

بررسی عددی اثر افزودن نانوذرات به روغن موتور بالگرد

خداداد واحدی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه امام حسین (ع)

عمران کرمی زرنندی^۲

مرکز توسعه علوم و فناوری مهندسی سطح و خوردگی
شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران (پنها)
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۰۷)

علی شکبیا^۱

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در این مقاله عملکرد نانوذرات افزوده شده به روغن با هدف بهبود انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، خصوصیات ترموفیزیکی روغن بالگرد (MIL-L-23699) با همکاری آزمایشگاه شیمی شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران (پنها)، اندازه گیری شدند. سپس، با گردآوری سایر داده ها هندسه مسئله با نرم افزار گمبیت تولید و شبکه بندی شده و برای شبیه سازی جریان و انتقال حرارت به نرم افزار انسیس فلوئنت ۱۷/۲ انتقال داده شده است. از مدل تک فاز و روش حجم محدود برای حل این مسئله استفاده شده است. نتایج نشان داد که با افزودن نانوذرات به روغن بالگرد خواص حرارتی، نظیر عدد ناسلت نسبت به روغن خالص به طور قابل توجهی بهبود می یابد و این در حالی است که بهبود فرایند انتقال حرارت برای نانوسیال طلا- روغن نسبت به نانوسیالات دیگر بیشتر می باشد. همچنین، مقایسه نتایج نشان داد، افزودن نانوذرات به روغن پایه سبب ایجاد تغییر فشار ناچیزی می شود، ولی در پمپاژ نانوسیال تاثیر خاصی ندارد. از طرفی نتایج نشان داد، با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت و فشار استاتیکی افزایش و ضریب اصطکاک کاهش می یابد. همچنین، ملاحظه شد در یک رینولدز ثابت با افزایش دمای کاری، عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و فشار استاتیکی کاهش و دمای بی بعد افزایش می یابد. بنابراین، افزودن نانوذرات به روغن بالگرد سبب بهبود خواص انتقال حرارت، خنک کاری بهتر موتور، کوچک سازی سیستم روان کاری موتور، توانایی تحمل بارگذاری های زیاد، توانایی پرواز در ارتفاعات بالاتر و در نهایت افزایش قدرت و بازدهی موتور خواهد شد.

واژه های کلیدی: نانوسیال، انتقال حرارت، روان کاری، روغن بالگرد

Numerical Investigation of the Effect of Adding Nanoparticles to Helicopter Motor Oil

A. Shakiba

Department of Mechanical
Engineering
Ferdowsi University of Mashhad

O. Karami-Zarandi

Center for Development of Science and
Technology, Surface Engineering and corrosion
Iran Helicopter Support and Renewal Company

Kh. Vahedi

Department of Mechanical
Engineering
Imam Hossein University

Received: (Received: 26/March/2016; Accepted: 27/January/2018);

ABSTRACT

In this paper, the effects of added nanoparticles to oil with the aim of improving heat transfer were investigated. At first, thermophysical characteristics of helicopter oil (MIL-L-23699) were measured by cooperation of chemical laboratory of Iran Helicopter Support and Renewal Company (PANHA). Then, by collecting other data, geometry of the problem was produced and gridded through the use of Gambit software and was transmitted to Ansys Fluent 17.2 for simulating the flow and heat transfer. The single-phase model and control volume technique have been used to solve this problem. The results reveal that by adding nanoparticles to helicopter oil, thermal properties, such as Nusselt number, considerably improve in comparison with pure oil. However, the improvement of heat transfer process for gold-oil nanofluid is more than the other nanofluids. Comparing the results also shows that adding nanoparticles to the base oil causes a slight pressure change, which has no special effect on nanofluid pumping. The results indicate that by increasing Reynolds number, Nusselt number and static pressure increase and friction coefficient decreases. It is also observed that in a constant Reynolds number, by increasing working temperature, Nusselt number, friction coefficient, and static pressure decrease and temperature increases. Therefore, adding nanoparticles to helicopter oil would lead to the improvement of heat transfer properties, better cooling of the size of engine, shrinking the engine lubrication system, the ability of tolerating high loads, the ability of flying at higher altitudes, and eventually the enhancement of power and efficiency of the engine.

Keywords: Nanofluid, Heat Transfer, Lubrication, Helicopter Oil

۱ - دانشجوی دکتری: Ali.Shakiba@mail.um.ac.ir

۲ - کارشناس ارشد: Omran.k1393@gmail.com

۳ - دانشیار (نویسنده پاسخگو): KhVahedi@ihu.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات

C_p	گرمای ویژه، (J/(kgK))
C_f	ضریب اصطکاک، $C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho_m U_{in}^2}$
D	قطر لوله، (m)
k	ضریب هدایت حرارتی، (W/(m ² K))
L	طول لوله، (m)
Nu_s	عدد ناسلت محلی، $Nu_s = \frac{q''D}{k_f(T-T_{in})}$
Nu_{avg}	عدد ناسلت میانگین
p	فشار، (Pa)
P	فشار بی بعد
Pr	عدد پرانتل، $Pr = \frac{\mu_f C_{p,f}}{k_f}$
q''	شار حرارتی، (W/m ²)
Re	عدد رینولدز، $Re = \frac{\rho_f U_{in} D}{\mu_f}$
T	دما، (K)

$$\Delta T = \frac{q''D}{k_f} \quad \Delta T$$

U_{in} سرعت سیال در ورودی، (m/s)

u سرعت در راستای x

v سرعت در راستای y

w سرعت در راستای z

x, y, z محورهای دستگاه مختصات دکارتی

X طول بی بعد، $X = \frac{x}{D}$

Y عرض بی بعد، $Y = \frac{y}{D}$

علائم یونانی

τ_w تنش برشی دیواره، (Pa)

ρ جرم مخصوص، (kg/m³)

ϕ کسر حجمی نانوذرات

μ ضریب لزجت دینامیکی، (kg/ms)

θ دمای بی بعد

زیرنویس ها

• شرایط مرجع

f سیال پایه در نانوسیال

m مخلوط نانوسیال

p نانوذرات

۱- مقدمه

در صنایع مختلف برای افزایش راندمان تجهیزات انتقال حرارتی می توان از کوچک سازی و افزایش شدت انتقال حرارت به ازای واحد سطح استفاده کرد. انتقال حرارت جابه جایی را می توان با تغییر در هندسه جریان و همچنین با افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال افزایش داد. لذا می توان با به کارگیری این دو عامل تعیین کننده، عملکرد گرمایی تجهیزات را بهبود بخشید.

امروزه نانوفناوری به عنوان علمی با دامنه تحقیقاتی بسیار گسترده، مورد توجه محققین دنیا قرار گرفته و حقیقتاً هر شاخه ای از این علم نیازمند مطالعات، آزمایشات و تحقیقات تخصصی و ویژه است. از دیدگاه علوم پیشرفته، نانوفناوری در صنایعی مانند پزشکی، انرژی، نساجی، هوایی، خودرو و بسیاری از علوم کاربردی دیگر دریچه ای نو به سوی پیشرفت های شگرف گشوده و توانسته است برای بسیاری از آرزوهای علمی بشر پاسخ قابل قبولی ارائه نماید [۱].

نانوسیال، سیالی است که از توزیع ذرات جامد با ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر در سیال های مورد استفاده در تجهیزات گرمایی به وجود می آید. در تهیه نانوسیال ها 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 می شود و سیال پایه، سیالات متداول مانند آب، اتیلن گلیکول و روغن های صنعتی می باشد. با توجه به بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی این ذرات در مقایسه با سیالات رایج در انتقال حرارت، انتظار می رود که نانوسیال کارایی حرارتی بهتری نسبت به سیال پایه مربوطه داشته باشد. دلیل انتخاب ابعاد نانو برای اندازه این ذرات، پایداری بیشتر آن ها در مقایسه با ذرات بزرگتر و سطح تبادل حرارتی بیشتر، همزمان با داشتن وزن کمتر می باشد. 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 جابه جایی ذکر شده است [۲]. این مقدار افزایش در ضریب هدایت حرارتی را نمی توان به بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی نانوذرات اضافه شده به سیال پایه نسبت داد. بلکه مکانیزم های دیگری وجود دارد که این افزایش چشمگیر در خواص حرارتی ناشی از آن ها است. به صورت خلاصه مزایای استفاده از نانوسیال، در مقایسه با سیال با ذرات بزرگتر، شامل

خواص ضدسایشی و ضداصطکاکی نانوروان‌کننده‌های مختلف که از ذراتی نظیر فولرین^۱، تیتانیوم‌دی‌اکسید، اکسیدمس، نانو الماس‌ها و ... تشکیل شده‌اند و دارای ساختار کروی شکل هستند، توسط محققان بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است [۸-۱۴]. همچنین خواص هدایت حرارتی نانوسیالاتی که شامل نانوذرات کروی شکلی نظیر فولرین، مس و نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره و چنددیواره هستند مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۹-۱۵]. برخی از پژوهشگران نیز به لحاظ تجربی و تئوری، به بررسی خواص مربوط به روغن نظیر ضریب لزجت، نقطه اشتعال، نقطه ریزش^۲ و ... نانوروان‌کننده‌ها پرداخته‌اند [۷]، [۲۱-۲۰]. پراکنده‌سازی نانولوله‌های کربنی داخل روغن موتور به دلایل مختلف از جمله غلظت بالای روغن پایه از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر این مطالعاتی در رابطه با پخش نانولوله‌های کربنی درون روغن پایه صورت گرفته است [۷]، [۲۲-۲۱].

