

## مطالعه‌ی عددی تأثیر نانو سیالات مختلف در بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی درون کانال با مقطع دایره‌ای در حضور نانوذرات $\text{TiO}_2$ ، $\text{Al}_2\text{O}_3$ ، $\text{CuO}$ و $\text{SiO}_2$ با کسر حجمی ۳ و ۵ درصد

حامد صداقت‌زادگان اصفهانی<sup>\*</sup>، کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) ■ کیوان طریقی، معاونت نظارت بر تولید گاز شرکت ملی نفت ایران

### چکیده

افزایش انتقال حرارت و راندمان در صنایع همواره مورد توجه طراحان و مهندسان بوده است. سیالاتی مانند آب، روغن و اتیلن‌گلیکول نقش مهمی در سرمایش و گرمایش فرآیندهای صنعتی دارند. خواص ضعیف انتقال حرارت این سیالات، مانع بزرگی در افزایش انتقال حرارت و کارآمدتر شدن مبدل‌های حرارتی است. از سوی دیگر، هدایت حرارتی برخی از جامدات همانند فلزات چند صد برابر مایعات متداول حامل انرژی است. بنابراین یکی از روش‌های افزایش انتقال حرارت سیالات متداول، پخش ذرات فلزی یا غیرفلزی در سیال مینا است که هدایت حرارتی بالاتری نسبت به سیال مینا دارند. در این پژوهش، تأثیر افزودن نانوذرات مختلف  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{CuO}$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{TiO}_2$  و با نسبت حجمی ۳ درصد و ۵ درصد نسبت به سیال مینا (آب)، درون لوله‌ای با سطح مقطع دایره‌ای در سرعت‌های مختلف به منظور افزایش انتقال حرارت، شبیه‌سازی شده است. میزان افزایش عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. این افزایش عدد ناسلت در رینولدزهای بالا مشهودتر است. در بین ۴ نانوسیال بررسی شده، تیتانیوم‌دی‌اکسید با کسر حجمی ۳ درصد بین ۸٫۷۵ درصد تا ۱۶٫۱۲ درصد و با کسر حجمی ۵ درصد بین ۱۲٫۰۸۷ درصد تا ۲۱٫۳۷ درصد (در رینولدزهای مختلف) کمترین تأثیر در بهبود انتقال حرارت را داشت. در رینولدز پایین (۵۰۰) نانوسیال آب‌سیلیکا با کسر حجمی ۵ درصد با بهبود ۳۰٫۱۲ درصد و در رینولدز بالا (۱۵۰۰) نانو سیال آب‌اکسیدمس با کسر حجمی ۵ درصد با بهبود ۳۲٫۰۱۲ درصد بیشترین تأثیر را در بهبود انتقال حرارت داشتند.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۹/۰۱/۲۱  
تاریخ ارسال به داور: ۹۹/۰۱/۲۷  
تاریخ پذیرش داور: ۹۹/۰۲/۱۳

### واژگان کلیدی:

نانوذره، نانوسیال، بهبود انتقال حرارت، جریان سیال.

### مقدمه

با توجه به حضور جریان سیال، داخل کانال‌ها در بسیاری از سیستم‌های طبیعی و ساخته‌ی بشر و کاربردهای گسترده‌ی آنها در سالیان اخیر، توجه به مسئله بهبود انتقال حرارت، با سرعت افزایش‌دهی در حال رشد است، به طوری که هم‌اکنون به بخش بسیار مهمی از تحقیقات تجربی و نظری تبدیل شده است. در حال حاضر مقالات منتشر شده مرتبط با بهبود انتقال حرارت در سیستم‌های حرارتی حدود ۱۰ درصد کل مقالات مرتبط با مبحث انتقال حرارت را شامل می‌شوند.

