

## شبه سازی عددی انتقال حرارت جابجایی در جریان مغشوش غیرنیوتنی نانوسیال در یک لوله افقی مدور

محمد شریفی اصل<sup>۱</sup>، داود طغرای<sup>۲\*</sup> و احمدرضا عظیمیان<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۴/۱۹	در این مقاله، انتقال حرارت جابجایی در جریان مغشوش یک نانوسیال غیرنیوتنی درون لوله ای افقی و مدور با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و حل عددی معادلات بقای جرم، بقای مومنتوم و بقای انرژی به کمک نرم افزار فلونتت بررسی می شود. برای این منظور از نانوسیالی غیرنیوتنی متشکل از سیال غیرنیوتنی محلول نیم درصد وزنی کربوکسی متیل سلولز (CMC) در آب و نانوذرات $Al_2O_3$ استفاده شده است. در این تحقیق اندازه متوسط نانوذرات در محلول ۲۵ نانومتر بوده و تحلیل برای دو کسر حجمی مختلف ۰/۵ و ۱/۵ درصد انجام شده است. استفاده از مدل قاعده توانی در تحلیل رفتار غیرنیوتنی سیال و بهره گیری از مدل چون و همکاران در تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال و مقایسه پیش گویی این مدل ها با نتایج تجربی موجود از ویژگی های این تحقیق است. اثر استفاده از نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی نانوسیال غیرنیوتنی در جریان مغشوش و در رینولدزهای متفاوت بررسی شده است. همچنین تأثیر کسر حجمی های مختلف نانوذرات بر این ضریب و عد ناسلت مورد بررسی قرار گرفته است. تطابق خوبی بین این نتایج و نتایج تحقیقات آزمایشگاهی مشاهده شد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۲۰	
<b>واژگان کلیدی:</b> نانوسیال، غیرنیوتنی، انتقال حرارت جابجایی، مغشوش، ناسلت، رینولدز.	

### ۱-مقدمه

در مسأله بازده انتقال حرارت در تجهیزاتی نظیر مبدل های حرارتی، هدایت حرارتی سیال حامل انرژی و ضریب انتقال حرارت جابجایی نقش اساسی را بر عهده دارند. به طور کلی انتقال حرارت جابجایی ذاتاً به وسیله تغییر در هندسه جریان، شرایط مرزی، یا به وسیله افزایش هدایت حرارتی سیال می تواند افزایش یابد. سیالات متداول در انتقال حرارت و حامل انرژی در صنایع را معمولاً سیالاتی نظیر آب، روغن ها و اتیلن گلیکول تشکیل می دهند. با افزایش رقابت جهانی در زمینه صنایع مختلف و نقش انرژی در هزینه تولید، این صنایع به شدت به سمت توسعه سیالات پیشرفته و جدید با شاخص های حرارتی بالا پیش می روند.

تحقیقات اخیر روی نانوسیالات، نشان می دهد که نانوذرات معلق ویژگی های انتقال حرارت محلول را تغییر می دهند. به طور کلی مطالعه نانوسیالات، بررسی ها و مدل سازی ها به سال ها قبل برمی گردد. به طوری که کار تئوری و نظری ماکسول [۱ و ۲] حدود ۱۰۰ سال پیش منتشر شده است. اما تا سال های اخیر بررسی ها برای ذراتی که دارای اندازه میلی متری یا میکرومتری بودند، صورت گرفته بود. در این اندازه ها ذرات با مشکل جدی ته نشینی سریع رو به رو بودند. به این مشکل باید مسئله ایجاد سایش در مسیر جریان و افزایش افت فشار را نیز اضافه کرد. نانوسیالات طبقه بندی جدیدی از سیالات انتقال حرارت می باشند که از طریق معلق سازی نانوذرات (ذرات با مقیاس نانومتر) در درون

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Toghraee@iaukhsh.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران

