

مطالعه عددی انتقال گرمای همرفت اجباری و افت فشار نانو سیال هیبرید آلومینیوم نیتريد و آلومینیوم اکسید با سیال پایه آب در داخل لوله با مقاطع هندسی مختلف

احسان استاجی

کارشناس ارشد، گروه طراحی فرآیند، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران،
estaji_e@petrotadbir.com

سید رضا شعبانیان*

دانشیار، گروه طراحی فرآیند، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران،
shabanian@nit.ac.ir

چکیده

در این تحقیق به صورت عددی انتقال گرمای همرفت اجباری و ضریب اصطکاک نانو سیال هیبرید آلومینیوم نیتريد و آلومینیوم اکسید درون لوله‌های با مقاطع هندسی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. تاثیر پارامترهای مختلفی همچون شکل مقطع عرضی لوله، عدد رینولدز ($5000 < Re < 17000$) و هم چنین درصد حجمی نانو ذرات بر روی انتقال گرمای همرفت به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه مقاطع شامل دایره، مثلث، مربع، شش ضلعی، بیضی گون تخت می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز در تمامی لوله‌ها با مقاطع هندسی مورد تحلیل این مقاله و در تمامی بازه درصد حجمی نانو ذرات هیبرید آلومینیوم نیتريد و آلومینیوم اکسید افزایش پیدا می‌کند. عدد ناسلت مربوط به لوله بیضی گون تخت در تمامی بازه عدد رینولدز در حالتی که درصد حجمی نانو سیال ۱٪ می‌باشد، بالاترین مقدار را دارا می‌باشد. هنگامی که درصد حجمی نانو ذرات ۱٪ می‌باشد با افزایش عدد رینولدز در تمامی مقاطع ضریب اصطکاک کاهش پیدا می‌کند و بالاترین مقدار ضریب اصطکاک در لوله با مقطع شش ضلعی می‌باشد. **واژه‌های کلیدی:** انتقال گرمای همرفت، ضریب اصطکاک، نانو سیال، بررسی عددی، مقطع هندسی، جریان آشسته.

Numerical study of forced convection heat transfer and pressure drop of AlN and Al₂O₃ hybrid nanofluids inside the tube with different geometric sections

E. Estaji

Process Design group, Faculty of Chemical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

S. R. Shabanian

Process Design group, Faculty of Chemical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Abstract

In this research, forced convection heat transfer and friction coefficient of hybrid nanofluid inside pipes with different geometrical sections have been investigated numerically. The influence of various parameters such as the cross-sectional shape of the tube, Reynolds number ($5000 < Re < 17000$), as well as the volume percentage of nanoparticles on the convection heat transfer has been investigated numerically. The geometry of the sections includes circle, triangle, square, hexagon, flat oval. The results show that the Nusselt number increases with the increase of the Reynolds number in all the tubes with the geometrical sections analyzed in this article and in all the volume concentrations of hybrid AlN and Al₂O₃ nanoparticles. The Nusselt number corresponding to the flat oval tube has the highest value in the entire range of Reynolds number in the case where the volume concentrations of nanofluid is 1%. When the volume concentrations of nanoparticles is 1%, with the increase of the Reynolds number, the friction coefficient decreases in all sections, and the highest value of the friction coefficient is in the pipe with a hexagonal section.

Keywords: convection, heat transfer, friction coefficient, nanofluid, numerical investigation, turbulent flow.

۱- مقدمه

افزایش میزان انتقال گرما و کاهش اصطکاک و اتلاف انرژی جریان درون لوله‌ها مدت‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته است. روش‌های مختلفی جهت بهبود میزان انتقال گرما پیشنهاد شده است. یکی از این روش‌ها استفاده از نانو ذرات پراکنده در داخل سیال پایه همچون آب می‌باشد. عمده بررسی‌های انجام گرفته بر روی نانو سیالات در مقاطع دایروی صورت پذیرفته است. از آنجایی که در طراحی تجهیزات گرمایی و صنعتی همچون مبادله‌کن‌های گرمایی افزایش آهنگ انتقال گرما و کاهش اصطکاک و اتلاف انرژی جریان دارای اهمیت است، در طراحی‌ها می‌توان با تغییر لوله با مقاطع هندسی از دایره به اشکال مختلف و استفاده از راهکارهای برای افزایش انتقال گرما درون لوله‌ها در مقابل کاهش آهنگ اتلاف اصطکاک ناشی از تغییر مقاطع هندسی می‌تواند مفید واقع شود. تحقیقات متعددی بر روی انتقال گرمای همرفتی و

افت فشار نانو سیالات درون لوله با مقاطع هندسی مختلف انجام گرفته است. به عنوان مثال، عدنان حسین و همکاران [۱] به بررسی عددی تاثیر هندسه مقطع لوله و درصد حجمی نانو سیال TiO₂-آب در جریان مغشوش بر روی انتقال گرما در رادیاتور خودرو پرداختند. آن‌ها نشان دادند که افزایش درصد حجمی نانو ذره در آب باعث افزایش ضریب انتقال گرمای همرفتی نسبت به حالت آب خالص می‌شود. همچنین در لوله با مقطع بیضی گون تخت ضریب انتقال گرمای همرفتی اجباری دارای بالاترین مقدار می‌باشد. لعون و همکاران [۲] به بررسی نحوه تغییرات تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک و انتقال گرما جریان نانو سیال‌های Al₂O₃-آب و MWCNT-آب در سه مقطع هندسی دایره، مربع و مثلث متساوی الاضلاع لوله، در شرط مرزی شار گرمایی ثابت پرداختند. آن‌ها نشان دادند که در لوله با مقطع دایروی کمترین تولید آنتروپی در مقایسه با سایر مقاطع ایجاد می‌شود. همچنین، در این

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: shabanian@nit.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳/۰۹/۰۳

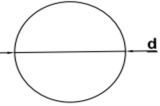
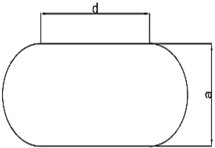
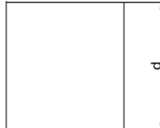
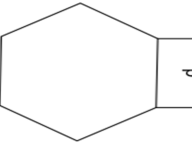
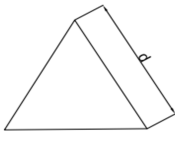
تاریخ پذیرش: ۱۳/۱۲/۱۳

