



بررسی و مقایسه اثر نانوسیالات مختلف بر عملکرد گرمایی لوله حرارتی

محمد حسن شجاعی فرد^۱، جواد زارع^{۲*} و مجتبی طحانی^۳

^۱استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۳استادیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۴/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۲۸

چکیده

لوله حرارتی از وسایل موثر در انتقال حرارت می‌باشد که از راههای بهبود عملکرد آن، استفاده از نانوسیالات که از پراکنده‌سازی ذرات با ابعاد نانو در سیال پایه به دست می‌آید، به عنوان سیال عامل می‌باشد. در تحقیق حاضر، به مدلسازی عددی عملکرد گرمایی لوله حرارتی استوانه‌ای هنگام استفاده از نانوسیالات مختلف پرداخته شده است. سه نوع نانوسیال استفاده شده، حاوی ذرات اکسید آلومینیوم، اکسید مس و نقره می‌باشند که از آب به عنوان سیال پایه استفاده می‌کنند. اثر تغییر نوع نانوذرات، کسر حجمی و سایز نانوذرات مورد استفاده بر عملکرد گرمایی و توزیع فشار و سرعت در لوله حرارتی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از نانوسیالات مختلف با یکدیگر، و با نتایج حاصل هنگام استفاده از آب خالص مقایسه شده است. نانوذرات مورد استفاده در سیال پایه باعث بهبود عملکرد گرمایی لوله حرارتی در مقایسه با آب خالص، با کاهش ۱۲/۲۷، ۱۲/۳۲ و ۱۳/۲۶ درصدی مقاومت حرارتی و گرادیان دما در طول لوله حرارتی، برای کسر حجمی ۳٪ و به ترتیب برای نانوذرات اکسید آلومینیوم، اکسید مس و نقره با قطر ۲۰ نانومتر، خواهند شد. مشاهده شده است که ذرات با سایز کوچکتر اثر بیشتری بر اختلاف دما در امتداد لوله حرارتی دارند. همچنین مقادیر بهینه کسر حجمی و سایز ذرات جهت افزایش عملکرد لوله حرارتی مشاهده شده است.

کلمات کلیدی: لوله حرارتی؛ نانوسیال؛ مقاومت حرارتی؛ کسر حجمی.

Investigation and comparison of the effect of different nanofluids on heat pipe thermal performance

M.H. Shojaeefard¹, J. Zare^{2*} and M. Tahani³

¹ Prof., School of Mech. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

² Ph.D. Student, School of Mech. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

³ Assist. Prof., Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Heat pipe is an effective device for heat transferring that using nanofluid, which is prepared by dispersion of nanoparticles in a base fluid, is a way to enhance its thermal performance. In this work, thermal performance of a cylindrical heat pipe while using different nanofluids is simulated numerically. Three kinds of the used nanofluids are consist of aluminium oxide, copper oxide and silver nanoparticles in water base fluid. The effects of variation of the nanoparticles, particle volume fractions and the size of nanoparticles on thermal performance, pressure and velocity distribution in heat pipe are investigated and the results are compared with each other and with that of the pure water. The used nanoparticles in base fluid cause the heat pipe thermal performance to increase in comparison with pure water, such as 12.27%, 12.32% and 13.26% reduction in thermal resistance and temperature gradient along the heat pipe for 3% particle volume fraction and particle diameter of 20 nm for aluminium oxide, copper oxide and silver nanoparticles are observed respectively. It is found that the particles with smaller size have more effect on temperature gradient along the heat pipe. Also optimum amount of particle volume fraction and size of particles for heat pipe performance increment are established.

Keywords: Heat pipe; Nanofluid; Thermal resistance; Volume fraction.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۱۷۷۲۴۰۱۷۵؛ فکس: ۰۲۱۷۷۲۴۰۳۶۳

آدرس پست الکترونیک: j_zare@mecheng.iust.ac.ir

۱- مقدمه

لوله حرارتی وسیله‌ای بسیار موثر برای انتقال حرارت می‌باشد که از سه قسمت اواپراتور، کندانسور و آدیاباتیک تشکیل شده است و در یک سیکل بسته عمل می‌نماید. به علت وجود تبخیر و کندانس در حین کارکرد، لوله‌های حرارتی قابلیت انتقال حرارت با افت دمای کم، عدم نیاز به توان خارجی، انتقال گرمای بالا و حجم کوچک را دارا می‌باشند و هدایت گرمایی معادل لوله حرارتی می‌تواند تا چند صد برابر بهترین رساناها مانند مس برسد [۱]. توسعه‌ی سریع تکنولوژی در زمینه الکترونیک منجر به ساخت مدارات فشرده در اندازه‌های کوچک و کاربرد بسیار گسترده آنها شده است. این امر باعث افزایش مقدار حرارت تولید شده در حجم کوچکتری گردیده است که ضرورت استفاده از وسایل انتقال حرارت مانند لوله‌های حرارتی را ایجاد می‌کند [۲ و ۳]. از راههای بهبود کارایی این وسیله بهبود خواص ترموفیزیکی سیال عامل می‌باشد. نانوسیال که از افزودن ذرات با ابعاد نانو به سیال عامل پایه بدست می‌آید به علت وجود ذرات فلزی در سیال پایه باعث افزایش قابلیت انتقال حرارت سیال، نسبت به سیال پایه می‌شود [۴]. در نتیجه کاربرد نانوسیالات در لوله‌های حرارتی به طور چشمگیری باعث بهبود عملکرد گرمایی این وسیله خواهد شد. تحقیقات گوناگونی به بررسی خواص و همچنین جابه‌جایی طبیعی و تغییر فشار نانوسیالات پرداخته‌اند [۵-۷].

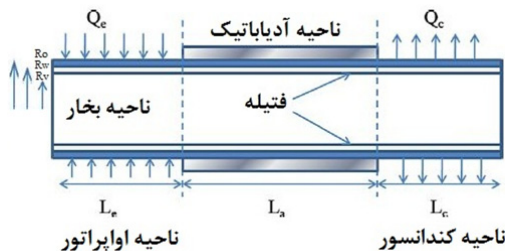
موسی [۸] به صورت آزمایشگاهی به بررسی بهبود عملکرد لوله حرارتی هنگام استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم پرداخته است. نتایج نشان‌دهنده کاهش دمای سطح با افزایش فاصله از بخش اواپراتور، کاهش دمای دیواره با افزایش کسر حجمی نانوذرات، کاهش مقاومت حرارتی با افزایش نسبت پر شدگی تا یک مقدار معین و سپس افزایش آن به دلیل افزایش مقدار مایع در اواپراتور و همچنین رابطه معکوس مقاومت حرارتی با کسر حجمی نانوذرات می‌باشد. سنتیلکومار و همکاران^۱ [۹] به صورت آزمایشگاهی به بررسی عملکرد لوله حرارتی هنگام استفاده از نانوسیال مس با سیال پایه آب و این-بوتانول^۲ پرداخته‌اند. که مشاهدات بیان کننده

افزایش بازده گرمایی در زوایای قرارگیری مختلف و برای تمام بارهای حرارتی ورودی، و سپس کاهش با رسیدن به یک مقدار بحرانی می‌باشد. همچنین تاثیر مثبت استفاده از نانوسیال بر بازده گرمایی، کاهش مقاومت حرارتی و افزایش اختلاف دمای اواپراتور و کندانسور با افزایش بار حرارتی مشاهده شده است. با تغییر سیال پایه به این-هگزانول^۳، بررسی فوق مجدداً توسط آنها تکرار شده است، که نتایج بیانگر عملکرد بسیار عالی و کاهش بسیار چشمگیر مقاومت حرارتی لوله برای نانوذرات مس در سیال پایه‌ی این-هگزانول می‌باشد که می‌توان آن را ناشی از گردآیدان کشش سطحی مثبت با دمای این نانوسیال دانست [۱۰].