۲. دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر

۳. استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر

است. شیوه اول چنین فرض می‌کند که فرض پیوستگی<sup>۴</sup> هنوز برای سیالات با ذرات با مقیاس نانوی حل شده در آنها (نانوسیالات) برقرار است. این شیوه از مدل سیال تک فازی بهره‌گیری نموده و از ویژگی‌های غنی شده نانوسیال برای استفاده در قوانین بقا و روابط موجود استفاده می‌کند [۷]. شیوه دوم بهره‌گیری از گزینه‌های چند فازی بوده و در این بین استفاده از مدل‌های دو فازی مثل مدل مخلوط<sup>۵</sup>، مدل پراکندگی<sup>۶</sup> و مدل فاز مجزا (اثر متقابل اویپری-لاگرانژی) از عمومی‌ترین شیوه‌ها بوده و برای توصیف بهتر هر دو فاز مایع و جامد استفاده می‌شوند [۷] اما با توجه به اعتبار مطلوب نتایج از یک سو و سهولت در انجام محاسبات از سوی دیگر بیشتر از روش تک فازی استفاده شده است [۷]. در تحقیقی عددی بیانکو و همکاران [۷] انتقال حرارت جابجایی اجباری در جریان مغشوش را برای نانوسیال آب- $Al_2O_3$  در یک لوله مدور بررسی نمودند. روش حجم محدود و به کارگیری نرم افزار فلونت و استفاده از هر دو روش دو فازی (مدل مخلوط<sup>۷</sup>) و تک فازی مدنظر قرار گرفت و شرط مرزی شار حرارتی ثابت روی دیواره لوله در نظر گرفته شد. قطر نانوذرات آلومینیوم در این تحقیق ۲۷ nm بوده و مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از هر دو روش بر روی پروفیل‌های سرعت، دما و عدد ناسلت به عمل آمد. بعلاوه مقایسه‌ای با نتایج آزمایشگاهی نیز انجام شد. تحلیل نتایج نشان داد که نتایج حاصل از هر دو مدل مذکور در نسبت حجمی یک درصد، تطابق خوبی با یکدیگر دارد، هرچند که در غلظت‌های بالاتر تفاوتی قابل ملاحظه مشاهده شد. همچنین مروجی و همکاران [۸] با روش CFD و استفاده از فلونت، جریان آرام نانوسیال را در یک لوله مدور و تحت شرایط مرزی شار حرارتی ثابت روی جداره لوله با هر دو روش سیال تک فازی و دو فازی شبیه‌سازی نمودند. آنها رابطه‌ای را بر مبنای اعداد بی‌بعد برای محاسبه عدد ناسلت به دست آوردند. در تحقیقی دیگر مروجی و همکاران [۹] انتقال حرارت جابجایی را در جریان آرام برای یک نانوسیال غیرنیوتنی به صورت عددی مورد توجه قرار دادند و با استفاده از CFD و روش حجم محدود به کاررفته در نرم افزار فلونت جریان در لوله افقی مدور و تحت شرط مرزی شار ثابت را شبیه‌سازی نمودند. آنها در

سیالات معمولی و متداول انتقال حرارت که به عنوان سیال پایه شناخته می‌شوند به دست می‌آیند. در سال‌های اخیر تحقیقات آزمایشگاهی، عددی و تئوریک زیادی در زمینه انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات صورت گرفته است. این تحقیقات جنبه‌های متنوعی از موضوع انتقال حرارت جابجایی در نانوسیالات را مورد توجه قرار داده‌اند. آنوپ و همکاران<sup>۱</sup> [۳] روی اثر اندازه ذرات بر ارتقای انتقال حرارت در نانوسیالات آب- $Al_2O_3$  تحقیق کردند آنها با استفاده از ذراتی با اندازه‌های ۴۵ و ۱۵۰ نانومتر مشاهده کردند که افزایش انتقال حرارت بیشتری با سایز ۴۵ نانومتر در مقایسه با ۱۵۰ نانومتر حاصل می‌شود. در تحقیقی دیگر کیم و همکاران<sup>۲</sup> [۴] با استفاده از نانوسیال آب- $Al_2O_3$  با نسبت حجمی ۳٪ به ترتیب ۱۵٪ و ۲۰٪ افزایش انتقال حرارت را در هر دو رژیم جریان آرام و آشسته مشاهده کردند. همچنین ون و دینگ<sup>۳</sup> [۵] روی نانوسیالات آب- $Al_2O_3$  در رژیم جریان آرام و تحت شرط مرزی شار ثابت دیواره‌ها تحقیق کردند. تحلیل یکسانی را با تغییر نسبت حجمی ذرات بین ۰/۶٪ و ۱/۶٪ ترتیب دادند. نانوسیالات بکار رفته در این تحقیق ذراتی با اندازه بین ۲۷ nm و ۵۶ nm داشتند. آنها به افزایش انتقال حرارت به‌ازای افزایش نسبت حجمی ذرات و عدد رینولدز دست یافتند و ملاحظه شد که نسبت افزایش ضریب انتقال حرارت موضعی در ورودی لوله بیشتر است. همچنین مشاهده شد که نانوسیالات نسبت به سیالات خالص به کندی به حالت توسعه یافته گرمایی می‌رسند. حجت و همکاران [۶] انتقال حرارت جابجایی اجباری را این بار برای سه نانوسیال غیرنیوتنی مختلف درون یک لوله مدور و تحت رژیم جریان مغشوش و شرط مرزی شار ثابت را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که ضرایب انتقال حرارت موضعی و متوسط نانوسیالات بزرگتر از سیال پایه است و نرخ انتقال حرارت نانوسیالات با افزایش غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد. در این تحقیق معادله‌ای نیز برای عدد ناسلت نانوسیالات غیرنیوتنی پیشنهاد شد که در آن ناسلت تابعی از اعداد رینولدز و پرانتل بود.

برای شبیه‌سازی عددی به منظور تحقیق روی ویژگی‌های انتقال حرارت نانوسیالات دو شیوه در مقالات اختیار شده

<sup>5</sup> - Mixture model

<sup>6</sup> - Dispersion model

<sup>7</sup> - Mixture model

<sup>1</sup> - Anoop et al.