تحقیق مشخص شد که نانو سیال MWCNT-آب تولید آنتروپی کمتری را در مقایسه با نانو سیال Al_2O_3 -آب به دلیل رسانایی گرمایی بالا نشان می‌دهد. سلیم پور [۳، ۴] به بررسی تجربی تاثیر شکل مقطع هندسی لوله در جریان نانو سیال TiO_2 -آب بر روی انتقال گرمای همرفتی لایه‌ای پرداخت. نتایج وی نشان داد که با افزایش درصد حجمی نانو سیال رفتار انتقال گرما در جریان سیال بهبود پیدا می‌کند. همچنین، لوله با مقطع دایره‌ای نسبت به مقاطع مربعی و مثلث دارای عملکرد بهتری در جهت انتقال گرما می‌باشد. با این حال، مجراها با مقاطع مربع و مثلث نسبت به لوله با مقطع دایروی بازده گرمایی بیشتری دارند. تورگت [۵] به بررسی تجربی و عددی انتقال گرمای همرفتی اجباری در جریان آشفته در مقطع شش ضلعی لوله تحت شرط مرزی دمای ثابت در دیواره لوله پرداخت و نتایج را با کانال دایروی با قطر هیدرولیکی معادل شش ضلعی مقایسه کرد. زینالی هریس و همکاران [۶] به بررسی عددی نسبت انتقال گرمای همرفتی لایه‌ای در لوله با مقطع مربعی در شرط مرزی دما ثابت دیواره لوله در حضور نانو سیالهای Cu -آب و CuO -آب و Al_2O_3 -آب پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد میزان عدد ناسلت در حالتی که درصد حجمی نانو سیال ۴ درصد می‌باشد، به ترتیب ۷۷٪، ۶۸٪، ۵۹٪ برای نانو سیال CU -آب و CuO -آب و Al_2O_3 -آب نسبت به حالت آب خالص افزایش پیدا می‌کند. مهرجو و همکاران [۷] به مطالعه انتقال گرمای همرفتی اجباری نانو سیال CuO -آب درون یک لوله با مقطع هندسی مربعی در جریان مغشوش پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش غلظت نانو ذرات عدد پکلت و ضریب انتقال گرمای همرفتی افزایش پیدا می‌کند. عدنان حسین [۸] به بررسی عملکرد گرمایی جریان لایه‌ای نانو سیال هیبرید در یک مبادله‌کن گرمایی دو لوله پرداخت. چنگ و همکاران [۹] به بررسی ویژگی‌های انتقال گرما در داخل لوله‌های پیچ خورده با مقاطع هندسی مختلف در اعداد رینولدز بین ۵۰ تا ۲۰۰۰ در شرایط مرزی دما ثابت دیواره لوله پرداختند. در قسمتی از نتایج این تحقیق نشان داده شد که شکل هندسی مقطع تاثیر کمی بر انتقال گرما لوله‌های پیچ خورده دارد، اما بیشترین تاثیر را بر الگوی جریان می‌گذارد. اتالا [۱۰] به بررسی تجربی انتقال گرمای همرفتی اجباری و ضریب اصطکاک نانو سیال SiO_2 -آب درون کانال‌هایی با مقاطع هندسی دایره، مثلث، مربع، مستطیل در جریان آشفته در اعداد رینولدز بین ۱۰۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰ پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد که در لوله با مقطع مثلث بالاترین مقدار ضریب افزایش گرمایی نسبت به دیگر مقاطع هندسی مورد مطالعه در این تحقیق را دارد. گابریل همونیک و همکاران [۱۱] به بررسی ویژگی‌های انتقال گرما و جریان سیال درون لوله با مقاطع بیضی گون تخت، بیضوی، و دایره با قطر هیدرولیکی یکسان در حضور نانو سیال هیبرید $Go/CaSO_4$ -آب پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد در مقطع هندسی تخت ضریب انتقال گرمای همرفتی اجباری نسبت به مقطع دایره دارای مقادیر بیشتری می‌باشد. اما در لوله با مقطع دایره افت فشار در جریان دارای مقادیر کمتری می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که نوع هندسه تاثیر معناداری نسبت به تغییر غلظت نانو ذرات هیبرید بر روی انتقال گرما دارد. سلیمافندگیل و همکاران [۱۲] به تحلیل عددی انتقال گرما جابجایی اجباری نانو سیال CNT-آب درون لوله با مقطع هندسی بیضی پرداختند. آن‌ها در این تحقیق به اثرات نسبت ابعاد مقطع بیضوی و کسر حجمی نانو ذرات

جامد بر عملکرد انتقال گرما پرداختند و در نهایت یک استراتژی مدل‌سازی برای تخمین عدد ناسلت پیشنهاد شد. حسن زاده و همکاران [۱۳] به بررسی جریان ضربانی در جریان‌های لایه‌ای و مغشوش در حضور نانو سیال آلومینا-آب برای لوله با مقاطع هندسی دایره، شش ضلعی، مثلث و تاثیر این پارامترها بر دما، سرعت، فشار جریان پرداختند. تلوزسکی [۱۴] به مدل‌سازی و بررسی انتقال گرمای همرفتی اجباری جریان لایه‌ای در گردآورنده خورشیدی سرامیکی و بتنی با مقطع غیر دایروی شامل چند ضلعی منتظم، بیضی، بیضی کاسینی و منحنی‌های لانه پرداخت. نیتی ارورا و همکاران [۱۵] به بررسی تجربی انتقال گرما و افت فشار نانو سیال Al_2O_3 -آب در داخل لوله دایروی در شرط مرزی شار گرمایی ثابت دیواره لوله پرداختند. آن‌ها نشان دادند با اضافه نمودن Al_2O_3 باعث افزایش انتقال گرما و افزایش تلفات فشار می‌شود. مشاهده شد که میزان افزایش انتقال گرما بر افزایش تلفات فشار غالب است. یاسین خطیب و همکاران [۱۶] بر روی تاثیر انتقال گرمای همرفتی اجباری جریان لایه‌ای نانو سیال هیبرید MGO/MWCNT/EG در یک مبادله‌کن گرمایی با لوله‌ای موج-دار با مقطع لوله بیضوی به صورت عددی پرداختند. فیلیپ نوس و همکاران [۱۷] به بررسی عملکرد دو نوع نانو سیال Al_2O_3 -آب و TiO_2 -آب بر روی انتقال گرمای همرفتی اجباری در رینولدزهای ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ درون لوله با مقطع هندسی بیضی گون تخت به کار رفته در رادیاتور اتومبیل با شرط مرزی شار ثابت در دیواره لوله پرداختند. سید محمد باقر عالم پور و همکاران [۱۸] به صورت عددی به بررسی انتقال گرمای همرفتی اجباری جریان نانو سیال MWCNT-آب در داخل لوله با مقطع هندسی بیضی تابیده شده در شرایط مرزی شار ثابت در دیواره لوله پرداختند. نوری بروجردی و همکاران [۱۹] به صورت تجربی به بررسی انتقال گرمای همرفتی اجباری درون لوله با مقطع هندسی بادامکی شکل پرداختند. زینالی هریس و همکاران [۲۰] به بررسی تجربی انتقال گرمای همرفتی اجباری جریان لایه‌ای نانو سیال Al_2O_3 -آب درون لوله با مقطع مثلث متساوی الاضلاع در شرایط مرزی شار گرمایی ثابت در دیواره پرداختند. سید محمود کیا و همکاران [۲۱] به بررسی تجربی و عددی انتقال گرمای همرفتی اجباری و افت فشار نانو سیال هیبرید OIL- SiO_2 و نانو سیال $OIL-Al_2O_3$ از طریق لوله‌های مارپیچ با مقاطع هندسی مختلف تحت شرط مرزی شار گرمایی ثابت در دیواره پرداختند. شرن آ و همکاران [۲۲] به بررسی تاثیر نانوسیال AlN/Al_2O_3 -آب بر روی انتقال گرما بیضی گون تخت در جریان مغشوش در شرط مرزی شار گرمایی ثابت در سطح لوله پرداختند. نور حمزه و همکاران [۲۳] به بررسی عددی و تجربی عملکرد انتقال گرما در حضور نانوسیال هیبرید در لوله دایره‌ای با حضور توربولاتور پیچشی در اعداد رینولدز بین ۳۵۶۰ تا ۸۳۲۰ پرداختند. شقایق ابراز و همکاران [۲۴] به بررسی عملکرد گرمایی یک گردآورنده خورشیدی سهموی با استفاده از نانوسیال حاوی ذرات آلومینیوم اکسید با درصد حجمی ۴٪ در جریان مغشوش پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که کاهش زاویه بال، ضریب اصطکاک عدد ناسلت و ضریب کارایی گرمایی را افزایش می‌دهد. بهینه ترین شرایط برای بهبود کارایی گرمایی در زاویه بال ۹۰ درجه و تعداد دور بیشتر به دست می‌آید. سید علی فرشاد و همکاران [۲۵] به بررسی عددی تولید آنتروپی