بهبود انتقال حرارت با استفاده از روش‌های مرسوم باعث صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌ها و منابع انرژی و حفظ محیط‌زیست شده است. پژوهش‌های بسیاری به منظور بررسی انتقال حرارت در شکل‌های هندسی متفاوت و بررسی اثرات عوامل خارجی بر این انتقال حرارت انجام شده است. [۱، ۲، ۳، ۴، ۵] برهم زدن زیر لایه آرام در لایه مرزی جریان مغشوش، ایجاد جریان ثانویه، اتصال دوباره سیال جدا شده به سطح، ایجاد تاخیر در توسعه لایه مرزی، تقویت ضریب هدایت حرارتی موثر سیال، افزایش اختلاف دما بین سطح و سیال و افزایش نرخ جریان سیال به صورت غیرفعال از جمله مهم‌ترین مکانیزم‌هایی هستند که به افزایش انتقال حرارت از طریق جریان سیال منجر می‌شوند.

موتور نسبت به فلزات و اکسیدهای فلزی، ضریب هدایتی پایینی دارند. یکی از روش‌های دستیابی به سیال با ضریب هدایتی بالا، افزودن ذرات فلزی یا غیرفلزی با خواص حرارتی بالا نظیر اکسید آلومینیوم، اکسید مس، تیتانیوم‌دی‌اکسید و... به یک سیال پایه معمولی است. به طور کلی دلایل افزایش انتقال حرارت در حضور نانو سیال به این شرح است:

با توجه به اینکه انتقال حرارت در نانوسیال روی سطوح ذرات معلق انجام می‌شود، ذرات نانو، سطح انتقال حرارت را افزایش می‌دهند.

با افزودن نانوذرات به سیال پایه، هدایت حرارتی نانوسیال به مراتب افزایش می‌یابد.

این ذرات معلق، توربولانس و اختلاط جریان را افزایش می‌دهند.

پراکنندگی ذرات، گرادیان دمایی سیال را تغییر می‌دهد، در نتیجه ضخامت لایه مرزی حرارتی کاهش یافته و طول توسعه یافتگی افزایش می‌یابد. [۶]

محققان بسیاری تأثیر نانوسیال بر بهبود انتقال حرارت را در مکانیسم‌های مختلف انتقال حرارت بررسی کرده‌اند. خانافر و همکاران [۷] با بررسی جریان جابه‌جایی آزاد نانوسیال داخل یک محفظه مربعی به این نتیجه رسیدند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در بررسی دیگری، ابوندا و همکاران [۸] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در یک حلقه را

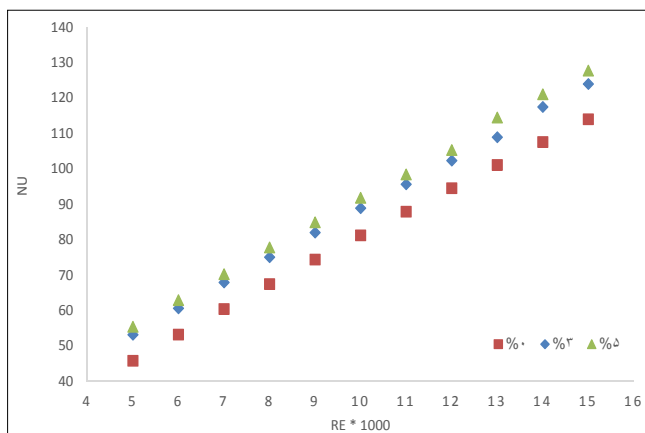
\* نویسنده عهد‌دار مکاتبات (sedaghatzadegan@aut.ac.ir)

نانوذرات همراه است. [۱۷] انگ تونگسوک و ونگ نیز ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک نانوسیال آب-اکسیدتیتانیوم را در یک مبدل دولوله‌ای افقی تحت جریان آشفته به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند. آنها متوجه شدند که ضریب انتقال حرارت نانوسیالات از سیال پایه بیشتر است و با افزایش عدد رینولدز و غلظت ذرات، این افزایش بیشتر می‌شود. همچنین افت فشار در نانوسیالات اندکی بیشتر از سیال پایه است و این افت فشار با افزایش غلظت ذرات، افزایش می‌یابد. [۱۸]