<sup>2</sup> - Kim et al.

<sup>3</sup> - Wen and Ding

<sup>4</sup> - continuum

چهار شبکه بندی مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند که به ترتیب عبارتند از:  $5 \times 1200$ ،  $10 \times 1200$ ،  $20 \times 1200$ ،  $20 \times 2400$ . همچنین با توجه به نرخ تغییر سرعت و دمای سیال در نزدیکی دیواره و اهمیت دقت محاسبات در این نواحی، تقسیم بندی‌ها در جهت شعاعی به صورت غیریکنواخت صورت گرفته و در نزدیکی دیواره شبکه ریزتر می‌باشد. در این تحقیق با توجه به تعداد دفعات تکرار صورت گرفته در هر شبکه بندی و همچنین سرعت رسیدن به جواب، میزان اختلاف معقول بین دو عدد ناسلت متوالی کمتر از ۱٪ در نظر گرفته شده است. بنابراین با توجه به نتایج، شبکه با تقسیم بندی  $10 \times 1200$  یعنی ۱۲۰۰ تقسیم بندی در راستای محور طولی لوله و ۱۰ تقسیم بندی در راستای شعاعی و از مرکز لوله، برای تحقیق حاضر مناسب بوده و مورد بررسی قرار گرفته است.

این تحقیق با شرط مرزی شار حرارتی ثابت روی جداره‌ها که شرط مرزی متداول در تحقیقات مشابه می‌باشد انجام شده است. میزان این شار حرارتی  $100000 \text{ W/m}^2$  یا  $100$  کیلووات بر مترمربع می‌باشد. با توجه به بالا بودن رینولدز و مغشوش بودن جریان، سرعت جریان سیال در لوله زیاد و فرصت تبادل حرارت کم است. بنابراین همانطور که در تحقیق انجام شده توسط بیانکو و همکاران [۷] نیز قابل مشاهده است، در جریان مغشوش مقدار شار حرارتی به منظور رسیدن جریان به توسعه یافتگی دمایی بیشتر از مقدار شار حرارتی در رینولدزهای پایین و جریان آرام در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۱- تعیین خواص ترموفیزیکی نانوسیال

همانطور که پیداست برای حل معادلات بقا نیاز به تعیین خواص ترموفیزیکی نانوسیال از جمله چگالی، ضریب گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی است. برای تعیین چگالی و ضریب گرمایی ویژه از روابط زیر استفاده شده است [۱۰]:

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_f \quad (1)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = \phi (\rho C_p)_p + (1 - \phi) (\rho C_p)_f \quad (2)$$

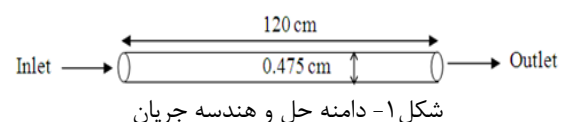
که در اینجا  $\phi$  کسر حجمی ذره و اندیس  $nf$  و  $f$  و  $p$  به ترتیب نشانگر نانوسیال، سیال پایه و ذره است. برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از معادله چون و همکاران<sup>۴</sup>

این تحلیل از مدل سیال تک فاز استفاده کرده و اثر اندازه و غلظت‌های مختلف نانوذرات را بر ضریب انتقال حرارت در رینولدزهای ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت نانوسیال غیرنیوتنی با افزایش غلظت ذرات در محلول افزایش می‌یابد.

در این مقاله رفتار انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات با استفاده از یک سیال غیرنیوتنی و در رژیم جریان آشفته تحت شرط مرزی شار حرارتی ثابت روی جداره‌ها، به طور عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از ابزار CFD و نرم افزار فلونت که عملکرد آن بر مبنای روش حجم محدود<sup>۱</sup> است در تحلیل عددی و مدلسازی مربوطه استفاده می‌شود. فرض مدل تک فاز مورد توجه بوده و مدلسازی برای جریان حالت دائم<sup>۲</sup> سیال، در این لوله افقی انجام می‌پذیرد. این تحلیل، جریان و انتقال حرارت را در طول لوله از ناحیه در حال توسعه تا ناحیه توسعه یافته برای سرعت و دما در بر می‌گیرد. همچنین معادلات بقا شامل بقای جرم، بقای مومنتم و بقای انرژی که در پی می‌آیند برای هندسه جریان مورد نظر حل می‌شوند.

#### ۲- بیان مسأله

در این مقاله از محلول آبی کربوکسی متیل سلولز (CMC) با غلظت وزنی ۰/۵٪ به عنوان سیال پایه غیرنیوتنی استفاده شده است. نانوذرات  $Al_2O_3$  در اندازه‌های ۲۵، ۴۵ و ۱۰۰ نانومتر و با غلظت‌های حجمی ۰/۵٪ و ۱/۵٪ مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به امکان دسترسی به متغیرهای مورد نیاز از طریق مقالات قبلی مدل قاعده توانی<sup>۳</sup> برای تخمین رفتار رئولوژیک سیالات غیرنیوتنی لزج به کار گرفته شده است. شکل (۱) هندسه جریان و دامنه حل مسأله را نشان می‌دهد که لوله‌ای با مقطع دایره‌ای و به طول ۱۲۰ سانتیمتر و قطر ۰/۴۷۵ سانتیمتر است.