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 به دست آمده نشان داد که هر دو ضریب انتقال حرارت متوسط و افت فشار با افزودن نانوذرات افزایش می‌یابد. آن‌ها برای پیدا کردن شرایط بهینه شاخص عملکرد^۳ را در اعداد رینولدز مختلف بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که افزودن نانوذرات به سیال پایه در بسیاری از کاربردهای عملی مناسب می‌باشد.

احمدی و همکاران [۲۴] در یک کار آزمایشگاهی به بررسی تاثیر افزودن نانوسیال تشکیل شده از نانولوله‌های کربنی چند دیواره^۴ 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.

فرزین و همکاران [۲۵] در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی و افت فشار نانوسیال روغن

افزایش انتقال حرارت، ایجاد سوسپانسیون پایدارتر، کاهش توان لازم برای پمپاژ سیال، کاهش گرفتگی و انسداد مجاری و کاهش اندازه سیستم‌های انتقال حرارت می‌شود.

هرچند نانوسیال یک مفهوم جدید است ولی ایده افزودن ذرات کوچک به سیال به منظور افزایش خواص گرمایی مطلب جدیدی نیست. ماکسول [۳] در سال ۱۹۰۴ و سپس همیلتون و کراسر [۴] مدل‌های خود را برای تخمین ضریب هدایت حرارتی محلول‌هایی با ذرات میکرو و بزرگتر ارائه دادند. اما هیچ کدام از این مدل‌ها قادر به پیش‌گویی مقدار صحیح ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌ها نیستند. چون اثر اندازه در آن‌ها لحاظ نشده است. 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 ضریب 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. انتظار می‌رود که ضریب انتقال حرارت نانوسیال‌ها به عوامل مختلفی از جمله ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی هر دو جزء سیال پایه و نانوذرات، الگوی جریان، ضریب لزجت نانوسیال، کسر حجمی ذرات توزیع شده، دما، ابعاد، شکل این ذرات و قدرت اسیدی سیال پایه وابسته باشد [۵].

امروزه نانوذرات و نانولوله‌ها به دلیل شکل، اندازه و دیگر خواص منحصر به فرد خود به عنوان نوع جدیدی از مواد افزودنی به روان‌کارها ظهور پیدا کرده‌اند. در واقع نانوروان‌کننده‌ها نوع جدیدی از روان‌کننده‌های مهندسی هستند که از نانو ساختارها، پخش‌کننده‌ها و روان‌کننده‌های پایه ساخته شده‌اند. این نوع از روان‌کننده‌ها خواصی نظیر انتقال حرارت هدایتی و روان‌کاری را در مقایسه با سیال پایه بهبود می‌بخشند [۶]. استفاده از روان‌کننده‌های نانو 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 [۷].

1- Fullerene

2- Pour Point

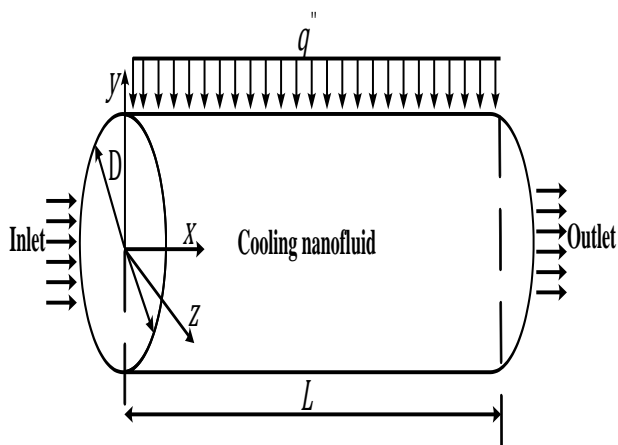
3- Performance Index

4- Multi-Walled Carbon Nanotubes

نانوذره با بهترین عملکرد حرارتی معرفی شود. از مدل تک‌فازی و روش حجم محدود جهت شبیه‌سازی، جریان آرام در یک لوله تحت شار حرارتی، استفاده شده است.

۲- 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 به‌عنوان سیال خنک‌کننده عمل می‌کند. هندسه مورد بررسی در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): هندسه مسئله.

طول لوله مستقیم L و قطر لوله D است و لوله تحت شار حرارتی ثابت و یکنواخت q'' قرار می‌گیرد. همچنین نسبت طول لوله به قطر آن برابر $L/D=14/29$ در نظر گرفته شده است.

جهت انجام مراحل شبیه‌سازی، خصوصیات ترموفیزیکی روغن بالگرد (MIL-L-23699) نظیر جرم مخصوص، ضریب لزجت، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه مورد نیاز است. خواص مذکور در آزمایشگاه شیمی شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران (پنها) اندازه‌گیری شده‌اند. از آن جایی که خواص ترموفیزیکی روغن بالگرد در دماهای مختلف تغییر می‌کنند، این خواص در دماهای مختلف اندازه‌گیری و در جدول ۱ آورده شده است. نمودار تغییرات خواص ترموفیزیکی روغن بالگرد (MIL-L-23699) نسبت به دما، در شکل ۲ نشان داده شده است.

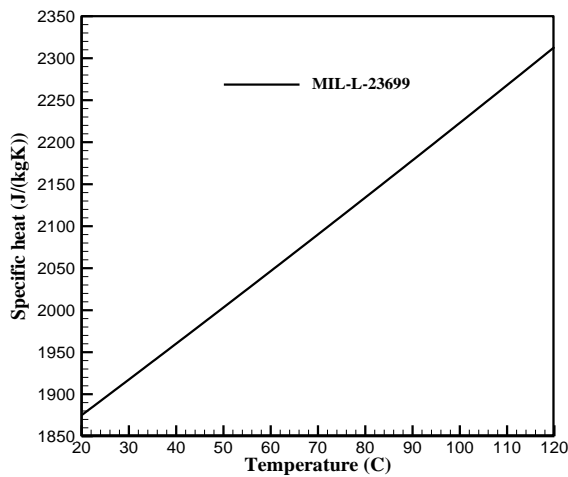
توربین- TiO_2 در رژیم جریان آرام پرداختند. آن‌ها با اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت و افت فشار در رینولدزهای مختلف و همچنین در کسر حجمی‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن نانوذرات TiO_2 سبب بهبود ضریب انتقال حرارت روغن توربین برای کسر حجمی پایین تر از $0/5$ درصد در اعداد رینولدز بین 300 تا 800 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 [۲۶] 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 به‌طور قابل توجهی افزایش داده و میزان حد اکثر آن حدود 35 درصد می‌باشد. همچنین ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال نسبت به سیال پایه حداکثر 20 درصد افزایش می‌یابد. اما نکته منفی در اضافه کردن نانوپودر به سیال پایه افزایش در ضریب لزجت نانوسیال است.

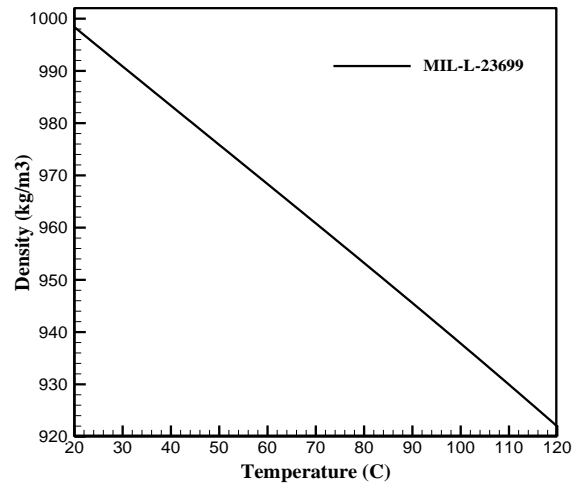
نتایج حاصل از تحقیقات اخیر منجر به گسترده‌تر شدن چشم انداز کاربردی نانوذرات در بهبود عملکرد روان‌کارها شده است. با وجود اهمیت بالای بهبود انتقال حرارت و خنک‌کاری موتور در صنایع هوایی و نظامی، تاثیر افزودن نانوذرات به روغن بالگرد کمتر مورد بررسی محققین قرار گرفته است. افزودن نانوذرات به روغن بالگرد می‌تواند سبب بهبود خواص انتقال حرارت و خنک‌کاری بهتر موتور شود که این عمل، امکان کوچک‌سازی سیستم روان‌کاری موتور، توانایی تحمل بارگذاری‌های زیاد، توانایی پرواز در ارتفاعات بالاتر و در نهایت افزایش قدرت و بازدهی موتور را در پی خواهد داشت. در این مقاله در نظر است، تاثیر افزودن نانوذرات مختلف نظیر طلا، تیتانیوم دی‌اکسید، الماس و تفلون به روغن بالگرد (MIL-L-23699)، با هدف بهبود فرایند خنک‌کاری به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گیرد و از میان نانوذرات افزوده شده

جدول (۱): خواص ترموفیزیکی به دست آمده روغن پایه از آزمایشگاه شیمی شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران (پنها).