اتمسفر تخلیه می‌گردد.

جدول ۱- پارامترهای هندسی مقطع لوله‌ها

shape	$D_h(mm)$	d(mm)	a(mm)
	25	25	-
	25	25.2	8.4
	25	25	-
	25	7.2254	-
	25	43.3	-

برای بررسی برگشت ناپذیری جریان نانوسیال آلومینیوم اکسید در گردآورنده خورشیدی صفحه تخت مجهز به نوار پیچشی پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که با افزایش نسبت قطر لوله و عدد رینولدز، انتقال گرما بهبود یافته و تولید آنتروپی گرمایی کاهش می‌یابد، اما تولید آنتروپی اصطکاکی افزایش می‌یابد. در کار حاضر، به بررسی انتقال گرمای همرفتی اجباری و افت فشار نانو سیال هیبرید آلومینیوم نیتريد و آلومینیوم اکسید با سیال پایه آب در داخل لوله با مقاطع هندسی دایره، مثلث، بیضی گون تخت، شش ضلعی و مربع پرداخته شده است. ترکیب نانو ذرات آلومینیوم نیتريد و آلومینیوم اکسید در یک نانو سیال می‌تواند رسانایی گرمایی نانو سیال هیبرید را به طور قابل توجهی افزایش دهد. آلومینیوم نیتريد دارای رسانایی گرمایی بالا است و آلومینیوم اکسید نیز به طور کلی رسانایی گرمایی خوبی دارد. این ترکیب می‌تواند باعث انتقال گرما بهینه در سیستم‌های خنک کننده شود. همچنین، این نانو ذرات پایداری بیشتری در برابر ته‌نشینی دارند و ترکیب این نانو ذرات می‌تواند موجب کاهش تجمع ذرات در مایع شود و در نتیجه پایداری طولانی مدت سیستم خنک کننده بهبود می‌یابد. در نانو سیال هیبریدی مانند ترکیب آلومینیوم نیتريد و آلومینیوم اکسید می‌تواند لزجت را به طور بهینه تنظیم کند تا بهترین عملکرد در انتقال گرما و کم‌ترین افت انرژی حاصل شود. با توجه به همین خصوصیات، در این تحقیق از ترکیب این نانو ذرات استفاده شده است. در صنایع الکترونیک، نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌ها برای بهینه‌سازی فضای مبادله کن گرمایی و ایجاد تماس بهتر میان سیالات از لوله با مقطع هندسی مربع یا مستطیل استفاده می‌شود. در کاربردهایی که نیاز به حجم کم و کارایی بالا دارد، لوله‌های شش ضلعی می‌توانند استفاده شوند. در مواردی که تغییرات زیاد در جریان سیال و نیاز به توزیع یکنواخت گرما وجود داشته باشد، از لوله با مقطع هندسی مثلث استفاده می‌گردد. با توجه به کاربردهای متنوعی که لوله با مقطع هندسی مختلف دارند و به منظور بالا بردن کارایی گرمایی این لوله‌ها، به بررسی تاثیر استفاده از نانو سیال هیبرید آلومینیوم نیتريد و آلومینیوم اکسید بر افزایش انتقال گرمای همرفتی اجباری درون این لوله‌ها پرداخته شد.

۲- مدلسازی عددی

در بررسی‌های عددی ابتدا باید هندسه مسئله مورد بررسی و شرایط مرزی مشخص شود. در قدم بعدی، برای اطمینان از صحت نتایج، باید نتایج حاصل از کار حاضر با نتایج ارائه شده در مراجع معتبر راستی آزمایی گردد. در ادامه، به تشریح این روند پرداخته می‌شود.

۲-۱- هندسه مسئله و شرایط مرزی

مقاطع هندسی مورد بررسی در این مقاله شامل دایره، مثلث، مربع، شش ضلعی، بیضی گون تخت با قطر هیدرولیکی ۲۵ میلی‌متر می‌باشند. مشخصات پارامترهای هندسی مقاطع در جدول ۱ نشان داده شده است. طول لوله ۱۵۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. نانو سیال در دمای 298.15°C وارد لوله می‌شود. شار گرمایی ثابت 5000 وات بر متر مربع بر دیواره لوله اعمال می‌گردد. جریان خروجی در فشار

۲-۲- معادلات و روابط حاکم بر مسئله

برای تحلیل یک مسئله انتقال گرما باید سه معادله پایستاری جرم، اصل پایستاری انرژی و معادلات ناویر استوکس به صورت هم‌زمان حل گردد. این مجموعه معادلات برای مسئله انتقال گرمای همرفتی اجباری به صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_{hnf} \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu_{hnf} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \rho_{hnf} \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u_i' u_j'}) \quad (2)$$

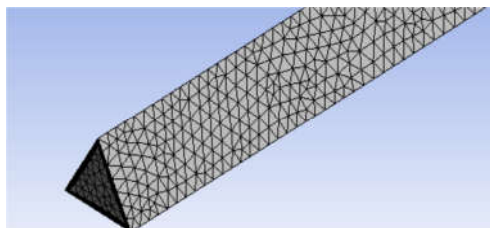
$$\frac{\partial(u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\theta}{Pr} + \frac{\theta_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

