

## بررسی عددی انتقال حرارت نانو ذرات اضافه شده به روغن، در قطعات گردنده بالگرد

علی شکیبیا<sup>۱</sup>، عمران کرمی زرنندی<sup>۲\*</sup>، مریم اوتادی

<sup>۱</sup> شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران، دانشگاه آزاد واحد مرکز

۲

### چکیده

در این مقاله عملکرد نانو ذرات افزوده شده به روغن در سیستم‌های روانکار مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا با گردآوری داده‌ها نظیر خصوصیات ترموفیزیکی روغن بالگرد از آزمایشگاه شیمی شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران (پنها)، خصوصیات ترموفیزیکی نانو ذرات مختلف، شرایط مرزی و ...، هندسه مسئله با نرم افزار Gambit تولید و شبکه بندی شده و برای شبیه سازی جریان و انتقال حرارت به نرم افزار Fluent 14 ANSYS انتقال داده شده است. در این نرم افزار با فرض جریان آرام، پایا، توسعه یافته و استفاده از مدل تکفازی و روش حجم محدود، اثر افزودن نانو ذرات مختلف نظیر طلا، تیتانیوم دی اکسید، الماس و تفلون به روغن بالگرد بررسی شده است. برای مقایسه خواص انتقال حرارتی از پارامترهایی نظیر عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت جابه جایی، ضریب اصطکاک پوسته‌ای، افت فشار استفاده شده است. پارامترهای مذکور در کسرهای حجمی مختلف، اعداد رینولدز مختلف و دماهای کاری مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد با افزودن نانو ذرات به روغن بالگرد خواص حرارتی نظیر عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه جایی نسبت به روغن خالص به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد و این در حالی است که بهبود فرایند انتقال حرارت برای نانوسیال طلا-روغن نسبت به نانوسیالات دیگر بیشتر می‌باشد. همچنین ملاحظه شد استفاده از نانوسیال در مقایسه با روغن خالص سبب کاهش ضریب اصطکاک پوسته‌ای می‌شود و این کاهش برای نانوسیال طلا-روغن نسبت به نانوسیالات دیگر بیشتر است. همچنین مقایسه نتایج نشان داد افزودن نانو ذرات به روغن پایه سبب افت فشار اندکی می‌شود که در پمپاژ نانوسیال تاثیر خاصی ندارد و افت فشار در نانوسیالات مختلف تقریباً یکسان می‌باشد. نتایج نشان داد، با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه جایی افزایش یافته و ضریب اصطکاک و فشار استاتیکی کاهش می‌یابند. همچنین ملاحظه شد، در یک رینولدز ثابت با افزایش دمای کاری، عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت جابه جایی، ضریب اصطکاک و فشار استاتیکی افزایش می‌یابند. با مقایسه نمودار دمای بی بعد در امتداد طول بی بعد لوله برای یک رینولدز ثابت مشخص شد، در حالتی که از نانوسیال استفاده می‌شود، نسبت به روغن خالص، دما در امتداد طولی لوله بیشتر کاهش می‌یابد و این در حالی است که استفاده از نانوسیال طلا-روغن دما را در طول لوله بیشتر کاهش می‌دهد. بنابراین افزودن نانو ذرات به روغن بالگرد سبب بهبود خواص انتقال حرارت، خنک کاری بهتر موتور، کوچک سازی سیستم

روانکاری موتور، توانایی تحمل بارگذاری‌های زیاد، توانایی پرواز در ارتفاعات بالاتر و در نهایت افزایش قدرت و بازدهی موتور خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: نانوسیال، انتقال حرارت، روانکاری، روغن بالگرد.

## مقدمه

امروزه نانو تکنولوژی به عنوان علمی با دامنه تحقیقاتی بسیار گسترده، مورد توجه محققین دنیا قرار گرفته و حقیقتاً هر شاخه‌ای از این علم نیازمند مطالعات، آزمایشات و تحقیقات تخصصی و ویژه است.

یکی از شاخه‌های نانو تکنولوژی مربوط به استفاده از نانوذرات با خواص حرارتی بسیار بالا در سیالات پایه دارای خواص حرارتی پایین تر می‌شود که محصول آن سوسپانسیونی با خواص حرارتی بالاتر از سیال اولیه است. در بحث انتقال حرارت، خواص ضعیف انتقال حرارت سیالات متداول را می‌توان یکی دیگر از موانع اساسی در کارآمدسازی تجهیزات انتقال حرارت دانست. سیال‌هایی نظیر روغن، آب و اتیلن گلیکول با توجه به خواص حرارتی پایینشان، توانایی محدودی در انتقال حرارت دارند. برعکس، فلزها دارای ضریب انتقال حرارتی تا سه برابر بیشتر از سیال‌های مذکور می‌باشند. ایده ترکیبی از این دو ماده برای تولید محیط انتقال حرارتی که شبیه به سیال عمل کند و هدایت حرارتی فلزات را داشته باشد، بر این اساس شکل گرفته است که در نهایت منجر به بوجود آمدن نانوسیال‌ها که شامل ذرات کوچکتر در ابعاد نانومتر هستند شده است.

نانوسیال، سیالی است که از توزیع ذرات جامد با ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر در سیال‌های مورد استفاده در تجهیزات گرمایی به وجود می‌آید. در تهیه نانوسیال‌ها عموماً از نانوذرات فلزی یا اکسیدهای فلزی مانند مس، آلومینا، نقره، طلا، اکسید مس، اکسید تیتانیوم و سایر نانوذرات که دارای خواص حرارتی مطلوبی هستند، استفاده می‌شود و سیال پایه، سیالات متداول مانند آب، اتیلن گلیکول و روغن‌های صنعتی می‌باشد. با توجه به بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی این ذرات در مقایسه با سیالات رایج در انتقال حرارت، انتظار می‌رود که نانوسیال کارایی حرارتی بهتری نسبت به سیال پایه مربوطه داشته باشد. دلیل انتخاب ابعاد نانو برای اندازه این ذرات، پایداری بیشتر آن‌ها در مقایسه با ذرات بزرگتر و سطح تبادل حرارتی بیشتر، همزمان با داشتن وزن کمتر می‌باشد. در عمل حدود ۱۵ تا ۴۰ درصد افزایش در ضریب رسانش حرارتی نسبت به سیال پایه و تا ۴۰ درصد افزایش در ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ذکر شده است [۱]. این مقدار افزایش در ضریب هدایت حرارتی را نمی‌توان به بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی نانوذرات اضافه شده به سیال پایه نسبت داد. بلکه مکانیزم‌های دیگری وجود دارد که این افزایش چشمگیر در خواص حرارتی ناشی از آن‌ها است. به صورت خلاصه مزایای استفاده از نانوسیال، در مقایسه با سیال با ذرات بزرگتر، شامل افزایش انتقال حرارت، ایجاد سوسپانسیون پایدارتر، کاهش توان لازم برای پمپاژ سیال، کاهش گرفتگی و انسداد مجاری و کاهش اندازه سیستم‌های انتقال حرارت می‌شود.

