بهبود انتقال حرارت نانوسیال مغناطیسی در لوله مارپیچ مسی با دیوارهی دما ثابت

تحت ميدان مغناطيسى

مجيد محمدي

کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک majid.mm.mohammadi@gmail.com امین طاهری^۱

کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک amintaheri@mail.um.ac.ir

محمد پسندیده فرد^{۴,*}

استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک mpfard@um.ac.ir اباذر آباده

دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک abazarabadeh@mail.um.ac.ir

چکیدہ

در این پژوهش آزمایشگاهی اثر قطر کویل،گام کویل، جنس سیال کاری (آب خالص و نانوسیال اکسید آهن-آب) و همچنین میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت و اصطکاک درون لوله با شرط مرزی دما ثابت بررسی شده است. در ادامه بعد از انتخاب کویل بهینه، اثر میدان مغناطیسی با شدتهای ۶۰۰ و ۹۰۰ گوس نیز بر عدد ناسلت و انتقال حرارت در کویل بررسی شده است. نتایج نشان میده افزایش دبی، یا همان افزایش عدد بی بعد رینولدز موجب زیاد شدن ضریب انتقال حرارت شده و این موضوع بهبود انتقال حرارت و عدد ناسلت را در لوله در پی خواهد داشت. کاهش قطر در لوله مارپیچ موجب بهبود انتقال حرارت میشود ولی مشکلاتی را نیز به همراه دارد. افزایش افت فشار در لوله مهترین مشکل است. با افزایش افت فشار، هزینه پمپ کردن سیال کاری در لوله بالا رفته و اثر نامطلوبی دارد. همچنین اثر نانوسیال ۱٪ جرمی اکسید آهن-آب بر عدد ناسلت و اصطکاک نیز بررسی شده است. میانگین عدد ناسلت برای نانوسیال و آن به ترتیب ۱۳/۱۲ و ۱۲/۱۴ است. در هنگام اعمال میدان نانوذرات مغناطیسی، نانوذرات به سمت دیواره لوله نزدیک شده و رسانندگی حرارتی را بهبود میدهد. افزایش رسانندگی حرارتی در نزدیکی لوله موجب افزایش مقدار عدد ناسلت برای نانوسیال و میان در لوله مهمترین مشکل است. با فزایش افت فشار، هزینه پمپ کردن سیال کاری در لوله بالا رفته و اثر نامطلوبی دارد. میرسی اثر نانوسیال ۱٪ جرمی اکسید آهن-آب بر عدد ناسلت و اصطکاک نیز بررسی شده است. میانگین عدد ناسلت برای نانوسیال و میدرتی را بهبود میدهد. افزایش رسانندگی حرارتی در نزدیکی لوله موجب افزایش مقدار عدد ناسلت و به دنبال آن افزایش نرخ انتقال حرارت میشود. میانگین عدد ناسلت برای حالت بدون میدان، ۲۰۰ گوس و ۹۰۰ گوس به ترتیب ۱۱/۱۲، ۱۱/۱۹ و ۱۲/۱۲ است.

كلمات كليدى: نانوسيال مغناطيسى، دما ثابت، ناسلت، مبدل حرارتى، ميدان مغناطيسى.

		، علائم	فهرست
		ظرفیت گرمایی ویژه	c_p
گام لوله	р	سطح لوله	А
اختلاف دماى متوسط لگاريتمى	ΔT_{lm}	قطر لوله	D
دہی جرمی	'n	طول لوله	L
دما	Т	ناسلت	Nu
نانى	علائم يو	شار حرارتی	$q^{,}$
بازده	η	ضريب جابجائي همرفت	h
چگالی	ρ	ضريب اصطكاك	f

۱– مقدمه

در سالهای اخیر به دلیل افزایش جمعیت و صنعتی شدن، جوامع و کشورها با کاهش ذخایر انرژی و مصرف روز افزون آن مواجه شده است. در هر کشور بخش صنعت آن یکی از بخشهای پر مصرف انرژی می،باشد. برخی وسایل و ابزار در صنعت به-منظور کارائی مطلوب، نیازمند خنک شدن بیشتر و بهتر می،باشند که مسئله خنککاری از گذشته تا به امروز یک چالش بزرگ محسوب میشود. افزایش قیمت و بالا رفتن هزینه تعویض، تعمیر و نگهداری باعث توجه بیشتر پژوهشگران به مسئله خنک کاری شده است. در واقع در پارهای از زمانها این وسایل به دلیل افزایش دمای شدید صرفه اقتصادی برای تولید ندارد و به این مرحله نمی رسند. به عنوان مثال اگر در مبدلها^۱ انتقال حرارت بهتری بین سیال کاری گرم و سرد ایجاد شود، بازده و عملکرد آن به صورت چشم گیری افزایش میابد.