با توجه به تقارن محوری هندسه مسأله در این تحقیق، تحلیل در فضای دوبعدی (2D) انجام شده است. برای مش بندی هندسه جریان و با استفاده از فضای نرم افزار گمبیت،

<sup>3</sup> -power-law

<sup>4</sup> - Chon et al.

<sup>1</sup> - Finite volume method

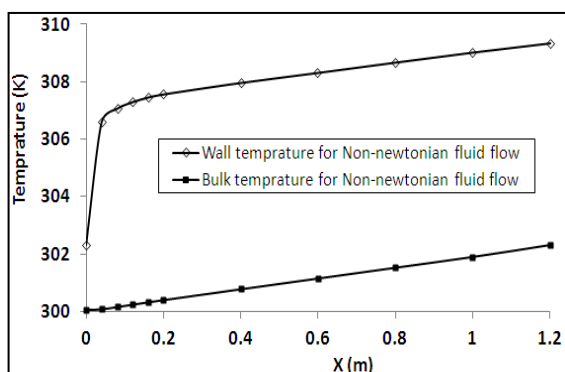
<sup>2</sup> - Steady state

شده است.  $T_w(x)$  و  $T_f(x)$  به ترتیب دمای موضعی دیواره در طول لوله و دمای میانگین موضعی سیال است. عدد ناسلت موضعی نیز از طریق رابطه (۹) قابل محاسبه می‌باشد:

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} D}{k_{nf}} \quad (9)$$

که در آن  $h_{nf}$  ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال،  $k_{nf}$  ضریب هدایت حرارتی نانوسیال و  $D$  قطر لوله است که مقدار آن در این تحقیق  $0.00475 \text{ m}$  است.

شکل‌های (۲) تا (۵) در قالب نمودارهایی به بررسی دمای سیال در مجاورت دیواره در طول لوله و دمای میانگین یا کپه‌ای سیال در طول لوله و همچنین اختلاف دماهای مذکور می‌پردازد. این نمودارها برای سیال غیرنیوتنی پایه و نانوسیال غیرنیوتنی حاوی ذرات آلومینا با غلظت  $1/5\%$  حجمی و اندازه  $25 \text{ nm}$  رسم شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود دمای سیال در مجاورت دیواره تا قبل از ناحیه توسعه یافته‌ی دمای به صورت منحنی و با شیبی تند افزایش می‌یابد و پس از آن و در ناحیه توسعه یافته به صورت خطی تغییر می‌کند. شیب این خط همانطور که مشاهده می‌شود با شیب تغییرات دمای میانگین سیال برابر است. بنابراین در ناحیه توسعه یافته اختلاف دمای دیواره و دمای میانگین موضعی سیال ثابت باقی می‌ماند. این موضوع در شکل (۵) به صورت بهتری نمایش داده شده است.



شکل ۲- تغییرات دماهای دیواره و میانگین سیال غیرنیوتنی پایه در عدد رینولدز ۸۰۰۰

نکته مهم دیگر در شکل (۴) که مقایسه‌ای بین شکل‌های (۲) و (۳) را نشان می‌دهد قابل استنتاج است. این شکل به روشنی نشان می‌دهد که دمای سیال روی دیواره در سیال غیرنیوتنی پایه بیش از مقدار مشابه آن برای نانوسیال

[۱۱] استفاده شده است. معادله چون و همکاران اثر حرکت براونی و همچنین اندازه ذرات را در تعیین مقدار ضریب هدایت حرارتی مورد توجه قرار می‌دهد:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64.7\phi^{0.7460} M \quad (3)$$

که در آن:

$$M = \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0.3690} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.7476} Pr^{0.9955} Re^{1.2321} \quad (4)$$

همچنین در این تحقیق از مدل قاعده توانی<sup>۱</sup> و رابطه (۵) در تعریف رفتار رئولوژیک سیال استفاده می‌شود:

$$\tau_{xy} = K^*(\dot{\gamma}_{xy})^n \quad (5)$$

که در آن  $\tau_{xy}$  تنش برشی،  $K$  ثابت پایداری،  $\dot{\gamma}_{xy}$  نرخ برش و  $n$  زیرنویس قاعده توانی است. مقادیر  $n$  و  $K$  یعنی ضریب و اندیس پاورلا یا قاعده توانی از نمودار مقاله تجربی حجت و همکاران [۱۲]. برای غلظت‌های  $0/5$  و  $1/5$  درصد حجمی آلومینا معلق در سیال غیرنیوتنی حاصل از محلول  $0/5\%$  وزنی کربوکسی متیل سلولز در آب استخراج می‌شود. همچنین در این شبه‌سازی رژیم جریان مغشوش بوده و تحلیل برای اعداد رینولدز  $4500$ ،  $6000$  و  $8000$  انجام می‌شود. باتوجه به تعریف عدد رینولدز برای سیال غیرنیوتنی، نقش ضریب و اندیس قاعده توانی در تعیین عدد رینولدز و سرعت اولیه جریان سیال در ورودی لوله بسیار حائز اهمیت است. اعداد رینولدز و پرانتل برای سیال غیرنیوتنی از روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شود [۶]:

$$Re = \frac{\rho u^{2-n} D^n}{k} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{C_p k \left(\frac{u}{D}\right)^{n-1}}{K} \quad (7)$$