اگرچه سیال‌های نانو از پتانسیل بالایی در زمینه افزایش نرخ انتقال حرارت برخوردار هستند، تحقیقات انجام شده روی مفهوم مکانیزم افزایش و کاربردهای نانوسیال همچنان در مراحل اولیه قرار دارد. تا به امروز مدل‌های مختلف تحلیلی، روش‌های عددی و آزمایشگاهی برای پیش‌بینی و اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیال‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای کاربردهای عملی به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت فهم کاملی از عملکرد انتقال حرارتی نانوسیال‌ها لازم است. در عین حال بسیار مشکل است که به نظریه فرمول‌بندی شده برای پیش‌بینی رفتار جریان مواد چندجزیی دست یافت [۲]. انتظار می‌رود که ضریب انتقال حرارت نانوسیال‌ها به عوامل مختلفی از جمله هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی هر دو جزء سیال پایه و نانوذرات، الگوی جریان، لزجت نانوسیال، کسر حجمی ذرات توزیع شده، دما، ابعاد، شکل این ذرات و قدرت اسیدی سیال پایه وابسته باشد [۳]. استفاده از نانو روان‌کننده‌ها با توجه به بهبود خواص سطحی، افزایش بازده موتور، کاهش مصرف سوخت و هزینه‌های تعمیر و نگهداری، امروزه مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۴].

خواص ضد سایشی و ضد اصطکاک نانوروان‌کننده‌های مختلف که از ذراتی نظیر فولرین<sup>۱</sup>، تیتانیوم دی‌اکسید، اکسید مس، نانو الماس‌ها و ... تشکیل شده‌اند و دارای ساختار کروی شکل هستند، توسط محققان بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است [۵-۱۱].

رازی و همکاران [۲۳] به بررسی افت فشار و خصوصیات حرارتی نانوسیال اکسید مس (CuO) -روغن در جریان آرام در لوله‌های تحت شار حرارتی ثابت پرداختند. نتایج بدست آمده نشان داد که هر دو ضریب انتقال حرارت متوسط و افت فشار با افزودن نانوذرات افزایش می‌یابد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزودن نانوذرات به سیال پایه در بسیاری از کاربردهای عملی مناسب می‌باشد.

احمدی و همکاران [۱۲] در یک کار آزمایشگاهی به بررسی تاثیر افزودن نانوسیال تشکیل شده از نانولوله‌های کربنی چند دیواره<sup>۲</sup> که در روغن موتور پراکنده شده‌اند پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزودن نانوذرات هدایت حرارتی نانوروان‌کننده را نسبت به حالتی که از روغن پایه استفاده می‌شود بالا می‌برد. یکی از دلایل این افزایش را می‌توان به بالاتر بودن هدایت حرارتی نانولوله‌های کربنی چند دیواره در مقایسه با روغن پایه اشاره کرد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی مقدار هدایت حرارتی نانوسیال نیز افزایش می‌یابد. آن‌ها به بررسی اثرات غلظت و دمای نانولوله‌های کربنی بر ویسکوزیته سینماتیکی نانوروان‌کار در دمای ۴۰ و ۱۰۰ درجه سانتیگراد و درصدهای وزنی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما، ویسکوزیته در تمام درصدهای وزنی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی، مقدار ویسکوزیته در هر دو دما افزایش می‌یابد.

فرزین و همکاران [۱۳] در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی و افت فشار نانوسیال روغن توربین -TiO<sub>2</sub> در رژیم جریان آرام پرداختند. آن‌ها با اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت و افت فشار در

<sup>۱</sup>fullerene<sup>۲</sup>Multi-Walled Carbon nanotubes

رینولدزهای مختلف و همچنین در کسر حجمی‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن نانوذرات  $TiO_2$  سبب بهبود ضریب انتقال حرارت روغن توربین برای کسر حجمی پایین‌تر از ۰/۵ درصد در اعداد رینولدز بین ۳۰۰ تا ۸۰۰ می‌شود. همچنین در کسر حجمی ثابت، با افزایش عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت در مقایسه با حالتی که از روغن پایه استفاده می‌شود، بیشتر می‌باشد. همچنین در رینولدز ثابت با افزایش کسر حجمی نانوسیال ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. علاوه بر این، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزودن نانوذرات  $TiO_2$  به سیال پایه و افزایش رینولدز نانوسیال، هر دو سبب افزایش در افت فشار می‌شوند.

قزوینی و همکاران [۱۴] در یک کار آزمایشگاهی به بررسی انتقال حرارت نانوسیال الماس-روغن موتور در یک لوله افقی ساده پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن نانوذرات الماس به روغن موتور انتقال حرارت را نسبت به سیال پایه به طور قابل توجهی افزایش داده و میزان حداکثر آن حدود ۳۵ درصد می‌باشد. همچنین ظرفیت گرمای ویژه نانوسیال نسبت به سیال پایه حداکثر ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. اما نکته منفی در اضافه کردن نانوپودر به سیال پایه افزایش در ویسکوزیته نانوسیال است.

صنعت بالگرد با توجه به گستره وسیع مواد مصرفی در زمینه روغن‌ها و روان‌کننده‌های پیشرفته هوایی یکی از پایگاه‌های مطالعاتی و تحقیقاتی بسیار مناسب توسعه فناوریهای نوین می‌باشد. در همین رابطه و با توجه به زمینه بسیار مناسب استفاده از نانو مواد، کمک به بهبود عملکرد سامانه‌های بالگرد، کاهش هزینه تعمیر و نگهداری بالگرد با استفاده از خواص ویژه نانو مواد و کاهش هزینه ناشی از تحریم مواد و فناوری طرح فوق در فاز اول و بصورت محاسباتی با موفقیت اجرا گردید.

در این پروژه در نظر است، تاثیر افزودن نانوذرات مختلف نظیر طلا، تیتانیوم دی‌اکسید، الماس و تفلون به روغن بالگرد (MIL-L-23699)، بر رفتار حرارتی آن، به صورت عددی مورد بررسی قرار گیرد. جهت شبیه‌سازی جریان آرام در یک لوله، از مدل تکفازی و روش حجم محدود استفاده شده است.

معادله ۱ توضیح می‌دهد معادله ۱ توضیح می‌دهد معادله ۱ توضیح می‌دهد معادله ۱ توضیح می‌دهد معادله ۱  
توضیح می‌دهد:

$$\frac{\pi d^3}{12} \rho_p V_n^2 = \frac{A}{2} \alpha \quad (1)$$

نتایج و بحث

تعریف مسئله

جریان آرام و انتقال حرارت جابه‌جایی برای نانوذرات مختلف که در سیال پایه روغن بالگرد MIL-L-23699 پراکنده شده‌اند، در یک لوله مستقیم (افقی) مورد بررسی قرار گرفته است. جداره خارجی لوله تحت شار حرارتی ثابت قرار داشته و نانوسیال به عنوان سیال خنک‌کننده عمل می‌کند. هندسه مورد بررسی در این

پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. طول لوله مستقیم  $L$  و شعاع لوله  $r$  است و لوله تحت شار حرارتی ثابت و یکنواخت  $q$  قرار می‌گیرد. همچنین نسبت طول لوله به شعاع آن برابر  $L/r=28/57$  در نظر گرفته شده است. جهت انجام مراحل شیشه سازی، خصوصیات ترموفیزیکی روغن بالگرد (MIL-L-23699) نظیر چگالی، ویسکوزیته، هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه مورد نیاز است. خواص مذکور در آزمایشگاه شیمی شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران (پنها) اندازه گیری شده‌اند. از آنجایی که خواص ترموفیزیکی روغن بالگرد در دماهای مختلف تغییر می‌کنند، این خواص در دماهای مختلف اندازه گیری و در جدول ۱ آورده شده است.