نافون و همکاران^۴ [۱۱] به بررسی اثرات نانوسیال تیتانیوم بر بازده گرمایی لوله حرارتی پرداخته‌اند و اثرات زاویه‌ی قرارگیری و کسر حجمی بر بازده گرمایی، بررسی شده است که نتایج بیانگر افزایش بازده با افزایش زاویه قرارگیری و کسر حجمی تا یک مقدار زاویه و کسر حجمی خاص و سپس کاهش آن می‌باشد. همچنین مشاهدات نشان دهنده‌ی افزایش بازده با افزایش حرارت ورودی می‌باشد که به دلیل افزایش اختلاف دمای اواپراتور و کندانسور و متعاقب آن افزایش نرخ تبخیر سیال در اواپراتور می‌باشد. یانگ و همکاران^۵ [۱۲] به صورت تجربی به بررسی عملکرد لوله حرارتی هنگام استفاده از نانوسیال اکسید مس با سیال پایه‌ی آب پرداخته‌اند. که کاهش دمای سطح با حرکت از اواپراتور به کندانسور در هر دو حالت استفاده از آب خالص و نانوسیال، مشاهده شده است. همچنین دما با افزایش میزان شار ورودی افزایش می‌یابد و دمای اواپراتور هنگام استفاده از نانوسیال به مراتب کمتر از هنگام استفاده از آب خالص می‌باشد. علاوه بر این به علت کاهش دما به دلیل استفاده از نانوسیال، توزیع دما یکنواخت‌تر می‌باشد. همچنین وجود یک مقدار غلظت جرمی بهینه برای نانوذرات، برای دستیابی به ماکزیمم انتقال حرارت و همچنین ماکزیمم CHF، و کاهش مقاومت حرارتی هنگام استفاده از نانوسیال در مقایسه با آب مشاهده شده است.

³ n-hexanol⁴ Naphon et al.⁵ Yang et al.¹ Senthilkumar et al.² n-butanol

مدلسازی در شکل ۱ نمایش داده شده است. لوله حرارتی در یک سیکل بسته کار می‌کند. در واقع، گرمای وارده در قسمت اواپراتور باعث تبخیر سیال عامل شده و بخار ایجاد شده در اثر اختلاف فشار ایجاد شده درون لوله، از قسمت اواپراتور به سمت کندانسور جریان یافته و در این قسمت سیال چگالیده شده و گرمای نهان تبخیر خود را پس می‌دهد، و گرما از طریق دیواره لوله گرمایی به محیط منتقل شده و مایع چگالیده شده از طریق ساختار فتیله به واسطه‌ی خاصیت موئینگی به قسمت اواپراتور برمی‌گردد.



شکل ۱- نمایی از لوله حرارتی به کار گرفته شده جهت

مدلسازی [۱۴]

طول قسمت اواپراتور (L_e)، آدیباتیک (L_a) و کندانسور (L_c) به ترتیب ۶۰۰، ۹۰ و ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین شعاع محفظه بخار (R_v)، شعاع داخلی (R_w) و خارجی دیواره (R_o) به ترتیب ۸/۶۵، ۹/۴ و ۹/۵۵ میلی‌متر می‌باشد [۱۵].

لوله حرارتی به کار گرفته شده از جنس مس می‌باشد، که از توری مسی دو لایه به عنوان ساختار فتیله استفاده می‌کند. تخلخل و نفوذپذیری ساختار فتیله مورد استفاده به ترتیب $0/9$ و $1/5 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ می‌باشد. همچنین شعاع منفذ موثر که از پارامترهای اساسی ساختار فتیله می‌باشد و به صورت نصف مجموع قطر سیم به کار رفته در ساخت توری و فاصله دو سیم مجاور یکدیگر تعریف می‌شود [۱]، $54 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده و در قسمت اواپراتور و کندانسور از فرض شار حرارتی یکنواخت استفاده شده است.

۱-۲- معادلات حاکم

جهت شبیه سازی عددی لوله حرارتی، جریان دو بعدی، پایا، غیر قابل تراکم، لایه‌ای و با صرف نظر از نیروهای حجمی در

شفاهی و همکاران [۱۳ و ۱۴] به ارائه مدلی تحلیلی برای بررسی عملکرد لوله حرارتی تخت و لوله حرارتی استوانه‌ای، هنگام استفاده از نانوسیالات پرداخته‌اند و سه نوع نانوذره مختلف با کسر حجمی‌های متفاوت تست شده است. نتایج بیان‌کننده کاهش سرعت مایع، اختلاف دمای کمتر در طول لوله حرارتی و کاهش سایز تحت شرایط عملکردی یکسان هنگام استفاده از نانوسیالات می‌باشد. همچنین استفاده از نانوسیالات کاهش مقاومت حرارتی را در پی خواهد داشت که منطبق با نتایج تجربی بدست آمده می‌باشد. اثرات کسر حجمی نانوذرات و پارامترهای ناحیه متخلخل بر ماکزیمم قابلیت انتقال حرارت نیز بررسی شده، که وجود مقادیر بهینه برای ماکزیمم کردن قابلیت انتقال حرارت لوله مشاهده شده است. با نگاهی به کارهای انجام شده مشخص می‌گردد که عمده کارهای انجام گرفته در مورد بررسی عملکرد گرمایی لوله حرارتی با استفاده از نانوسیال به صورت آزمایشگاهی می‌باشد و به جز معدود کارهای تحلیلی انجام شده، کار دیگری مشاهده نمی‌شود و نتیجتاً انجام تحقیقات تحلیلی و عددی در این زمینه ضروری می‌باشد.

در تحقیق حاضر مدلسازی عددی عملکرد لوله حرارتی استوانه‌ای هنگام استفاده از نانوسیال و مقایسه اثر استفاده از نانوسیالات مختلف مورد توجه قرار گرفته است. جهت دست‌یابی به هدف مذکور، سه نوع نانوسیال متفاوت یعنی نانوسیال اکسید آلومینیوم، اکسید مس و نقره، به عنوان سیال عامل مورد استفاده در لوله حرارتی استوانه‌ای انتخاب شده است. و در ادامه اثر تغییر سیال عامل، کسر حجمی و قطر نانوذرات بر توزیع دما و مقاومت حرارتی و همچنین توزیع سرعت و فشار مورد بررسی قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه گردیده است. از مهم‌ترین نتایج تحقیق حاضر می‌توان به افزایش عملکرد گرمایی لوله حرارتی به دلیل کاهش اختلاف دمای اواپراتور و کندانسور و در نتیجه کاهش مقاومت حرارتی، اثر بیشتر ذرات با سایز کوچکتر بر اختلاف دما در امتداد لوله حرارتی و همچنین تغییر در توزیع فشار مایع و بخار و همچنین توزیع سرعت در لوله حرارتی به دلیل وجود نانوذرات در سیال پایه اشاره کرد.

۲- مدلسازی عددی

نمایی از لوله حرارتی استوانه‌ای به کار گرفته شده جهت

بخار نیز معادله پیوستگی، معادلات مومنتوم دو بعدی و انرژی می‌باشند، که با قرار دادن $\varepsilon = 1$ ، $K = \infty$ ، $k_{eff} = k$ و $S = 0$ در روابط ۴-۱ بدست خواهد آمد. در ناحیه‌ی دیواره لوله حرارتی، معادله انتقال هدایت حرارتی استفاده شده در مختصات استوانه‌ای به صورت رابطه ۷ می‌باشد:

$$k_{solid} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \frac{\partial T_{solid}}{\partial r} \right\} + \frac{\partial^2 T_{solid}}{\partial x^2} \right] = 0 \quad (7)$$

معادلات ۴-۱ معادلات اصلی مورد استفاده می‌باشند که برای قسمت بخار، مایع و دیواره لوله حرارتی مطابق با روند شرح داده شده، ساده سازی و با استفاده از معادلات مربوط به خواص نانوسیال که در ادامه به آنها اشاره گردیده است، حل خواهند گردید.