جدول ۲- خواص ترموفیزیکی نانو ذرات Al_2O_3 ، AIN، آب

خواص	آب	Al_2O_3	AIN
چگالی	۹۹۸٫۲	۳۸۸۰	۳۲۶۰
گرمای ویژه	۴۱۸۰	۷۷۳	۷۳۵
رسانایی گرمایی	۰٫۶	۴۰	۱۸۰
لزجت	۰٫۰۱۰۰۳	-	-

۲-۴- روش عددی و صحت سنجی نتایج

با توجه به بازه‌ی عددی عدد رینولدز، نوع جریان در ناحیه‌ی مغشوش قرار دارد. مدل‌سازی به صورت سه بعدی و با استفاده از نرم افزار Ansys Fluent انجام شده است. تاکنون مدل‌های آشفتگی زیادی ارائه شده است که هر کدام از آن‌ها برای رژیم خاصی از جریان قابل اعمال و دقت لازم را برخوردار می‌باشد. هدف نهایی از هر مدل به دست آوردن اندازه تنش در نقاط مختلف جریان است. این مدل برای اکثر جریان‌های موجود در کاربردهای مهندسی مورد استفاده و معتبر است. الگوریتم مورد استفاده در محاسبات عددی سیمپل و مدل اغتشاشی k-ε استاندارد و تابع دیواره Enhance wall treatment استفاده شده است. کوپلینگ فشار و سرعت با الگوریتم SIMPLE انجام می‌گردد. گسسته‌سازی برای گرادین از روش حداقل مربعات بهره می‌گیرد. برای فشار از مرتبه دوم استفاده می‌شود. برای مومنتوم و انرژی جنبشی آشفتگی و آهنگ میرایی و همچنین معادله انرژی از طرح بالادست مرتبه دوم استفاده می‌شود. عدد همگرایی در باقیمانده‌ها 10^{-6} در نظر گرفته شده است. به منظور شبکه‌بندی هندسه مسئله از نرم افزار Ansys Meshing استفاده گردید. در ناحیه مورد بررسی برای مقاطع هندسی دایره و بیضی گون تخت و مربع و شش ضلعی از مش سازمان یافته استفاده گردید و برای مقطع هندسی مثلث با توجه به هندسه آن از مش بی‌سازمان استفاده شد. شبکه‌بندی برای مقطع هندسی مثلث در شکل ۱ نشان داده شده است. برای اطمینان از نتایج حاصل شده از روش عددی با توجه به شکل ۲، نتایج حاصل شده از تحلیل عددی برای لوله با مقطع دایره با فرضیات و روش این مقاله با نتایج حاصل از مقاله عدنان حسین و همکاران [۱] و همچنین رابطه شماره ۳ مقایسه شده است.



شکل ۱- مش‌بندی بی‌سازمان لوله با مقطع هندسی مثلث

در رابطه ۳، طرف چپ نشان دهنده تغییرات انرژی گرمایی سیال به دلیل جابجایی است و سمت راست معادله نشان دهنده تغییرات انرژی گرمایی سیال به دلیل رسانایی گرمایی می‌باشد. برای صحت سنجی نتایج حاصل از بررسی عددی از رابطه ۴ که به رابطه بلازیوس دیتروید معروف است، استفاده شده است. شرط استفاده از این رابطه جریان تک فاز و عدد رینولدز بیشتر از ۴۰۰۰ می‌باشد [۲۲]:

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4} \quad (4)$$

رابطه بی‌بعد عدد ناسلت و ضریب اصطکاک لوله به ترتیب در روابط ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند:

$$Nu = \frac{hD}{K} \quad (5)$$

$$f = \frac{2D_h \Delta P}{L \rho V^2} \quad (6)$$

به منظور بررسی هم‌زمان افزایش انتقال گرما و افت فشار، می‌توان از ضریب کارایی گرمایی استفاده نمود. در صورتی که مقدار ضریب کارایی گرمایی بالاتر از ۱ باشد، از نظر اقتصادی استفاده از نانو سیال قابل توجیه است. به منظور محاسبه درصد افزایش انتقال گرما و کارایی نانو سیال مورد استفاده در مدل از روابط ۷ و ۸ استفاده شده است [۲۲]:

$$E\% = \frac{Nu_{hnf} - Nu_f}{Nu_{hnf}} \quad (7)$$

$$\zeta = \frac{\left(\frac{Nu_{hnf}}{Nu_f}\right)}{\left(\frac{f_{hnf}}{f_f}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (8)$$

۲-۳- خواص ترموفیزیکی نانو سیال

در کار حاضر، از نانو سیال هیبرید دو تایی آلومینیم نیتريد و آلومینیم اکسید و سیال پایه آب استفاده شده است. همچنین، نتایج با نانوسیال آلومینیم اکسید و سیال پایه آب مورد مقایسه قرار گرفته است. جریان سیال به صورت تک فاز در نظر گرفته شده است. برای به دست آوردن خواص ترموفیزیکی این ترکیب نانو سیال، از روابط توسعه یافته در مطالعه انجام شده توسط شارن آ و همکاران [۲۲] به صورت زیر استفاده گردیده است:

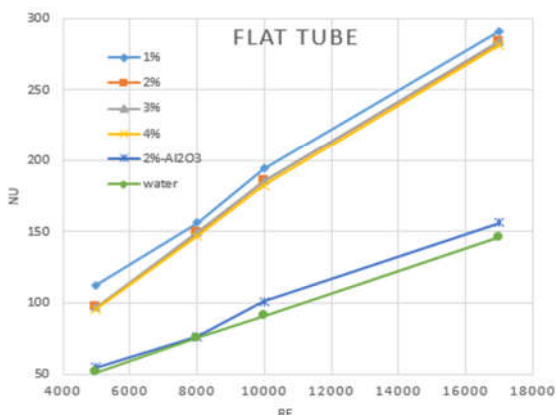
$$k_{hyb} = \varphi_1 \left(\frac{k_1 - k_f}{k_f} \right) + \varphi_2 \left(\frac{k_2 - k_f}{k_f} \right) \quad (9)$$

$$\mu_{hyb} = \mu_f (1 + A_1 \varphi_1 + A_2 \varphi_2) \quad (10)$$

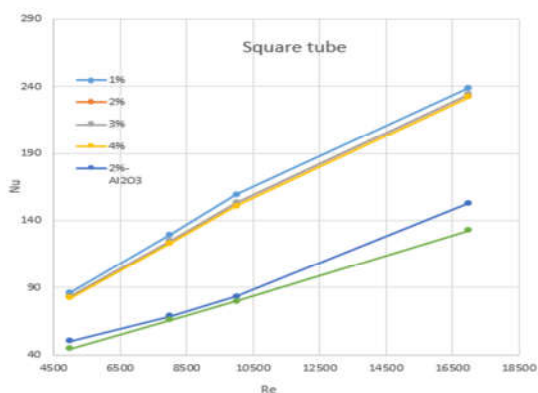
$$C_{hyb} = \varphi_1 C_{p1} + \varphi_2 C_{p2} + (1 - \varphi_1 - \varphi_2) C_f \quad (11)$$

$$\rho_{hyb} = \varphi_1 \rho_{p1} + \varphi_2 \rho_{p2} + (1 - \varphi_1 - \varphi_2) \rho_f \quad (12)$$