## روش حل

در این پژوهش از چهار نمونه نانوذره با نام‌های طلا (Au)، دی‌اکسید تیتانیوم ( $TiO_2$ )، الماس و پلی تترافلورواتیلن<sup>۱</sup> (PTFE) با نام تجاری تفلون استفاده شده است. نانوذرات به صورت کروی و با قطر متوسط ۱۰ نانومتر در نظر گرفته شده‌اند. دلیل عدم استفاده از نانوذرات مس (Cu)، آلومینا ( $Al_2O_3$ ) و نقره (Ag) این است که قطعات در تماس با روغن نظیر چرخنده‌ها و یاتاقان‌ها معمولاً از مس، آلومینیوم و نقره ساخته می‌شوند، با پراکنده شدن این نانوذرات در روغن بالگرد امکان تشخیص ذرات ناشی از سائیده شدن قطعات وجود نخواهد داشت.

با استفاده از خواص ترموفیزیکی نانوذرات مختلف که از هندبوک‌ها و کتاب‌های مرتبط با خواص ترموفیزیکی نانوذرات استخراج شده‌اند [۱۵، ۱۶]، خواص ترموفیزیکی مخلوط نانوسیال شامل روغن بالگرد (MIL-L-23699) و نانوذرات مختلف را می‌توان از روابط ۱ تا ۴ محاسبه نمود.

## چگالی مخلوط

$$\rho_m = \alpha_p \rho_p + (1 - \alpha_p) \rho_f \quad (1)$$

## لزجت مخلوط

$$\mu_m = \left(1 + \frac{5}{2} \alpha_p\right) \mu_f \quad (2)$$

## هدایت حرارتی مخلوط

$$k_m = \left[ \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\alpha_p(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \alpha_p(k_f - k_p)} \right] k_f \quad (3)$$

رابطه (۳) برای اولین بار توسط همیلتون و کراسر [۲] ارائه شد که در آن  $n$  ضریب شکل بوه و برای ذرات کروی مقدار آن برابر ۳ است.

<sup>1</sup>Poly tetrafluoroethylene

## ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط

$$C_p = \alpha_p C_{p,p} + (1 - \alpha_p) C_{p,f} \quad (4)$$

در این مقاله در نظر است، اثرات افزودن نانوذرات مختلف به روغن بالگرد روی رفتار حرارتی نانوسیال، در حالت‌های مختلف با استفاده از مدل تکفازی مورد بررسی قرار گیرد.

## معادلات حاکم و شرایط مرزی

## ۳-۱- نظریه سیال تکفازی

به دلیل کوچک بودن ذرات، فرض شده است که آن‌ها به آسانی در سیال پایه پخش شده اند و در نتیجه شبیه یک سیال رفتار می‌کنند. به علاوه با فرض ناچیز بودن سرعت لغزشی بین ذرات و فاز پیوسته و برقراری شرط تعادل حرارتی، نانوسیال را می‌توان به عنوان یک سیال تک فازی با خواص فیزیکی بر اساس غلظت دو جزء در نظر گرفت. سرعت مطلق نانوذره می‌تواند به عنوان مجموعه سرعت سیال پایه و سرعت نسبی (لغزشی) در نظر گرفته شود. جهت تعیین روش مدل‌سازی نانوسیال در انتقال حرارت نانوسیالات، فهم مکانیزم‌هایی که توسط آن‌ها نانوذرات می‌توانند یک سرعت لغزشی نسبت به سیال پایه ایجاد کنند از اهمیت بسزایی برخوردار است. فرض می‌شود که سیال حول نانوذره پیوسته است.

## ۴-۲- معادلات حاکم بر مسئله

با در نظر گرفتن جریان نانوسیال به صورت آرام، پایا، غیرقابل تراکم و با صرف نظر کردن از اتلافات لزجی، معادلات بقا به صورت زیر بیان می‌شوند:

## معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot (\rho_n \vec{v}_n) = 0 \quad (5)$$

## معادله مومنتوم

$$\nabla \cdot (\rho_n \vec{v}_n \vec{v}_n) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_n \nabla \vec{v}_n) \quad (6)$$

در روابط (۵) و (۶)،  $\rho_n$ ،  $\mu_n$ ،  $k_n$  به ترتیب چگالی، لزجت، ضریب هدایت حرارتی مخلوط هستند.

## معادله انرژی

$$\rho_n C_{p,n} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v}_n \cdot \nabla T \right) = k_n \nabla^2 T \quad (7)$$

## ۴-۳- شرایط مرزی

برای حل معادلات مذکور، شرایط مرزی در ورودی لوله به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

ورودی

$$x=0: v_{m,y} = v_{m,z} = 0; v_{m,x} = V_0; T_m = T_0$$

نانوسیال

همچنین در نرم افزار **Fluent** شرط مرزی در ورودی، سرعت ورودی<sup>۱</sup> و در خروجی، فشار خروجی<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده است. دیواره های خارجی لوله تحت شار حرارتی ثابت و یکنواخت  $q$  قرار داده شده و در خروجی لوله نیز شرط مرزی فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۴- تعریف پارامترها

متغیرهای بدون بعد بصورت روابط (۸) تعریف می شوند:

$$x = \frac{x}{r}, \quad y = \frac{y}{r}, \quad T_{rel} = \frac{T}{T_{in}} \quad (8)$$

عدد بی بعد رینولدز نیز بصورت رابطه (۹) تعریف می شود.

$$Re = \frac{\rho_f U_{in} (2r)}{\mu_f} \quad (9)$$

در این مطالعه پنج حالت  $Re=50$ ،  $Re=100$ ،  $Re=500$ ،  $Re=1000$  و  $Re=2000$  مورد بررسی قرار گرفته می شود.

برای بررسی انتقال حرارت از عدد بی بعد ناسلت استفاده می کنیم. عدد ناسلت نسبت انتقال حرارت جابه جایی به هدایتی است. مقادیر محلی و میانگین عدد ناسلت به ترتیب بصورت روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می شوند.

$$Nu_{local} = - \frac{k_w}{k_f} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=r} \quad (10)$$

$$Nu_{avg} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_{local} dx \quad (11)$$

ضریب اصطکاک پوسته ای نیز طبق رابطه (۱۲) تعریف می شود.

$$C_f = \frac{\tau_w}{(1/2)\rho_w V_0^2} \quad (12)$$

#### مدل سازی عددی

<sup>1</sup> Velocity inlet

<sup>2</sup> Pressure outlet

هندسه مسئله در نرم افزار Gambit 2/3/16 تولید و شبکه بندی شده است. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود شبکه بندی به صورت سازمان یافته و برای افزایش دقت حل، نواحی نزدیک لایه های مرزی از شبکه بندی ریزتری برخوردارند. معادلات دیفرانسیل غیرخطی همبسته حاکم بر مسئله نیز با استفاده از ANSYS FLUENT14 بر اساس روش حجم محدود حل شده اند.

در روش حجم محدود، ابتدا میدان فیزیکی<sup>۱</sup> مربوط به مسئله به حجم کنترل های<sup>۲</sup> گسسته ای تقسیم می شود. سپس معادلات حاکم، بر روی هر حجم کنترل انتگرال گیری می شود تا معادلات جبری و گسسته<sup>۳</sup> بدست آیند. در گام بعدی معادلات گسسته بدست آمده، خطی سازی<sup>۴</sup> می شوند. سیستم معادلات گسسته و خطی سازی شده به صورت هم زمان حل می شوند. جهت حل مسئله از حل کننده فشار مینا<sup>۵</sup> و برای ارتباط فشار و سرعت از اسکیم سیمپل سی<sup>۶</sup> استفاده شده است. برای گسسته سازی معادلات مومنتوم و انرژی از طرح بالادست مرتبه دوم<sup>۷</sup> استفاده شده است. با توجه به فلوچارت، معیار همگرایی برای کار حاضر برای تمامی معادلات ذکر شده<sup>۸</sup> ۱۰ در نظر گرفته شده است.