فتوکیان و اصفهانی، انتقال حرارت جریان آشفته و افت فشار نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم درون لوله دایره‌ای را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها از نتایج این آزمایش متوجه شدند که افت فشار برای نانوسیال رقیق (غلظت ذرات کمتر از ۲ درصد) بیشتر از سیال پایه است. آنها نتایج خود را با فرمول‌های موجود برای انتقال حرارت نانوسیالات مقایسه کردند. همچنین در تحقیقی دیگر آنها از نانوسیال آب-اکسیدمس برای آزمایش خود استفاده کردند. آنها افزایش ۲۵ درصد را در ضریب انتقال حرارت مشاهده کردند. [۱۹، ۲۰] نانوسیال آب-اکسیدسیلیسیم در محدوده‌ی رینولدز ۲۷۰۰۰-۵۰۰۰۰ تحت لوله‌ای شار ثابت با مقطع دایره‌ای توسط عظیمی و همکاران بررسی شده است. نتایج حاصل از این بررسی بیانگر افزایش ۳۲/۷ درصد عدد ناسلت در نانوسیال با غلظت ۳ درصد است. [۲۱] در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر نانوسیالات بر بهبود ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری و سپس عدد ناسلت از نانو سیالی با سیال پایه آب و نانوذرات مختلف  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{CuO}$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{SiO}_2$  با نسبت جرمی ۳ و ۵ درصد استفاده شده است.

## ۲- روابط محاسباتی و محاسبه خواص ترموفیزیکی نانوسیال

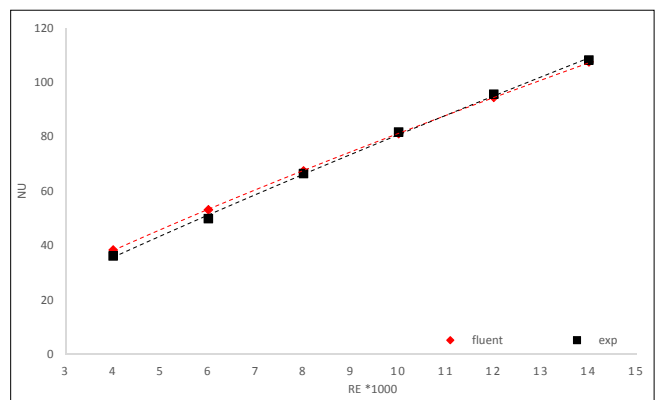
خواص ترموفیزیکی نانوسیالات، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و عدد ناسلت در این قسمت آورده شده است. روابط مختلفی برای محاسبه گرانروی



شکل ۲ | تاثیر نانوسیال آب-تیتانیوم دی اکسید برای کسر حجمی ۳ و ۵ درصد

به روش عددی و با به کارگیری نانوسیال‌های مختلف بررسی کردند. آنها بهبود انتقال حرارت را با افزایش کسر حجمی نانوذرات در تمام اعداد رایلی گزارش کردند. بر اساس نتایج آنها در عدد رایلی بزرگ‌تر از ۱۰۴، تاثیر استفاده از نانوذرات نسبت به سایر اعداد رایلی کمتر است. با بررسی گسترده جریان سیال و کاربردهای حرارتی آن در صنایع مختلف اعم از انتقال انرژی، پتروشیمی و حتی استفاده از کانال‌ها در ابعاد میکرو در صنعت پزشکی و تجهیزات الکتریکی و...، مسئله‌ی بهبود انتقال حرارت به شدت مورد توجه محققان واقع شده است. تاثیر نانوسیال‌های مختلف در جریان اجباری نیز همواره به عنوان پارامتری در بهبود انتقال حرارت مورد بررسی واقع شده است، به عنوان مثال بررسی تاثیرات نانوسیالات آب-اکسیدروی [۹]، آب-اکسیدآلومینیوم [۱۰]، آب-طلا [۱۱]، آب-اکسیدسیلیسیم [۱۲]، آب-مس [۱۳] و آب-گرافن [۱۴] به منظور بهبود انتقال حرارت در کانال‌ها نشان از اهمیت این موضوع دارد.