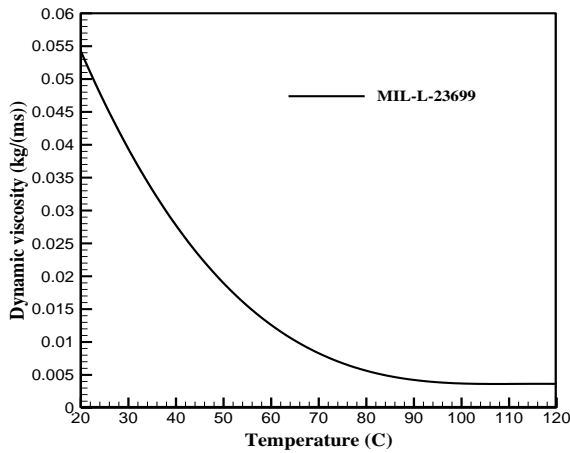
ضریب هدایت حرارتی (W/(m ² K))	ظرفیت گرمایی ویژه (J/(KgK))	ضریب لزجت دینامیکی (Kg/(ms))	جرم مخصوص (Kg/m ³)	دما (°C)
۰/۱۳۲۸۲۶	۱۸۹۶/۲۱	۰/۰۴۸۱۹۷	۹۹۴/۶	۲۵
۰/۱۳۳۰۱۸	۱۹۶۰/۱۹	۰/۰۲۵۱۸۳	۹۸۳/۴	۴۰
۰/۱۳۳۱۴۸	۲۰۰۳/۲۲	۰/۰۱۷۶۲۲	۹۷۵/۸	۵۰
۰/۱۳۳۴۱۳	۲۰۹۰/۱۹	۰/۰۰۹۷۰۵	۹۶۰/۸	۷۰
۰/۱۳۳۶۸۶	۲۱۷۸/۴۰	۰/۰۰۵۹۸۶	۹۴۵/۶	۹۰
۰/۱۳۳۸۲۵	۲۲۲۳/۰۱	۰/۰۰۴۸۶۸	۹۳۷/۸	۱۰۰



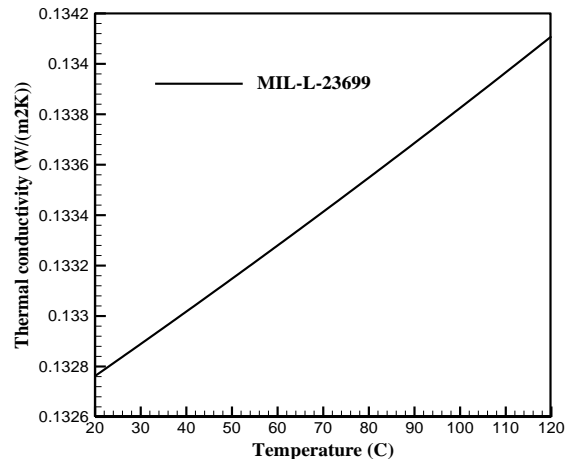
(ب)



(الف)



(د)



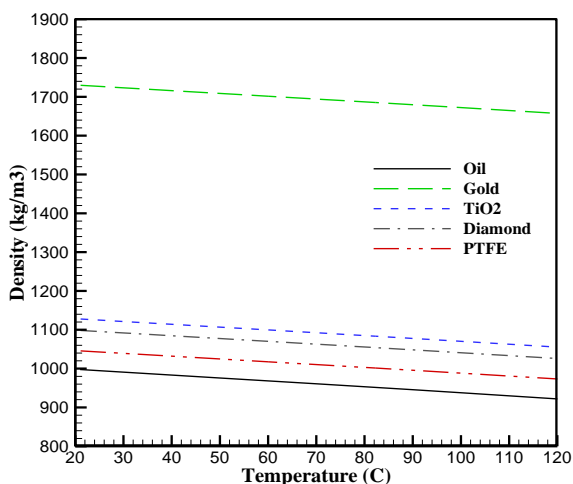
(ج)

شکل (۲): نمودار تغییرات خواص ترموفیزیکی روغن بالگرد (MIL-L-23699) در دماهای مختلف. (الف): جرم مخصوص، (ب): گرمای ویژه، (ج): ضریب هدایت حرارتی، (د): ضریب لزجت.

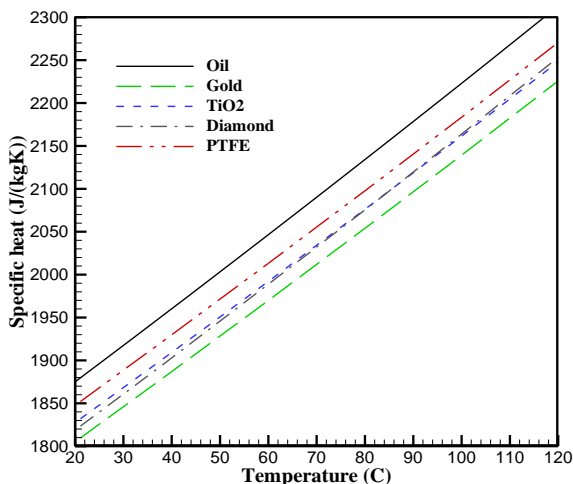
۳- روش حل

در روابط ۱ تا ۴ اندیس‌های p ، f و m به ترتیب مربوط به نانوذرات، سیال پایه و مخلوط نانوسیال می‌باشد. همچنین p ، ϕ ، μ و k به ترتیب نشان دهنده جرم مخصوص، کسر حجمی نانوذرات، ضریب لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی می‌باشند.

در شکل ۳ تا ۵ مقایسه‌ای بین خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌های مختلف صورت گرفته است. در این مقاله از نانوسیال با کسر حجمی $\phi=0/04$ استفاده شده است. در شکل ۶ نیز مقایسه‌ای بین ضریب لزجت نانوسیال و سیال پایه در کسر حجمی‌های مختلف نشان داده شده است. طبق رابطه (۲) ضریب لزجت مخلوط نانوسیال به کسر حجمی و ضریب لزجت سیال پایه وابسته است و با آن رابطه مستقیم دارد. بنابراین، نمودار ضریب لزجت در هر کسر حجمی برای نانوسیالات مختلف یکسان خواهد شد.



شکل (۳): جرم مخصوص نانوسیال ($\phi=0/04$)



شکل (۴): گرمای ویژه نانوسیال ($\phi=0/04$).

در این پژوهش از چهار نمونه نانوذره با نام‌های طلا (Au)، تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2)، الماس و پلی‌تترافلورواتیلن (PTFE) با نام تجاری تفلون استفاده شده است. نانوذرات به صورت کروی و با قطر متوسط ۱۰ نانومتر در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که در ابتدا قرار بود انتقال حرارت نانوذرات مس (Cu)، آلومینا (Al_2O_3) و نقره (Ag) نیز بررسی شود، اما طی مشاوره با مسئول آزمایشگاه شیمی شرکت پنها مشخص شد، در صورت به‌کارگیری این نانوذرات در روغن بالگرد، نتایج حاصل از آزمایش تشخیص ذرات پراکنده شده در روغن که برای شناسایی قطعات آسیب دیده انجام می‌گیرد، دیگر قابل اعتماد نیستند. آزمایش مذکور برای تشخیص وجود ذرات سائیده‌شده و پخش‌شده در روغن انجام می‌گیرد.

از آنجایی که قطعات در تماس با روغن نظیر چرخ‌دنده‌ها و یاتاقان‌ها معمولاً از مس، آلومینیوم و نقره ساخته می‌شوند، 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 [۲۷-۲۸]، خواص ترموفیزیکی مخلوط نانوسیال شامل روغن بالگرد (MIL-L-23699) و نانوذرات مختلف را می‌توان از روابط (۱) تا (۴) محاسبه نمود.

جرم مخصوص مخلوط

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

ضریب لزجت مخلوط

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

ضریب هدایت حرارتی مخلوط

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

رابطه (۳) برای اولین بار توسط همیلتون و کراسر [۴] ارائه شد که در آن n ضریب شکل بوه و برای ذرات کروی مقدار آن برابر ۳ است.

ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط

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

می‌تواند به‌عنوان مجموعه سرعت سیال پایه و سرعت نسبی (لغزشی) در نظر گرفته شود. جهت تعیین روش مدل‌سازی نانوسیال در انتقال حرارت نانوسیالات، فهم ساز و کارهایی که توسط آن‌ها نانوذرات می‌توانند یک سرعت لغزشی نسبت به سیال پایه ایجاد کنند از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. فرض می‌شود که سیال حول نانوذره پیوسته است.

۲-۴- تعریف پارامترهای بدون بعد

متغیرهای بدون بعد به‌صورت روابط (۵) تعریف می‌شوند.

$$X = \frac{x}{D} \quad Y = \frac{y}{D} \quad P = \frac{p}{\rho_m U_{in}^2} \quad (5)$$

$$U = \frac{u}{U_{in}} \quad V = \frac{v}{U_{in}}$$

$$\theta = \frac{T - T_{in}}{\Delta T} \quad \Delta T = \frac{q'' D}{k_f}$$

اعداد بی‌بعد رینولدز و پرانتل نیز به‌صورت رابطه (۶) تعریف می‌شوند.

$$Re = \frac{\rho_f U_{in} D}{\mu_f} \quad Pr = \frac{\mu_f C_{p,f}}{k_f} \quad (6)$$

در این رابطه، D ، U_{in} ، ρ_f ، μ_f ، $C_{p,f}$ و k_f به‌ترتیب نشان دهنده قطر لوله، سرعت ورودی، جرم مخصوص، ضریب لزجت، گرمای ویژه و ضریب هدایت حرارتی سیال پایه می‌باشند.