#### ۵-۱- آزمون استقلال از شبکه<sup>۸</sup>

به منظور دستیابی به نتایج مستقل از شبکه، مطالعه عددی در حالت های مختلف با شبکه های مختلف بررسی می گردد. برای رسیدن به این مقصود، در دو جهت X و Y تعداد گره ها را افزایش داده و تاثیر این افزایش روی عدد ناسلت میانگین و ضریب انتقال حرارت جابه جایی بررسی شده است. در جدول ۲ مقایسه ای بین نتایج حاصل از استقلال از شبکه آورده شده است. نتایج این جدول نشان می دهد که افزایش در تعداد گره ها به بیشتر از تعداد معین، تنها باعث تغییرات بسیار ناچیزی در عدد ناسلت میانگین و ضریب انتقال حرارت جابه جایی می شود. بنابراین برای حل این مسئله از تعداد گره  $71 \times 1177$  استفاده شده است.

#### تحلیل نتایج حل عددی برای لوله مستقیم افقی با شار حرارتی ثابت در دیواره

در این مقاله با شبیه سازی میدان دما و جریان، انتقال حرارت نانوذرات اضافه شده به روغن هلیکوپتر (MIL-L-23699) با استفاده از دیدگاه تکفازی و روش حجم محدود بررسی شده است. از آنجایی که خواص ترمودینامیک نانوذرات مختلف یکی از پارامترهای مهم مورد بررسی در اکثر پژوهش ها می باشد، مقایسه ای در مورد نانوذرات مختلف طلا، تیتانیوم دی اکسید، الماس و تفلون در این مقاله صورت گرفته است تا مناسب ترین نانوذره از نظر حداکثر بهبود انتقال حرارت مشخص شود.

<sup>1</sup>Physical Domain

<sup>2</sup>Control Volumes

<sup>3</sup>Discretized

<sup>4</sup>Linearization

<sup>5</sup>Pressure-based

<sup>6</sup>SIMPLC

<sup>7</sup>Second-Order Upwind

<sup>8</sup>Grid independency test



شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

مقایسه درصد افزایش عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به روغن خالص، برای کسر حجمی‌های مختلف در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با به کارگیری نانوسیال عدد ناسلت متوسط و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به روغن خالص افزایش می‌یابد. همچنین نانوذرات با هدایت حرارتی بالاتر موجب افزایش مطلوب‌تری در ویژگی‌های انتقال حرارتی نانوسیالات می‌شوند. مشاهده می‌شود که عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با افزایش کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه، افزایش می‌یابد. همچنین نانوسیال طلا-روغن بیشترین مقدار و نانوسیال تفلون-روغن، کمترین مقدار افزایش را در عدد ناسلت متوسط و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، نسبت به نانوسیالات دیگر نشان می‌دهند.

با توجه به اطلاعات به دست آمده از شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران (پنجا)، دمای روغن هلیکوپتر در شرایط کاری مختلف مطابق جدول ۴ می‌باشد.

در این پروژه برای بررسی خواص نانوسیال در دماهای مختلف، دمای ورودی لوله را تغییر داده می‌شود. برای این کار دما در محدوده ۲۵ تا ۱۱۰ درجه سانتیگراد معادل ۲۹۸/۱۵ تا ۳۸۳/۱۵ کلوین تغییر می‌کند. با این وجود دمای کاری در محدوده ۳۰ تا ۱۱۵ درجه سانتیگراد و معادل ۳۰۳/۱۵ تا ۳۸۸/۱۵ کلوین تغییر می‌کند.

شکل‌های ۳ تا ۶ نمودارهای ناسلت محلی، توزیع محوری فشار استاتیک، ضریب اصطکاک محلی و دمای بی‌بعد در حالتی که  $Re=100$  و  $\alpha=0.04$  است، در دماهای ورودی مختلف، برای نانوسیالات مختلف بررسی شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تمام حالت‌ها، استفاده از نانوسیال باعث بهبود انتقال حرارت شده و این در حالی است که استفاده از نانوسیال روغن-طلا خصوصیات حرارتی بهتری نسبت به سایر نانوذرات نشان می‌دهد.

کل‌های ۷ تا ۱۰ نمودارهای تغییرات عدد ناسلت متوسط، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، افت فشار و ضریب اصطکاک پوسته‌ای را در رینولدزهای مختلف و برای نانوسیالات مختلف نشان می‌دهند. از آنجایی که جریان آرام در نظر گرفته شده، این نمودارها در اعداد رینولدز ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ رسم شده‌اند. همچنین دمای ورودی سیال برابر  $T_{in}=363/15$  و کسر حجمی برابر  $\alpha=0.04$  برای تمامی نمودارها در نظر گرفته شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت متوسط و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ افزایش می‌یابد و این افزایش برای نانوسیال روغن-طلا در مقایسه با سایر نانوسیال‌ها بیشتر می‌باشد.

در شکل ۹ نمودار ضریب اصطکاک پوسته‌ای متوسط در طول بی‌بعد لوله برای نانوسیال‌های مختلف رسم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش عدد رینولدز ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد و این ضریب برای نانوسیال روغن-طلا نسبت به نانوسیالات دیگر کمتر می‌باشد.

در شکل ۱۰ نیز مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، فشار متوسط لوله افزایش یافته و این افزایش فشار برای حالتی که از نانوسیال روغن-طلا استفاده می‌شود نسبت به سایر نانوسیال‌ها بیشتر می‌باشد.

#### نتیجه‌گیری

۱ پس از گردآوری داده‌ها نظیر خصوصیات ترموفیزیکی روغن بالگرد (MIL-L-23699) از آزمایشگاه شیمی شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران، خصوصیات ترموفیزیکی نانوذرات مختلف، شرایط مرزی و ...، هندسه مسئله تولید و شبکه بندی شد و برای شبیه سازی جریان و انتقال حرارت به نرم افزار انسیس فلونت انتقال داده شد. پس از حل مسئله نتایج حاصل از شبیه سازی به صورت زیر می‌باشد:

- افزودن نانوذرات مختلف نظیر نانوذرات طلا، تیتانیوم دی‌اکسید، الماس، تفلون و ... به روغن بالگرد (MIL-L-23699) سبب بهبود انتقال حرارت در سیستم روانکاری خواهد شد.
- در یک رینولدز ثابت با افزایش کسر حجمی نانوسیال، عدد ناسلت میانگین و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال بیشتر افزایش می‌باشد.
- در یک رینولدز ثابت با افزایش کسر حجمی، فشار استاتیکی و ضریب اصطکاک پوسته‌ای نانوسیال بیشتر کاهش می‌یابند.
- در یک رینولدز ثابت عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به حالتی که از روغن خالص استفاده می‌شود، افزایش می‌یابد و با مقایسه نانوسیالات مختلف، نانوسیال طلا-روغن بیشترین افزایش و نانوسیال تفلون-روغن کمترین افزایش را دارا می‌باشند.
- در یک رینولدز ثابت فشار استاتیکی و ضریب اصطکاک پوسته‌ای نسبت به حالتی که از روغن خالص استفاده می‌شود، کاهش می‌یابد. مقایسه نانوسیالات مختلف، نشان داد که افت فشار در نانوسیالات مختلف تقریباً یکسان است اما در مورد ضریب اصطکاک پوسته‌ای، نانوسیال طلا-روغن بیشترین کاهش و نانوسیال تفلون-روغن کمترین کاهش را دارا می‌باشند.
- با مقایسه نمودار دمای بی‌بعد در امتداد طول بی‌بعد لوله برای یک رینولدز ثابت مشخص شد، در حالتی که از نانوسیال استفاده می‌شود، نسبت به روغن خالص، دما در امتداد طولی لوله بیشتر کاهش می‌یابد. همچنین با مقایسه نانوسیال‌ها مشخص شد، استفاده از نانوسیال طلا-روغن دما را در طول بی‌بعد لوله بیشتر کاهش می‌دهد.
- نتایج نشان داد که در یک رینولدز ثابت، با افزایش دمای کاری، عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابند.