۲-۲- خواص ترموفیزیکی نانوسیال

جهت مدلسازی نانوسیال از مدل تک فاز همگن استفاده شده است. یعنی در واقع فرض می‌شود که نانوذرات در جریان سیال کاملا پخش شده و حضور آنها، تنها خواص سیال نظیر چگالی، لزجت، ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه را تغییر می‌دهد و در مدلسازی از معادلات جریان سیال، با در نظر گرفتن خواص ظاهری استفاده می‌شود. رابطه مورد استفاده برای محاسبه چگالی نانوسیال مطابق رابطه ۸ می‌باشد [۱۸]:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \rho_{bf} + \varphi \rho_p \quad (8)$$

رابطه فوق نشان می‌دهد که کسر حجمی نانوذرات و همچنین چگالی سیال پایه و نانوذرات بر روی چگالی نانوسیال تاثیرگذار است. ظرفیت گرمایی توسط رابطه ۹ بدست آمده است [۱۹]:

$$C_{p,nf} = \frac{(1 - \varphi) \rho_{bf} C_{p,bf} + \varphi \rho_p C_{p,p}}{(1 - \varphi) \rho_{bf} + \varphi \rho_p} \quad (9)$$

این رابطه نشان می‌دهد که ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال به ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی سیال پایه و نانوذرات و همچنین کسر حجمی نانوذرات مرتبط می‌باشد. برای محاسبه‌ی لزجت نانوسیال از رابطه‌ی برینکمن^۱ [۲۰] مطابق رابطه ۱۰ استفاده شده است:

نواحی بخار و مایع در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم برای مدلسازی جریان مایع در ناحیه فنیله (معادله پیوستگی، معادلات مومنتوم و معادله انرژی) مطابق روابط ۴-۱ می‌باشد [۱۶]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\rho}{\varepsilon^2} \left\{ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} \right\} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \left[\frac{\mu}{\varepsilon} \left\{ \frac{4}{3} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \frac{\partial u}{\partial r} \right\} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \frac{\partial v}{\partial r} \right\} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) \right\} \right] - \left[\frac{\mu}{K} + \frac{c}{\sqrt{K}} |\rho \vec{V}| \right] u \quad (2)$$

$$\frac{\rho}{\varepsilon^2} \left\{ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right\} = - \frac{\partial p}{\partial r} + \left[\frac{\mu}{\varepsilon} \left\{ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{4}{3r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \frac{\partial v}{\partial r} \right\} - \frac{4}{3} \frac{v}{r^2} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial r} \right] - \left[\frac{\mu}{K} + \frac{c}{\sqrt{K}} |\rho \vec{V}| \right] v \quad (3)$$

$$\rho c_p \left\{ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right\} = k_{eff} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \frac{\partial T}{\partial r} \right\} + r \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] + v \frac{\partial p}{\partial r} + u \frac{\partial p}{\partial x} + S \quad (4)$$

که $c = 0.143 \varepsilon^{-3/2}$ و S ترم چشمه می‌باشد. برای یک فنیله یکنواخت، ضریب نفوذپذیری و تخلخل در جهات محوری و شعاعی برابر می‌باشد (رابطه ۵):

$$\varepsilon_r = \varepsilon_x = \varepsilon \quad (5)$$

$$K_r = K_x = K$$

هدایت گرمایی موثر ناحیه مایع- فنیله مطابق رابطه ۶ می‌باشد، که جهت محاسبه دما در این ناحیه به کار می‌رود [۱۷]:

$$k_{eff} = \frac{k_{nf} [(k_{nf} + k_s) - (1 - \varepsilon)(k_{nf} - k_s)]}{[(k_{nf} + k_s) + (1 - \varepsilon)(k_{nf} - k_s)]} \quad (6)$$

که در آن k_s ضریب هدایت حرارتی فنیله و k_{nf} ضریب هدایت حرارتی نانوسیال می‌باشد. معادلات حاکم برای جریان

¹ Brinkman

۲-۳- شرایط مرزی

شرایط مرزی در قسمتهای مختلف لوله حرارتی و مورد نیاز برای مدل‌سازی عددی، در ادامه آورده شده است. در قسمت دیواره خارجی لوله ($r = R_o$) شرایط مرزی برای سه بخش اواپراتور، آدیاباتیک و کندانسور به ترتیب مطابق رابطه ۱۳ می‌باشد:

$$k_{solid} \frac{\partial T_{solid}}{\partial r} = + \frac{Q_e}{A_e}$$

$$\frac{\partial T_{solid}}{\partial r} = 0 \quad (13)$$

$$k_{solid} \frac{\partial T_{solid}}{\partial r} = - \frac{Q_c}{A_c}$$

در ناحیه سطح مشترک جامد/مایع- فتیله ($r = R_w$) شرایط مرزی سرعت و دمایی مطابق رابطه ۱۴ می‌باشد:

$$T_i = T_{solid}$$

$$k_{eff} \frac{\partial T_i}{\partial r} = k_{solid} \frac{\partial T_{solid}}{\partial r} \quad (14)$$

$$v = u = 0$$

در قسمت سطح مشترک مایع و بخار ($r = R_v$)، نیز شرایط مرزی سرعت و دمایی مطابق رابطه ۱۵ را خواهیم داشت:

$$u = 0, \quad v = \frac{\dot{m}}{\rho}, \quad q = \dot{m} h_{fg}$$

$$T_{int} = \frac{1}{\frac{1}{T_{v,sat}} - \frac{R}{h_{fg}} \ln \frac{p_v}{p_{v,sat}}} \quad (15)$$

و در قسمت ابتدا و انتهای لوله حرارتی ($x = 0, L$) نیز شرط عدم لغزش و شرط گرمایی عایق حرارتی برقرار می‌باشد (رابطه ۱۶).

$$v = u = 0$$

$$\partial T / \partial x = 0 \quad (16)$$

در خط مرکزی لوله حرارتی ($r = 0$) شرط مرزی تقارن مطابق زیر در نظر گرفته شده است. (رابطه ۱۷)

$$v = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (17)$$

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_{bf}}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (10)$$

و برای محاسبه هدایت گرمایی نانوسیال، از مدل یو و چوی^۱ [۲۱] که یک مدل بهبود بخشیده شده مدل ماکسول می‌باشد و در آن اثرات نانولایه‌ی تشکیل شده اطراف ذره و نقش آن در رسانندگی گرمایی در نظر گرفته شده، مطابق رابطه ۱۱ استفاده شده است:

$$k_{eff} = \frac{k_{pe} + 2k_{bf} + 2(k_{pe} - k_{bf})(1+\beta)^3 \phi}{k_{pe} + 2k_{bf} - (k_{pe} - k_{bf})(1+\beta)^3 \phi} k_{bf} \quad (11)$$

که در آن خواهیم داشت:

$$k_{pe} = \frac{[2(1-\alpha) + (1+\beta)^3(1+2\alpha)]\alpha}{-(1-\alpha) + (1+\beta)^3(1+2\alpha)} k_p \quad (12)$$

$$\alpha = k_{lower} / k_p$$

$$\beta = w / r_p$$

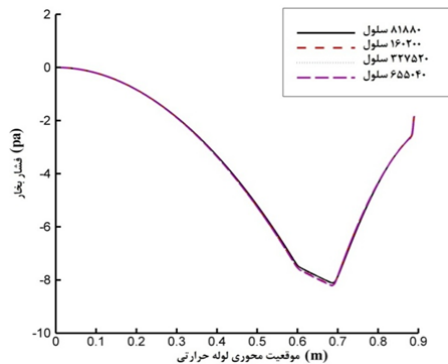
که در مدل ارائه شده w ، r_p و k_{lower} به ترتیب ضخامت نانولایه، شعاع ذره و هدایت گرمایی نانولایه می‌باشد. مدل فوق مزیت ایجاد ارتباط بین رسانندگی گرمایی نانوسیال و قطر نانوذرات را دارا می‌باشد و اثرات قطر بر رفتار گرمایی سیال را در نظر می‌گیرد. که در تحقیق حاضر مقدار ۲ نانومتر برای ضخامت نانولایه و $\alpha=1$ در نظر گرفته شده است [۲۱]. مشخصات نانوذرات به کار رفته در مدل‌سازی در جدول ۱ آورده شده است:

جدول ۱- مشخصات نانوذرات به کار رفته در مدل‌سازی

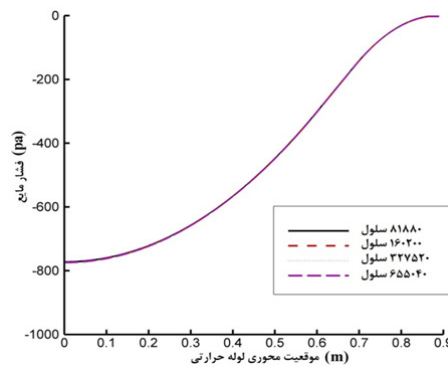
| چگالی kg/m ^۳ | ضریب هدایت حرارتی W/mK | ظرفیت گرمایی ویژه J/kgK | قطر نانوذرات nm |
|----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| ۳۸۸۰ | ۴۲ | ۷۲۹ | نانوذرات اکسید آلومینیوم |
| ۶۵۱۰ | ۱۸ | ۵۴۰ | ۴۰ و ۲۰، ۱۰ نانوذرات اکسید مس |
| ۱۰۵۰۰ | ۴۲۹ | ۲۳۵ | نانوذرات نقره |

^۱ Yu & Choi

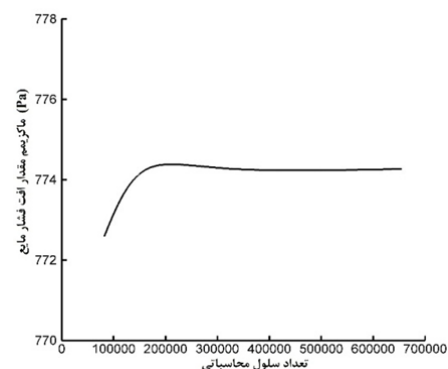
افت فشار مایع ۰/۲۱ درصد می‌باشد اما از ۱۶۰۲۰۰ سلول به بعد این تغییرات به مراتب کمتر می‌باشد و بنابراین با توجه به اهمیت کم بودن حجم و زمان محاسبات تعداد ۱۶۰۲۰۰ سلول دارای دقت مناسب تشخیص داده شده و استفاده گردیده است.



شکل ۲- توزیع محوری افت فشار بخار



شکل ۳- توزیع محوری افت فشار مایع



شکل ۴- روند همگرایی ماکزیمم مقدار افت فشار مایع

جهت در نظر گرفتن تغییر فاز در سطح مشترک مایع-بخار، گرمای نهان تبخیر به صورت یک چاه حرارتی در سطح مشترک مایع-بخار در قسمت اواپراتور و گرمای نهان چگالش در قسمت کندانسور به صورت یک چشمه حرارتی به معادله‌ی انتقال حرارت در این ناحیه مطابق رابطه ۱۸ افزوده شده است:

$$s_e = -\frac{Q_e}{\pi \left((R_w)^2 - R_v^2 \right) L_e} \quad (18)$$

$$s_c = +\frac{Q_c}{\pi \left((R_w)^2 - R_v^2 \right) L_c}$$

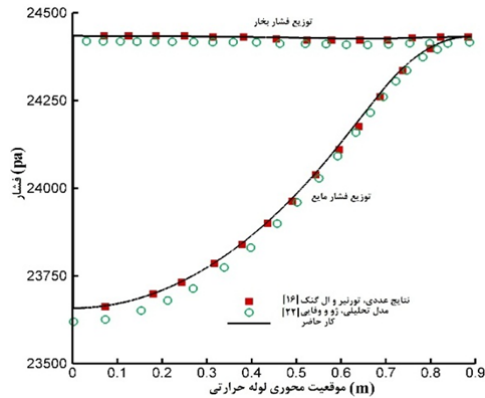
روش حجم محدود جهت گسسته‌سازی معادلات بدست آمده به کار گرفته شده است و الگوریتم به کار رفته برای ارتباط بین سرعت و فشار الگوریتم سیمپل می‌باشد. برای گسسته‌سازی معادلات مومنتوم و انرژی نیز، از طرح بالا دستی درجه دوم استفاده شده است که نشان می‌دهد دقت گسسته سازی از مرتبه دوم می‌باشد.

۳- شبکه بندی و ارزیابی مدل عددی به کار رفته

شبکه مورد استفاده از نوع شبکه با سازمان و شامل المانهایی چهار ضلعی مستطیل شکل می‌باشد و شبکه یکنواخت مورد استفاده قرار گرفته است. در ابتدا برای ارزیابی شبکه به کار رفته در مدل‌سازی عددی، معادلات حاکم برای تعداد شبکه‌های مختلف برای توزیع محوری فشار بخار و مایع در لوله حرارتی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در محفظه‌ی بخار و مایع از ۱۶۰۲۰۰ سلول به بعد تغییرات در توزیع فشار بسیار اندک می‌باشد و بنابراین از این تعداد سلول محاسباتی جهت انجام محاسبات استفاده شده است. به گونه‌ای که با افزایش تعداد سلول‌ها از ۸۱۸۸۰ به ۱۶۰۲۰۰ سلول تغییر ماکزیمم افت فشار بخار ۱ درصد می‌باشد اما از ۱۶۰۲۰۰ به بعد، این تغییرات بسیار کمتر می‌باشد.

روند همگرایی ماکزیمم مقدار افت فشار مایع نیز در شکل ۴ آورده شده است که موید صحت تعداد سلول انتخاب شده می‌باشد و مشاهده می‌کنیم که با افزایش تعداد سلول‌ها از ۸۱۸۸۰ به ۱۶۰۲۰۰ سلول، میزان تغییرات ماکزیمم مقدار

محاسبات حاضر، جهت دست یابی به نتایج با دقت بالاتر در محاسبات مد نظر قرار داده شده است.

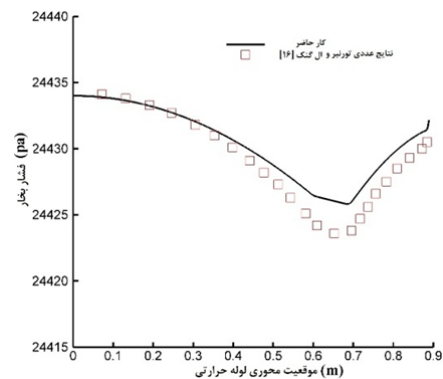


شکل ۶- مقایسه توزیع فشار مایع و بخار با نتایج عددی [۱۶] و تحلیلی [۲۱]

اعتبارسنجی توزیع دمای سطح خارجی دیواره لوله حرارتی در شکل ۷ نشان داده شده است. که مشاهده می‌شود در کار آزمایشگاهی و همچنین کار عددی تبخیر در امتداد اواپراتور یکسان، ولی چگالش در امتداد کندانسور به دلیل افزایش دمای آب خنک‌کننده کاهش خواهد یافت. اما نتایج عددی بدست آمده در کار حاضر و همچنین نتایج تحلیلی موجود به دلیل فرض شار حرارتی یکنواخت در قسمت‌های اواپراتور و کندانسور دمای سطح تقریباً یکنواخت را در این دو قسمت پیش‌بینی می‌کنند. با این وجود نیز خطای حاصل ناشی از فرض شار حرارتی یکنواخت در کندانسور بسیار اندک و قابل نظر خواهد بود.

تطابق‌سنجی دمای بخار با نتایج موجود، در جدول ۲ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که افت دمای بخار در امتداد لوله حرارتی بسیار ناچیز است که با نتایج تجربی نیز در تطابق است. ماکزیمم خطا نسبت به نتایج آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی به ترتیب 0.294% ، 0.296% و 0.3% می‌باشد. در واقع می‌توان این‌چنین بیان کرد که، برای لوله‌های حرارتی که از آب خالص به عنوان سیال عامل استفاده می‌کنند به خاطر افت فشار کم بخار در طول لوله در مقایسه با فشار استاتیک بخار و همچنین تعادل ترمودینامیکی بین فشار و دما در سطح مشترک مایع-بخار، دمای بخار در طول لوله تقریباً یکنواخت است.