حسین و همکاران تاثیر نانوسیال آب-اکسیدتیتانیوم با کسر حجمی‌های مختلف ۱-۲۵ درصد را در لوله‌ای با سطح مقطع بیضوی به منظور بهبود انتقال حرارت با حداقل افت فشار بررسی کردند. افزایش ۹ درصد ضریب انتقال حرارت در لوله‌ای با مقطع بیضوی نسبت به لوله‌ای دایره‌ای و همچنین افزایش ضریب انتقال حرارت با کاهش قطر نانوذرات، از نتایج کار حسین و همکاران است. [۱۵] چن و همکاران برای مطالعه توانایی نانوسیال در افزایش انتقال حرارت از نانولوله‌های اکسیدتیتانیوم با قطر ۱۰ نانومتر و طول ۱۰۰ نانومتر استفاده کردند. نتایج تجربی آنها نشان داد که در جریان آرام و شرط مرزی شار حرارتی ثابت دیواره، میزان انتقال حرارت نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آنها نشان می‌دهد که شکل نانوذرات در میزان افزایش انتقال حرارت موثر است. [۱۶] نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم توسط آنوپ و همکارانش نیز با هدف مشابهی مورد بررسی قرار گرفت. با این تفاوت که آنها جریان آرام را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها با نتایج حسین و همکاران همخوانی داشته و افزایش نسبی انتقال حرارت با کاهش اندازه



شکل ۳ | مقایسه‌ی عدد ناسلت حاصل از شبیه‌سازی با عدد ناسلت تجربی در رینولدزهای مختلف

$$h_{nf} = \frac{(C_p \rho)_{nf} * \bar{u} * A * (T_{b2} - T_{b1})}{\pi D * L * (T_w - T_B)} \quad (7)$$

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} * D}{k_{nf}} \quad (8)$$

که  $(T_{b2} - T_{b1})$  دمای توده،  $L$  طول لوله و  $D$  قطر هیدرولیکی است که از این رابطه محاسبه می شود:

$$D = \frac{4A}{P} \quad (9)$$

که  $A$  سطح مقطع و  $P$  محیط کانال می باشد.

عدد ناسلت آب مقطر در کانال ها از این رابطه محاسبه می شود: [۲۳]

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (10)$$

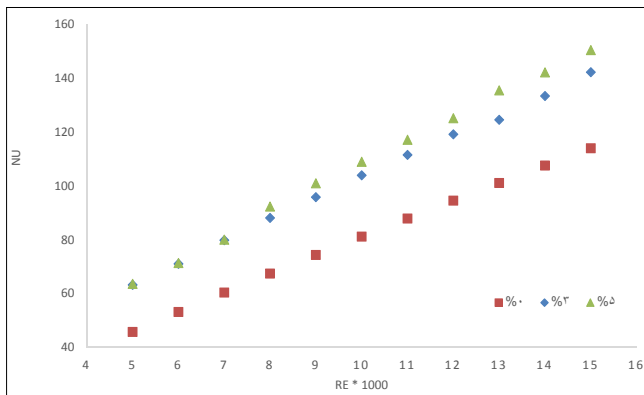
### ۳- مدل سازی مسئله

مدل کردن عددی انتقال حرارت جابه جایی نانوسیال را می توان به دو روش انجام داد:

■ روش تک فاز

■ روش دو فاز

در روش تک فاز فرض می شود هر دو فاز سیال و ذرات جامد در تعادل حرارتی هستند و جریان دارای یک سرعت است. این روش که مبتنی بر تک فاز بودن جریان است و همراه با ساده سازی هایی می باشد، ساده تر بوده و به زمان محاسبات کمتری نیاز دارد. در روش دو فاز، نانوسیال را به صورت دو فاز جداگانه یعنی فاز مایع، به عنوان فاز پیوسته و نانوذرات معلق در سیال به عنوان فاز پراکنده در نظر گرفته می شود. معادلات حاصل از فرضیه ی دو فاز از نظر حل، مشکل بوده و به زمان محاسبات بیشتر نیازمند است. [۲۴] در این شبیه سازی با استفاده از نرم افزار فلوئنت، فرض تک فاز بودن نانوسیال به منظور بررسی رفتار هیدرولیکی-حرارتی جریان، درون کانال لحاظ شده است. نرم افزار فلوئنت از تکنیک حجم محدود برای تبدیل معادلات پیوسته حاکم بر مسئله به معادلات جبری گسسته استفاده می کند. این روش بر پایه ی انتگرال گیری فضایی از معادلات بقا روی حجم های محدود، استوار است.