جهت بهبود بازده در انواع مبدلها باید انتقال حرارت بین دو سیال افزایش یابد که این کار را میتوان از طریق افزایش اختلاف دما در ورود و خروج لوله بین سیال کاری گرم و سرد، افزایش ضریب انتقال حرارت سیال، تغییر نوع سیال کاری انجام داد. در دو دهه اخیر، استفاده از نانوسیالات^۲ مختلف بهعنوان خنک کننده و عامل بهبود انتقال حرارت گسترش یافته است. در یک پژوهش اقتصادی و زیست محیطی آباده و همکاران [۱] نشان دادند آیندهای روشن را میتوان برای این نوع سیالات متصور شد. آنها تحلیل زیست محیطی و اقتصادی نانوسیالات اکسید فلزی شامل نانوسیالات آب/اکسید روی، آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید تیتانیوم با غلظت جرمی ۲/۰ درصد در سامانهی سیستمهای فوتوولتاییک حرارتی^۳ انجام دادند.

به طور کلی نانوسیالات با استفاده از روش یک مرحلهای^۴ یا دو مرحلهای^۵ تهیه میشوند. در روش اول (روش یک مرحله-ای) آماده سازی نانوسیالات و تولید نانوذرات به طور همزمان و به کمک یک واکنش شیمیایی انجام شده و در این روش به دلیل اینکه از ذرات خشک استفاده نمیشود معمولا رسوب و تجمع کاهش مییابد. در روش یک مرحلهای نمیتوان تهیه نانوسیالات را در مقیاس زیاد انجام داد. در مرحله دوم (روش دو مرحله ای) نانوذرات به شکل پودر به کمک تحریک نیروی مغناطیسی متمرکز و ارتعاشات فراصوت و در همزن با دورهای بالا در سیال پایه پخش شده و این روش را برای تولید نانوسیال در مقیاس بزرگ اقتصادی مناسب دیده اند.

یکی از انواع پرکاربرد مبدلها، نوع مارپیچ آن است که توسط پژوهشگران زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. مبدلهای مارپیچ به دلیل تغییر رژیم و حرکت سیال نقش بسیار مهمی را در صنعت ایفا میکنند. لولههای کویلی و مارپیچ همچنین به-خاطر ضریب انتقال حرارت بالا و فشردگی (حجم کم) نقش بسیار بزرگی را در تولید انواع مبدلها از جمله ژنراتورهای بخار موجود در صنعت ایفا میکنند [۲]. همچنین این مبدلها در سیستمهای اختلاط شیمیایی، سیستمهای خنک کننده، بازیاب حرارت هدررفته، مهندسی محیط، فرآیندهای مهندسی بیومکانیک و برودتی نیز بهکار میروند [۳, ۴]. با افزودن مواد جامدی با ضریب هدایت بالا با ابعاد نانومتر به سیال کاری پایه، یک مخلوط همگن جامد-مایع تشکیل شده (نانوسیال) که دارای مزایای فراوانی است [۵]. از جمله مزایای آن بهبود انتقال حرارت و افزایش بازده سیستمها است. اما معایب آن شامل زمان پایداری کم، خوردگی زیاد، گرفتگی مجراها و کانالها و افت فشار شدید است [۶]. به طور کلی دو رویکرد برای مطالعه رفتار نانوسیال وجود دارد. رویکرد یا مدل تک فاز مدل دو فاز. یکی از مدلهای تکفاز که بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، مدل درات نام دارد که اولین بار توسط خووان⁹ و روئتزل^۷ در سال ۲۰۰۰ میلادی ارائه گردید [۷]. اکبرینیا و بهزادمهر [۸] با سرتماه دارت در ویکرد یا مدل تک فاز مدل دو فاز. یکی از مدلهای تکفاز که بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، مدل سرکندگی است که تنها تفاوت آن با سیال پایه، خواص حرارتی و ترموفیزیکی موثر آن است. مدل دیگر تکفازی، مدل پراکندگی سرکند میا دارد که اولین بار توسط خووان⁹ و روئتزل^۷ در سال ۲۰۰۰ میلادی ارائه گردید [۷]. اکبرینیا و بهزادمهر [۸] با