۳-۴- معادلات حاکم بر مسئله

با در نظر گرفتن جریان نانوسیال به‌صورت آرام، پایه، نیوتنی، غیرقابل تراکم و با صرف نظر کردن از اتلافات لزجی، معادلات حاکم بی‌بعد شده به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0, \quad (7)$$

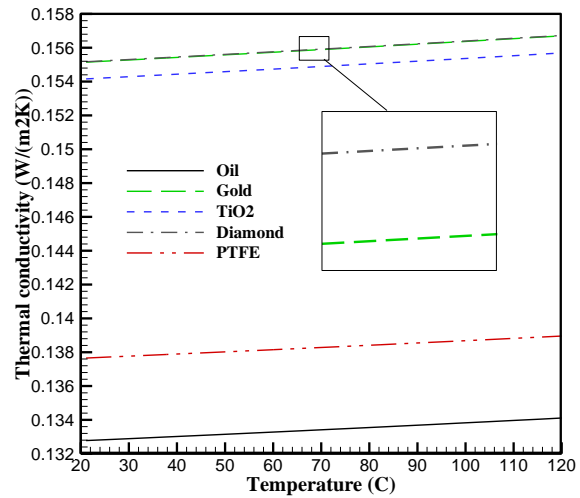
معادله مومنوم

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \frac{\mu_m \rho_f}{\rho_m \mu_f} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (8)$$

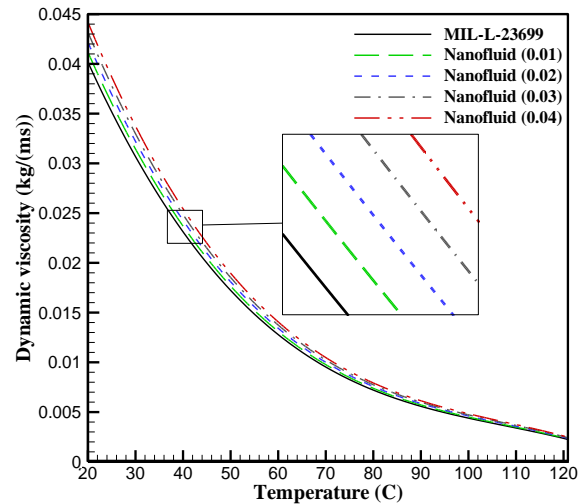
$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \frac{\mu_m \rho_f}{\rho_m \mu_f} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right)$$

معادله انرژی

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Re Pr} \frac{\rho_f C_{p,f} k_m}{\rho_m C_{p,m} k_f} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right). \quad (9)$$



شکل (۵): ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ($\phi = 0.04$).



شکل (۶): ضریب لزجت دینامیکی نانوسیال.

۴- معادلات حاکم و شرایط مرزی

در این قسمت با تعریف مفهوم نظریه سیال تک‌فازی، پارامترهای بدون‌بعد، معادلات حاکم و شرایط مرزی مسئله بیان خواهد شد.

۴-۱- نظریه سیال تک‌فازی

به‌دلیل کوچک بودن ذرات، فرض شده است که آن‌ها به آسانی در سیال پایه پخش شده‌اند و در نتیجه شبیه یک سیال رفتار می‌کنند. به‌علاوه، با فرض ناچیز بودن سرعت لغزشی بین ذرات و فاز پیوسته و برقراری شرط تعادل حرارتی، نانوسیال را می‌توان به‌عنوان یک سیال تک‌فازی با خواص فیزیکی بر اساس غلظت دو جزء در نظر گرفت. سرعت مطلق نانوذره

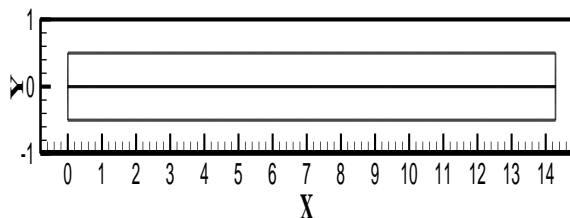
ورودی نانوسیال

$$x = 0: u_m = U_{in}; v_m = w_m = 0; T_{in} = T_0.$$

همچنین، در نرم افزار فلونت شرط مرزی در ورودی، سرعت ورودی^۱ و در خروجی، فشار خروجی^۲ 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.

۵- مدل سازی عددی

با توجه به شکل های ۷ و ۸ هندسه مسئله در نرم افزار گمبیت ۲/۴/۶ تولید و شبکه بندی شده است. همان طور که 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 انسیس فلونت ۱۷/۲ بر اساس روش حجم محدود حل شده اند. در روش حجم محدود، ابتدا میدان فیزیکی^۳ مربوط به مسئله به حجم کنترل های^۴ گسسته ای تقسیم می شود. سپس معادلات حاکم، بر روی هر حجم کنترل انتگرال گیری می شود تا معادلات جبری و گسسته^۵ به دست آیند. در گام بعدی معادلات گسسته به دست آمده، خطی سازی^۶ می شوند. سیستم معادلات گسسته و خطی- سازی شده به صورت هم زمان حل می شوند. جهت حل مسئله از حل کننده فشار مینا^۷ و برای ارتباط فشار و سرعت از روش سیمپل سی^۸ استفاده شده است. برای گسسته سازی معادلات مومنتوم و انرژی از طرح بالادست مرتبه دوم^۹ استفاده شده است.



شکل (۷): هندسه مسئله.

در روابط (۷-۹) $C_{p,m}$ ، k_m ، μ_m ، ρ_m و θ به ترتیب جرم مخصوص، ضریب لزجت، ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و دمای بی بعد هستند.

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 را بیان می کند. تغییرات محلی عدد ناسلت در طول دیواره گرم را می توان با استفاده از رابطه (۱۰) بیان نمود.

$$Nu_s = \frac{q'' D}{k_f (T - T_{in})} \quad (10)$$

با مرتب سازی عدد ناسلت محلی با استفاده از پارامترهای بی بعد رابطه (۱۱) به دست می آید.

$$Nu_s(X) = \frac{1}{\theta_s(X)} \quad (11)$$

عدد ناسلت میانگین (Nu_{avg}) نیز با انتگرال گیری از $Nu_s(X)$ در طول دیواره لوله طبق رابطه (۱۲) به دست خواهد آمد.

$$Nu_{avg} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_s(X) dX \quad (12)$$

ضریب اصطکاک پوسته ای نیز طبق رابطه (۱۳) تعریف می شود.

$$C_f = \frac{\tau_w}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho_m U_{in}^2} \quad (13)$$

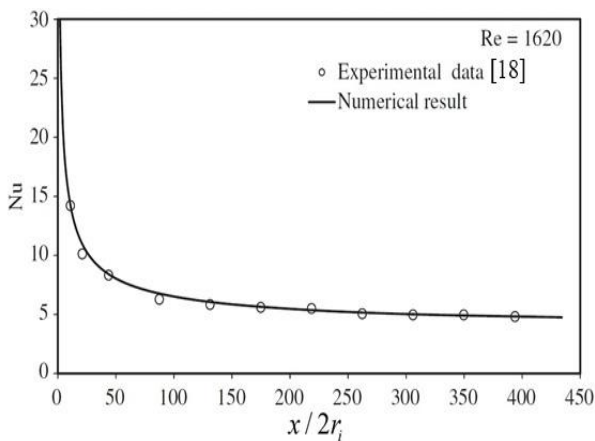
که در آن، C_f ، τ_w ، ρ_m و U_{in} به ترتیب ضریب اصطکاک پوسته ای، تنش برشی، جرم مخصوص و سرعت ورودی نانوسیال می باشند.

۴-۴- شرایط مرزی

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

- 1- Velocity Inlet
- 2- Pressure Outlet
- 3- Physical Domain
- 4- Control Volumes
- 5- Discretized
- 6- Linearization
- 7- Pressure-Based
- 8- SIMPLC
- 9- Second-Order Upwind

دارای شار حرارتی ثابتی هستند، پرداخته شده و نتایج به دست آمده از حل عددی این مسئله با یک کار آزمایشگاهی مقایسه شده است. در حالتی که از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با کسر حجمی ۳ درصد استفاده می شود، نتایج حل عددی با نتایج تجربی کیم و همکاران [۱۸] مقایسه شده است. شکل ۹ نتایج این مقایسه را در قالب نمودار عدد ناسلت در راستای طول بی بعد در $Re=1620$ نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و حل عددی حاضر وجود دارد. لذا نتایج عددی در مقایسه با نتایج تجربی قابل اعتماد است.

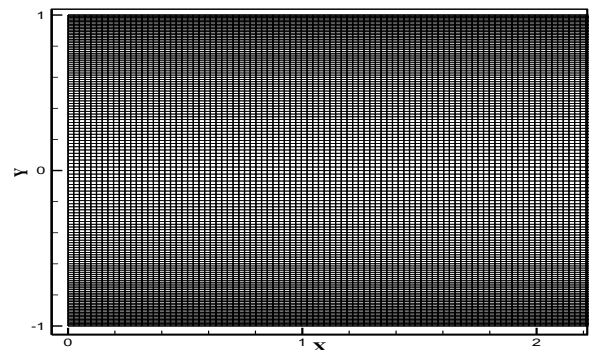


شکل (۹): مقایسه عددی ناسلت در یک لوله بلند با مدل تجربی [۱۸].