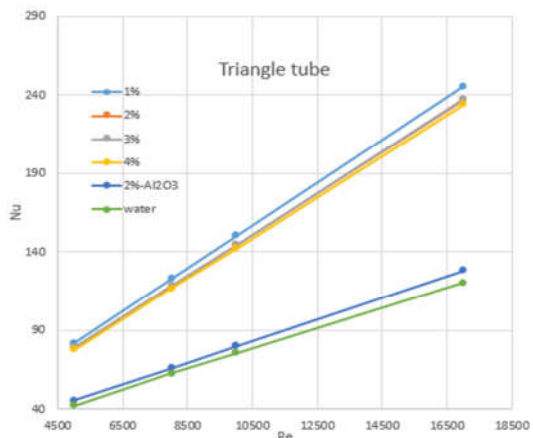
در این روابط A ثابت هایی است که به نوع نانوذرات بستگی دارد. با توجه به کم بودن تغییرات دمایی، خواص به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شوند. خواص ترموفیزیکی نانو ذرات Al_2O_3 ، AIN، آب در جدول ۲ نشان داده شده است [۲۲]:



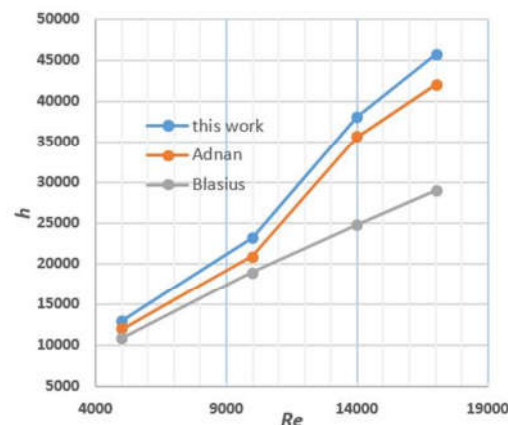
شکل ۴- تغییرات عدد ناسلت در رینولدزهای مختلف در لوله با مقطع بیضی گون تخت



شکل ۵- تغییرات عدد ناسلت در رینولدزهای مختلف در لوله با مقطع مربع



شکل ۶- تغییرات عدد ناسلت در رینولدزهای مختلف در لوله با مقطع مثلث



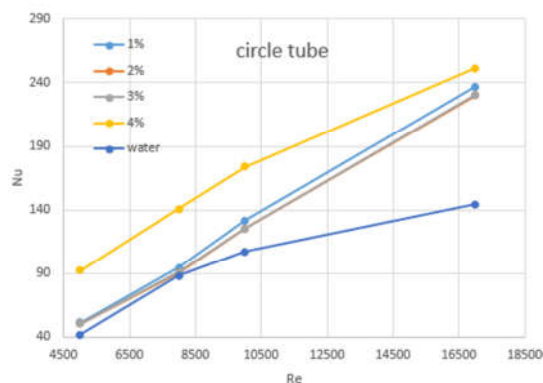
شکل ۲- صحت سنجی نتایج عددی

برای بررسی استقلال جواب‌ها از تعداد شبکه‌بندی و گره‌ها از چهار شبکه‌بندی مختلف استفاده گردید و عدد ناسلت برای این چهار شبکه بندی محاسبه گردید. مشاهده گردید که با افزایش تعداد مش‌ها، از حالتی که تعداد مش‌ها ۵۳۰۳۷۷ می‌باشد، عدد ناسلت تغییر محسوسی ندارد، در نتیجه برای تحلیل عددی از این تعداد شبکه بندی استفاده شده است.

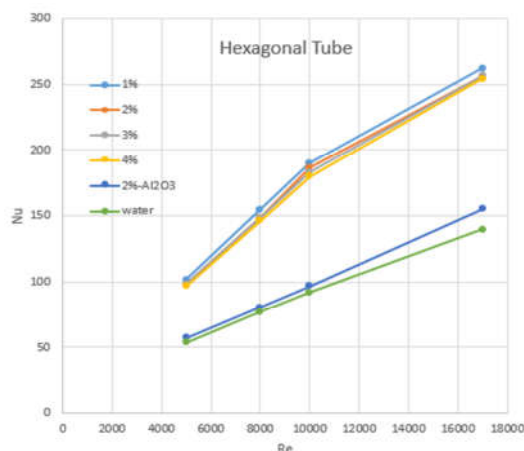
۳- نتایج

۳-۱- بررسی عدد Nu

تغییرات عدد ناسلت نمایانگر عملکرد گرمایی در جریان از طریق لوله است. می‌توان با بررسی عدد ناسلت به بررسی تاثیر درصد حجمی نانو ذرات، عدد رینولدز و هندسه سطح مقطع لوله بر روی عملکرد گرمایی پرداخت. در شکل‌های شماره ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ تغییرات عدد ناسلت در مقابل عدد رینولدز برای لوله با مقاطع هندسی دایره، مثلث، مربع و شش ضلعی و بیضی گون تخت به ترتیب نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز برای تمامی اشکال مقاطع لوله و درصد حجمی‌های مختلف افزایش می‌یابد.



