حرارتی کمتر باشد، نشان‌دهنده این است که قابلیت انتقال حرارت بیشتر در اختلاف دمای یکسان برای لوله حرارتی فراهم می‌باشد. اختلاف دما در لوله حرارتی با سه اواپراتور از رابطه ۱۵ حاصل می‌شود و حرارت دریافتی لوله حرارتی نیز مجموع حرارت‌های جذب شده در اواپراتورها در نظر گرفته می‌شود. با توجه به علاقه‌مندی به تأثیر حضور نانوذره بر مقاومت حرارتی لوله حرارتی، مقاومت حرارتی نسبی معرفی می‌شود که نسبت مقاومت حرارتی لوله حرارتی با استفاده از نانوسیال به مقادیر محاسبه شده برای سیال پایه است. شکل ۱۳ نمودارهای مقاومت حرارتی نسبی را برای دو نوع نانوسیال نشان می‌دهد که برای مقادیر مختلف قطر و غلظت نانوذره فراهم شده است. نتایج نشان می‌دهد حضور نانوذره مقاومت حرارتی را کاهش می‌دهد که به دلیل افزایش ضریب هدایت مؤثر در ناحیه متخلخل است. همچنین افزایش غلظت نانوذره باعث می‌شود مقاومت



شکل ۹. تأثیر قطر نانوذره بر اختلاف دمای بین نواحی کندانسور و اواپراتورها



شکل ۸. تأثیر غلظت نانوذره بر اختلاف دمای بین کندانسور و اواپراتورها

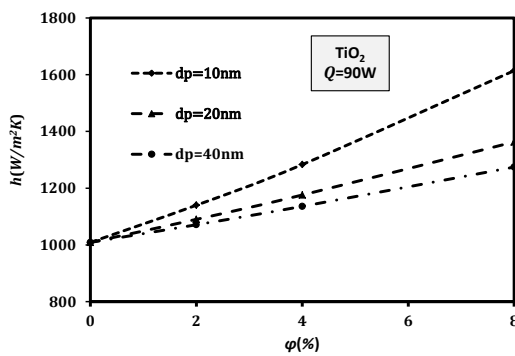


شکل ۱۰. تأثیر نوع نانوذره بر اختلاف دمای بین نواحی کندانسور و اواپراتورها

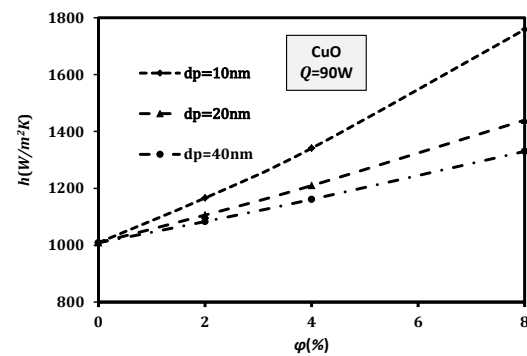
۴-۵. اندازه لوله حرارتی

در بخش‌های قبل نشان داده شد که چگونه افزودن نانوذره می‌تواند بر افزایش انتقال حرارت، کاهش مقاومت حرارتی و در نتیجه بهبود عملکرد لوله حرارتی تأثیر مثبت بگذارد. واضح است که افزایش انتقال حرارت این اجازه را به طراح می‌دهد که بتواند سطح کمتری برای انتقال گرما از تجهیزات ماهواره به قسمت کندانسور در نظر بگیرد. اهمیت این امر زمانی روشن‌تر می‌شود که هزینه پرتاب حدود ۲۰۰۰۰ دلار در کیلوگرم تخمین زده می‌شود [۳۴]. شکل ۱۴ اثر دو نوع نانوذره با قطرهای و غلظت‌های مختلف را بر تغییر طول لوله حرارتی نشان می‌دهد. در این شکل L_0