در ابتدا جهت اعتبارسنجی روش عددی مورد استفاده، نتایج حاصل از کار موجود با نتایج آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی مربوط به عملکرد لوله حرارتی هنگام استفاده از سیال عامل آب و بار حرارتی ورودی 455 وات، مقایسه شده است. در شکل‌های ۵ الی ۷ به ترتیب به اعتبار‌سنجی توزیع فشار بخار، توزیع فشار مایع و توزیع دمای سطح دیواره خارجی لوله حرارتی پرداخته شده است و همان‌طور که از نتایج مشهود است، تطابق خوب بین نتایج کار حاضر با نتایج موجود نشان از صحت روش عددی مورد استفاده دارد. آنچنان که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، در ناحیه بخار و در قسمت اواپراتور افت فشار ترکیبی ناشی از اصطکاک و اینرسی، در ناحیه آدیاباتیک افت خطی فشار ناشی از اصطکاک و در ناحیه کندانسور افت اصطکاک و بازیابی فشار به دلیل اثرات اینرسی وجود خواهد داشت. که ماکزیمم خطای 0.009% بین نتایج کار حاضر و نتایج عددی مربوط به توزیع فشار بخار مشاهده می‌شود.



شکل ۵- مقایسه توزیع فشار بخار با نتایج عددی [۱۶]

همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، افت فشار مایع بسیار بیشتر از افت فشار بخار می‌باشد که به دلیل عبور فاز مایع از یک محیط متخلخل می‌باشد. در قسمت مایع در ناحیه کندانسور و اواپراتور افت فشار ترکیب افت فشار ناشی از تغییر فاز و اصطکاک می‌باشد، در صورتی که در ناحیه آدیاباتیک تنها افت فشار اصطکاک را شاهد خواهیم بود. و در ناحیه مایع اثرات افت فشار ناشی از اینرسی برخلاف ناحیه بخار که نقش اساسی در روند تغییرات فشار در این محفظه خواهد داشت، قابل نظر خواهد بود. هرچند که در

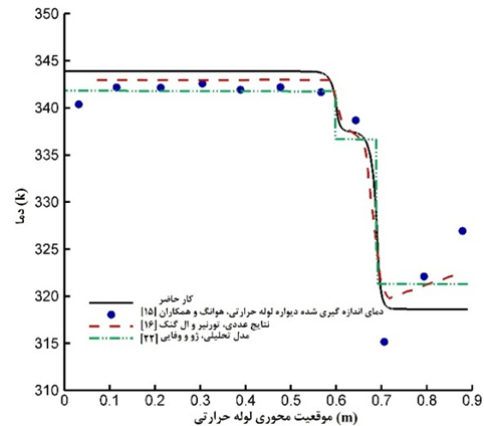
که h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی کندانسور، T_b میانگین دمای آب ورودی و خروجی در کندانسور و k_{eff} ضریب هدایت گرمایی موثر فتیله و سیال می‌باشد [۱۵].

۴- تحلیل نتایج

در ادامه به بررسی و مقایسه نتایج بدست آمده هنگام استفاده از نانوسیال، به جای آب به عنوان سیال عامل پرداخته خواهد شد. جهت مدلسازی از سه نانوسیال مختلف که از پراکنده-سازی ذرات اکسید آلومینیوم، اکسید مس و نقره در سیال پایه‌ی آب خالص بدست آمده‌اند استفاده شده است. که ذرات مورد استفاده دارای سه قطر متفاوت ۱۰، ۲۰ و ۴۰ نانومتر می‌باشند.

شکل ۸ نشان‌دهنده‌ی اثر کسر حجمی نانوذرات اکسید آلومینیوم بر ماکزیمم سرعت نانوسیال می‌باشد. علامت منفی سرعت نشان دهنده‌ی جهت مخالف جریان مایع با جهت x انتخابی می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش کسر حجمی نانوذرات ماکزیمم سرعت مایع کاهش می‌یابد، که به خاطر افزایش چگالی در حضور نانوذرات در مقایسه با آب خالص می‌باشد. در واقع با افزایش کسر حجمی شاهد افزایش هرچه بیشتر چگالی نانوسیال و کاهش بیشتر ماکزیمم سرعت مایع خواهیم بود. نحوه تغییرات ماکزیمم سرعت مایع در یک کسر حجمی خاص نیز به دلیل تبخیر مایع در قسمت اواپراتور و کندانس بخار در قسمت کندانسور و در نتیجه تغییر مقدار مایع می‌باشد ولی در قسمت آدیاباتیک به دلیل ثابت بودن مقدار مایع مقدار ماکزیمم سرعت ثابت خواهد شد. شکل ۹ بیان‌کننده‌ی مقایسه ماکزیمم سرعت مایع برای سه نانوذره متفاوت استفاده شده و همچنین مقایسه اثر قطر نانوذرات بر ماکزیمم سرعت می‌باشد. مشاهده می‌شود که نانوسیال اکسید آلومینیوم، اکسید مس و نقره به ترتیب بیشترین تا کمترین مقدار سرعت را خواهند داشت. در واقع چون اکسید آلومینیوم و نقره کمترین و بیشترین مقدار چگالی را دارند، در نتیجه نانوسیال نقره کمترین مقدار سرعت و نانوسیال اکسید آلومینیوم بیشترین مقدار سرعت را خواهند داشت.

همچنین مشاهده می‌شود که برای هر سه نوع نانوذره استفاده شده، نانوذره با قطر ۱۰ نانومتر کمترین مقدار سرعت و ذرات با قطر ۴۰ نانومتر بیشترین مقدار سرعت را خواهند



شکل ۷- مقایسه توزیع دمای سطح دیواره لوله حرارتی با نتایج آزمایشگاهی [۱۵]، عددی [۱۶] و تحلیلی [۲۲]

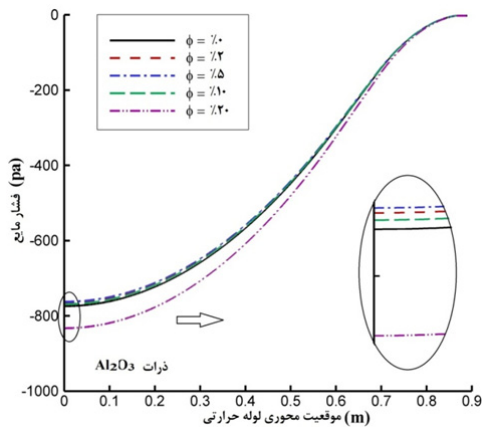
جدول ۲- مقایسه توزیع دمای بخار با نتایج آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی

| فاصله از انتهای اواپراتور (m) | کار حاضر | نتایج آزمایشگاهی هوانگ و همکاران [۱۵] | نتایج عددی تورنیر و ال گنک [۱۶] | نتایج تحلیلی ژو و وفایی [۲۲] |
|-------------------------------|----------|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| ۰/۰۳۱ | ۳۳۷/۶۰۹ | ۳۳۸/۲۰۵ | ۳۳۷/۶۰۷ | ۳۳۶/۶۸۵ |
| ۰/۱۱۴ | ۳۳۷/۶۰۹ | ۳۳۷/۹۷۴ | ۳۳۷/۵۳۹ | ۳۳۶/۶۷۲ |
| ۰/۲۱۱ | ۳۳۷/۶۰۸ | ۳۳۷/۹۵۹ | ۳۳۷/۵۲۴ | ۳۳۶/۶۵۷ |
| ۰/۳۰۴ | ۳۳۷/۶۰۷ | ۳۳۷/۹۴۴ | ۳۳۷/۵۱۱ | ۳۳۶/۶۴۲ |
| ۰/۳۸۸ | ۳۳۷/۶۰۶ | ۳۳۸/۰۰۳ | ۳۳۷/۴۹۸ | ۳۳۶/۶۲۹ |
| ۰/۴۷۵ | ۳۳۷/۶۰۵ | ۳۳۸/۱۳۳ | ۳۳۷/۵۵۵ | ۳۳۶/۶۱۴ |
| ۰/۵۶۶ | ۳۳۷/۶۰۳ | ۳۳۸/۴۸ | ۳۳۷/۵۴۱ | ۳۳۶/۶ |
| ۰/۶۴۳ | ۳۳۷/۶۰۲ | ۳۳۸/۱۷۹ | ۳۳۷/۵۲۸ | ۳۳۶/۵۸۷ |
| ۰/۷۰۶ | ۳۳۷/۶۰۲ | ۳۳۷/۳۰۱ | ۳۳۷/۵۱۶ | ۳۳۶/۵۷۵ |
| ۰/۷۹۴ | ۳۳۷/۶۰۵ | ۳۳۷/۵۰۳ | ۳۳۷/۶۰۳ | ۳۳۶/۵۶۴ |
| ۰/۸۷۸ | ۳۳۷/۶۰۷ | ۳۳۷/۵۶۲ | ۳۳۷/۴۹۳ | ۳۳۶/۶۲۳ |