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

- در یک رینولدز ثابت با افزایش دمای کاری فشار استاتیکی و ضریب اصطکاک پوسته‌ای افزایش می‌یابد.
  - بررسی نتایج نشان داد، با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت میانگین و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال نسبت به حالتی که از روغن خالص استفاده می‌شود، افزایش می‌یابد و این افزایش برای حالتی که از نانوسیال طلا-روغن استفاده می‌شود بیشتر می‌باشد.
  - نتایج نشان داد، با افزایش عدد رینولدز، ضریب اصطکاک پوسته‌ای نانوسیال نسبت به روغن خالص کاهش یافته و کاهش این ضریب برای نانوسیال طلا-روغن نسبت به سایر نانوسیال‌ها بیشتر می‌باشد.
- با افزایش عدد رینولدز فشار استاتیکی نانوسیال نسبت به روغن خالص کاهش یافته و این درحالی است که نانوسیالات مختلف دارای افت فشار تقریباً یکسانی هستند.

## مراجع

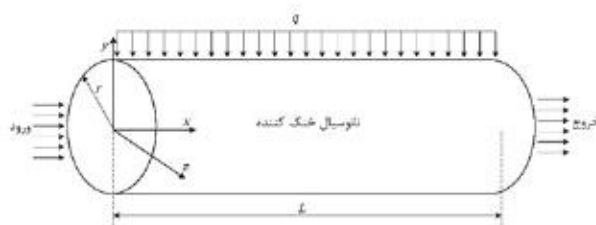
- [1] S. U. Choi, Nanofluids: from vision to reality through research, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 131, No. 3, pp. 033106, 2009 .
- [2] M. Prakash, E. Giannelis, Mechanism of heat transport in nanofluids, *Journal of computer-aided materials design*, Vol. 14, No. 1, pp. 109-117, 2007 .
- [3] X. Wang, X. Xu, S. U. S. Choi, Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, *Journal of thermophysics and heat transfer*, Vol. 13, No. 4, pp. 474-480, 1999 .
- [4] G. Vakili-Nezhaad, A. Dorany, Investigation of the effect of multiwalled carbon nanotubes on the viscosity index of lube oil cuts, *Chemical Engineering Communications*, Vol. 196, No. 9, pp. 997-1007, 2009 .
- [5] Y. Hwang, C. Lee, Y. Choi, S. Cheong, D. Kim, K. Lee, J. Lee, S. H. Kim, Effect of the size and morphology of particles dispersed in nano-oil on friction performance between rotating discs, *Journal of mechanical science and technology*, Vol. 25, No. 11, pp. 2853-2857, 2011 .
- [6] X. Ji, Y. Chen, G. Zhao, X. Wang, W. Liu, Tribological properties of CaCO<sub>3</sub> nanoparticles as an additive in lithium grease, *Tribology letters*, Vol. 41, No. 1, pp. 113-119, 2011 .
- [7] L. Liu, Z. Fang, A. Gu, Z. Guo, Lubrication effect of the paraffin oil filled with functionalized multiwalled carbon nanotubes for bismaleimide resin, *Tribology Letters*, Vol. 42, No. 1, pp. 59-65, 2011 .
- [8] S. Ma, S. Zheng, D. Cao, H. Guo, Anti-wear and friction performance of ZrO<sub>2</sub> nanoparticles as lubricant additive, *Particuology*, Vol. 8, No. 5, pp. 468-472, 2010 .

- [9] Y. Peng, Y. Hu, H. Wang, Tribological behaviors of surfactant-functionalized carbon nanotubes as lubricant additive in water, *Tribology Letters*, Vol. 25, No. 3, pp. 247-253, 2007 .
- [10] M. Shen, J. Luo, S. Wen, J. Yao, Nano-tribological properties and mechanisms of the liquid crystal as an additive, *Chinese Science Bulletin*, Vol. 46, No. 14, pp. 1227-1232, 2001 .
- [11] Y. Wu, W. Tsui, T. Liu, Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives, *Wear*, Vol. 262, No. 7, pp. 819-825, 2007 .
- [12] H. Ahmadi, A. Rashidi, A. Nouralishahi, S. S. Mohtasebi, Preparation and thermal properties of oil-based nanofluid from multi-walled carbon nanotubes and engine oil as nano-lubricant, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 142-147, 2013.
- [13] F. Farzin, S. Z. Heris, S. Rahimi, Laminar Convective Heat Transfer and Pressure Drop of TiO<sub>2</sub>/Turbine Oil Nanofluid, *Journal of thermophysics and heat transfer*, Vol. 27, No. 1, pp. 127-133, 2013 .
- [14] M. Ghazvini, M. Akhavan-Behabadi, E. Rasouli, M. Raisee, Heat transfer properties of nanodiamond-engine oil nanofluid in laminar flow, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 33, No. 6, pp. 525-532, 2012 .
- [15] F. Erich, *Thermophysical properties of materials: North Atlantic Treaty Organization, Advisory Group for Aerospace Research and Development*, 1967 .
- [16] G. Grimvall, *Thermophysical properties of materials: Elsevier*, 1999 .

جدول اخواس ترموفیزیکی بدست آمده از آزمایشگاه شیمی  
شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران (پنها)

ویسکوزیته	ظرفیت	هدایت	دما	چگالی
(Kg/m <sup>3</sup> )	گرمایی	حرارتی	(°C)	(Kg/m <sup>3</sup> )
(Kg/m/s)	ویژه	(W/m <sup>2</sup> /K)		

(J/Kg/K)				
۰/۱۳۲۸۲۶	۱۸۹۶/۲۱	۰/۰۴۸۱۹۷	۹۹۴/۶	۲۵
۰/۱۳۳۰۱۸	۱۹۶۰/۱۹	۰/۰۲۵۱۸۳	۹۸۳/۴	۴۰
۰/۱۳۳۱۴۸	۲۰۰۳/۲۲	۰/۰۱۷۶۲۲	۹۷۵/۸	۵۰
۰/۱۳۳۴۱۳	۲۰۹۰/۱۹	۰/۰۰۹۷۰۵	۹۶۰/۸	۷۰
۰/۱۳۳۶۸۶	۲۱۷۸/۴۰	۰/۰۰۵۹۸۶	۹۴۵/۶	۹۰
۰/۱۳۳۸۲۵	۲۲۲۳/۰۱	۰/۰۰۴۸۶۸	۹۳۷/۸	۱۰۰