طول لوله حرارتی برای زمانی است که از آب به‌عنوان سیال کاری استفاده شده است. تأثیر نوع، قطر و غلظت نانوذره بر کاهش طول لوله حرارتی مانند تأثیر این عوامل بر مقاومت حرارتی نسبی می‌باشد، با این تفاوت که از نظر کمی تأثیر آن مقداری کمتر می‌باشد. دلیل این امر این است که در کاهش اندازه لوله حرارتی فرض شد طول نواحی آدیاباتیک بدون تغییر باقی خواهد ماند. بنابراین همان‌طور که در شکل ۱۴ ملاحظه می‌شود، بیشترین کاهش طول لوله حرارتی حدود ۳۵ درصد می‌باشد که مربوط به استفاده از نانوذره اکسید مس با قطر ۱۰ نانومتر و غلظت ۸ درصد است.

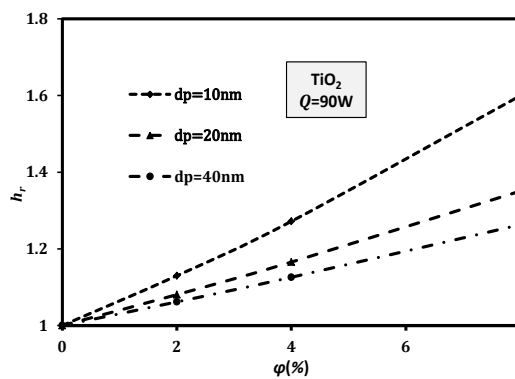


(ب)

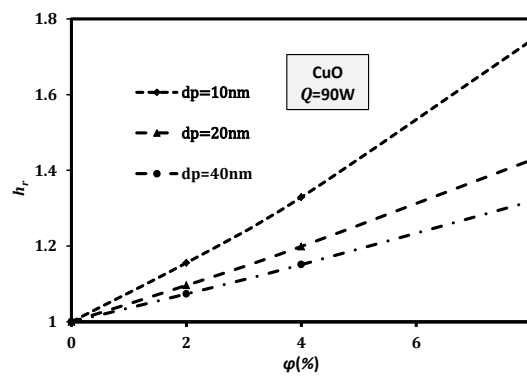


(ف)

شکل ۱۱. تأثیر غلظت و قطر نانوذره بر ضریب انتقال حرارت؛ الف) نانوسیال آب-اکسید مس، ب) نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم



(ب)



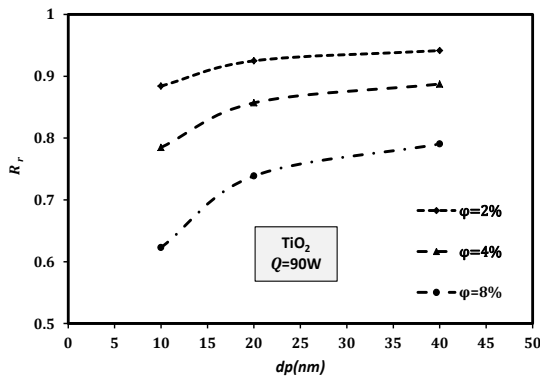
(ف)

شکل ۱۲. تأثیر غلظت و قطر نانوذره بر ضریب انتقال حرارت نسبی؛ الف) نانوسیال آب-اکسید مس، ب) نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم

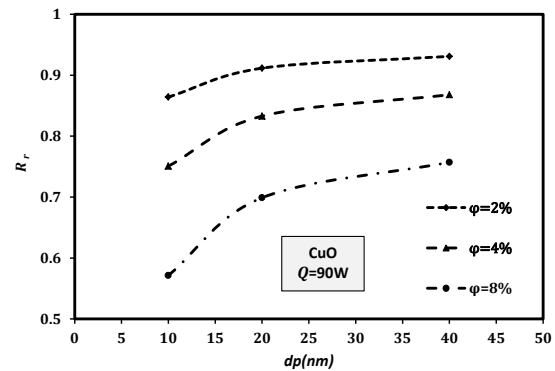
پایدارکننده‌ها تا حدودی برطرف شده است و امکان پایداری آنها تا چندین ماه فراهم شده است. مشکل دیگر که ممکن است در لوله حرارتی رخ دهد، فرسایش دیواره یا محیط متخلخل در اثر برخورد نانوذرات با آنهاست. لذا برای رفع این مشکل باید از مواد مقاوم‌تر در ساخت لوله حرارتی استفاده شود.