شکل ۳- تغییرات عدد ناسلت در رینولدزهای مختلف در لوله با مقطع دایره



شکل ۷- تغییرات عدد ناسلت در رینولدزهای مختلف در لوله با مقطع شش ضلعی

هدف از اضافه نمودن نانو ذرات به سیال پایه بهبود رسانایی گرمایی و در نتیجه بهبود عملکرد گرمایی سیال در جریان داخل لوله می‌باشد. اضافه نمودن نانو ذرات همچنین باعث تغییر در لزجت سیال و در نتیجه باعث تغییر در لایه مرزی هیدروپنایمیک جریان می‌گردد. در این تحقیق از نانو سیال هیبرید Al_2O_3 -آب با درصد حجمی‌های ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪ در لوله با مقاطع هندسی مختلف لوله استفاده گردیده است. نتایج با حالتی که سیال کاری آب خالص است و حالتی که از نانو سیال Al_2O_3 با درصد حجمی ۲٪ مقایسه گردید. با توجه به نمودارهای شکل‌های ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، بالاترین عدد ناسلت در لوله با مقاطع مثلث، مربع، شش ضلعی، بیضی گون تخت مربوط به زمانی می‌باشد که از نانو سیال هیبرید با درصد حجمی ۱٪ استفاده شده است. به عنوان مثال، در رینولدز ۱۷۰۰۰ زمانی که درصد حجمی نانوسیال هیبرید ۱٪ می‌باشد، افزایش عدد ناسلت نسبت به آب خالص ۲۴۰٪، ۱۶۰٪، ۱۵۲٪، ۱۷۵٪ و نسبت به نانو سیال Al_2O_3 -آب ۱۸۸٪، ۱۷۷٪، ۱۸۹٪، ۱۸۶٪، به ترتیب برای مقاطع مثلث، مربع، شش ضلعی و بیضی گون تخت می‌باشد. در لوله با مقاطع مثلث، مربع، شش ضلعی و بیضی گون تخت با افزایش درصد حجمی نانو ذرات هیبرید از ۱٪ عدد ناسلت کاهش پیدا می‌کند. کم‌ترین عدد ناسلت در این مقاطع در درصد حجمی ۲٪ می‌باشد. دلیل کاهش عدد ناسلت با درصد حجمی بالاتر از ۱٪، افزایش لزجت نانو سیال هیبرید و در نتیجه تشدید شدن زیر لایه چسبناک و کوچک شدن لایه مرزی هیدروپنایمیک می‌باشد. در حالتی که درصد حجمی نانو سیال ۴٪ می‌باشد نسبت به حالتی که درصد حجمی نانو سیال ۲٪ و ۳٪ می‌باشد، افزایش رسانایی گرمایی در اثر افزودن نانو ذرات بر اثر کوچک شدن لایه مرزی هیدروپنایمیک غلبه و باعث می‌شود در این حالت عدد ناسلت از درصد حجمی ۲٪ و ۳٪ بیشتر شود.

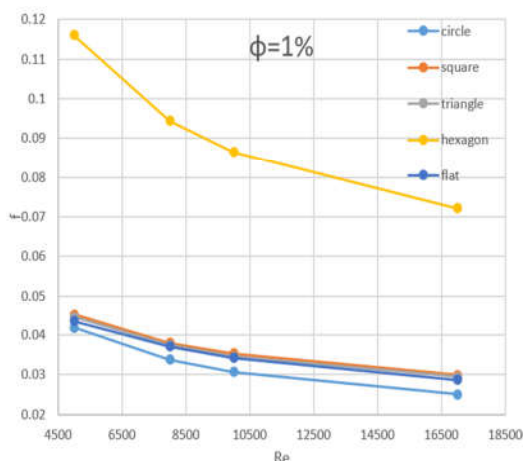
در لوله با مقطع دایروی بالاترین عدد ناسلت در حالتی می‌باشد که درصد حجمی نانوسیال هیبرید ۴٪ می‌باشد و به ترتیب عدد ناسلت در درصد حجمی ۱٪، ۳٪ و ۲٪ دارای بیشترین عدد ناسلت می‌باشد.

عدد ناسلت در تمامی بازه درصد حجمی و عدد رینولدز مورد بررسی در این تحقیق، در مقطع بیضی گون تخت بالاترین عدد را نشان می‌دهد. این ویژگی نشان‌دهنده پتانسیل بالای این هندسه برای

کاربرد در سیستم‌های انتقال گرما است. به دلیل افزایش سطح مؤثر برای تبادل گرما و توزیع یکنواخت‌تر جریان، این مقطع می‌تواند در طراحی مبادله‌کن گرمایی، سیستم‌های خنک‌کننده الکترونیکی، و تجهیزات صنعتی که نیاز به بازده گرمایی بالا دارند، مورد استفاده قرار گیرند. به‌ویژه در صنایع نفت و گاز، نیروگاه‌های گرمایی، و سیستم‌های تهویه مطبوع، استفاده از این نوع مقطع می‌تواند منجر به بهبود عملکرد و کاهش مصرف انرژی شود. همچنین، عدد ناسلت در مقطع شش ضلعی در مقایسه با لوله با مقطع مثلث و مربع عدد بالاتری را نشان می‌دهد. علت این افزایش در وجود زوایای حاده‌تری در مربع و مثلث نسبت به شش ضلعی می‌باشد. وجود این زوایا در مقطع هندسی لوله باعث به وجود آمدن بخش‌هایی با سیال ساکن بیشتر و کاهش سرعت انتقال می‌شود. در شکل ۸ کانتور سرعت در مقاطع دایره، مثلث و مربع، شش ضلعی بیضی گون تخت در رینولدز ۱۷۰۰۰، درصد حجمی ۱٪ نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در شکل ۸ نشان می‌دهند که توزیع سرعت در مقاطع مختلف تأثیر قابل‌توجهی بر میزان انتقال گرما و عدد ناسلت دارد. در مقطع بیضی‌گون تخت، توزیع سرعت یکنواخت‌تر بوده و ناحیه‌هایی با سرعت بالاتر نسبت به سایر مقاطع مشاهده می‌شود. این امر موجب بهبود آهنگ انتقال گرما و در نتیجه افزایش عدد ناسلت در این مقطع شده است. در مقابل، در مقاطع مثلث و مربع، به دلیل وجود زوایای حاده و نواحی با سرعت پایین، اختلال در جریان افزایش یافته که این امر منجر به کاهش آهنگ انتقال گرما و مقدار عدد ناسلت شده است. علاوه بر این، در مقطع شش‌ضلعی، اگرچه توزیع سرعت نسبت به مقاطع مثلثی بهبود یافته، اما همچنان تأثیر زوایای موجود باعث کاهش نسبی عدد ناسلت شده است. همان‌طور که از شکل پیدا است، وجود زوایای کم‌تر از ۹۰ درجه، باعث تشدید کاهش سرعت جریان می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده از کانتور جریان در این مطالعه با نتایج ارائه‌شده توسط [۲۲] مقایسه شده است. همان‌طور که در این مطالعه مشاهده شد، افزایش یکنواختی توزیع سرعت در مقاطع مانند بیضی‌گون تخت منجر به بهبود انتقال گرما و افزایش عدد ناسلت شده است. این یافته‌ها با گزارش [۲۲] که نشان می‌دهد مقاطع بیضی‌گون تخت می‌توانند عملکرد بهتری در انتقال گرما داشته باشند، هم‌خوانی دارد. با این حال، تفاوت‌های جزئی در مقدار عدد ناسلت مشاهده شده که می‌تواند ناشی از شرایط مرزی باشد.

در اعداد رینولدز مختلف برای مقاطع هندسی دایره، مثلث، مربع، شش ضلعی و بیضی گون تخت لوله در درصد حجمی ۱٪ آورده شده است. با توجه به نمودار شکل ۹، مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز، در تمامی مقاطع ضریب اصطکاک محاسبه شده با استفاده از معادله ۶ کاهش پیدا می‌کند. این کاهش ضرب اصطکاک به ضخامت لایه مرزی هیدرولیکی نسبت داده می‌شود. با افزایش عدد رینولدز، لایه مرزی هیدرولیکی نازک‌تر می‌شود. لوله با مقطع دایروی در تمام بازه اعداد رینولدز مورد بررسی در این تحقیق دارای کم‌ترین مقدار ضریب اصطکاک می‌باشد. همچنین، ضریب اصطکاک در لوله با مقطع شش ضلعی دارای بالاترین مقدار می‌باشد. این نتایج به دلیل افزایش گردابه‌ها در اثر جریان نانو سیال هیبرید در داخل لوله با مقاطع غیر دایروی نسبت به مقطع دایره‌ای می‌باشد.