¹ Heat exchangers

² Nanofluids

³ Thermal photovoltaic system

⁴ One-step

⁵ Two-step

⁶ Xuan

⁷ Roetzel

غلظت نانوسیال، اثرات مثبتی در بهبود انتقال حرارت دارد. در یک پژوهش عددی دیگر، اکبرینیا و لاور[^] [۹] اثر قطر ذرات جامد در یک لوله منحنی شکل در جریان با رژیم آرام را بررسی کردند. لازم به ذکر است پژوهش آنها به کمک روش حجم کنترل و با مدل دوفازی انجام شد. آنها بیان کردند که افزایش قطر نانوذرات، رفتار جریان را لولهی منحنی شکل تغییر نمی-دهد. دین^۴ [۱۰] بهعنوان اولین پژوهشگر در زمینهی لولههای با شکل منحنی بود که بر روی جریان در یک لوله چنبرهای با استفاده از روش اختلال مطالعاتی انجام داد و بیان کرد که این نوع جریان را میتوان با یک عدد بیبعد بهنام عدد دین^{۱۰} نسبت نیروهای مرکزگرا به نیروهای اینرسی، معرفی کرد. در واقع در لولههای منحنی، نیروی مرکزگرا جریان ثانویهای را ایجاد میکند میگیرد. لازم به ذکر است مدل پراکندگی توانایی تخمین میزان بالایی از انتقال حرارت نانوسیال را دارد. همچنین پژوهش میگیرد. لازم به ذکر است مدل پراکندگی توانایی تخمین میزان بالایی از انتقال حرارت نانوسیال را دارد. همچنین پژوهش میگیرد. و این به ذکر است مدل پراکندگی توانایی تخمین میزان بالایی از انتقال حرارت نانوسیال را دارد. همچنین پژوهش میگیرد. و میشگاهی فراوانی در زمینه انتقال حرارت در لولهها با اشکال و شرایط مرزی متفاوت صورت گرفته است. در یک می میرد می ازمایشگاهی زینلی هریس و همکاران[۱۱]، جریانی با رژیم آرام (نانوسیال آب-Ou) و آبرادهی تایوبیال را دارد. همچنین پژوهش می و می ازمایشگاهی زینلی هریس و همکاران[۱۱]، جریانی با رژیم آرام (نانوسیال آب-Ou) و آبرادهای نتایج در درصدهای حجم پایین، به خوبی با مدل همگن مطابقت داشت، اما در درصدهای حجمی بالاتر نتایج زیاد مطابقت نداشتند.در یک پژوهش عددی و آزمایشگاهی اکبری دوست و همکاران [۱۲] اثر نسبت انحنا و پیچ خوردگی را در مقادیر مختلف عدد رینولار، برای جریان جر

یکی از راههای موثر در افزایش و بهبود انتقال حرارت اعمال میدان مغناطیسی بر لولهها یا کویلهای حاوی نانوسیال مغناطیسی است. اعمال میدان سبب نزدیک شدن نانوذرات به دیواره شده و بهبود انتقال حرارت را در پی دارد. پژوهشهایی آزمایشگاهی و عددی در زمینه اعمال میدان مغناطیسی به دو شکل متغیر و ثابت گرفتهاست. در یک پژوهش عددی و قرمایشگاهی، عزیزیان و همکاران [۱۳] در حضور میدان مغناطیسی تغییرات افت فشار و ضریب انتقال حرارت جابهجایی جریان آرام نانوسیال را تحقیق کردند. آنها بیان کردند که میدان مغناطیسی بر افت فشار جریان در لوله اثر چندانی ندارد. افت فشار با اعمال شدت میدان مغناطیسی برابر با ۴۳۰ میلی تسلا تنها تا ۵/۷ درصد افزایش مییابد. درحالیکه ضریب انتقال محرارت محلی نانوسیال معناطیسی در حدود ۳۰۰ درصد افزایش مییابد. رینالدی^{۱۱} و همکاران[۱۴] نیز روی جریانهای سیال مغناطیسی مطالعاتی انجام دادند و به پیشرفتهایی فراوانی در این مبحث دست یافتند. آنها بیان کردند سیال مغناطیسی میتواند شاخصههای هدرودینامیکی یاتاقان لغزشی را بهبود ببخشد بهطوریکه در یک دور ثابت این نوع یاتاقان میتواند بار میدان مغناطیسی مطالعاتی انجام دادند و به پیشرفتهایی فراوانی در این مبحث دست یافتند. آنها بیان کردند سیال مغناطیسی میواند شاخصههای هدرودینامیکی یاتاقان لغزشی را بهبود ببخشد بهطوریکه در یک دور ثابت این نوع یاتاقان میتواند بار میدان مغناطیسی ثابت و متغیر بررسی کرده و مشاهده کردند که با افزایش فرکانس اعمالی ، اختلاف دما در ورود و خروج میدان مغناطیسی ثابت و متایز مربع اختلاف دمای ورود و خروج کلکتور به ترتیب ۹/۰، ۸، ۸ و ۱/۸ کلوین به ترتیب برای بدون میدان و میدان هی مغناطیسی با فرکانس ۵، ۲۵ و ۵۰ هرتز است.