که در آن  $K$  ضریب هدایت حرارتی سیال و  $k$  ضریب قاعده توانی است.

### ۳- نتایج

ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی با استفاده از رابطه (۸) تعیین می‌شود:

$$h(x) = \frac{q''}{T_w(x) - T_f(x)} \quad (8)$$

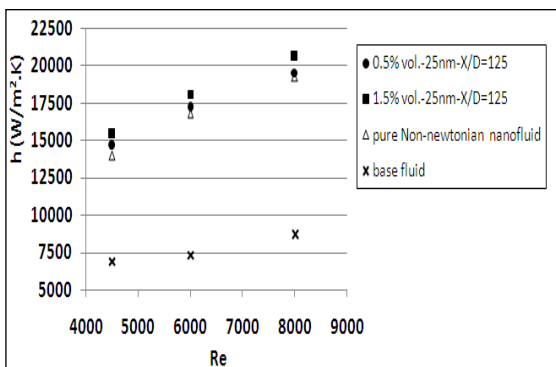
در این معادله  $q''$  شارحرارتی ثابت روی جداره‌ها است که مقدار آن در این تحقیق  $100$  کیلووات بر مترمربع فرض

<sup>1</sup> - Power-law model

جابجایی موضعی محاسبه شده در مقطع میانی لوله که در ناحیه توسعه یافته قرار دارد برای سیال نیوتنی آب خالص، سیال غیرنیوتنی محلول کربوکسی متیل سلولز در آب و نانوسیال غیرنیوتنی حاوی ذرات ۲۵ نانومتری آلومینا با دو غلظت حجمی ۰/۵ و ۱/۵ درصد گزارش شده و ترسیم گردیده است.

جدول ۱- مقایسه مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات غیرنیوتنی حاوی ذرات آلومینا به اندازه ۲۵ nm با سیالات پایه

رینولدز	رینولدز	رینولدز	نوع سیال
۸۰۰۰	۶۰۰۰	۴۵۰۰	نانوسیال غیرنیوتنی با ۱٪/۵ آلومینا
۲۰۵۷۵	۱۸۰۸۰	۱۵۳۹۰	نانوسیال غیرنیوتنی با ۱٪/۵ آلومینا
۱۹۵۳۰	۱۷۲۱۰	۱۴۶۰۰	سیال غیرنیوتنی خالص
۱۹۲۵۰	۱۶۷۵۰	۱۳۹۶۰	آب خالص

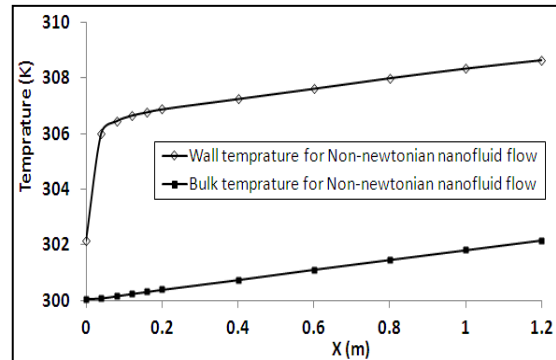


شکل ۶- اثر غلظت ذرات و عدد رینولدز بر ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی

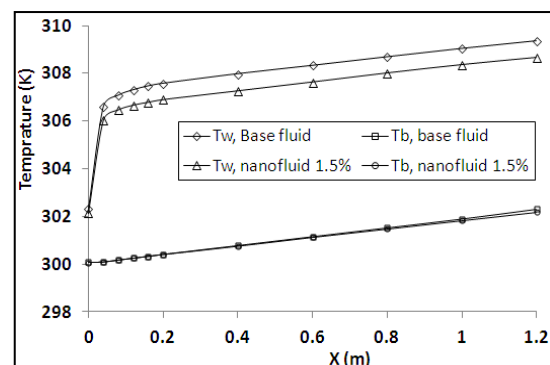
همانطور که مشاهده می شود تغییر خاصیت رئولوژیکی سیال و تغییر ماهیت سیال از نیوتنی به غیرنیوتنی و شبه-پلاستیک موجب افزایش قابل ملاحظه در ضریب انتقال حرارت جابجایی شده است. این موضوع اساساً یکی از روش‌های مؤثر در افزایش انتقال حرارت به شمار می‌رود [۱۳]. همچنین از جدول (۱) و شکل (۶) افزایش ضریب انتقال حرارت سیال از طریق افزودن ذرات نانو به سیال قابل مشاهده است.