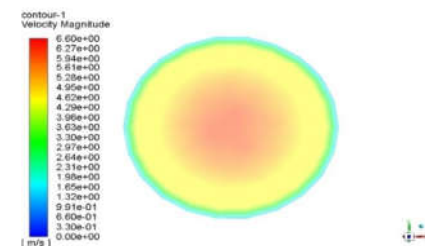
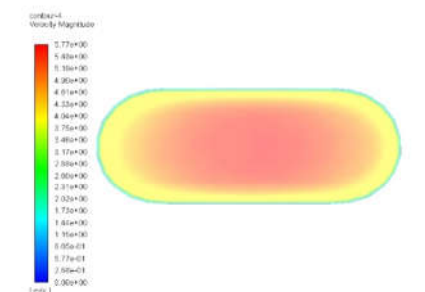
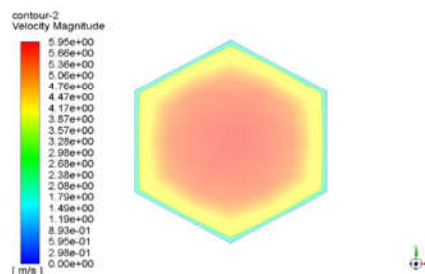
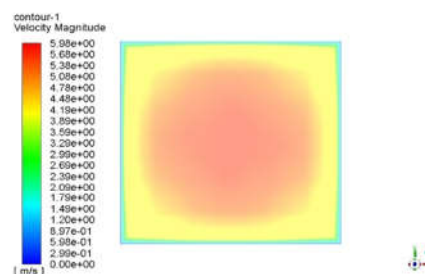
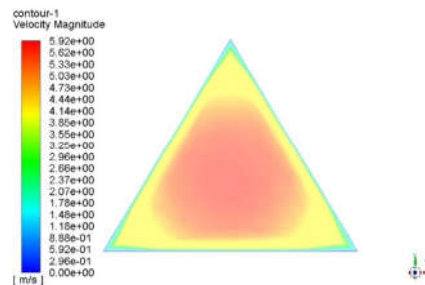


شکل ۹- تغییرات ضریب اصطکاک با عدد رینولدز در مقاطع مورد بررسی

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، انتقال گرمای همرفتی اجباری درون لوله با مقاطع هندسی دایره، مثلث، مربع، شش ضلعی و بیضی گون تخت با نانو سیال هیبرید Al_2O_3 -AIN آب بررسی شد. به طور کلی مشاهده گردید که با افزایش عدد رینولدز در تمامی لوله‌ها با مقاطع هندسی مختلف و در تمامی بازه درصد حجمی نانو ذرات هیبرید، عدد ناسلت افزایش پیدا می‌کند. عدد ناسلت مربوط به لوله تخت بیضی گون در تمامی بازه عدد رینولدز در حالتی که درصد حجمی نانو سیال ۱٪ می‌باشد، بالاترین مقدار را دارا می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد که این نوع هندسه می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای طراحی مبادله‌کن گرمایی و سیستم‌های خنک‌کننده باشد، به‌ویژه در کاربردهایی همچون گردآورنده‌های خورشیدی که نیاز به افزایش بازده گرمایی و کاهش افت فشار دارند. هنگامی که درصد حجمی نانوذرات ۱٪ می‌باشد، با افزایش عدد رینولدز در تمامی مقاطع ضریب اصطکاک کاهش پیدا می‌کند و بالاترین مقدار ضریب اصطکاک در لوله با مقطع شش ضلعی می‌باشد.

در شکل شماره ۱۰ نمودار مربوط به درصد افزایش عدد ناسلت با اضافه نمودن نانو ذره نسبت به حالت آب خالص در رینولدزهای مختلف برای درصد حجمی نانوذرات ۱٪ نشان داده شده است. مشاهده گردید

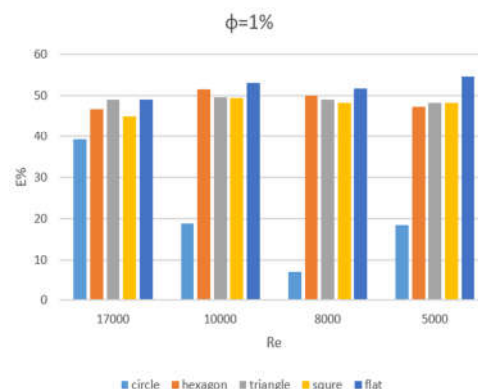


شکل ۸: کانطور سرعت در مقاطع مختلف

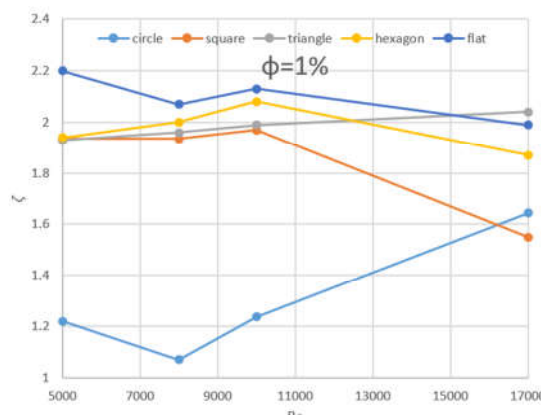
۳-۲- بررسی ضریب اصطکاک f

هنگامی که درصد حجمی نانوذرات موجود در نانو سیال ۱٪ می‌باشد، عدد ناسلت در تمامی مقاطع هندسی غیر دایروی دارای بالاترین میزان می‌باشد، در شکل میزان تغییر ضریب اصطکاک در لوله

که در لوله با مقطع هندسی تخت افزودن نانوذرات بالاتریت درصد افزایش عدد ناسلت را ایجاد می‌کند. در شکل شماره ۱۱ ضریب کارایی نانو سیال هیبرید با درصد حجمی ۱٪ در رینولدزهای مختلف نشان داده شده است همان طور که مشاهده می‌شود، با افزودن نانو ذرات هیبرید با درصد حجمی ۱٪ در تمامی مقاطع ضریب کارایی بالاتر از یک می‌باشد که نمایانگر توجیه اقتصادی استفاده از نانو سیال هیبرید در جهت بهبود عملکرد گرمایی می‌باشد.