۶- 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 بالگرد (MIL-L-23699) با استفاده از دیدگاه تک فازی و روش حجم محدود بررسی شده است. از آن جایی که خواص ترموفیزیکی 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.

شکل ۱۰ نمودار عدد ناسلت محلی را در طول بی بعد لوله در حالتی که $Re=500$ ، $T_{in}=363/15$ و $\phi=0/04$ است، برای نانوسیالات مختلف و سیال پایه نشان می دهد. همان طور که



شکل (۸): شبکه بندی.

معیار همگرایی برای کار حاضر برای تمامی معادلات ذکر شده 10^{-7} در نظر گرفته شده است.

۵-۱- آزمون استقلال از شبکه

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 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 می شود. بنابراین، برای حل این مسئله از تعداد گره 71×1177 استفاده شده است.

جدول (۲): بررسی استقلال از شبکه.

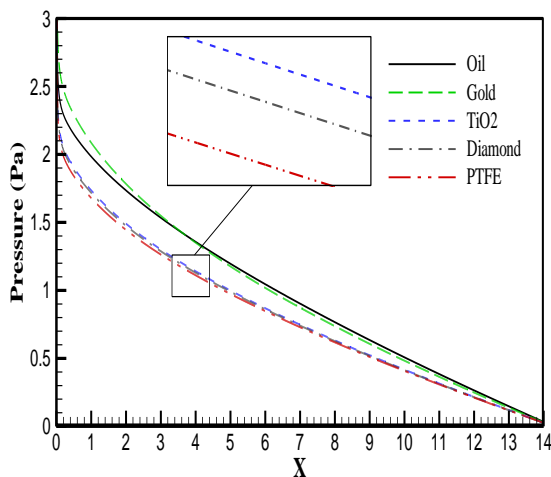
ردیف	Nu_avg	Ny×Nx	نانوسیال الماس
			روغن خالص
۱	۴۲/۳۳	۵۵×۱۰۰۱	۳۳/۷۹
۲	۴۲/۴۲	۵۹×۱۰۵۴	۳۳/۸۷
۳	۴۲/۵۲	۶۵×۱۱۱۲	۳۳/۹۷
۴	۴۲/۵۴	۷۱×۱۱۷۷	۳۴/۰۰
۵	۴۲/۵۵	۷۹×۱۲۵۱	۳۴/۰۱

۵-۲- اعتبار سنجی

برای نشان دادن صحت و دقت مدل حاضر، ابتدا به حل جریان و انتقال حرارت درون یک لوله بلند افقی که دیواره های آن

توزیع محوری فشار استاتیک در طول بی‌بعد لوله در حالتی که $Re=500$ ، $T_{in}=363/15$ و $\phi=0/04$ است، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. عامل اصلی در تغییر فشار را می‌توان به لزجت نسبت داد. با توجه به رابطه ۲ افزودن نانوذرات به سیال پایه لزجت آن را افزایش می‌دهد. از طرفی با توجه به شکل ۶ لزجت تابعی از دما بوده و با آن رابطه عکس دارد. در حالتی که از نانوسیال استفاده می‌شود، میزان تغییرات لزجت ناشی از افزودن نانوذرات در مقابل تغییرات دمایی کمتر است. بنابراین در مجموع لزجت کاهش یافته و افت فشار نیز کاهش می‌یابد. علت تفاوت افت فشار در نانوسیالات مختلف را می‌توان به تفاوت در جرم مخصوص آن‌ها نسبت داد. با توجه به شکل ۳ جرم مخصوص نانوسیال طلا-روغن در مقایسه با بقیه نانوسیال‌ها بیشتر است. در نتیجه دبی جرمی عبوری از لوله افزایش یافته و افت فشار بیشتر خواهد شد.

در جدول ۴ نیز مقایسه درصد تغییرات فشار نسبت به حالتی که از روغن خالص استفاده می‌شود آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان تغییرات فشار نانوسیالات مختلف در مقایسه با روغن خالص تقریباً ناچیز بوده و می‌توان گفت که استفاده از نانوسیال تاثیر قابل توجهی بر عملکرد پمپ روغن نخواهد داشت.



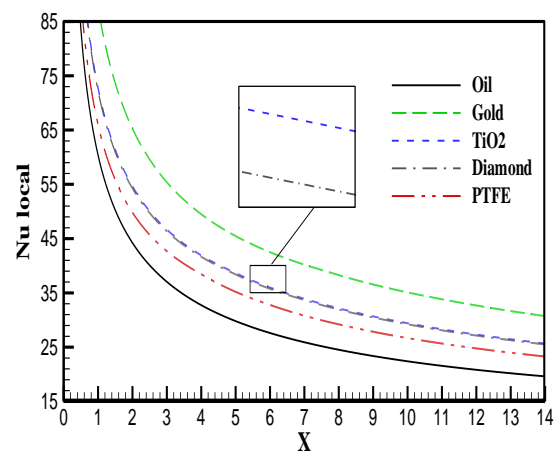
شکل (۱۱): نمودار فشار در راستای طولی برای نانوسیالات مختلف در طول بی‌بعد لوله در $Re=500$ و $T_{in}=363/15$ و $\phi=0/04$

ملاحظه می‌شود با به‌کارگیری نانوسیال عدد ناسلت نسبت به روغن خالص افزایش می‌یابد. نانوذرات با ضریب هدایت حرارتی بالاتر موجب افزایش مطلوب‌تری در ویژگی‌های انتقال حرارتی نانوسیالات می‌شوند. همچنین نانوسیال طلا-روغن بیشترین مقدار و نانوسیال تفلون-روغن، کمترین مقدار افزایش را در عدد ناسلت، نسبت به نانوسیالات دیگر نشان می‌دهند.

علاوه بر این، مقایسه درصد افزایش عدد ناسلت نسبت به روغن خالص، در حالتی که $Re=500$ ، $T_{in}=363/15$ و $\phi=0/04$ است در جدول ۳ آورده شده است. نتایج به‌دست‌آمده با آنچه پک و چو [۲۹]، خوان و لی [۳۰] و هی و همکاران [۳۱] به‌دست آورده‌اند، مطابقت دارد. دلایل احتمالی این افزایش‌ها را می‌توان به این‌صورت بیان نمود:

۱- نانوسیال‌ها با نانوذرات معلق ضریب هدایت حرارتی مخلوط را بالا می‌برند.

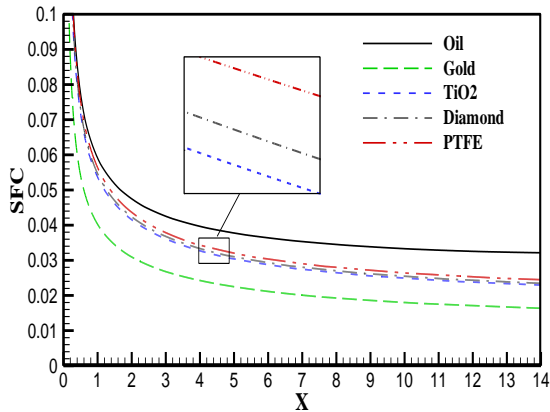
۲- فرایند تغییرات بزرگ انرژی ناشی از حرکت بی‌نظم نانوذرات می‌باشد [۳۲].



شکل (۱۰): نمودار عدد ناسلت محلی برای نانوسیالات مختلف در طول بی‌بعد لوله در $Re=500$ و $T_{in}=363/15$ و $\phi=0/04$.

جدول (۳): مقایسه درصد افزایش عدد ناسلت متوسط در $Re=500$ و $T_{in}=363/15$ و $\phi=0/04$.

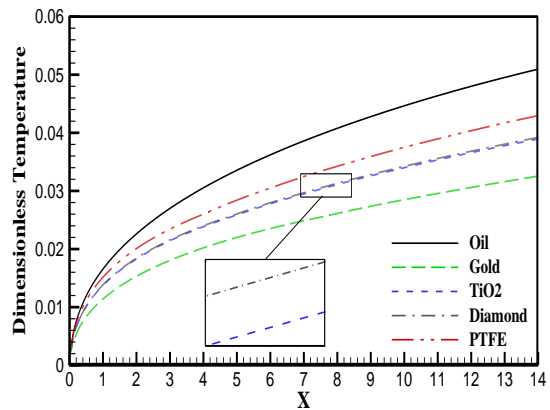
پارامتر	طلا	تیتانیوم دی‌اکسید	الماس	تفلون
Nu_{avg}	۴۹/۸۷	۲۵/۹۴	۲۵/۱۱	۱۴/۴۱



شکل (۱۲): نمودار ضریب اصطکاک محلی در طول لوله، برای نانوسیالات مختلف در $Re=500$ و $T_{in}=363/15$ و $\phi=0/04$.

جدول (۵): مقایسه درصد تغییرات ضریب اصطکاک متوسط نسبت به روغن خالص در $Re=500$ و $\phi=0/04$ و $T_{in}=363/15$

تفلون	الماس	تیتانیوم دی اکسید	طلا	پارامتر
-۱۳/۶۵	-۱۶/۵۹	-۱۸/۲۳	-۴۰/۰۲	SFC_avg



شکل (۱۳): نمودار دمای بی بعد در طول بی بعد لوله، برای نانوسیالات مختلف در $Re=500$ و $T_{in}=363/15$ و $\phi=0/04$.

جدول (۶): دمای روغن بالگرد در شرایط کاری مختلف.