شکل ۴ | تاثیر نانوسیال آب اکسیدمس برای کسر حجمی ۳ و ۵ درصد

سوسپانسیون های جامد مایع از جمله نانوسیالات، ارائه شده است. برای محاسبه گرانیروی نانوسیالات از رابطه ی ۱ مایگا و همکاران [۲۱] استفاده شده است.

$$\mu_{ff} = (1 + 7.3\phi + 123\phi^2)\mu_f \quad (1)$$

برای محاسبه خواص حرارتی نانوسیالات از مدل ماکسول به شرح زیر استفاده شده است:

$$k_{nf} = k_f * \frac{k_p + 2k_f + 2\phi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \phi(k_p - k_f)} \quad (2)$$

$$(c_p \rho)_{nf} = (1 - \phi)(c_p \rho)_f + \phi(c_p \rho)_p \quad (3)$$

در این روابط، اندیس های  $p$  و  $f$  به ترتیب مربوط به نانوذره و سیال است. همچنین  $\phi$  کسر حجمی نانوذرات،  $k$  ضریب هدایت حرارتی،  $\mu$  ویسکوزیته و  $\rho$  چگالی است.

اعداد بدون بعد رینولدز، پرانتل و پکلت برای نانوسیال از این روابط محاسبه می شوند:

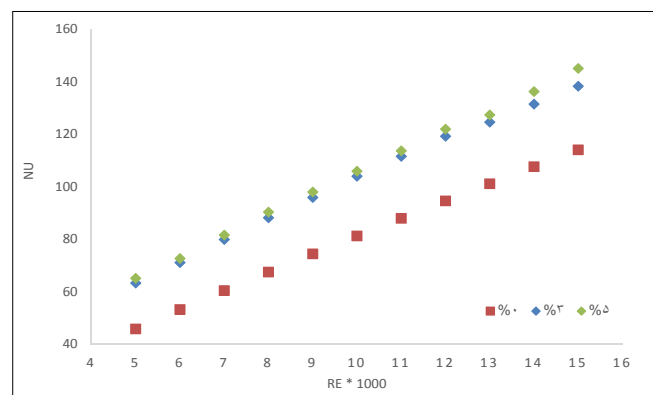
$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} * u_{nf} * D}{\mu_{nf}} \quad (4)$$

$$Pr_{nf} = \frac{\mu_{nf} * c_{p,nf}}{k_{nf}} \quad (5)$$

$$Pe_{nf} = Re_{nf} * Pr_{nf} \quad (6)$$

ضریب انتقال حرارت جابه جایی تجربی و همچنین عدد ناسلت به این صورت محاسبه می شود:

Re	Nu <sub>fluent</sub>	Nu <sub>exp</sub>	Error(%)
۴۰۰۰	۳۸.۳۸۳۱۹	۳۶.۱۷۰۹۵	۶.۱۱۶۰۶۸
۶۰۰۰	۵۳.۱۶۵۲۵	۴۹.۹۱۵۸۱	۶.۵۰۹۸۴۱
۸۰۰۰	۶۷.۴۳۳۷۹	۶۶.۴۸۴۹۳	۱.۴۲۷۱۸۱
۱۰۰۰۰	۸۱.۱۶۴۶۱	۸۱.۷۱۹۵۲	۰.۶۷۹۰۴
۱۲۰۰۰	۹۴.۴۹۶۱۷	۹۵.۶۱۹۵۷	۱.۱۷۴۸۶
۱۴۰۰۰	۱۰۷.۵۱۵۸	۱۰۸.۱۸۵۱	۰.۶۱۸۶۶



شکل ۳ | تاثیر نانوسیال آب آلومینا برای کسر حجمی ۳ و ۵ درصد

و سیال برقرار است. همچنین شار حرارتی ثابت ۵۰۰۰ وات بر مترمربع بر دیواره (ها) اعمال می‌شود.

#### ۴- نتایج

پس از همگرایی و بررسی استقلال از مش، نتایج حاصل از شبکه مشبندی نهایی، جهت حصول اطمینان از عملکرد درست برنامه کامپیوتری و مراحل انجام محاسبات با نتایج عددی و آزمایشگاهی قبلی مقایسه می‌شوند.