شکل ۱۰- درصد افزایش عدد ناسلت با اضافه نمودن نانو ذره نسبت به حالت آب خالص



شکل ۱۱- تغییرات ضریب کارایی نانو سیال در رینولدز مختلف

۵- نمادها

علائم انگلیسی

Nu	عدد ناسلت
Re	عدد رینولدز
Pr	عدد پرانتل
D	قطر (m)
h	ضریب انتقال گرما $(\frac{W}{K m^2})$
K	رسانایی گرمایی $(\frac{W}{m K})$
L	طول (m)
P	فشار (Pa)
T	دما (K)
Cp	گرمای ویژه $(\frac{J}{kg K})$
f	ضریب اصطکاک

علائم یونانی

ζ	کارایی نانو سیال
α	پخشندگی گرمایی $(\frac{m^2}{s})$
ρ	چگالی $(\frac{kg}{m^3})$
μ	لزجت $(\frac{kg}{m.s})$
ϕ	کسر حجمی
θ	لزجت سینماتیکی $(\frac{m^2}{s})$

زیرنویس

H	هیدرولیکی
hnf	نانو سیال
P	نانو ذره
f	سیال پایه
Eff	موثر
i	مولفه برداری
j	مولفه برداری
t	مغشوش

۶- مراجع

- [1] Hussein AM, Sharma KV, Bakar RA, Kadirgama K. The effect of cross sectional area of tube on friction factor and heat transfer nanofluid turbulent flow. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2013 Oct 1;47:49-55.
- [2] Leong KY, Ong HC. Entropy generation analysis of nanofluids flow in various shapes of cross section ducts. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2014 Oct 1;57:72-8.
- [3] Salimpour M, Dehshiri-Parizi A. Effect of duct cross sectional shape on the nanofluid flow heat transfer. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering Vol. 2014:1943-7.
- [4] Salimpour MR, Dehshiri-Parizi A. Convective heat transfer of nanofluid flow through conduits with different cross-sectional shapes. Journal of Mechanical Science and Technology. 2015 Feb;29(2):707-13.
- [5] Turgut O, Sari M. Experimental and numerical study of turbulent flow and heat transfer inside hexagonal duct. Heat and Mass Transfer. 2013 Apr;49(4):543-54.
- [6] Zeinali Heris S, Kazemi-Beydokhti A, Noie SH, Rezvan S. Numerical study on convective heat transfer of Al₂O₃/water, CuO/water and Cu/water nanofluids through square cross-section duct in laminar flow. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2012 Jan 1;6(1):1-4.
- [7] Mehrjou B, Heris SZ, Mohamadifard K. Experimental study of CuO/water nanofluid turbulent convective heat transfer in square cross-section duct. Experimental Heat Transfer. 2015 May 4;28(3):282-97.
- [8] Hussein AM. Thermal performance and thermal properties of hybrid nanofluid laminar flow in a double pipe heat exchanger. Experimental Thermal and Fluid Science. 2017 Nov 1;88:37-45.
- [9] Cheng J, Qian Z, Wang Q, Fei C, Huang W. Numerical study of heat transfer and flow characteristic of twisted tube with different cross section shapes. Heat and Mass Transfer. 2019 Mar 8;55(3):823-44.
- [10] Attalla M. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop of SiO₂/water nanofluid through conduits with altered cross-sectional shapes. Heat and Mass Transfer. 2019 Dec;55(12):3427-42.
- [11] Humnic G, Humnic A. A numerical approach on hybrid nanofluid behavior in laminar duct flow with various cross sections. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry. 2020 Jun 1;140(5).

- [12] Selimefendigil F, Öztop HF, Özgül R. Turbulent forced convection of nanofluid in an elliptic cross-sectional pipe. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2019 Dec 1;109:104384.
- [13] Hoseinzadeh S, Otaghsara ST, Khatir MZ, Heyns PS. Numerical investigation of thermal pulsating alumina/water nanofluid flow over three different cross-sectional channel. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2020 Jun 16;30(7):3721-35.
- [14] Teleszewski TJ. Numerical laminar forced convection modelling in a ceramic and concrete solar collector with non-circular duct. *InE3S Web of Conferences* 2019 (Vol. 116, p. 00091). EDP Sciences.
- [15] Arora N, Gupta M. An experimental study on heat transfer and pressure drop analysis of Al₂O₃/water nanofluids in a circular tube. *Materials Today: Proceedings*. 2022 Jan 1;69:199-204.
- [16] Khetib Y, Abo-Dief HM, Alanazi AK, Said Z, Memon S, Bhattacharyya S, Sharifpur M. The influence of forced convective heat transfer on hybrid nanofluid flow in a heat exchanger with elliptical corrugated tubes: Numerical analyses and optimization. *Applied Sciences*. 2022 Mar 9;12(6):2780.
- [17] Neves F, Soares AA, Rouboa A. Forced convection heat transfer of nanofluids in turbulent flow in a flat tube of an automobile radiator. *Energy Reports*. 2022 Nov 1;8:1185-95.
- [18] Alempour SM, Abbasian Arani AA, Najafizadeh MM. Numerical investigation of nanofluid flow characteristics and heat transfer inside a twisted tube with elliptic cross section. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*. 2020 May 1;140(3).
- [19] Nouri-Borujerdi A, Lavasani AM. Experimental study of forced convection heat transfer from a cam shaped tube in cross flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007 Jul 1;50(13-14):2605-11.
- [20] Heris SZ, Nassan TH, Noie SH, Sardarabadi H, Sardarabadi M. Laminar convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid through square cross-sectional duct. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2013 Dec 1;44:375-82.
- [21] Kia S, Khanmohammadi S, Jahangiri A. Experimental and numerical investigation on heat transfer and pressure drop of SiO₂ and Al₂O₃ oil-based nanofluid characteristics through the different helical tubes under constant heat fluxes. *International journal of thermal sciences*. 2023 Mar 1;185:108082.
- [22] Kaska SA, Khalefa RA, Hussein AM. Hybrid nanofluid to enhance heat transfer under turbulent flow in a flat tube. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019 Mar 1;13:100398.
- [23] Hamza NF, Aljabair S. Numerical and experimental investigation of heat transfer enhancement by hybrid nanofluid and twisted tape. *Engineering and Technology Journal*. 2023;41(1):69-85.

[۲۴] ابراز، شقایق، شیخ الاسلامی کندلوسی، محسن. بررسی عددی عملکرد حرارتی گردآورنده خورشیدی سهموی با بکارگیری نانوسیال و مغشوش کننده مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۱، د. ۵۲، ش. ۱، ص ۲۳۷-۲۴۶.

[۲۵] فرشاد، سید علی، شیخ الاسلامی، محسن. بررسی عددی افزایش انتقال گرما نانوسیال در گردآورنده خورشیدی صفحه تخت با قراردادن نوار پیچشی چندکاناله در داخل لوله. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۳۹۹، د. ۵۰، ش. ۴، ص ۱۴۱-۱۴۹.