۵-۵. معایب نانوسیال

اگرچه در مطالعه حاضر به‌صورت کمی و کیفی کاربرد بالقوه نانوسیال در خنک‌کاری تجهیزات ماهواره پرداخته شده است، اما چالش‌هایی نیز در استفاده از نانوسیال وجود دارد. مهمترین مشکل نانوسیال ته‌نشین شدن آنهاست. امروزه این مشکل با افزودن

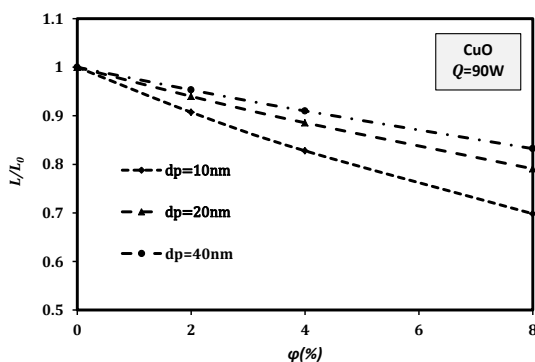


(ب)

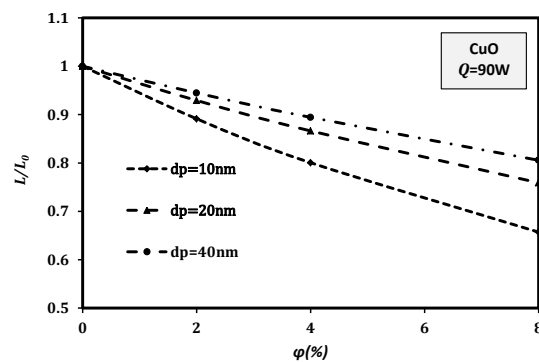


(ف)

شکل ۱۳. تأثیر غلظت و قطر نانوذره بر مقاومت حرارتی نسبی؛ الف) نانوسیال آب-اکسید مس، ب) نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم



(ب)



(ف)

شکل ۱۴. تأثیر غلظت و قطر نانوذره بر کاهش طول لوله حرارتی؛ الف) نانوسیال آب-اکسید مس، ب) نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم

تسریع در جذب حرارت از نواحی اواپراتورها به بخار و همچنین دفع حرارت از بخار به کندانسور شود. افزودن نانوذرات اکسید مس با قطر ۱۰ نانومتر و غلظت ۸ درصد ضریب انتقال حرارت را تا حدود ۷۵ درصد افزایش می‌دهد.

استفاده از نانوسیال سبب کاهش مقاومت حرارتی در لوله حرارتی می‌شود. در حالی که افزایش غلظت نانوذره تأثیر خطی و کاهشی بر مقاومت حرارتی دارد، تأثیر افزایش قطر ذره بر آن به صورت لگاریتمی و افزایشی می‌باشد. همچنین با وجود اختلاف چند برابری ضریب هدایت حرارتی دونه نانوذره مورد بررسی (اکسید مس و تیتانیوم)، نوع نانوذره تغییر عمده در نتایج حاصل برای مقاومت حرارتی ایجاد نمی‌کند.

نانوسیال با بهبود فرایند انتقال حرارت در لوله حرارتی این امکان را فراهم می‌آورد تا سطوح انتقال حرارت کوچکتر و در نتیجه اندازه لوله حرارتی در شرایط کارکرد مشابه سبکتر شود. این امر می‌تواند در کاهش وزن ماهواره و جانمایی تجهیزات الکترونیکی تأثیر مثبت به همراه داشته باشد. در مطالعه حاضر و در بهترین