#### ۴-۱- نتایج حاصل از جریان سیال تک فاز (آب)

به‌منظور اعتبارسنجی، عدد ناسلت حاصل از شبیه‌سازی در جریان تک فاز (آب) درون کانال دایره‌ای، با عدد ناسلت حاصل از روابط تجربی در رینولدزهای مختلف ارائه شده است. این نتایج در جدول ۱ و شکل ۱ ارائه شده است.

از جدول و شکل ۱ استنباط می‌شود که نتایج حاصل از  $\phi=1\%$  و  $\phi=3\%$  شبیه‌سازی با نتایج تجربی از دقت خوبی برخوردار است و درصد خطا در رینولدزهای بالا کم‌تر می‌شود که نشان‌دهنده‌ی صحت کار می‌باشد.

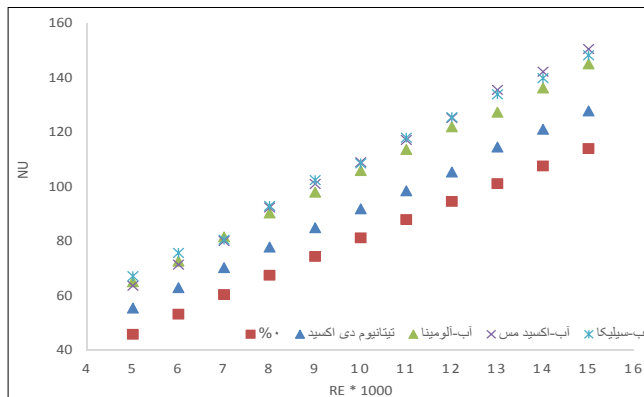
#### ۴-۲- نتایج حاصل از جریان نانوسیال

نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای  $\phi=1\%$  و  $\phi=3\%$  برای نانوسیالات مختلف در اشکال ۲ تا ۵ ارائه شده است:

نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر این است که با افزایش  $\phi$ ، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. این نتیجه با نتایج دانگ تونگسوک و ونگ و سایر محققانی که تاثیر  $\phi$  را در بهبود انتقال حرارت بررسی کرده‌اند همخوانی دارد. افزایش عدد ناسلت در رینولدزهای بالا نمود بهتری داشته و این افزایش عدد ناسلت با افزایش  $\phi$  برای نانوسیال آب-آلومینا کمتر مشهود است.

در اشکال ۶ و ۷ نانوسیالات با  $\phi$  یکسان با هم مقایسه شده‌اند.

نتایج حاصل بیانگر این است که در کسر حجمی ۳ و ۵ درصد تیتانیوم‌دی‌اکسید



شکل ۵ | تاثیر نانوسیالات مختلف با کسر حجمی ۵ درصد در بهبود انتقال حرارت

هندسه‌ی مسئله حاضر، کانال‌هایی با طول ۱۰۰۰ میلی‌متر و قطر هیدرولیکی ۱۰ میلی‌متر است. همچنین قطر نانوذرات در این شبیه‌سازی مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

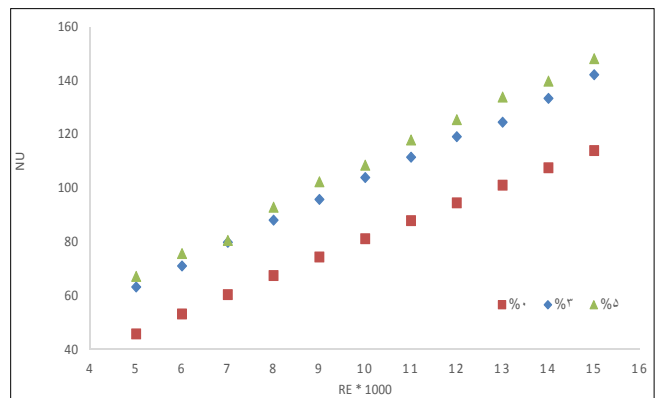
برای اعمال شرایط مرزی و شبکه‌بندی، بر روی کانال‌ها از نرم‌افزار گمیت استفاده شده و هندسه ایجاد شده به‌همراه شرایط مرزی مسئله جهت حل معادلات پاره‌ای غیرخطی پیوستگی، مومنتوم و انرژی به فلوننت فراخوانی شده است. شرایط مرزی تعریف شده برای کانال‌ها به این شرح است:

■ شرط مرزی هیدرودینامیکی در ورودی کانال: مقدار سرعت ورودی سیال به کانال بر اساس عدد رینولدز و مشخصات فیزیکی نانوسیال محاسبه می‌شود. در این پژوهش رفتار حرارتی سیال در رینولدزهای ۴۰۰۰، ۶۰۰۰، ۱۴۰۰۰ و... بررسی شده است.