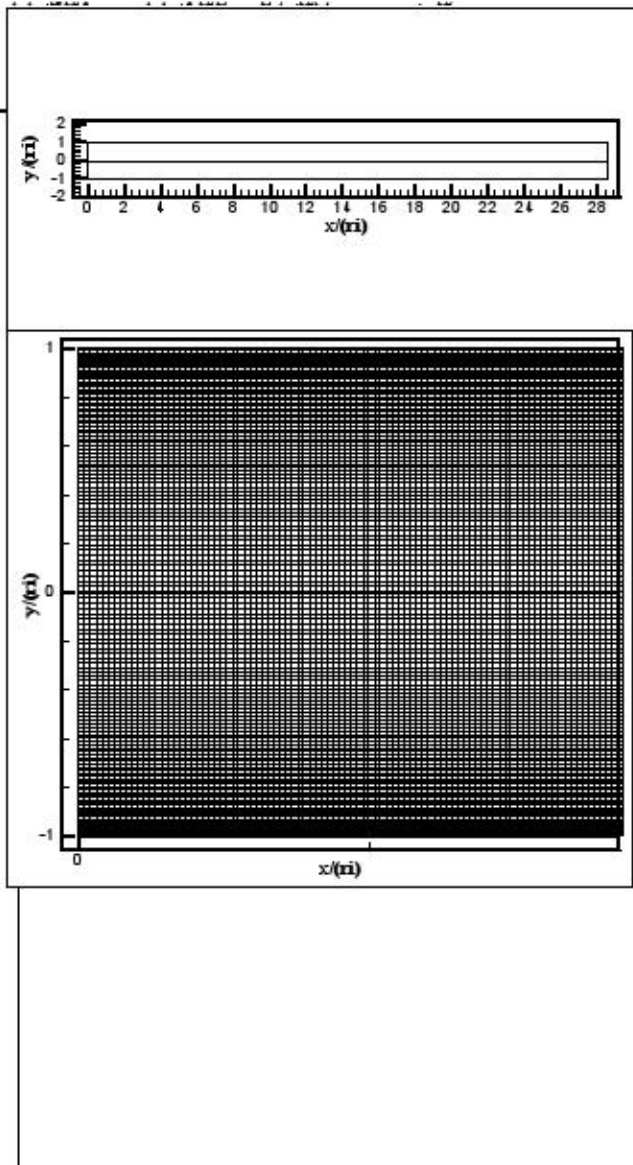
شکل ۱ هندسه مسئله

جدول ۲ بررسی استقلال از شبکه

Oil-Diamond	Nu_avg		h_avg		Ny×Nx	
	Oil	Oil-Diamond	Oil	Oil-Diamond		
۳۱/۰۹۸۳۶	۲۶/۹۳۸۰۶	۵۹/۶۹۴۶۲	۵۱/۶۲۵۵۱	۵۵/۱۰۰۱	۵۵×۱۰۰۱	۱
۳۱/۲۵۹۹	۲۷/۰۷۵۱۸	۶۰/۰۰۵۴۹	۵۱/۸۸۹۱۳	۵۹/۱۰۵۴	۵۹×۱۰۵۴	۲
۳۱/۴۹۵۴۹	۲۷/۲۸۲۸۳	۶۰/۴۵۸۴۵	۵۲/۲۸۷۸۱	۶۵/۱۱۱۲	۶۵×۱۱۱۲	۳
۳۱/۷۴۱۰۴	۲۷/۴۹۹۴۵	۶۰/۹۲۹۹۸	۵۲/۷۰۳۱۳	۷۱/۱۱۷۷	۷۱×۱۱۷۷	۴

جدول ۳ مقایسه درصد افزایش عدد ناسلت متوسط و ضریب انتقال حرارت جابه جایی در  
 $T_{in}=363/15$ ،  $Re=100$  و برای کسر حجمی های مختلف

پارامتر	کسر حجمی	طلا	تیتانیوم دی اکسید	الماس	تفلون
Nu_avg	۰/۰۱	۹/۸۷۲	۳/۸۲۷	۳/۶۵۸	۱/۱۰۵
	۰/۰۲	۱۹/۲۷۰	۷/۷۹۶	۷/۴۴۰	۲/۲۴۱
	۰/۰۳	۲۸/۴۶۲	۱۱/۹۲۲	۱۱/۳۹۱	۳/۴۳۱
	۰/۰۴	۳۷/۴۴۰	۱۶/۲۲۸	۱۵/۴۲۴	۳/۸۸۶
h	۰/۰۱	۱۰/۰۴۶	۴/۰۴۳	۳/۸۴۷	۱/۱۶۶
	۰/۰۲	۱۹/۴۰۲	۷/۹۴۹	۷/۶۰۳	۲/۲۸۱
					۳/۴۴۶
					۶/۶۲۶

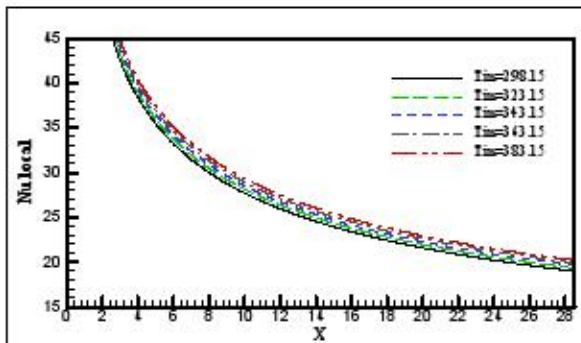


(الف)

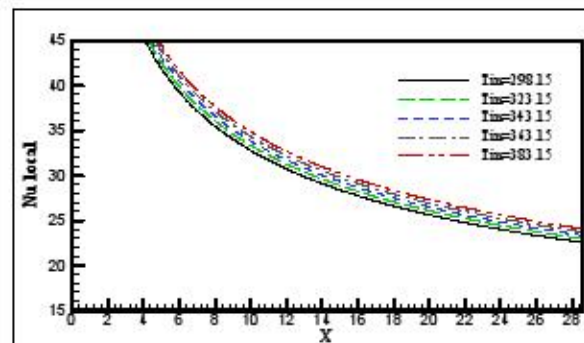
شکل ۲ شبکه بندی استفاده شده (الف) نمای دوبعدی ب) شبکه بندی لوله

جدول ۴ دمای روغن بالگرد در شرایط کاری مختلف

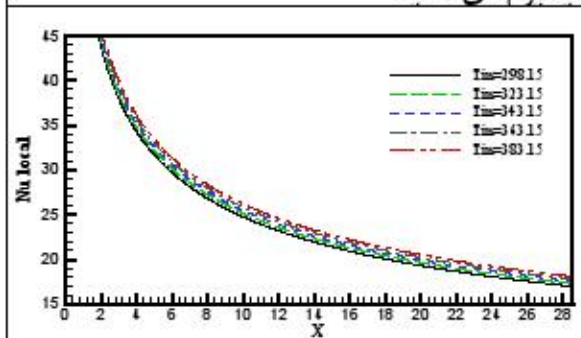
State	Temperature (°C)
Ground run operation	0 to 35
Continuous operation	35 to 135
Caution	135 to 150
Maximum	150