همانطور که در پیشینه پژوهش بیان شد استفاده از کویل به دلیل حجم کم و تغییر حرکت سیال موجب افزایش کارائی مبدلها می شود. همچنین استفاده از نانوسیال و اعمال میدان مغناطیسی نیز موجب بهبود راندمان مبدلها شده است و مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. اما استفاده همزمان از کویل، میدان مغناطیسی و نانوسیال کمتر توسط پژوهشگران قرار گرفته است. در این پژوهش آزمایشگاهی اثر قطر کویل، گام کویل و جنس سیال کاری (آب خالص و نانوسیال اکسید آهن-آب) بر انتقال حرارت و اصطکاک درون لوله با شرط مرزی دما ثابت بررسی شده است. در ادامه بعد از انتخاب کویل بهینه، اثر میدان مغناطیسی با شدتهای ۶۰۰ و ۹۰۰ گوس نیز بر عدد ناسلت و انتقال حرارت در کویل بررسی شده است.

- ⁸ Laur
- ⁹ Dean
- ¹⁰ Dean number

¹¹ Rinaldi

۲- بستر آزمایشگاهی، تهیه نانوسیال و تحلیل عدم قطعیت

در شکل ۱ و ۲ بهترتیب بستر آزمایشگاهی و طرحواره آن که در آزمایشگاه میکرو/نانو دانشگاه فردوسی ساخته شده نشان داده شده است. اجزای موجود در بستر حاضر شامل لولههای مسی و پلاستیکی برای عبور سیال کاری، مخازن آب و نانوسیال برای تامین سیال خنک کننده و سیال کاری، منبع تغذیه برای تامین المنت حرارتی، پمپ، مگنتها، ترموکوپلهای داخل مخزن و ورود و خروج سیال، سیستم کنترلی دما و فشارسنج است. روند انجام آزمایشات بدین صورت است که سیال از داخل مخزن مربوطه به سمت دبیسنج حرکت کرده و سپس با تنظیم مقدار دبی سیال کاری به درون کویل مارپیچ با دمای دیواره ثابت حرکت میکند. پس از جذب گرما از داخل مخزن از آن خارج شده و بعد از خنک شدن داخل مبدل به مخزن باز میگردد.



شکل ۱: بستر آزمایشگاهی و تجهیزات اندازه گیری



نانوسیالی مورد مطالعه در این پژوهش نانوسیال آب-Fe₃O4 میباشد که دلیل استفاده از این نوع نانوسیال تغییرات حرکت نانو ذرات آن در میدان مغناطیسی است. همانطور که بیان شد برای پایدارسازی و تهیه نانوسیالات دو روش کلی وجود دارد، روش یک مرحلهای و دو مرحلهای. در این پژوهش از روش دو مرحلهای برای ساخت نانوسیال استفاده شده است. ابتدا نانوذرات اکسید آهن (نانوذرات Fe₃O4 با خلوص بیشتر از ۹۸٪ و اندازهی ۲۰ تا ۳۰ نانومتر که از شرکت US research نانوذرات اکسید آهن (نانوذرات Fe₃O4 با خلوص بیشتر از ۹۸٪ و اندازهی ۲۰ تا ۳۰ نانومتر که از شرکت US research بهمنظور جدا کردن عدم تودهای شدن ذرات در دستگاه اولتراسونیک قرار داده میشود. سپس مخلوط حاضر روی دستگاه بهمنظور جدا کردن عدم تودهای شدن ذرات در دستگاه اولتراسونیک قرار داده میشود. سپس مخلوط حاضر روی دستگاه بهمزن قرار داده و حین بهم خوردن، ماده پایدار کننده (اسید سیتریک) به آرامی به آن اضافه میشود. در مرحله بعد، به منظور پایداری بهتر مخلوط شست و شو داده شده و این عمل توسط آهنربا و جمع کردن ذرات کنار دیواره انجام میشود. سپس آب

FDC2019 هجدهمین کنفرانس دینامیک شارهها FDC2019 مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، ۷-۵ شهریور ۱۳۹۸