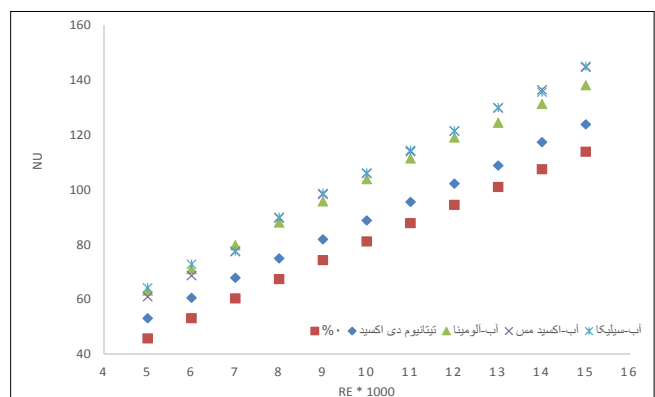
■ شرط مرزی حرارتی در ورودی کانال: دمای نانوسیال ورودی به کانال ۲۹۸ درجه کلوین اتخاذ شده است.

■ شرط مرزی در خروجی کانال: در اینجا از شرط جریان خروجی پیش‌فرض در فلوننت استفاده شده است.

■ شرط مرزی در دیواره‌ی کانال: در دیواره شرط عدم لغزش<sup>۱</sup> میان دیواره



شکل ۶ | تاثیر نانوسیال آب-سیلیکا برای کسر حجمی ۳ و ۵ درصد



شکل ۷ | تاثیر نانوسیالات مختلف با کسر حجمی ۳ درصد در بهبود انتقال حرارت

انتقال حرارت استفاده می‌شوند، ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند. ذرات نانو به دلیل بالا بودن ضریب هدایتی با توزیع در سیال پایه باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال، که یکی از پارامترهای اساسی انتقال حرارت محسوب می‌شود، می‌گردند.

میزان افزایش عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. این افزایش عدد ناسلت در رینولدزهای بالا مشهودتر است. در بین ۴ نانوسیال بررسی شده، تیتانیوم‌دی‌اکسید تاثیر کمتری در بهبود انتقال حرارت داشته و در رینولدزهای پایین، نانوسیال آب-سیلیکا و در رینولدزهای بالا، نانوسیال آب-اکسیدمس عملکرد بهتری نسبت به سایر نانوسیالات برای بهبود انتقال حرارت داشت. ■

تاثیر کمتری در افزایش انتقال حرارت داشته و تاثیر نانوسیال آب-سیلیکا و آب-اکسیدمس در رینولدزهای بالا به هم نزدیک هستند.

##### ۵- نتیجه گیری

نانوسیالات که از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیالات معمولی حاصل می‌شوند، نسل جدیدی از سیالات با پتانسیل بسیار زیاد در کاربردهای صنعتی هستند. اندازه ذرات مورد استفاده در نانو سیالات از یک نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر است. این ذرات از جنس ذرات فلزی و یا اکسیدفلزی همچون آلومینیوم‌اکسید، تیتانیوم‌دی‌اکسید، اکسیدمس و... هستند. سیالات متداولی که در زمینه‌ی