T (°C)	حالت
۰ تا ۳۵	شرایطی که بالگرد روی زمین است
۳۵ تا ۱۳۵	شرایطی که بالگرد عملکرد مستمر دارد
۱۳۵ تا ۱۵۰	بالگرد در شرایط پرباری
۱۵۰	حالت ماکزیمم

جدول (۴): مقایسه درصد تغییرات افت فشار متوسط

نسبت به روغن خالص در طول بی بعد لوله در $Re=500$ و $\phi=0/04$ و $T_{in}=363/15$

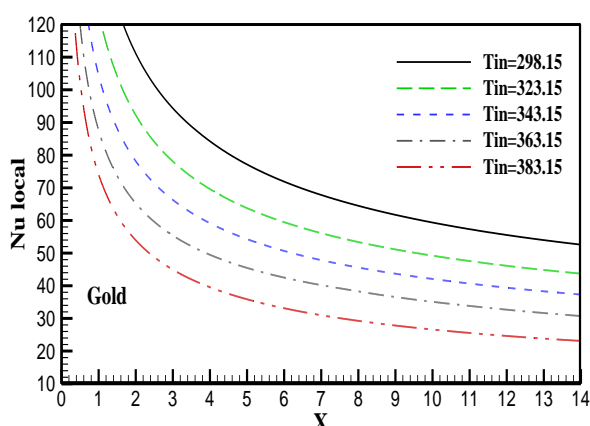
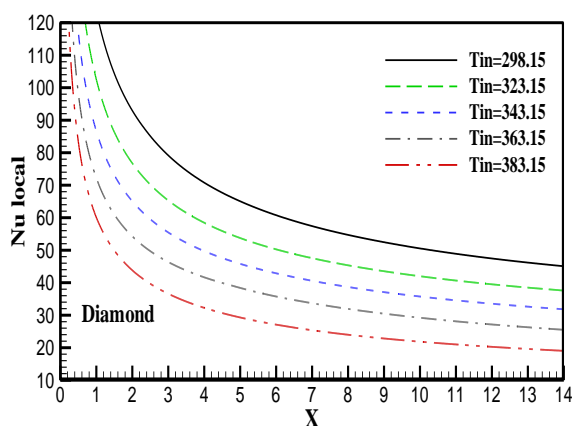
تفلون	الماس	تیتانیوم دی اکسید	طلا	پارامتر
-۱۷/۵۲	-۱۶/۰۱	-۱۵/۱۸	+۰/۳۹	P_avg (Pa)

شکل ۱۲ تغییرات ضریب اصطکاک محلی نانوسیالات مختلف در طول بی بعد لوله در حالتی که $Re=500$ و $T_{in}=363/15$ و $\phi=0/04$ می باشد، را نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود ضریب اصطکاک محلی در اثر افزودن نانوذرات مختلف، نسبت به حالتی که از روغن خالص استفاده می شود، کاهش یافته و این کاهش برای حالتی که از نانوسیال روغن- طلا استفاده شده، قابل توجه است. با توجه به رابطه ۱۳ ضریب اصطکاک پوسته ای با ضریب لزجت رابطه مستقیم و با جرم مخصوص نانوسیال رابطه عکس دارد. همان طور که در شکل های ۳ و ۶ ملاحظه شد جرم مخصوص و ضریب لزجت نیز با دما رابطه عکس دارند. در نتیجه برآیند تغییرات ناشی از افزودن نانوذرات و تغییرات دمایی سبب کاهش ضریب اصطکاک پوسته ای نانوسیال نسبت به سیال پایه خواهد شد. جدول ۵ نیز درصد تغییرات ضریب اصطکاک متوسط را برای نانوسیالات گوناگون نشان می دهد.

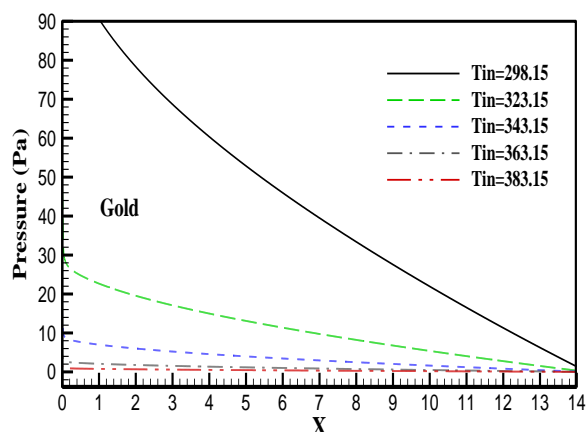
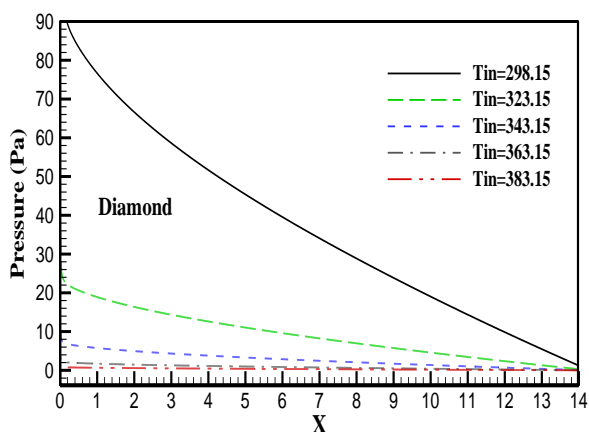
شکل ۱۳ تغییرات دمای بی بعد دیواره لوله برای نانوسیالات مختلف در طول بی بعد لوله، در حالتی که $Re=500$ و $T_{in}=363/15$ و $\phi=0/04$ می باشد، را نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود دما دیواره در حالتی که از نانوسیال استفاده شده نسبت به روغن خالص بیشتر کاهش یافته است. همچنین نانوسیال طلا- روغن در مقایسه با سایر نانوسیال ها عملکرد بهتری را نشان می دهد و این به دلیل خواص حرارتی مناسب نانوذرات طلا در فرایند انتقال حرارت است. بنابراین، از نظر کاربردی، با افزودن نانوذرات به روغن بالگرد، خنک کاری بهتر موتور آن، کوچک سازی سیستم روان کاری، توانایی تحمل بارگذاری های زیاد، توانایی پرواز در ارتفاعات بالاتر و در نهایت، افزایش قدرت و بازدهی موتور امکان پذیر خواهد شد. با توجه به اطلاعات به دست آمده از شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران (پنجا)، دمای روغن هلیکوپتر در شرایط کاری مختلف مطابق جدول ۶ می باشد.

در این مقاله بررسی خواص نانوسیال در دماهای مختلف، دمای ورودی لوله 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. در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ نمودارهای ناسلت محلی، توزیع محوری فشار استاتیک، ضریب اصطکاک محلی و دمای بی‌بعد در حالتی که $Re=500$ و $\phi=0.04$ است، در دماهای ورودی مختلف، برای نانوسیالات طلا و الماس بررسی شده است.

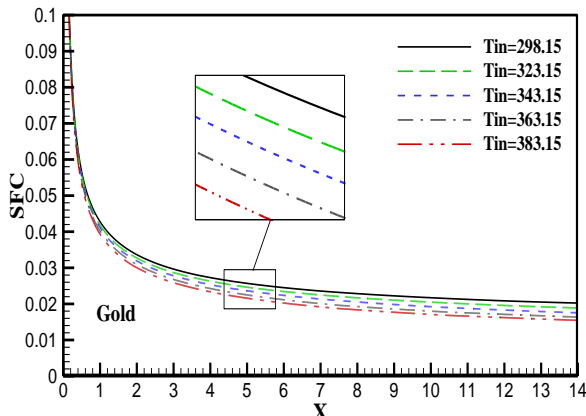
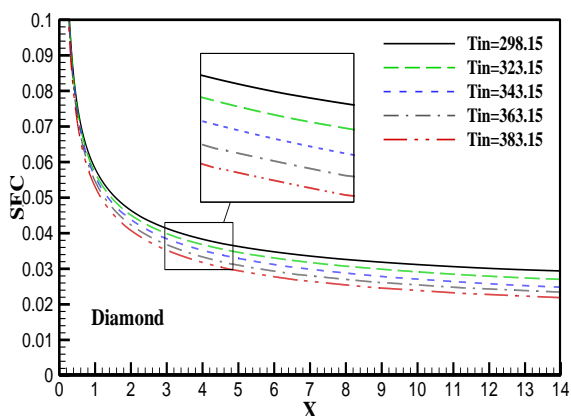
شکل (۱۴): نمودار ناسلت محلی در طول بی‌بعد لوله در $Re=500$ و $\phi=0.04$ برای دماهای مختلف.



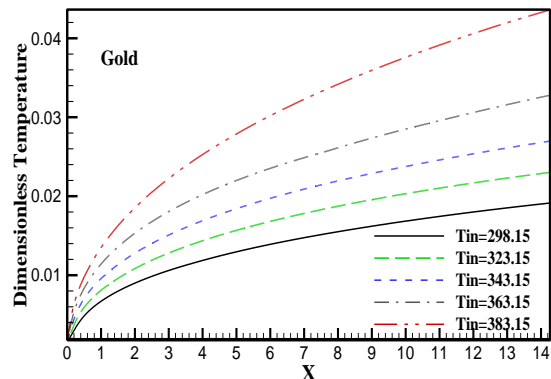
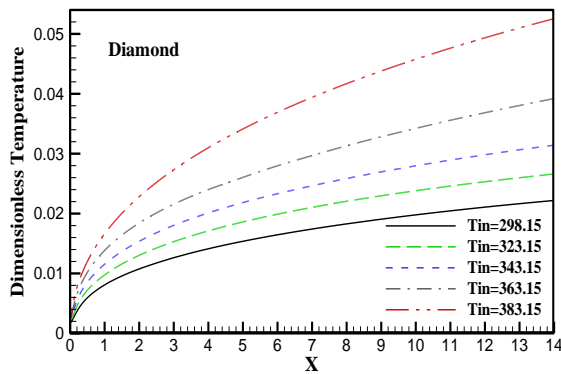
شکل (۱۴): نمودار ناسلت محلی در طول بی‌بعد لوله در $Re=500$ و $\phi=0.04$ برای دماهای مختلف.