همان‌طور که مشاهده شد، افت دمای بخار بسیار اندک می‌باشد و بنابر این فرض بخار اشباع و دمای یکنواخت در کل محفظه‌ی بخار برای ادامه محاسبات فرضی منطقی می‌باشد [۱۶]. و برای محاسبه‌ی دمای بخار از رابطه ۱۹ استفاده شده است [۲۲]:

$$T_v = T_b + \frac{Q}{2\pi L_c} \left(\frac{\ln(R_o/R_w)}{k_{wall}} + \frac{\ln(R_w/R_v)}{k_{eff}} + \frac{1}{hR_o} \right) \quad (19)$$

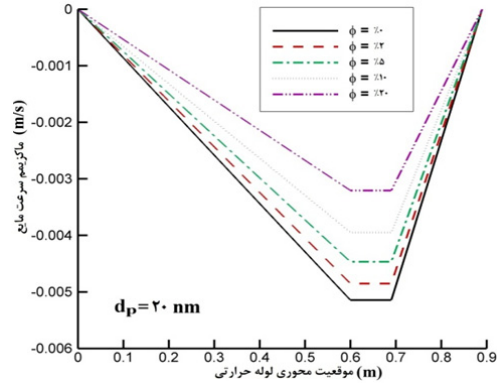
سیال پایه ناشی از افزودن نانوذرات، در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ترسیم شده است. اثر افزودن نانوذرات به سیال پایه بر توزیع فشار مایع بدینصورت می‌باشد که، ابتدا با افزودن نانوذرات مقدار افت فشار کاهش خواهد یافت و این کاهش با افزایش کسر حجمی تا رسیدن به یک کسر حجمی خاص ادامه خواهد داشت و پس از عبور از این کسر حجمی شاهد معکوس شدن اثر افزایش کسر حجمی و در نتیجه افزایش افت فشار خواهیم بود. دلیل مشاهده‌ی روند فوق را می‌توان توسط اثرات متضاد چگالی و ویسکوزیته تشریح کرد. مطابق روابط ارائه شده برای محاسبه‌ی چگالی و ویسکوزیته نانوسیال، با افزایش کسر حجمی چگالی و ویسکوزیته نانوسیال افزایش خواهد یافت. اما در ابتدا شاهد غلبه‌ی اثرات افزایش چگالی و متعاقب آن کاهش افت فشار خواهیم بود ولی در ادامه افزایش ویسکوزیته غالب و باعث افزایش افت فشار خواهد شد. به طور فیزیکی می‌توان اینگونه بیان کرد که افزایش چگالی باعث کاهش سرعت مایع و در نتیجه کاهش تنش برشی خواهد شد. و به علت غلبه‌ی چگالی در ابتدای امر شاهد کاهش افت فشار می‌باشیم. اما افزایش ویسکوزیته باعث افزایش تنش برشی و غلبه‌ی ویسکوزیته و در نتیجه افزایش افت فشار خواهد شد که نتیجه‌ی ترکیب این دو اثر بیان وجود یک کسر حجمی بهینه برای نانوذرات می‌باشد.



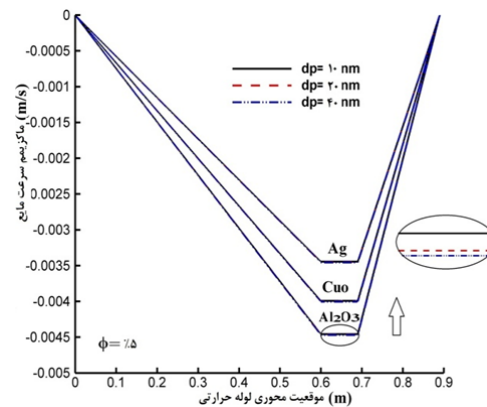
شکل ۱۰- اثر کسر حجمی نانوذرات بر توزیع فشار مایع بدون در نظر گرفتن تغییر دمای عملکرد

همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود، روند تغییرات هر دو نمودار یکسان می‌باشد اما تمایز اصلی

داشت. در واقع هرچه قطر ذرات کمتر باشد، با توجه به رابطه‌ی بیان شده در مورد هدایت گرمایی نانوسیال، شاهد انتقال حرارت بیشتر و دمای عملکردی پایین‌تر و متعاقب آن چگالی بیشتر خواهیم بود. که نتیجه‌ی آن مقدار سرعت کمتر خواهد بود، که منطبق با نتایج بدست آمده می‌باشد.



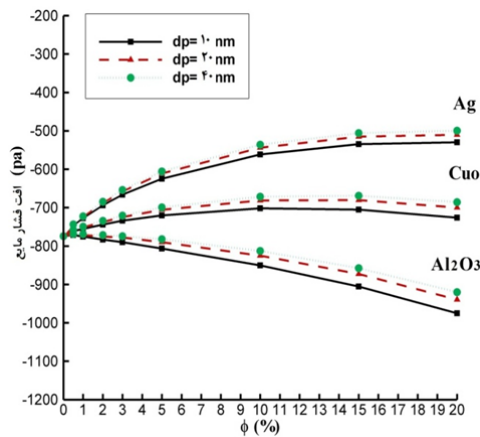
شکل ۸- بررسی اثر کسر حجمی نانوذرات اکسید آلومینیوم بر ماکزیمم سرعت مایع



شکل ۹- مقایسه اثر نوع نانوذرات و قطر آنها بر ماکزیمم سرعت مایع

هنگام استفاده از نانوسیال به عنوان سیال عامل، توزیع فشار مایع در لوله حرارتی تغییر خواهد کرد. نمودارهای توزیع فشار مایع برای نانوسیال اکسید آلومینیوم و در دو حالت، با در نظر گرفتن اثر تغییر دمای عملکرد لوله حرارتی ناشی از انتقال حرارت نانوذرات و بدون در نظر گرفتن تغییرات دمای عملکرد یعنی تنها تغییر چگالی و ویسکوزیته

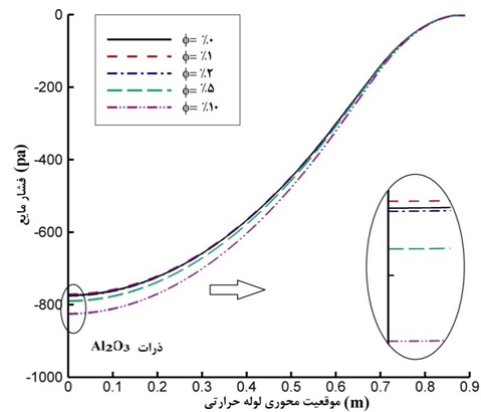
مس در مقادیر کسر حجمی متوسط و برای نانوذرات نقره تا کسر حجمی ۲۰ در صد این معکوس شدن مشاهده نمی‌شود. که نشان از غلبه‌ی شدید اثر چگالی در نانوسیال نقره دارد. همچنین اثر تغییر قطر نانوذرات بر افت فشار نیز در این شکل مقایسه شده است، که مشاهده می‌کنیم برای هر سه نوع ذره، نانوذرات با قطر ۴۰ نانومتر کمترین افت فشار و نانوذرات با قطر ۱۰ نانومتر بیشترین مقدار افت فشار را خواهند داشت. که این روند را نیز با توجه به تغییر دمای عملکرد بر حسب قطر نانوذرات می‌توان اینگونه توجیه کرد که با افزایش قطر نانوذرات، افزایش دمای عملکرد و متعاقب آن چگالی کمتر سیال پایه و افت فشار کمتر را شاهد خواهیم بود.