به منظور اطمینان از نتایج آزمایش معمولا تحلیل عدم قطعیت برای نتایج آزمایش و ابزار انجام میگیرد. مقادیر عدم قطعیت ابزار مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. جزئیات محاسبه عدم قطعیتها در پژوهش پیشین بیان شده است [۱۶]. خلاصه روابط محاسبه عدم قطعیت مطلق و نسبی در روابط (۱–۵) ارائه شده است. در جداول (۱) و (۲) به ترتیب عدم قطعیت ابزار و پارامترهای مختلف ذکر شده است.

$$\delta N = \sqrt{\left(\frac{\partial Nu}{\partial h}\delta h\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial D}\delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial K}\delta K\right)^2} \tag{1}$$

$$\frac{\delta N u}{N u} = \sqrt{\left(\frac{\delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\delta K}{K}\right)^2} \tag{(Y)}$$

$$\frac{\delta\Delta T_{lm}}{\Delta T_{lm}} = \sqrt{\left(\frac{\delta T_{b,i}}{T_{b,i}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{b,o}}{T_{b,o}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_s}{T_s}\right)^2} \tag{(7)}$$

$$\frac{\delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\delta q_s}{q_s}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta T_{lm}}{\Delta T_{lm}}\right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A}\right)^2} \tag{(f)}$$

$$Re = \frac{\delta Re}{\sqrt{\left(\frac{\delta v}{v}\right)^2 + \left(\frac{\delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\delta v}{v}\right)^2}} \tag{(a)}$$

ها	قطعيت	عدم	و	ابزار	و	تجهيزات	:'	ر ۱	جدوا
----	-------	-----	---	-------	---	---------	----	-----	------

شماره	ابزار	حدود	پارامتر	دقت	عدم قطعیت نسبی
١	PT 100 thermocouple	0 - 200 °C	دمای ورود و خروج سیال کاری	0.1	0.244
٢	Pressure transmitter	0 - 100 mbar	فشار ورود و خروج سیال کاری	0.1	0.238
٣	Flow meter	0 - 70 lit/hr	دبی سیال کاری	1	1.667
		طعيت پارامترها	جدول ۲: عدم قد		
را بام ت	ΛT	h	Re	Nu	a

پارامتر	ΔT_{lm}	h	Re	Nu	q_s
عدم قطعيت	0.422	1.676	1.670	1.708	1.796

۴- نتايج

۴-۱- راهبرد آزمایشها و روابط حاکم

FDC2019 هجدهمین کنفرانس دینامیک شارهها FDC2019 مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، ۷-۵ شهریور ۱۳۹۸

یکی از راههای کاربردی در افزایش عدد ناسلت درون لوله صاف و به دنبال آن افزایش ضریب و مقدار انتقال حرارت سیال کاری از لوله صاف، ایجاد انحنا در لوله است. زمانی که در لوله صاف به شکل کویل مارپیچ تبدیل میشود هم سبب کاهش اشغال فضا میشود. در این پژوهش آزمایشگاهی عوامل اثرگذار بر عدد ناسلت متوسط جریان سیال از لوله مورد بررسی قرار میگیرد. براساس جدول (۳) ۶ لوله کویل مارپیچ مختلف انتخاب شده است. همه کویلها از جنس مس هستند و دارای طول کل لوله ثابت و اندازه قطر و گام متفاوت هستند. کویلها بر اساس موارد زیر طراحی و بررسی میشوند.

- کویلهای شماره ۱، ۲، ۳و ۴ دارای گامهای ۳۰ میلیمتر هستند در حالیکه هریک قطر کویل متفاوتی دارند.
 - کویلهای شماره ۲، ۵ و۶ نیز قطر کویل مشابه و اندازه گام متفاوت دارند.

ન	δ	p (mm) گام	L (mm) طول	D (mm) قطر کویل	شماره کویل مار پیچ
0.100	0.068	30	200	95	1
0.070	0.048	30	200	135	2
0.056	0.038	30	200	170	3
0.043	0.030	30	200	220	4
0.047	0.048	20	200	135	5
0.093	0.048	40	200	135	6

جدول ۳: پارامترهای مختلف در کویلهای مورد مطالعه

سه پارامتر شامل ضریب اصطکاک داخلی ، ضریب جابجائی و عدد ناسلت برای مقایسه نتایج در این پژوهش مورد بررسی قرار می گیرد. برای یافتن ضریب انتقال حرارت جابجائی، ابتدا حرارت جذب شده توسط سیال از رابطه (۶) محاسبه میشود: $q_s = \dot{m}C_{p_{nf}}(T_{b,o} - T_{b,i})$