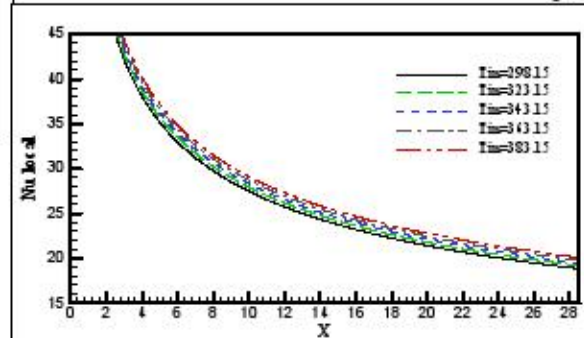
تیتانیوم دی اکسید



طلا

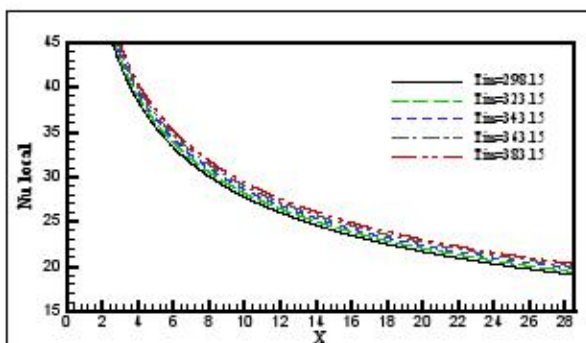


تیتان

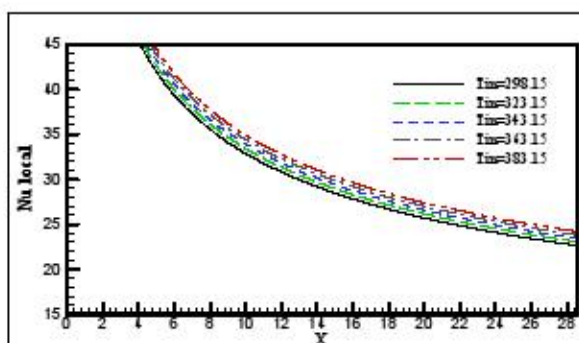


الماس

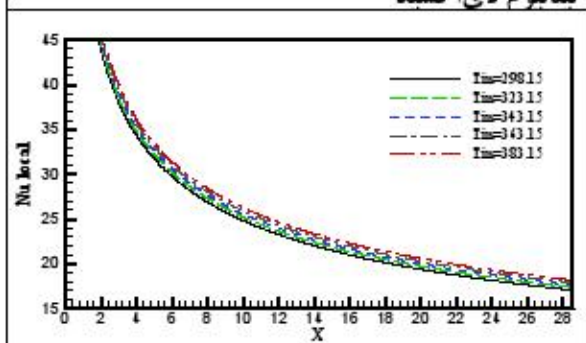
شکل ۳ نمودار ناسلت محلی در طول بی بعد لوله، برای نانوسیالات مختلف در  $Re=100$  و  $\alpha=0.04$  در دماهای مختلف



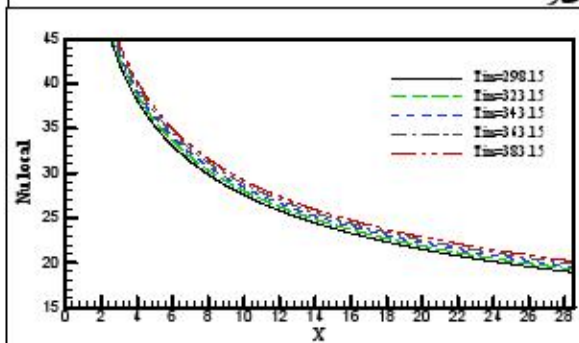
تیتانیوم دی اکسید



طلا



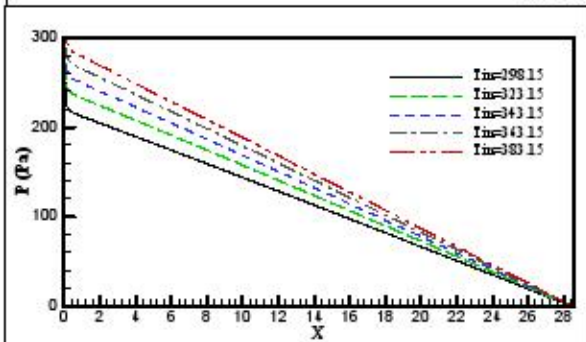
نیکل



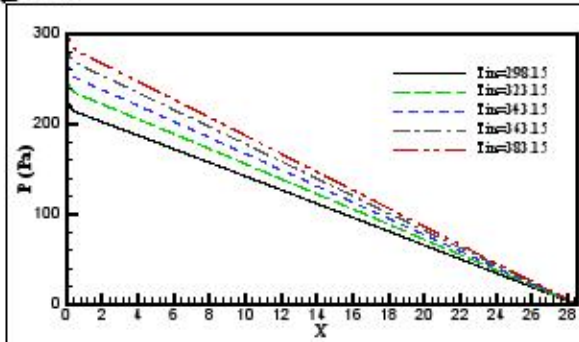
الماس

شکل ۳ نمودار ناسلت محلی در طول بی بعد لوله، برای نانوسیالات مختلف در  $Re=100$  و  $\alpha=0.04$  در

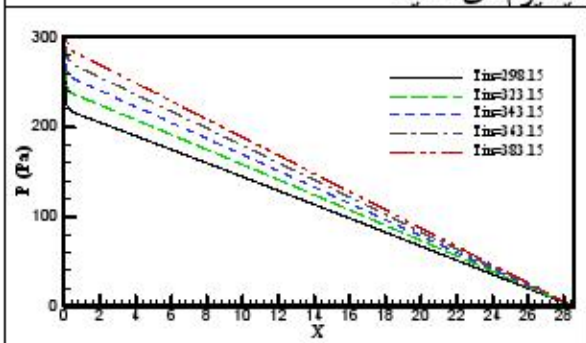
دماهای مختلف



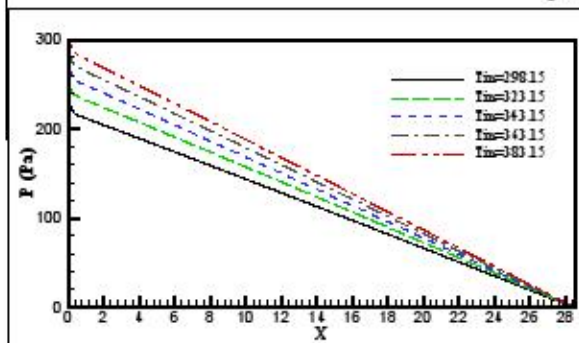
تیتانیوم دی اکسید



طلا



نیکل

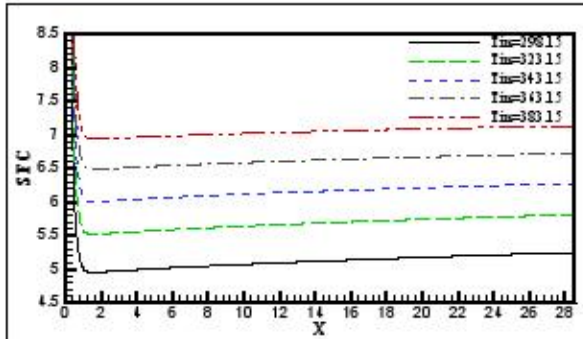


الماس

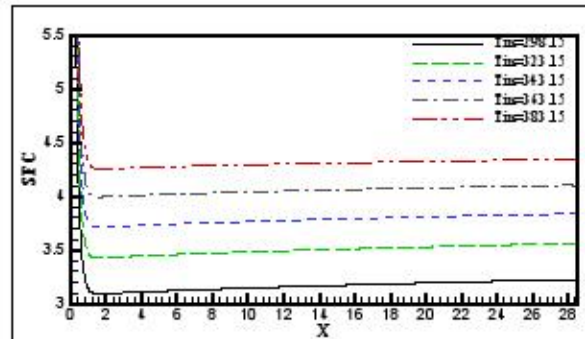
شکل ۴ نمودار فشار در طول بی بعد لوله، برای نانوسیالات مختلف در  $Re=100$  و  $\alpha=0.04$  در