شکل ۱۲- بررسی اثر نوع ذرات و قطر آنها بر مقادیر افت فشار مایع

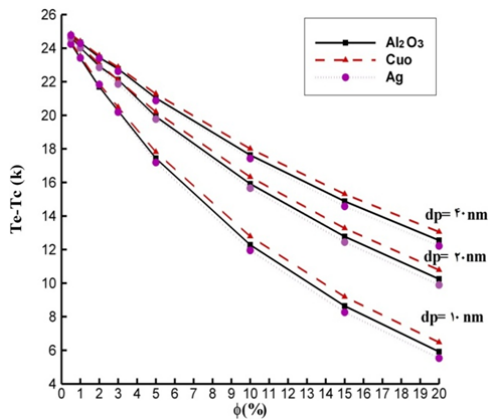
شکل ۱۳ نشان دهنده‌ی اثر کسر حجمی نانوذرات بر توزیع دمای دیواره لوله حرارتی، به ترتیب برای نانوذرات اکسید آلومینیوم، اکسید مس و نقره می‌باشد. نمودارها برای قطر ذرات ۲۰ نانومتر ترسیم گردیده است. همان‌طور که مشهود است در هر سه نانوسیال استفاده شده، افزایش کسر حجمی مورد استفاده طبق رابطه هدایت گرمایی نانوسیال سبب افزایش هدایت گرمایی نانوسیال و متعاقب آن افزایش هدایت گرمایی موثر مایع-فتیله خواهد شد، که نتیجه مستقیم آن کاهش دمای سطح دیواره لوله حرارتی می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در کسر حجمی یکسان،

بین دو نمودار مقدار کسر حجمی بهینه نانوذرات در آن‌ها می‌باشد. در واقع بدون در نظر گرفتن تغییر دمای عملکرد با تغییر کسر حجمی نانوذرات، مشاهده می‌کنیم که روند کاهش افت فشار با افزایش کسر حجمی تا مقادیر بیشتر کسر حجمی ادامه می‌یابد. اما با در نظر گرفتن اثر تغییر دما و به علت ایجاد تغییر در خواص سیال پایه شاهد کاهش مقدار کسر حجمی نانوذرات که در آن معکوس شدن روند نمودار را مشاهده می‌کنیم، خواهیم بود.



شکل ۱۱- اثر کسر حجمی نانوذرات بر توزیع فشار مایع با در نظر گرفتن تغییر دمای عملکرد

نمودارهای توزیع فشار مایع برای نانوسیالات مختلف و در کسر حجمی‌ها و قطرهای متفاوت نیز ترسیم گردیده است. روند مشاهده شده در آنها هم مطابق روند نمودارهای فوق می‌باشد، اما تفاوت بین آنها در مقادیر افت فشار برای کسر حجمی‌های متفاوت و همچنین مقدار کسر حجمی بهینه خواهد بود. که در شکل ۱۲ به مقایسه این مقادیر برای نانوذرات مختلف و قطرهای متفاوت آنها پرداخته شده است. آنچنان که از شکل واضح است، نانوذرات نقره و اکسید مس به ترتیب دارای چگالی بیشتری نسبت به نانوذرات اکسید آلومینیوم می‌باشند که نتیجه آن اثرات غالب هرچه بیشتر چگالی و در نتیجه افت فشار کلی کمتر در این دو نوع نانوذره می‌باشد. افزودن کسر حجمی تا کسر حجمی ۲۰ درصد ادامه یافته است و مشاهده می‌شود که به دلیل چگالی متفاوت این نانوذرات، معکوس شدن روند افت فشار، برای نانوذرات اکسید آلومینیوم در مقادیر کسر حجمی پایین، برای نانوذرات اکسید

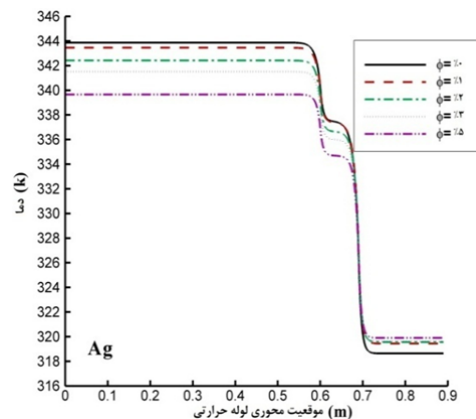
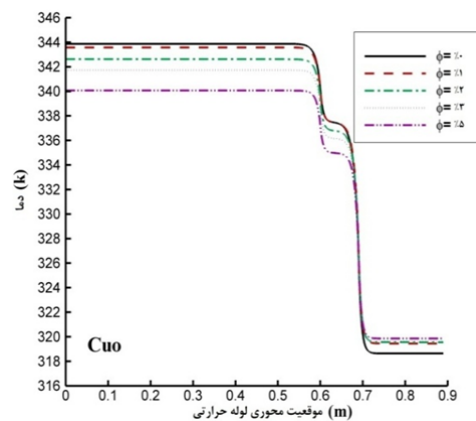
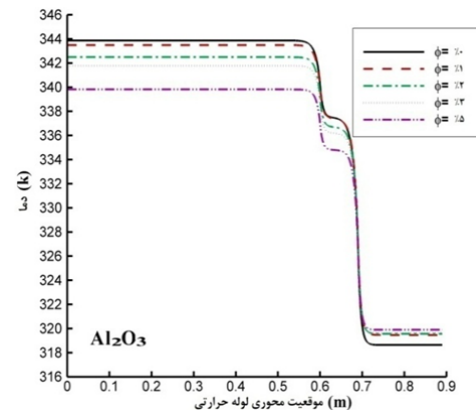


شکل ۱۴- تغییر اختلاف دمای اواپراتور و کندانسور برای نانوذرات متفاوت و قطرهای مختلف

شکل ۱۴ نشان‌دهنده توزیع اختلاف دمای اواپراتور و کندانسور برای نانوذرات و قطرهای متفاوت آنها می‌باشد. همان‌طور که مشهود است، در هر سه قطر مورد استفاده، نانوذرات نقره کمترین و نانوذرات اکسید مس بیشترین اختلاف دما را ایجاد خواهند کرد، که این امر نتیجه مستقیم تفاوت در ضریب هدایت گرمایی این نانوذرات می‌باشد. علاوه بر موارد ذکر شده در این شکل امکان مقایسه قطر نانوذرات با یکدیگر نیز وجود دارد. آنچنان که واضح است، برای هر سه نوع نانوذره استفاده شده، چون هدایت گرمایی نانوسیال وابسته به قطر نانوذرات می‌باشد و با افزایش قطر نانوذرات ضریب هدایت گرمایی پایین‌تری را شاهد خواهیم بود در نتیجه افزایش قطر نانوذرات سبب افزایش اختلاف دمای اواپراتور و کندانسور خواهد شد.

از دیگر فاکتورهای مهم در عملکرد لوله حرارتی، مقاومت حرارتی آن می‌باشد که در شکل ۱۵ ترسیم گردیده است و مشاهده می‌شود که با توجه به رابطه مقاومت حرارتی، $R = \Delta T / Q$ ، در هر سه نوع نانوذره و قطر مورد استفاده، افزایش کسر حجمی نانوذرات سبب کاهش مقاومت حرارتی لوله خواهد شد، که به دلیل رابطه مستقیم ضریب هدایت گرمایی با کسر حجمی می‌باشد. به عنوان نمونه کاهش مقاومت حرارتی برای ذرات اکسید آلومینیوم، اکسید مس و نقره با قطر ۲۰ نانومتر، برای کسر حجمی ۳٪ به ترتیب ۲۷/۱۲٪، ۳۲/۱۲٪ و ۲۶/۱۳٪ می‌باشد و در کسر حجمی ۵ درصد کاهش ۲۰/۹۹٪، ۱۹/۸۵٪ و ۲۱/۵۸٪ را شاهد خواهیم

نانوذرات نقره به دلیل دارا بودن ضریب هدایت گرمایی بالاتر نسبت به دو نوع نانوذره استفاده شده دیگر، دمای سطح دیواره کمتری را نشان خواهند داد.