۶. جمع‌بندی

در مطالعه حاضر کاربرد نانوسیال در خنک‌کاری تجهیزات ماهواره به صورت تحلیلی ارزیابی شد. برای این منظور یک لوله حرارتی با سه اواپراتور در نظر گرفته شد که هر یک وظیفه جذب گرما از یکی از تجهیزات الکترونیکی را می‌توانند برعهده داشته باشند. دو نوع نانو سیال آب - اکسید مس و آب - تیتانیوم با قطر و غلظت‌های مختلف در نظر گرفته شد تا تأثیر آنها بر عملکرد لوله حرارتی سنجیده شود. نتایج را می‌توان به ترتیب زیر خلاصه نمود:

استفاده از نانوذره می‌تواند باعث یکنواختی پروفیل دما در سطح لوله حرارتی شود و دمای نقاط داغ سطح را، که متصل به یکی از تجهیزات الکترونیکی ماهواره است، پایین آورد. به عنوان مثال استفاده از نانوذرات اکسید مس می‌تواند در بهترین حالت دمای حداکثر دمای سطح لوله حرارتی را ۵ کلوین بیشتر از شرایطی کاهش می‌دهد که آب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کاهش قطر و افزایش غلظت نانوذرات تأثیر مثبتی بر افزایش انتقال حرارت در لوله حرارتی ایفا می‌کند. این امر می‌تواند باعث

<p>L طول (متر)</p> <p>m تعداد جملات سری در رابطه ۱۱</p> <p>p فشار (پاسکال)</p> <p>Q حرارت دریافتی (وات)</p> <p>\dot{q}'' شار حرارتی (وات بر متر مربع)</p> <p>R شعاع (متر) و مقاومت حرارتی (K/W)</p> <p>r مختصات استوانه‌ای (متر)</p> <p>T دما (درجه سانتی‌گراد)</p> <p>t ضخامت نانوذره (متر)</p> <p>x مختصات استوانه‌ای (متر)</p> <p>ε ضریب تخلخل</p> <p>a آدیاباتیکی</p> <p>bf سیال پایه</p> <p>c کندانسور</p> <p>e اواپراتور</p> <p>eff خاصیت موثر</p> <p>l مایع</p> <p>nf نانوسیال</p> <p>p نانوذره</p> <p>o بیرون دیواره لوله حرارتی</p> <p>s قسمت جامد محیط متخلخل</p> <p>v بخار، سطح مشترک</p> <p>$wall$ دیوار لوله حرارتی، سطح مشترک دیوار محیط متخلخل</p>	<p>مورد استفاده از نانوسیال اندازه لوله حرارتی را تا ۳۵ درصد کاهش می‌دهد. مدلسازی انجام شده براساس فرض کارکرد صحیح لوله حرارتی انجام شد. در صورت عدم چنین فرضی لوله حرارتی به‌درستی کار نمی‌کند و اصطلاحاً پدیده خشک‌شدگی اتفاق می‌افتد. در این حالت باید جریان دو فاز مایع و گاز را در ناحیه متخلخل حل نمود و نتایج حاصل در مطالعه حاضر معتبر نیستند. همچنین اگر معادله انرژی در محیط بخار حل شود، دمای کل محیط بخار بسیار نزدیک به دمای بخار اشباع خواهد بود و تغییر محسوس در نتایج به‌وجود نمی‌آید. نکته دیگر استفاده از مدل تک‌فاز برای مدلسازی نانوسیال می‌باشد. چنانچه این فرض در نظر گرفته نشود، باید توزیع نانوذرات با استفاده از روش دو فاز به‌دست آید. با توجه به اینکه نتایج حاصل از مدلسازی تک‌فاز و دو فاز سیال در ادبیات فن [۳۶-۳۷] به هم نزدیک گزارش شده است، لذا می‌توان استنباط کرد که فرض یکتواخت بودن توزیع نانوذرات تغییر چندانی در نتایج کلی ایجاد نمی‌کند.</p>
--	--

۷. فهرست علائم و اختصارات

d	قطر (متر)
h	ضریب انتقال حرارت ($W/m^2 K$)
I	تابع بسل اصلاح شده نوع اول
K	تابع بسل اصلاح شده نوع دوم
k	هدایت حرارتی ($W/m K$)