دماهای مختلف

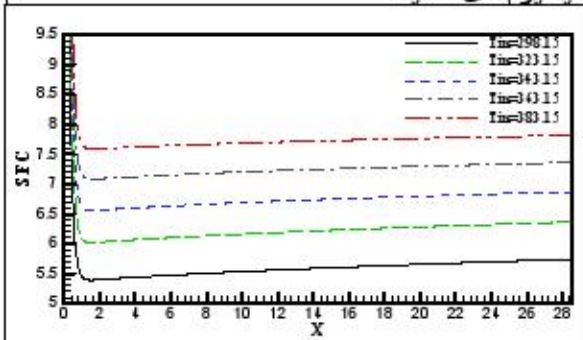




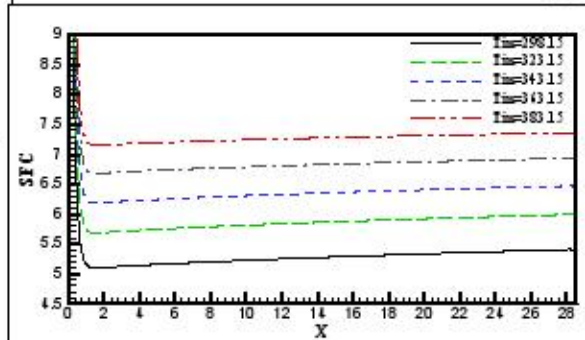
تیتانیوم دی اکسید



طلا

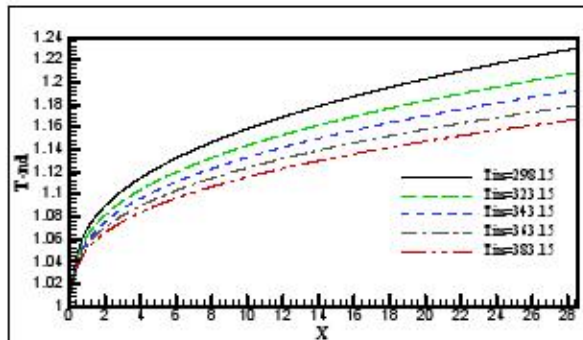


نیکل

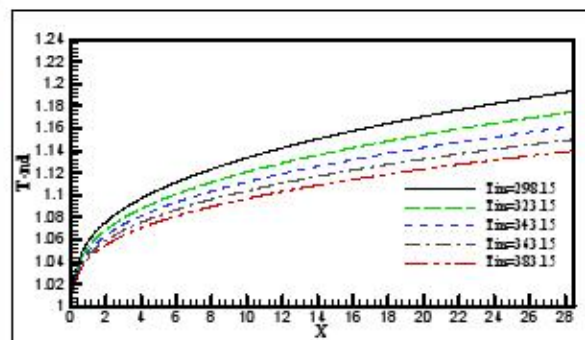


الماس

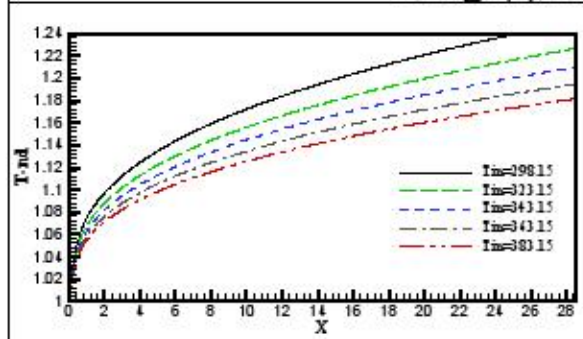
شکل ۵ نمودار ضریب اصطکاک پوسته‌ای در طول بی‌بعد لوله، برای نانوسیالات مختلف در  $Re=100$  و  $a=0.04$  در دماهای مختلف



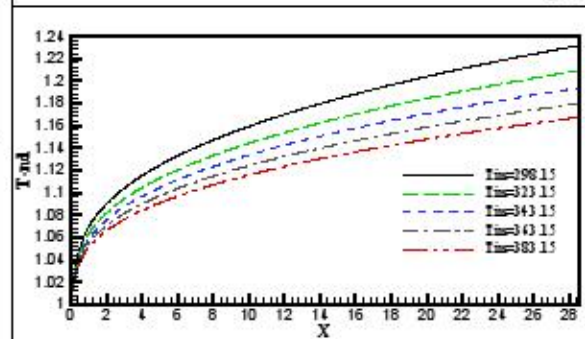
تیتانیوم دی اکسید



طلا

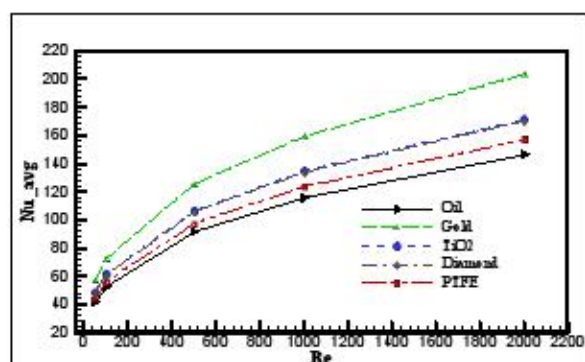


نیکل

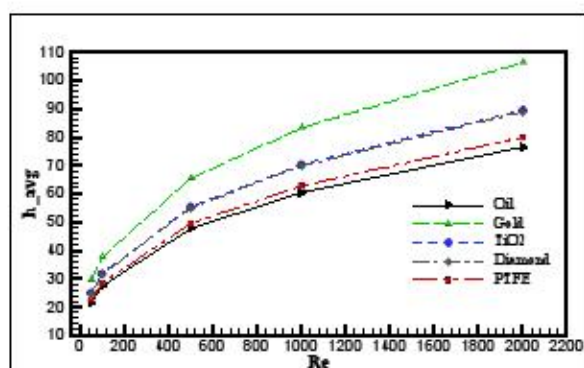


الماس

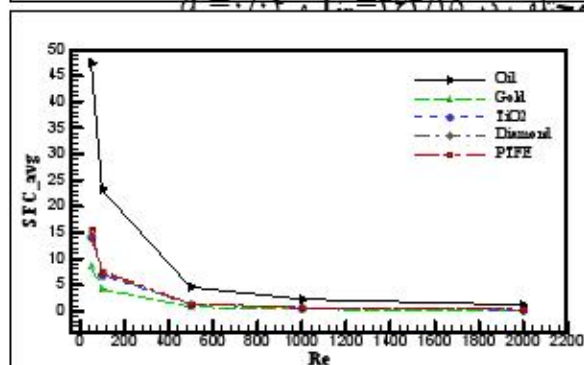
شکل ۶ نمودار دمای بی‌بعد در طول بی‌بعد لوله، برای نانوسیالات مختلف در  $Re=100$  و  $a=0.04$  در دماهای مختلف



شکل ۷ نمودار عدد ناسلت متوسط برای نانوسیالات مختلف در اعداد رینولدز مختلف در  $T_{in}=363/15$  و  $\alpha=0.04$



شکل ۸ نمودار ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط برای نانوسیالات مختلف در اعداد رینولدز مختلف در  $\alpha=0.04$  و  $T_{in}=363/15$



شکل ۹ نمودار ضریب اصطکاک پوسته ای برای نانوسیالات مختلف در اعداد رینولدز مختلف در  $\alpha=0.04$  و  $T_{in}=363/15$

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