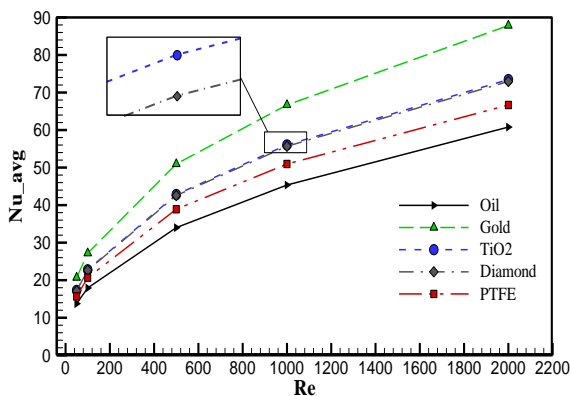
شکل (۱۵): نمودار فشار در طول بی‌بعد لوله در $Re=500$ و $\phi=0.04$ برای دماهای مختلف.



شکل (۱۶): نمودار ضریب اصطکاک پوسته‌ای در طول بی‌بعد لوله در $Re=500$ و $\phi=0.04$ برای دماهای مختلف.



شکل (۱۷): نمودار دمای بی‌بعد در طول بی‌بعد لوله در $Re=500$ و $\phi=0.04$ برای دماهای مختلف.



شکل (۱۸): نمودار عدد ناسلت متوسط برای نانوسیالات

مختلف در اعداد رینولدز مختلف در $T_{in}=363/15$ و $\phi=0.04$.

جدول (۷): مقایسه درصد تغییرات عدد ناسلت متوسط

نانوسیالات مختلف در رینولدزهای متفاوت در

$\phi=0.04$ و $T_{in}=363/15$

عدد رینولدز	طلا	تیتانیوم دی اکسید	الماس	تفلون
۵۰	۵۰/۶۶	۲۵/۸۰	۲۴/۹۶	۱۴/۰۸
۱۰۰	۵۱/۸۲	۲۷/۱۴	۲۶/۳۰	۱۵/۳۲
۵۰۰	۴۹/۸۷	۲۵/۹۴	۲۵/۱۱	۱۴/۴۱
۱۰۰۰	۴۷/۰۵	۲۳/۵۸	۲۲/۷۷	۱۲/۳۶
۲۰۰۰	۴۴/۵۳	۲۰/۸۳	۲۰/۰۱	۹/۶۸

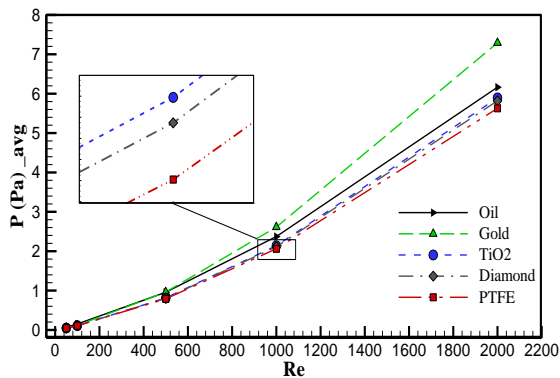
در شکل ۱۹ نمودار ضریب اصطکاک پوسته‌ای متوسط در طول بی‌بعد لوله برای نانوسیالات مختلف رسم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش عدد رینولدز ضخامت لایه مرزی و اثرات اصطکاکی کاهش و در نتیجه آن ضریب اصطکاک پوسته‌ای کاهش می‌یابد. کاهش این ضریب برای نانوسیالات طلا- روغن نسبت به نانوسیالات دیگر کمتر می‌باشد.

همان‌طور که، ملاحظه می‌شود افزایش دمای کاری سبب کاهش عدد ناسلت، افت فشار، ضریب اصطکاک پوسته‌ای و افزایش دمای بی‌بعد در طول لوله می‌شود. با توجه به روابط (۱۰-۱۲) عدد ناسلت با دمای دیواره رابطه عکس دارد. در نتیجه با افزایش دما عدد ناسلت کاهش می‌یابد. همچنین کاهش افت فشار و ضریب اصطکاک پوسته‌ای را می‌توان به وابستگی خواص ترموفیزیکی نظیر ضریب لزجت و جرم مخصوص به دما نسبت داد. با افزایش دما ضریب لزجت و جرم مخصوص کاهش می‌یابد در نتیجه افت فشار و ضریب اصطکاک پوسته‌ای کاهش پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال برای نانوسیال طلا با مقایسه دو حالت $T_{in}=298/15$ و $T_{in}=383/15$ کلین ملاحظه شد عدد ناسلت، فشار استاتیک و ضریب اصطکاک پوسته‌ای به ترتیب تقریباً ۵۲، ۹۹ و ۱۲ درصد کاهش و دمای بی‌بعد به اندازه ۳۴ درصد افزایش پیدا کرده‌اند.

شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ نمودارهای تغییرات عدد ناسلت متوسط، افت فشار و ضریب اصطکاک پوسته‌ای را در رینولدزهای مختلف و برای نانوسیالات مختلف نشان می‌دهند. از آنجایی که جریان آرام است، این نمودارها در اعداد رینولدز ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ رسم شده‌اند.

همچنین دمای ورودی سیال $T_{in}=363/15$ و کسر حجمی $\phi=0.04$ برای تمامی نمودارها در نظر گرفته شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت متوسط در شکل ۱۸ افزایش می‌یابد و این افزایش

برای نانوسیال طلا- روغن در مقایسه با سایر نانوسیالات بیشتر می‌باشد. جدول ۷ نیز روند افزایش عدد ناسلت متوسط نسبت به روغن خالص را نشان می‌دهد.



شکل (۲۰): نمودار فشار برای نانوسیالات مختلف در اعداد رینولدز مختلف در $T_{in}=۳۶۳/۱۵$ و $\phi=۰/۰۴$.

جدول (۹): مقایسه درصد تغییرات فشار استاتیک

متوسط نانوسیالات مختلف در رینولدزهای متفاوت در

$T_{in}=۳۶۳/۱۵$ و $\phi=۰/۰۴$.

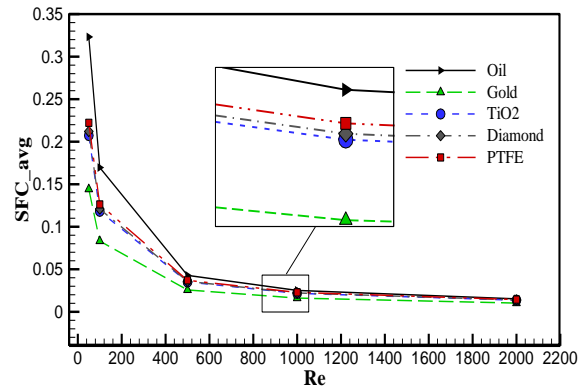
عدد رینولدز	طلا	تیتانیوم دی اکسید	الماس	تفلون
۵۰	-۲۹/۱۵	-۳۳/۸۹	-۳۴/۱۷	-۳۴/۲۷
۱۰۰	-۲۲/۲۶	-۲۸/۰۸	-۲۸/۴۱	-۲۸/۶۸
۵۰۰	+۰/۳۹	-۱۵/۱۸	-۱۶/۰۱	-۱۷/۵۲
۱۰۰۰	+۱۰/۱۸	-۹/۷۹	-۱۰/۸۱	-۱۳/۰۸
۲۰۰۰	+۱۸/۲۹	-۴/۳۹	-۵/۵۹	-۸/۶۹

۷- نتیجه گیری

پس از گردآوری داده‌ها نظیر خصوصیات ترموفیزیکی روغن بالگرد (MIL-L-23699) از آزمایشگاه شیمی شرکت پشیبانی 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 می باشد:

- افزودن نانوذرات مختلف نظیر نانوذرات طلا، تیتانیوم دی اکسید، الماس، تفلون و ... به روغن بالگرد (MIL-L-23699) سبب بهبود انتقال حرارت در سیستم روان کاری خواهد شد،

- در یک رینولدز ثابت عدد ناسلت نسبت به حالتی که از روغن خالص استفاده می شود، افزایش می یابد و با مقایسه نانوسیالات مختلف، نانوسیال طلا- روغن بیشترین افزایش و نانوسیال تفلون- روغن کمترین افزایش را دارا می باشند،



شکل (۱۹): نمودار ضریب اصطکاک پوسته ای برای نانوسیالات مختلف در اعداد رینولدز مختلف در $T_{in}=۳۶۳/۱۵$ و $\phi=۰/۰۴$.

جدول ۸ درصد تغییرات ضریب اصطکاک پوسته ای در

مقایسه با روغن خالص در هر رینولدز را نشان می دهد.