۸. مأخذ

- [1] H. Park, A study on thermal performance of heat pipe for optimal placement of satellite equipment, *ETRI Journal*, vol. 19, pp. 59-69, 1997.
- [2] C. Hoa, B. Demolder, A. Alexandre, Roadmap for developing heat pipes for ALCATEL SPACE's satellites, *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, no. 9, pp. 1099-1108, 2003.
- [3] T. Kim, B. S. Hyun, J. J. Lee, J. Rhee, Numerical study of the spacecraft thermal control hardware combining solid-liquid phase change material and a heat pipe, *Aerospace Science and Technology*, vol. 27, no. 1, pp. 10-16, 2013.
- [4] M. Shafahi, B. Vincenz, K. Vafai, M. Manca, an investigation of thermal performance of cylindrical heat pipes using nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 1-3, pp. 376-383, 2010.
- [5] S. U. S. Choi, J.A. Eastman, enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, The Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Francisco, USA, ASME, FED 231/MD, pp. 99-105, 1995.
- [6] O. A. Alawi, N. A. Sidik, Mohammed, C. H. A., S. Syahrullail, Fluid flow and heat transfer characteristics of nanofluids in heat pipes: A review, *International Communication of Heat and Mass Transfer*, vol. 56, pp. 50-62, 2014.
- [7] Z. H. Liu, Y. Y. Li, A new frontier of nanofluid research-application of nanofluids in heat pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, pp. 6786-6797, 2012.
- [8] H. T. Chien, Ch. I. Tsai, P. H. Chen, P. Y. Chen, Improvement on thermal performance of a disk-

- shaped miniature heat pipe with nanofluid, *Electronic Packaging Technology Proceedings, Fifth International Conference IEEE*, pp. 389–391, 2003.
- [9] M. Shafahi, B. Vincenzo, K. Vafai, M. Manca, Thermal performance of flat-shaped heat pipe using nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 1438-1445, 2010.
- [10] K. Alizad, M. Shafahi, K. Vafai, M. Manca, Thermal performance and operational attributes of startup characteristics of flat-shaped heat pipes using nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, pp. 140-155, 2012.
- [11] C. Y. Tsai, H. T. Chien, P. P. Ding, B. Chan, T. Y. Luh, P. H., Chen, Effect of Structural character gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe performance, *Material Letters*, vol. 58, pp. 1461-1465, 2004.
- [12] G. Kumaresan, S. Venkatachalapath, L. G. Asirvatham, S. Wongwises, Comparative study on heat transfer characteristics of sintered and mesh wick heat pipes using CuO nanofluids, *International Communication of Heat and Mass Transfer*, vol. 57, pp.208-215, 2014.
- [13] S. W. Kang, W. C. Wei, S. H. Tsai, C. C. Huang, Experimental investigation of nanofluids on sintered heat pipe thermal performance, *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, no. 5-6, pp.973-979, 2009.
- [14] Y. H. Hung, T. P. Teng, B. G. Lin, Evaluation of the thermal performance of a heat pipe using alumina nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 44, pp.505-511, 2013.
- [15] N. Putra, W. N. Septiadi, H. Rahman, R. Irvansyah, Thermal performance of screen mesh wick heat pipes with nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 40, pp.10-17, 2012.
- [16] H. Shabgard, A. Faghri, Performance characteristics of cylindrical heat pipes with multiple heat sources, *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 16, pp.3410-3419, 2010.
- [17] M. M. Chen, A. Faghri, an analysis of the vapor flow and heat conduction through the liquid-wick and pipe wall in a heat pipe with single or multiple heat sources, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 33, pp.1945-1955, 1990.
- [18] F. Lefe`vre, M. Lallemand, Coupled thermal and hydrodynamic models of flat micro heat pipes for the cooling of multiple electronic components, *International Journal of Heat and Transfer*, vol. 39, pp.1375-1383, 2006.
- [19] H. Hassan, Heat transfer of Cu–water nanofluid in an enclosure with a heat sink and discrete heat source, *European Journal of Mechanic B-Fluid*, vol. 45, pp.72-83, 2014.
- [20] G. C. Bourantas, E. D. Skouras, V. C. Loukopoulos, G. C. Nikiforidi, Natural convection of nanofluids flow with nanofluid-oriented models of thermal conductivity and dynamic viscosity in the presence of heat source, *International Journal of Numerical Method for Heat and fluid flow*, vol. 23, no. 2, pp.248-274, 2013.
- [21] A. H. Mahmoudi, K. Hooman, Effect of a discrete heat source location on entropy generation in mixed convective cooling of a nanofluid inside the ventilated cavity, *International Journal of Exergy*, vol. 13, no. 3, pp.299-319, 2013.
- [22] P. R. Mashaei, S. M. Hosseinalipour, M. Bahiraei, Numerical investigation of nanofluid forced convection in channels with discrete heat sources, *Journal of Applied Mathematics*, pp. 259-284, 2012.
- [23] P. R. Mashaei, S. M. Hosseinalipour, M. Bahiraei, M. Dirani, 3-D numerical simulation of nanofluid laminar forced convection in a channel with localized heating, *Australian Journal of Basic and Applied Science*, vol. 6, pp.479-489, 2012.
- [24] P. R. Mashaei, S. M. Hosseinalipour, a numerical study of nanofluid forced convection in a porous channel with discrete heat sources, *Journal of porous media*, vol. 17, no. 6, pp.549-561, 2014.
- [25] P. R. Mashaei, M. Shahryari, Effect of nanofluid on thermal performance of heat pipe with two evaporators; application to satellite equipment cooling, *Acta Astronautica*, vol. 111, pp.549-561, 2015.