## پانویس‌ها

### 1. No slip condition

## منابع

- [1]. Li, Zhouhang, et al. "Comparison between heat transfer to supercritical water in a smooth tube and in an internally ribbed tube." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 84 (2015): 529-541.
- [2]. Han, Huaizhi, Bingxi Li, and Wei Shao. "Effect of flow direction for flow and heat transfer characteristics in outward convex asymmetrical corrugated tubes." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 92 (2016): 1236-1251.
- [3]. Garcia, A., et al. "The influence of artificial roughness shape on heat transfer enhancement: Corrugated tubes, dimpled tubes and wire coils." *Applied Thermal Engineering* 35 (2012): 196-201.
- [4]. Pethkool, S., et al. "Turbulent heat transfer enhancement in a heat exchanger using helically corrugated tube." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38.3 (2011): 340-347.
- [5]. Qi, Cong, et al. "Experimental study on thermo-hydraulic performances of TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluids in a horizontal elliptical tube." *Applied Thermal Engineering* 129 (2018): 1315-1324.
- [6]. Qi, Cong, et al. "Experimental study on thermo-hydraulic performances of TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluids in a horizontal elliptical tube." *Applied Thermal Engineering* 129 (2018): 1315-1324.
- [7]. Khanafer, Khalil, Kambiz Vafai, and Marilyn Lightstone. "Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids." *International journal of heat and mass transfer* 46.19 (2003): 3639-3653.
- [8]. Abu-Nada, E., Z. Masoud, and A. Hijazi. "Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35.5 (2008): 657-665.
- [9]. Li, Haoran, et al. "Thermophysical and natural convection characteristics of ethylene glycol and water mixture based ZnO nanofluids." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 91 (2015): 385-389.
- [10]. Hu, Yanwei, et al. "Experimental and numerical study of natural convection in a square enclosure filled with nanofluid." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 78 (2014): 380-392.
- [11]. Chen, Meijie, et al. "Investigation into Au nanofluids for solar photothermal conversion." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 108 (2017): 1894-1900.
- [12]. Hu, Yanwei, et al. "Effect of nanoparticle size and concentration on boiling performance of SiO<sub>2</sub> nanofluid." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 107 (2017): 820-828.
- [13]. Sun, Bin, Amin Yang, and Di Yang. "Experimental study on the heat transfer and flow characteristics of nanofluids in the built-in twisted belt external thread tubes." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 107 (2017): 712-722.
- [14]. Akhavan-Zanjani, Hossein, et al. "Experimental investigation of laminar forced convective heat transfer of Graphene-water nanofluid inside a circular tube." *International Journal of Thermal Sciences* 100 (2016): 316-323.
- [15]. Hussein, Adnan M., et al. "HEAT TRANSFER ENHANCEMENT WITH ELLIPTICAL TUBE UNDER TURBULENT FLOW TiO<sub>2</sub>-WATER NANOFLUID." *Thermal Science* 20.1 (2016).
- [16]. Chen, Haisheng, et al. "Heat transfer and flow behavior of aqueous suspensions of titanate nanotubes (nanofluids)." *Powder Technology* 183.1 (2008): 63-72.
- [17]. Anoop, K. B., T. Sundararajan, and Sarit K. Das. "Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region." *International journal of heat and mass transfer* 52.9-10 (2009): 2189-2195.
- [18]. Duangthongsuk, Weerapun, and Somchai Wongwises. "An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53.1-3 (2010): 334-344.
- [19]. Fotukian, S. M., and M. Nasr Esfahany. "Experimental investigation of turbulent convective heat transfer of dilute  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid inside a circular tube." *International Journal of Heat and Fluid Flow* 31.4 (2010): 606-612.
- [20]. Fotukian, S. M., and M. Nasr Esfahany. "Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube." *International communications in heat and mass transfer* 37.2 (2010): 214-219.
- [21]. Azmi, W. H., et al. "Experimental determination of turbulent forced convection heat transfer and friction factor with SiO<sub>2</sub> nanofluid." *Experimental Thermal and Fluid Science* 51 (2013): 103-111.
- [22]. Maiga, Sidi El Becaye, et al. "Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows." *International journal of heat and fluid flow* 26.4 (2005): 530-546.
- [23]. Qadir, G. A., Irfan Anjum Badruddin, and NJ Salman Ahmed. "Numerical investigation of the performance of a triple concentric pipe heat exchanger." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 75 (2014): 165-172.
- [24]. Heris, S. Zeinali, M. Nasr Esfahany, and G. Etemad. "Numerical investigation of nanofluid laminar convective heat transfer through a circular tube." *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 52.11 (2007): 1043-1058.