شکل ۱۳- اثر کسر حجمی بر توزیع دمای سطح دیواره لوله حرارتی برای ذرات متفاوت. $dp=20$ nm

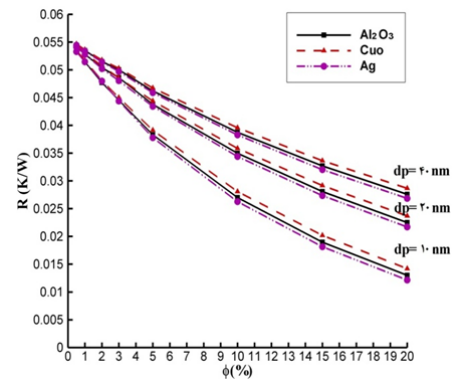
۵- نتیجه گیری

عملکرد گرمایی لوله حرارتی هنگام استفاده از نانوسیال به عنوان سیال عامل و با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار گرفت. سه نوع نانوذره اکسید آلومینیوم، اکسید مس و نقره در سیال پایه آب، به عنوان سیال عامل مورد استفاده قرار گرفت و تغییرات سرعت، فشار و دما برای کسر حجمی‌ها و سایز مختلف ذرات بررسی و با یکدیگر مقایسه گردید. مشاهده گردید که نانوذرات مورد استفاده در سیال پایه باعث بهبود عملکرد گرمایی لوله حرارتی در مقایسه با آب خالص، با کاهش مقاومت حرارتی و گرادیان دما در طول لوله حرارتی می‌شوند. که تایید کننده‌ی نتایج آزمایشگاهی موجود می‌باشد و پتانسیل نانوسیالات را به عنوان جایگزین سیالات عامل مورد استفاده، نشان می‌دهد. با افزایش کسر حجمی شاهد کاهش ماکزیمم سرعت مایع و کاهش افت فشار مایع تا مقادیر خاص کسر حجمی و سپس افزایش آن خواهیم بود. و به دلیل عدم امکان پیشنهاد یک مقدار کسر حجمی خاص برای تمام موارد، یک بازه گسترده از کسر حجمی مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهدات بیان-کننده‌ی وابستگی انتقال حرارت به سایز نانوذرات و اثر بیشتر نانوذرات با سایز کوچکتر بر اختلاف دما در امتداد لوله حرارتی می‌باشد، که بیان کننده‌ی وجود مقادیر بهینه برای کسر حجمی و قطر ذرات برای دستیابی به ماکزیمم عملکرد لوله حرارتی می‌باشد. همچنین از بین سه نانوسیال استفاده شده، نانوسیال نقره به دلیل ایجاد کمترین مقاومت حرارتی و افت فشار بهترین عملکرد را ایجاد خواهد کرد.

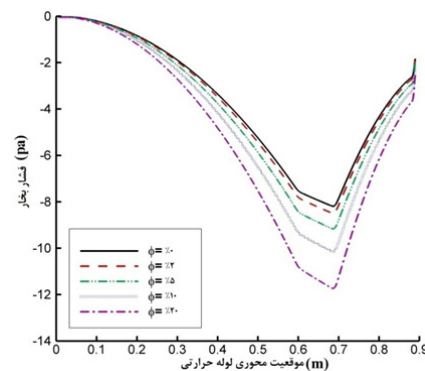
مراجع

- [1] Faghri A (1995) Heat Pipe Science and Technology. Taylor & Francis Pub, Washington.
- [2] Zuo ZJ, North MT, Wert KL (2001) High heat flux heat pipe mechanism for cooling of electronics. IEEE Trans on Comp and Pack Tech 24(2): 220-225.
- [3] Kim K, Won M, Kim J, Back B (2003) Heat pipe cooling technology for desktop pc cpu. App Ther Eng 23(9): 1137-1144.
- [4] Choi SUS, Eastman JA (1995) Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticle. ASME FED 231: 99-105.

بود. علاوه بر این نتایج تغییرات مقاومت حرارتی منطبق با نتایج و تغییرات تشریح شده در مورد تغییرات دمای اواپراتور و کندانسور می‌باشد. با توجه به مطالب ذکر شده در بالا می‌توان نتیجه‌گیری نمود که، استفاده از ذرات با کسر حجمی بیشتر، هدایت گرمایی بالاتر و قطر کمتر سبب کاهش هرچه بیشتر مقاومت حرارتی و افزایش عملکرد لوله حرارتی خواهد بود. از دیگر اثرات افزودن نانوذرات به سیال پایه، تغییر فشار بخار می‌باشد. آنچنان که در شکل ۱۶ برای نانوسیال اکسید آلومینیوم مشاهده می‌شود، در صورت در نظر گرفتن تغییرات خواص ترموفیزیکی بخار به دلیل تغییر دمای عملکرد بخار، نحوه‌ی تغییرات توزیع فشار به صورت افزایش افت فشار با افزایش کسر حجمی می‌باشد. یعنی در واقع به دلیل کاهش دمای عملکرد با افزایش کسر حجمی، شاهد کاهش چگالی و افزایش سرعت و افت فشار خواهیم بود.



شکل ۱۵- تغییر مقاومت حرارتی برای ذرات و قطرهای مختلف



شکل ۱۶- اثر کسر حجمی بر توزیع فشار بخار برای نانوذرات اکسید آلومینیوم

- using nanofluids. *Int J Heat Mass Trans* 53: 1438–1445.
- [14] Shafahi M, Bianco V, Vafai K, Manca O (2010) An investigation of the thermal performance of cylindrical heat pipes using nanofluids. *Int J Heat Mass Trans* 53: 376–383.
- [15] Huang L, El-Genk MS, Tournier JM (1993) Transient performance of an inclined water heat pipe with a screen wick. *ASME national heat transfer conf, Atlanta GA heat pipes and capillary pumped loops HTD* 236: 87–92.
- [16] Tournier JM, El-Genk MS (1994) A heat pipe transient analysis model. *Int J Heat Mass Trans* 37(5): 753–762.
- [17] Chi SW (1976) *Heat Pipe Theory and Practice*. Hemisphere, Washington.
- [18] Drew DA, Passman SL (1999) *Theory of multi component fluids*. Springer, Berlin.
- [19] Haghshenas Fard M, Nasr Eshahany M, Talaie MR (2010) Numerical study of convective heat transfer of nanofluids in a circular tube two- phase model versus single- phase model. *Int Communic in Heat Mass Trans* 37: 91–97.
- [20] Brinkman HC (1952) The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *J Chem Phys* 20: 571–581.
- [21] Yu W, Choi SUS (2003) The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model. *J of Nanopartic Resea* 5: 167–171.
- [22] Zhu N, Vafai K (1999) Analysis of cylindrical heat pipes incorporating the effects of liquid-vapor coupling and non-Darcian transport-a closed form solution. *Int J Heat Mass Trans* 42: 3405–3418.
- [5] Das SK, Choi SUS, Patel HE (2006) Heat Transfer in Nanofluids-A Review. *Heat Trans Eng* 27(10): 3–19.
- [6] Kayhani MH, Soltanzadeh H, Heyhat MM, Nazari M, Kowsary F (2012) Experimental study of convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid. *Int Communic in Heat and Mass Trans* 39: 456–462.
- [7] Kayhani MH, Nazari M, Soltanzadeh H, Heyhat MM, Kowsary F (2012) Experimental analysis of turbulent convective heat transfer and pressure drop of Al₂O₃/water nanofluid in horizontal tube. *Micro & Nano Letters* 7: 223–227.
- [8] Mousa MG (2011) Effect of nanofluid concentration on the performance of circular heat pipe. *Int J Sci & Eng Res* 2(4): 1–8.
- [9] Senthilkumar R, Vaidyanathan S, Sivaraman B (2010) Performance analysis of heat pipe using copper nanofluid with aqueous solution of n-butanol. *Int J Mech and Mat Eng* 1(4): 251–256.
- [10] Senthilkumar R, Vaidyanathan S, Sivaraman B (2011) Experimental analysis of cylindrical heat pipe using copper nanofluid with aqueous solution of n-hexanol. *Fro in Heat Pipes* 2: 1–5.
- [11] Naphon P, Assadamongkol P, Borirak T (2008) Experimental investigation of titanium nanofluids on the heat pipe thermal efficiency. *Int com in Heat and Mass Trans* 35(10): 1316–1319.
- [12] Yang XF, Liu Z-H, Zhao J (2008) Heat transfer performance of a horizontal micro-grooved heat pipe using cuo nanofluid. *J of Micromech and Microeng* 18(3): 35–38.
- [13] Shafahi M, Bianco V, Vafai K, Manca O (2010) Thermal performance of flat-shaped heat pipes