که رابطهی بالا \dot{m} دبی جرمی سیال کاری، $C_{p_{nf}}$ ظرفیت گرمایی نانوسیال، $T_{b,o} g_{b,i}$ بهترتیب دمای ورودی و خروجی سیال کاری در لوله مارپیچ است. سپس توسط روابط (۲) و (۸) بهترتیب ضریب متوسط انتقال حرارت جابجائی و اختلاف دمای متوسط لگاریتمی بدست میآید: $\bar{h} = q_s / A \Delta T_{lm}$ (۷)

$$\Delta T_{lm} = (\Delta T_2 - \Delta T_1) / \ln(\Delta T_2 / \Delta T_1) \tag{A}$$

که روابط بالا \bar{h} ضریب متوسط انتقال حرارت همرفت، $\Delta T_1 = T_{b,i} - T_s$ ، $\Delta T_2 = T_{b,o} - T_s$ و A مساحت سطح جانبی داخلی لوله است. در نتیجه عدد ناسلت و عدد رینولدز به عنوان دو عدد بدون بعد از روابط (۹) و (۱۰) بدست میآید. همچنین با داشتن اختلاف فشار دو سر کویل مقدار ضریب اصطکاک از رابطه (۱۱) به سادگی محاسبه میشود. (۹)

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi d\mu}$$
(1.)

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{l}{d}\right)\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)} \tag{11}$$

۴-۲- بررسی اثر دبی سیال کاری و قطر کویل

ابتدا اثر دبی بر عدد ناسلت میانگین در ۴ کویل ۱ تا ۴ در شکل ۲ بررسی شده است. افزایش دبی جریان گذرنده از لوله، افزایش عدد ناسلت را درپی دارد. در توجیه این پدیده میتوان بیان کرد که افزایش دبی، یا همان افزایش عدد بی بعد رینولدز موجب زیاد شدن ضریب انتقال حرارت شده و این موضوع بهبود انتقال حرارت و عدد ناسلت را در لوله در پی خواهد داشت. به عنوان مثال در کویل شماره ۱ با افزایش رینولد از ۲۰۰ تا ۲۲۰۰ عدد ناسلت حدود ۸۶ درصد افزایش دارد. در گام بعد بررسی اثر قطر کویل مارپیچ بر انتقال حرارت لوله بررسی میشود.در شکل (۳) نشان داده شده است در رینولد ثابت با کاهش قطر ناسلت افزایش و انتقال حرارت افزایش یافته است. دلیل این پدیده افزایش نیروی گریز از مرکز در اثر کاهش دور است که جریان ثانویه قویتر میشود. به عنوان مثال در رینولد ۱۳۰۰ با کاهش قطر، عدد ناسلت از ۹/۶ تا ۱۱/۹۵ افزایش یافته است.



شکل ۳: عدد ناسلت برحسب عدد رینولد برای کویل های شماره ۱ تا ۴

۴-۳- بررسی اثر دبی سیال کاری بر ضریب اصطکاک

اگرچه کاهش قطر در لوله مارپیچ موجب بهبود انتقال حرارت می شود اما مشکلاتی را نیز به همراه دارد. یکی از این مشکلات افزایش افت فشار در لوله است. با افزایش افت فشار، هزینه پمپ کردن سیال در لوله بالا رفته و اثر نامطلوبی دارد. براساس شکل (۴) با افزایش دبی جریان سیال کاری در لوله افت فشار نیز افزایش می یابد. دلیل این موضوع این است که در اثر افزایش دبی و سرعت جریان، گرادیان سیال کاری در لوله افت فشار نیز افزایش می یابد. دلیل این موضوع این است که در اثر امل براساس شکل (۳) با افزایش دبی جریان سیال کاری در لوله افت فشار نیز افزایش می یابد. دلیل این موضوع این است که در اثر افزایش دبی و سرعت جریان، گرادیان سرعت و درنتیجه تنش زیاد شده و تلفات در لوله نیز با گرادیان سرعت در رابطه مستقیم است. براساس شکل (۴) در رینولدز ثابت ۱۰۰۰ با کاهش قطر، تنش از ۱/۳۳ تا ۱/۶۶ افزایش پیدا می کند.