شکل‌های (۷) تا (۹) تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی در طول لوله را برای نانوسیال غیرنیوتنی

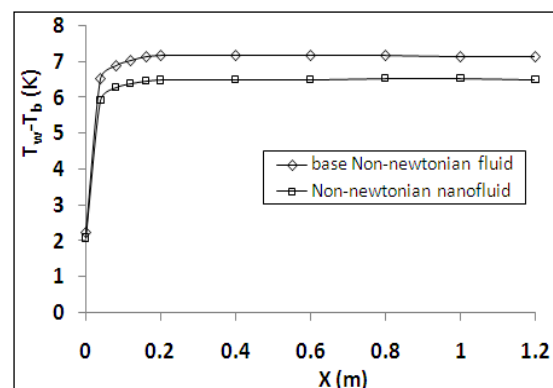
غیرنیوتنی می‌باشد. همچنین این شکل همراه با شکل (۵) نشان می‌دهد اختلاف دمای دیواره و دمای میانگین موضعی در سیال غیرنیوتنی پایه بیشتر از مقدار آن در نانوسیال غیرنیوتنی مشابه می‌باشد.



شکل ۳- تغییرات دماهای دیواره و میانگین نانوسیال غیرنیوتنی حاوی ذرات آلومینا با غلظت ۱/۵ درصد و اندازه ۲۵ nm در عدد رینولدز ۸۰۰۰



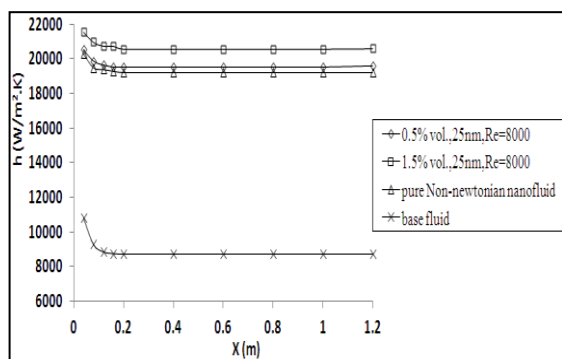
شکل ۴- تغییرات دماهای دیواره و میانگین سیال غیرنیوتنی پایه و نانوسیال غیرنیوتنی در عدد رینولدز ۸۰۰۰



شکل ۵- اختلاف دماهای دیواره و کپه ای برای سیال غیرنیوتنی پایه و نانوسیال غیرنیوتنی حاوی ذرات آلومینا با غلظت ۱/۵٪ و اندازه ۲۵ nm

در جدول ۱ و همچنین شکل (۶) ضریب انتقال حرارت

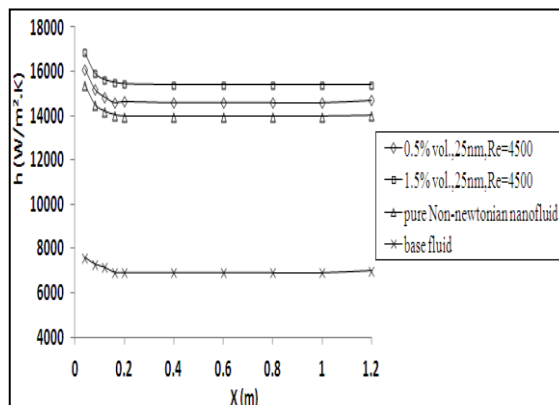
این نمودارها به ترتیب برای رینولدزهای ۴۵۰۰، ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ ترسیم شده‌اند. اختلاف بین منحنی‌های مربوط به سیال غیرنیوتنی و نانوسیال با غلظت ۰/۵٪ به ترتیب از شکل (۷) تا شکل (۹) رو به کاهش است. به نحوی که در شکل (۹) این دو منحنی کاملاً نزدیک به یکدیگر می‌باشند. اما رشد ضریب انتقال حرارت جابجایی در نانوسیال با غلظت ۱٪/۵ در هر سه نمودار تا حد زیادی حفظ شده است.



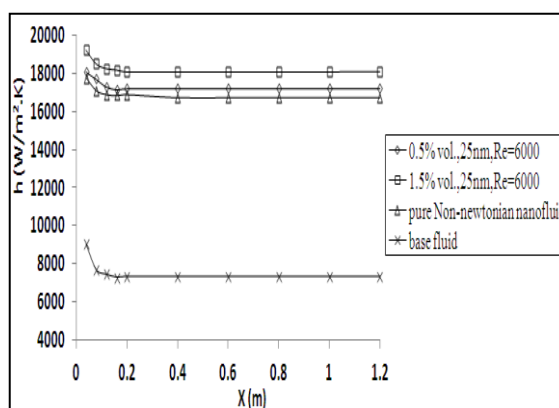
شکل ۹- اثر غلظت ذرات بر ضریب انتقال حرارت جابجایی

بنابراین با بررسی شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت نانوذرات ۲۵ نانومتری آلومینا به سیال غیرنیوتنی پایه از ۰/۵٪ به ۱/۵٪ ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال افزایش می‌یابد. این افزایش در رینولدزهای پایین‌تر چشمگیرتر است و به تدریج با افزایش عدد رینولدز و افزایش اغتشاش جریان از میزان این افزایش کاسته می‌شود.