- [26] P. R. Mashaei, M. Shahryari, H. Fazeli, S. M. Hosseinalipour, Numerical simulation of nanofluid application in a horizontal mesh heat pipe with multiple heat sources: a smart fluid for high efficiency thermal system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 110, pp.1016-1030, 2016.
- [27] N. Zhu, F. Vafai, Analysis of cylindrical heat pipes incorporating the effects of liquid-vapor coupling and non Darcian transport-a closed form solution, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 42, pp.3405-3418, 2016.
- [28] M. Layeghi, A. Nouri-Borujerdi, Vapor flow analysis in partially-heated concentric annular heat pipes, *International Journal of Computational Engineering Science*, vol. 5, no. 1, pp.235-244, 2004.
- [29] J. M. Tournier, M. S. El-Genk, A heat pipe transient analysis model, *International Journal of Heat and Transfer*, vol. 37, pp.753-762, 1994.
- [30] T. Kaya, J. Goldak, Three-dimensional numerical analysis of heat and mass transfer in heat pipes, *Heat and Mass Transfer*, vol. 43, no. 8, pp.775-785, 2007.
- [31] S. W. Chi, *Heat Pipe Theory and Practice*, Hemisphere Washington, DC, 1976.
- [32] W. Yu, S. U. S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model, vol. 5, no. 1, pp.161-171, 2003.
- [33] Z. H. Liu, Q. Z. Zhu, Application of aqueous nanofluids in a horizontal mesh heat pipe, *Energy Conversion and Management*, vol. 5, no. 1, pp. 292-300, 2011.
- [34] K. H. Do, J. H. Ha, S. P. Jang, Thermal resistance of screen mesh wick heat pipes using the water-based Al₂O₃ nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 5888-5894, 2010.
- [35] M. K. Keshavarz, S. Razvaz, Experimental investigation of aluminum oxide nanofluid on heat pipe thermal performance, *International Communication in Heat and Mass*, vol. 39, pp. 1444-1448, 2012.
- [36] H. Fazeli, S. Madani, P. R. Mashaei, Nanofluid forced convection in entrance region of a baffled channel considering nanoparticle migration, *Applied Thermal Engineering*, vol. 106, pp.293-306, 2016.
- [37] A. Akbarinia, R. Laur, Investigating the diameter of solid particles effects on a laminar nanofluid flow in a curved tube using a two phase approach, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 30, no. 4, pp.706-714, 2009.