شکل ۴: ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولد برای کویل های شماره ۱ تا ۴

برای پیدا کردن کویل مناسب از دیدگاه همزمان ناسلت و افت فشار، استفاده از متغیر η الزامی میباشد. در شکل ۵ میزان بازده کویلهای ۱ و ۲ و همچنین ۳ و ۴ به صورت جداگانه بررسی شده است. با افزایش متغیر η عدد ناسلت افزایش و افت فشار نیز کاهش مییابد. لازم به توضیح است شکل ۵ و مقادیر آن نسبت به کویل شماره ۴ سنجیده شده است. در شکل مشهود است که η برای کویل۲ بیشترین مقدار را دارد. پس از آن بیشترین مقدار η برای کویل۳، سپس کویل۴ و در آخر کویل۱ می باشد. بنابراین کویل۲ به عنوان کویل مناسب انتخاب شده است.



شکل ۵: (الف) بازده بر حسب رینولدز برای (الف) کویل ۱ و ۲ (ب) برای کویل ۳ و ۴

۴-۴- اثر نانوسیال بر نتایج

در بخش قبل کویل ۲ به عنوان کویل بهینه از دیدگاه بازده انتخاب شده. یکی از راههای افزایش نرخ انتقال حرارت افزایش ضریب هدایت حرارتی (استفاده از نانوسیال به جای آب خالص) است. در این پژوهش نانوذرات اکسید آهن به سیال پایه اضافه شد تا نانوسیال ۱٪ جرمی اکسید آهن-آب تهیه شود. براساس شکل ۶ در هر مقدار رینولدز و دبی سیال کاری نانوسیال از آب نتایج بهتریب نشان میدهد. میانگین عدد ناسلت برای نانوسیال و آب به ترتیب ۱۱/۳۴ و ۱۰/۳۴ است.



شکل ۶: مقایسه آب و نانوسیال بر حسب رینولدز و ناسلت

۴-۵- اثر میدان مغناطیسی

یکی از عوامل مهم در بهبود انتقال حرارت در کویل اعمال نیروی مغناطیسی است. در این پژوهش میدان مغناطیسی توسط توسط ۸ قطعه آهنربای دائمی که در کنار کویل قرار داده شده است اعمال میشود. لازم به ذکر است میدان مغناطیسی توسط دستگاه گوسمتر اندازه گیری شده است. به صورتی که چسبیده به آهنربا در حدود ۲۵۰۰ گوس و در فاصله ۱٫۵ سانتیمتری از آهنربا حدودا ۹۰۰ گوس و در فاصله ۲ سانتیمتری نیز ۶۰۰ گوس میباشد. آهنرباها از دو سمت بالا و پایین لوله به لوله اعمال میشود. در هنگام اعمال میدان نانوذرات مغناطیسی به سمت دیواره لوله نزدیک شده و رسانندگی حرارتی را بهبود میدهند. افزایش رسانندگی حرارتی در نزدیکی لوله باعث افزایش مقدار عدد ناسلت و به دنبال آن افزایش نرخ انتقال حرارت میشود. (شکل ۷). میانگین عدد ناسلت برای حالت بدون میدان، ۶۰۰ گوس و ۹۰۰ گوس به ترتیب ۱۱/۳۴، ۱۱/۳۴ و