مورد نظر با غلظت‌های ۰/۵ و ۱/۵ درصد و سیال غیرنیوتنی پایه و همچنین آب خالص نشان می‌دهند.



شکل ۷- اثر غلظت ذرات بر ضریب انتقال حرارت جابجایی



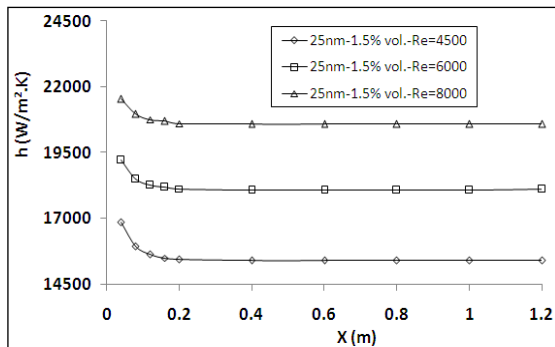
شکل ۸- اثر غلظت ذرات بر ضریب انتقال حرارت جابجایی

جدول ۲- مقایسه بین اعداد ناسلت تحقیق حاضر و تحقیق آزمایشگاهی حجت و همکاران [۶]

	عدد ناسلت حاصل از تحقیق تجربی حجت و همکاران		عدد ناسلت حاصل از تحقیق حاضر		درصد اختلاف اعداد ناسلت تحقیق حاضر تحقیق حجت و همکاران	
	$\phi = 0.5\%$	$\phi = 1.5\%$	$\phi = 0.5\%$	$\phi = 1.5\%$	$\phi = 0.5\%$	$\phi = 1.5\%$
Re = 4500	115.8	121	110.7474	110.7615	-4.36%	-8.4%
Re = 6000	139.5	146	130.1212	130.5454	-6.72%	-10.5%
Re = 8000	169	175	148.1	148.1436	-12.3%	-15.3%

نانوذرات  $Al_2O_3$  با اندازه ۲۵ نانومتر نسبت به نتایج تحقیق تجربی حجت و همکاران از دقت مطلوبی برخوردار است. همچنین این مقایسه نشان می‌دهد در غلظت کمتر و رینولدزهای پایین‌تر تطابق بیشتری بین نتایج تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. عمده‌ترین دلیل اختلاف بین نتایج تحقیقات عددی و شبیه‌سازی‌ها در نانوسیالات با

جدول ۲ مقایسه‌ای بین اعداد ناسلت به دست آمده از تحقیق حاضر را با نتایج به دست آمده از رابطه تجربی تحقیق آزمایشگاهی حجت و همکاران [۶]، به عمل می‌آورد. با توجه به ارقام این جدول می‌توان گفت اعداد ناسلت به دست آمده در تحقیق حاضر برای نانوسیال غیرنیوتنی مورد استفاده یعنی محلول آبی کربوکسی متیل سلولز حاوی



شکل ۱۰- اثر رینولدز بر ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال

#### ۴- جمع بندی

در این تحقیق انتقال حرارت جابجایی یک نانوسیال غیرنیوتنی در جریان مغشوش درون یک لوله افقی مدور با استفاده از نرم افزار فلونت شبیه‌سازی و تحلیل گردید. اثر غلظت ذرات و عدد رینولدز بر ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی و عدد ناسلت بررسی شد و نتایج زیر به دست آمد:

- ۱- تغییر رفتار رئولوژیک سیال از نیوتنی به غیرنیوتنی ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال پایه را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.
- ۲- عدد رینولدز اثر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت نانوسیال غیرنیوتنی داشته و افزایش آن این ضریب را افزایش می‌دهد.
- ۳- ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال غیرنیوتنی در مقایسه با سیال غیرنیوتنی خالص بزرگتر است.
- ۴- افزایش غلظت نانوذرات موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت نانوسیال می‌شود.