در شکل ۲۰ نیز مشاهده می شود که با افزایش عدد رینولدز، فشار متوسط لوله افزایش یافته و این افزایش فشار برای حالتی که از نانوسیال طلا- روغن استفاده می شود نسبت به سایر نانوسیال ها بیشتر می باشد. با افزایش عدد رینولدز سرعت سیال افزایش یافته و در نتیجه آن دبی عبوری از لوله نیز افزایش می یابد. افزایش دبی رابطه مستقیم با افت فشار دارد. در نتیجه فشار باید افزایش یابد.

برای مقایسه درصد تغییر فشار نانوسیالات نسبت به روغن خالص در هر رینولدز می توان به جدول ۹ مراجعه نمود.

با توجه به شکل ۳ از آن جایی که جرم مخصوص طلا نسبت به سایر نانوسیال های دیگر بیشتر است افت فشار آن نیز بیشتر خواهد شد.

جدول (۸): مقایسه درصد تغییرات ضریب اصطکاک متوسط نانوسیالات مختلف در رینولدزهای متفاوت در $T_{in}=۳۶۳/۱۵$ و $\phi=۰/۰۴$

عدد رینولدز	طلا	تیتانیوم دی اکسید	الماس	تفلون
۵۰	-۵۵/۴۰	-۳۵/۸۷	-۳۴/۳۸	-۳۱/۲۵
۱۰۰	-۵۰/۹۶	-۳۰/۳۳	-۲۸/۷۶	-۲۵/۵۸
۵۰۰	-۴۰/۰۲	-۱۸/۲۳	-۱۶/۵۹	-۱۳/۶۵
۱۰۰۰	-۳۵/۹۳	-۱۳/۷۷	-۱۲/۱۱	-۹/۲۶
۲۰۰۰	-۳۲/۸۸	-۱۰/۲۷	-۸/۶۰	-۵/۷۲

۹- مراجع

1. Saidur, R., Leong, K., and Mohammad, H. "A Review on Applications and Challenges of Nanofluids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 3, pp. 1646-1668, 2011.
2. Choi, S.U. "Nanofluids: from Vision to Reality Through Research", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 131, No. 3, pp. 033106, 2009 .
3. Maxwell, J.C. "A Treatise on Electricity and Magnetism", Clarendon Press, London, England, 1881 .
4. Hamilton, R. and Crosser, O. "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems", *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 1, No. 3, pp. 187-191, 1962 .
5. Wang, X., Xu, X. and Choi, S.U.S. "Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 13, No. 4, pp. 474-480, 1999 .
6. Lee, C.G., Hwang, Y.J., Choi, Y.M., Lee, Choi, J.K. C., and Oh, J.M.. "A Study on The Tribological Characteristics of Graphite Nano Lubricants", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 1, pp. 85-90, 2009 .
7. Vakili-Nezhaad, G. and Dorany, A. "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 .
8. Hwang, Y., Lee, C., Choi, Y., Cheong, S., Kim, D. Lee, K., Lee, J., and Kim, S. H. "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 .
9. Ji, X., Chen, Y., Zhao, G., Wang, X., and Liu, W. "Tribological Properties of Caco3 Nanoparticles as an Additive in Lithium Grease", *Tribology Letters*, Vol. 41, No. 1, pp. 113-119, 2011 .
10. Liu, L., Fang, Z., Gu, A., and Guo, Z. "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 .
11. Ma, S., Zheng, S., Cao, D., and Guo, H. "Anti-wear and Friction Performance of Zro₂ Nanoparticles as Lubricant Additive", *Particuology*, Vol. 8, No. 5, pp. 468-472, 2010 .
12. Peng, Y., Hu, Y., and Wang, H. "Tribological Behaviors of Surfactant-Functionalized Carbon Nanotubes as Lubricant Additive in Water", *Tribology Letters*, Vol. 25, No. 3, pp. 247-253, 2007 .

• در یک رینولدز ثابت افت فشار 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 ناچیز 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، افت فشار، ضریب اصطکاک پوسته‌ای کاهش و دمای بی‌بعد در طول لوله افزایش می‌یابد،

• بررسی نتایج نشان داد، با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت میانگین، 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 کاهش یافته و کاهش این ضریب برای نانوسیال طلا- روغن نسبت به سایر نانوسیال‌ها بیشتر می‌باشد،

• با افزایش عدد رینولدز فشار استاتیکی افزایش یافته و این درحالی است که نانوسیالات مختلف دارای تغییرات فشار تقریباً ناچیزی هستند و

• افزودن نانو ذرات به روغن بالگرد سبب بهبود خواص انتقال حرارت، خنک‌کاری بهتر موتور، کوچک‌سازی سیستم روان‌کاری موتور، توانایی تحمل بارگذاری‌های زیاد، توانایی پرواز در ارتفاعات بالاتر و در نهایت افزایش قدرت و بازدهی موتور خواهد شد.

۸- قدردانی

با تشکر از مساعدت‌های شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران (پن‌ها).

23. Razi, P., Akhavan-Behabadi, M., and Saeedinia, M. "Pressure Drop And Thermal Characteristics of Cu-Base Oil Nanofluid Laminar Flow in Flattened Tubes Under Constant Heat Flux", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 7, pp. 964-971, 2011 .
24. Ahmadi, H., Rashidi, A., Nouralishahi, A., and Mohtasebi, S.S. "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.
25. Farzin, F., Heris, S. Z., Rahimi, S. "Laminar Convective Heat Transfer and Pressure Drop of TiO₂ Turbine Oil Nanofluid", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 27, No. 1, pp. 127-133, 2013 .
26. Ghazvini, M., Akhavan-Behabadi, M., Rasouli, E., and Raisee, M. "Heat Transfer Properties of Nanodiamond-Engine Oil Nanofluid in Laminar Flow", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 33, No. 6, pp. 525-532, 2012 .
27. Erich, F. "Thermophysical Properties of Materials", North Atlantic Treaty Organization, New York, United States, 1967 .
28. Grimvall, G. "Thermophysical Properties of Materials", Elsevier, North-Holland, 1999 .
29. Pak, B.C. and Cho, Y. I. "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles", *Experimental Heat Transfer an International Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 151-170, 1998 .
30. Xuan, Y. and Li, Q. "Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids", *Journal of Heat transfer*, Vol. 125, No. 1, pp. 151-155, 2003 .
31. He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D., and Lu, H. "Heat Transfer and Flow Behaviour of Aqueous Suspensions of Tio₂ Nanoparticles (Nanofluids) Flowing Upward Through a Vertical Pipe", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 11, pp. 2227-2281 ,2007 .
32. Xuan, Y. and Roetzel, W. "Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 19, pp. 3701-3707, 2000 .
13. Shen, M., Luo, J., Wen, S., and Yao, J. "Nano-Tribological Properties And Mechanisms of the Liquid Crystal as an Additive", *Chinese Science Bulletin*, Vol. 46, No. 14, pp. 1227-1232, 2001 .
14. Wu, Y., Tsui, W., and Liu, T. "Experimental Analysis of Tribological Properties of Lubricating Oils with Nanoparticle Additives", *Wear*, Vol. 262, No. 7, pp. 819-825 ,2007 .
15. Choi, C., Yoo, H., and Oh, J. "Preparation and Heat Transfer Properties of Nanoparticle-In-Transformer Oil Dispersions as Advanced Energy-Efficient Coolants", *Current Applied Physics*, Vol. 8, No. 6, pp. 710-712, 2008 .
16. Hwang, Y., Ahn, Y., Shin, H., Lee, C., Kim, G., Park, H., and Lee, J. "Investigation on Characteristics of Thermal Conductivity Enhancement of Nanofluids", *Current Applied Physics*, Vol. 6, No. 6, pp. 1068-1071, 2006 .
17. Hwang, Y., Park, H., Lee, J., and Jung, W. "Thermal Conductivity and Lubrication Characteristics of Nanofluids", *Current Applied Physics*, Vol. 6, pp. e67-e71, 2006 .
18. Kim, D., Kwon, Y., Cho, Y., Li, C., Cheong, S., Hwang, Y., Lee, J., Hong, D., and Moon, S. "Convective Heat Transfer Characteristics of Nanofluids Under Laminar and Turbulent Flow Conditions", *Current Applied Physics*, Vol. 9, No. 2, pp. e119-e123, 2009 .
19. Ruan, B. and Jacobi. A. M. "Ultrasonication Effects on Thermal and Rheological Properties of Carbon Nanotube Suspensions", *Nanoscale Research Letters*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-14, 2012 .
20. Chen, L., Xie, H., Yu, W., and Li, Y. "Rheological Behaviors of Nanofluids Containing Multi-Walled Carbon Nanotube", *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 32, No. 4, pp. 550-554, 2011 .
21. Vasheghani, M., Marzbanrad, E., Zamani, C., Aminy, M., Raissi, B., Ebadzadeh, T., and Barzegar-Bafroei, H. "Effect of Al₂O₃ Phases on Enhancement of Thermal Conductivity and Viscosity of Nanofluids In Engine Oil", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 11, pp. 1401-1405, 2011 .
22. Harish, S., Ishikawa, K., Einarsson, E., Aikawa, S., Chiashi, S., Shiomi, J., and Maruyama, S. "Enhanced Thermal Conductivity of Ethylene Glycol with Single-Walled Carbon Nanotube Inclusions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 13, pp. 3885-3890, 2012 .