۵- نتیجهگیری

در این پژوهش آزمایشگاهی اثر قطر کویل، گام کویل و جنس سیال کاری بر انتقال حرارت و اصطکاک درون لوله با شرط مرزی دما ثابت بررسی شده است. همچنین در پایان بعد از انتخاب کویل بهینه، اثر میدان مغناطیسی ۶۰۰ و ۹۰۰ گوس نیز بر عدد ناسلت درون لوله بررسی شده است. در این پژوهش کویلهای شماره ۱، ۲، ۳و ۴ دارای گامهای ۳۰ میلیمتر هستند در حالیکه هریک قطر کویل متفاوتی دارند. همچنین کویلهای شماره ۲، ۵ و ۶۰ تو ۶۰ و ۱۰ معاوت دارند. عمد ناسلت درون لوله بررسی شده است. در این پژوهش کویلهای شماره ۲، ۵ و ۶۰ تو ۲ دارای گامهای ۳۰ میلیمتر هستند در حالیکه هریک قطر کویل متفاوتی دارند. همچنین کویلهای شماره ۲، ۵ و۶ نیز قطر کویل مشابه و اندازه گام متفاوت دارند. نتایج نشان می دهد افزایش دبی با همان افزایش عدد بی نتایج نشان می دهد افزایش دبی جریان گذرنده از لوله، افزایش عدد ناسلت را در پی دارد. افزایش دبی، یا همان افزایش عدد بی نتایج نشان می دهد افزایش دبی جریان گذرنده از لوله، افزایش عدد ناسلت را در پی دارد. افزایش دبی، یا همان افزایش عدد بی نتایج نشان می دهد افزایش دبی جریان گذرنده از لوله، افزایش عدد ناسلت را در پی دارد. افزایش دبی یا همان افزایش عدد بی نتایج نشان می دهد افزایش دوب کرارت و عدد ناسلت را در لوله در پی نواهد داشت. اگرچه کاهش قطر در لوله مارپیچ بهبود انتقال حرارت را در پی دارد. اما مشکلاتی را نیز به همراه دارد. یکی از بین مشکلات افزایش افت فشار، هزینه پمپ کردن سیال در لوله را بالا رفته و اثر نامطلوبی دراد. در این پژوهش همچنین نانوذرات اکسید آهن به سیال پایه اضافه شد تا نانوسیال ۱٪ جرمی اکسید آهن -آب تهیه شود. برای نانوسیال و آب به ترتیب ۴۰۱/۱ و ۴۰/۱۰ است. در پژوهش همچنین آهنرباها از دو سمت بالا و پایین به لوله اعمال می نتایج نشان می دهد. میانگین عدد ناسلت شود. در هنگام اعمال میدان نانوذرات مغناطیسی به سمت دیواره لوله نزدیک شان می دوله در مین به دوله اعمال می افزایش را می در نانوندان در زویش می از بران از دو سم بالا و پایین به لوله اعمال می نود. شده اینوز بال می دی نوره باعث افزایش می در پژوهش همی نود ناسلت و به دنبال آن افزایش می در نامیلی عدد ناسلت می در در همیال از و پایین به لوله اعمال می نود. می دان در نود می این در و ۹۰۰ گوس به تردیک شده و رسانندگی حرارتی را میود. می ورد. می می ای نوره ۹۰۰ گوس به مرمی دناسا و به دنبال آن افزای

[1] Abadeh A, Rejeb O, Sardarabadi M, Menezo C, Passandideh-Fard M, Jemni A. Economic and environmental analysis of using metal-oxides/water nanofluid in photovoltaic thermal systems (PVTs). Energy. 2018;159:1234-43.

[2] Jayakumar J, Mahajani S, Mandal J, Vijayan P, Bhoi R. Experimental and CFD estimation of heat transfer in helically coiled heat exchangers. chemical engineering research and design. 2008;86(3):221-32.

[3] Huminic G, Huminic A. Heat transfer characteristics in double tube helical heat exchangers using nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011;54(19):4280-7.

[4] Kim YI, Kim SH, Hwang YD, Park JH. Numerical investigation on the similarity of developing laminar flows in helical pipes. Nuclear Engineering and Design. 2011;59(18):4256-8

[5] AL-Musawi AIA, Taheri A, Farzanehnia A, Sardarabadi M, Passandideh-Fard M. Numerical study of the effects of nanofluids and phase-change materials in photovoltaic thermal (PVT) systems. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. Y. NA.

[6] Mokmeli A, Saffar-Avval M. Prediction of nanofluid convective heat transfer using the dispersion model. International Journal of Thermal Sciences. 2010;49(3):471-8.

[7] Xuan Y, Roetzel W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids .International Journal of Heat and Mass Transfer. 2000;43(19):3701-7.

[8]Akbarinia A, Behzadmehr A. Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in horizontal curved tubes. Applied Thermal Engineering. 2007;27(8):1327-37.

[9] Akbarinia A, Laur R. 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. 2009;30(4):706-14.

[10] Dean W, Hurst J. Note on the motion of fluid in a curved pipe. Mathematika. 1959;6(01):77-85.

[11] Heris SZ, Etemad SG, Esfahany MN. Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2006;33(4):529-35.

[12] Akbaridoust F, Rakhsha M, Abbassi A, Saffar-Avval M. Experimental and numerical investigation of nanofluid heat transfer in helically coiled tubes at constant wall temperature using dispersion model. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013;58(1):480.91-

[13] Azizian R, Doroodchi E, McKrell T, Buongiorno J, Hu L, Moghtaderi B. Effect of magnetic field on laminar convective heat transfer of magnetite nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014;68:94-109.

[14] Rinaldi C, Chaves A Elborai S, He XT, Zahn M. Magnetic fluid rheology and flows. Current Opinion in Colloid & Interface Science. 2005;10(3):141-57.

[15] Ghadiri M, Sardarabadi M, Pasandideh-fard M, Moghadam AJ. Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids. Energy Conversion and Management. 2015;103:468-76.

[16] Sardarabadi M, Passandideh-Fard M, Zeinali Heris S. Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units). Energy. 2014;66:264-72.