نتایج آزمایشگاهی مربوط به اختلاف در محاسبه خواص ترموفیزیکی و از جمله مهم‌ترین این خواص ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات می‌باشد. زیرا هیچ کدام از روابط موجود برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات به تنهایی قادر به پیش‌بینی دقیق این خاصیت در شرایط واقعی مختلف نمی‌باشند. به طور کلی استفاده از مطالعات عددی مهم‌ترین روش برای اعتبارسنجی روابط و معادلات پیشنهادی موجود در شرایط مرزی مختلف و هندسه‌های متفاوت جریان می‌باشد. بنابراین با توجه به دقت نسبتاً مطلوب نتایج این تحقیق در مقایسه با نتایج به دست آمده از تحقیق حجت و همکاران [۶] به نظر می‌رسد استفاده از رابطهٔ چون و همکاران (رابطهٔ (۴)) در تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در این تحقیق دقت مطلوبی در نتایج به همراه داشته است. در شکل (۱۰) تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال غیرنیوتنی در طول لوله و برای سه عدد رینولدز ۴۵۰۰، ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ ترسیم شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در تحقیق حاضر افزایش عدد رینولدز به طور قابل ملاحظه‌ای بر افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال غیرنیوتنی موثر است. همانطور می‌دانیم عدد ناسلت و در نتیجه ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال در جریان مغشوش ارتباط مستقیم با عدد رینولدز و سرعت سیال دارد [۱۴]. همچنین در تحقیق تجربی حجت و همکاران و برای نانوسیال غیرنیوتنی نیز ملاحظه می‌شود که عدد ناسلت در جریان مغشوش در نانوسیال غیرنیوتنی محلول آبی کربوکسی متیل سلولز و ذرات  $Al_2O_3$  مستقیماً با عدد رینولدز ارتباط دارد.

#### مراجع

- [1] J.C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, Clarendon Press, Oxford, 1873.
- [2] J.C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, Oxford University Press, 1881.
- [3] K. Anoop, T. Sundararajan, and S.K. Das, "Effect of Particle Size on the Convective Heat Transfer in Nanofluid in the Developing Region", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, No. 9-10, 2009, pp. 2189-2195.
- [4] D. Kim, Y. Kwon, Y. Cho, C. Li, S. Cheong, Y. Hwang, J. Lee, D. Hong, and S. Moon, "Convective Heat Transfer Characteristics of Nanofluids under Laminar and Turbulent Flow Conditions", Current Applied Physics, Vol. 9, No. 2, Supplement, 2009, pp. e119-e123.

- [5] D. Wen, and Y. Ding, "Experimental Investigation into Convective Heat Transfer of Nanofluids at the Entrance Region under Laminar Flow Conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 24, 2004, pp. 5181–5188.
- [6] M. Hojjat, S.GH. Etemad, R. Bagheri, J. Thibault, "Turbulent forced convection heat transfer of non-Newtonian nanofluids", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, No. 7, 2011, pp. 1351–1356.
- [7] V. Bianco, O. Manca, S. Nardini, "Numerical investigation on nanofluids turbulent convection heat transfer inside a circular tube", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 3, 2011, pp. 341–349.
- [8] M.K. Moraveji, E. Esmaeili, "Comparison between single-phase and two-phases CFD modeling of laminar forced convection flow of nanofluids in a circular tube under constant heat flux", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 8, 2012, pp. 1297–1302.
- [9] M.K. Moraveji, S.M.H. Haddad, M. Darabi, "Modeling of forced convective heat transfer of a non-Newtonian nanofluid in the horizontal tube under constant heat flux with computational fluid dynamics", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 7, 2012, pp. 995–999.
- [10] B.C. Pak, and Y.I. Cho, "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles", *Exp. Heat Transfer*, Vol. 11, No. 2, 1998, pp. 151–170.
- [11] C.H. Chon, K.D. Kihm, S. P. Lee, and S.U.S. Choi, "Empirical Correlation Finding the Role of Temperature and Particle Size for Nanofluid ( $Al_2O_3$ ) Thermal Conductivity Enhancement", *Applied Physics Letters*, Vol. 87, No. 15, 2005.
- [12] M. Hojjat, S.Gh. Etemad, J. Thibault, "Rheological characteristics of non-Newtonian nanofluids: Experimental investigation", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 2, 2011, pp. 144–148.
- [13] S.GH. Etemad, A.S. Mujumdar, B. Huang, "Viscous dissipation effects in entrance region Heat transfer for a power law fluid flowing between parallel plates", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 15, No. 2, 1994, pp. 122–131.
- [14] F.P. Incropera, D.P. DEWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, fourth ed., John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [15] S. Ozerinc, S. Kakac, and A.G. Yazicioglu, "Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A State-of-the-Art Review", *Microfluid. Nanofluid*, Vol. 8, No. 2, 2010, pp. 145–170.
- [16] R.L. Hamilton, and O.K. Crosser, "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems", *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 1, No. 3, 1962, pp. 187–191.
- [17] P. Bhattacharya, S. K. Saha, A. Yadav, P.E. Phelan, and R.S. Prasher, "Brownian Dynamics Simulation to Determine the Effective Thermal Conductivity of Nanofluids", *Journal of Applied Physics*, Vol. 95, No. 11, 2004, pp. 6492–6494.
- [18] W. Evans, J. Fish, and P. Keblinski, "Role of Brownian Motion Hydrodynamics on Nanofluid Thermal Conductivity", *Applied Physics Letters*, Vol. 88, No. 9, 2006, pp. 093116-1–093116-3.
- [19] V. Bianco, F. Chiacchio, O. Manca, and S. Nardini, "Numerical Investigation of Nanofluids Forced Convection in Circular Tubes", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 17–18, 2009, pp. 3632–3642.