



## Numerical analysis of heat transfer in silicon oxide-titanium oxide hybrid nanofluid based on water and ethylene glycol for cooling

Nasim Momeni Shourakchally<sup>1</sup>, Amir Mohammad Jadidi<sup>2\*</sup>, Mohammad Azadi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MSc. Student, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

<sup>3</sup> Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

\* 35131-19111, Semnan, Iran, [am.jadidi@semnan.ac.ir](mailto:am.jadidi@semnan.ac.ir)

### Article info

#### Article history:

Received: 7 Aug 2022

Revised: 14 Sep 2022

Accepted: 19 Sep 2022

Available online: 19 Sep 2022

#### Keywords:

Nano coolant

Hybrid nanofluid

Computational fluid dynamics

Heat transfer

Pressure drop

<https://doi.org/10.22077/AEC.2022.5533.1013>

### Abstract

Considering the importance of using nanofluids in internal combustion engines, it is important to design an optimal cooling system to reduce the temperature to improve engine performance. Previous studies have shown that the thermal conductivity of nanoparticles can be changed by preparing hybrid nanoparticles. In this study, the ability to increase the heat transfer rate of hybrid nanofluid in internal combustion engines has been investigated numerically for single-phase flow. Hybrid nanofluid is composed of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> on water-ethylene glycol based with different concentrations of nanoparticles in equal volume fraction of the base fluid. The results show that hybrid nanofluids improve the heat transfer rate, reduce the thermal resistance and increase the coefficient of friction. For concentrations of 1 and 2% SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-water-ethylene glycol hybrid nanofluid, the heat transfer coefficient compared to the base fluid increased by 8.26 and 13%, respectively. An increase in Nusselt number for hybrid nanofluids compared to base fluid was recorded at 11.23 and 19.18%. In this study, the values of pressure drop, pumping power and average coefficient of friction are also investigated.

## تحلیل عددی انتقال حرارت در نانوسیال هیبریدی اکسیدسیلیسیوم-اکسیدتیتانیوم بر پایه آب و اتیلن گلیکول برای خنک کاری

نسیم مومنی شورکچالی<sup>۱</sup>، امیرمحمد جدیدی<sup>۲\*</sup>، محمد آزادی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

\* ۳۵۱۳۱-۱۹۱۱۱، سمنان، ایران، [am.jadidi@semnan.ac.ir](mailto:am.jadidi@semnan.ac.ir)

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>با توجه به اهمیت استفاده از نانوسیالات در موتورهای احتراق داخلی، طراحی یک سیستم خنک کننده بهینه برای کاهش دما جهت بهبود عملکرد موتور حائز اهمیت است. در مطالعات پیشین مشخص شده است که هدایت حرارتی نانوذرات می تواند با تهیه نانوذرات هیبریدی تغییر کند. در این مطالعه توانایی افزایش نرخ انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی در موتورهای احتراق داخلی به صورت عددی برای جریان تک فاز بررسی شده است. نانوسیال هیبریدی از اکسیدسیلیسیوم-اکسیدتیتانیوم مبتنی بر آب-اتیلن گلیکول با غلظت های مختلف نانوذرات در کسر حجمی برابر سیال پایه، تشکیل شده است. نتایج نشان می دهد نانوسیالات هیبریدی باعث بهبود نرخ انتقال حرارت، کاهش مقاومت حرارتی و افزایش ضریب اصطکاک می شود. برای غلظت 1 و 2 درصد نانوسیال هیبریدی اکسیدسیلیسیوم-اکسیدتیتانیوم-آب-اتیلن گلیکول ضریب انتقال حرارت نسبت به سیال پایه به ترتیب 8.26 و 13 درصد افزایش مشاهده شد. افزایش عدد ناسلت برای نانوسیال هیبریدی نسبت به سیال پایه 11.23 و 19.18 درصد ثبت شده است. در این مطالعه مقادیر افت فشار، قدرت پمپاژ و متوسط ضریب اصطکاک نیز بررسی شده است.</p>	<p>تاریخچه مقاله: دریافت: ۰۱/۰۵/۱۶ بازنگری: ۰۱/۰۶/۲۳ پذیرش: ۰۱/۰۶/۲۸ نشر برخط: ۰۱/۰۶/۲۸</p> <p>کلمات کلیدی: نانو خنک کننده نانوسیال هیبریدی دینامیک سیالات محاسباتی انتقال حرارت افت فشار</p>

## ۱- مقدمه

افزایش افت فشار و ضریب اصطکاک می‌شوند. اوکلو<sup>۱</sup> و همکاران [۹]، به بررسی سه نوع مختلف از نانوسیالات هیبریدی مبتنی بر اتیلن‌گلیکول ((Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), (Cu-TiO<sub>2</sub>), (TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)) پرداختند. شبیه‌سازی جریان مایع خنک‌کننده در رادیاتور خودرو با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شد. نتایج نشان داد نانوخنک‌کننده هیبریدی Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> منجر به کاهش سریع دما در لایه مرزی می‌شود.

شیان<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۰]، تأثیر نسبت‌های مختلف مخلوط هیبریدی، عدد رینولدز و سرعت ورودی هوا بر عملکرد حرارتی نانو خنک‌کننده ترکیبی از نانوپلاکت‌های گرافن دارای عامل کریوکسیل (CGNP) و نانوذرات دی اکسید تیتانیوم (TiO<sub>2</sub>) در مخلوطی از آب مقطر و اتیلن گلیکول را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد هنگامی که CGNP-TiO<sub>2</sub> (70:30) با غلظت 0.1 درصد وزنی در خنک‌کننده پایه مخلوط شد، به ترتیب برای عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت کلی و اثربخشی رادیاتور به میزان 4.94%، 35.87% و 20.48% افزایش مشاهده شد. می‌توان نتیجه گرفت که نانو خنک‌کننده هیبریدی با نسبت‌های مختلف اختلاط به طور قابل توجهی بر عملکرد حرارتی رادیاتور خودرو تأثیر می‌گذارد.

عباس<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۱]، یک نانوسیال هیبریدی جدید حاوی نانوذرات Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> (50:50) معلق در سیال پایه آب برای بهبود عملکرد حرارتی در لوله آلومینیومی رادیاتور خودرو مورد بررسی قرار دادند. نانوذرات هیبریدی در سه غلظت؛ 0.005، 0.007 و 0.009 درصد حجمی، از 48 تا 56 درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان از 11 تا 15 لیتر بر دقیقه آزمایش شد. مشاهده شد که در دمای ورودی 56 درجه سانتی‌گراد، سرعت جریان 15 لیتر بر دقیقه و غلظت نانوذرات 0.009 درصد حجمی، عدد ناسلت 20.03 درصد و انتقال حرارت 26.7 درصد افزایش یافته است. برای بیشتر از غلظت 0.009 درصد حجمی، گرفتگی نانوذرات، پایداری نانوسیال هیبریدی را کاهش داده و منجر به بدتر شدن عملکرد کلی نانوسیال فوق می‌شود.

سارپلا<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۲]، یک سیستم خنک‌کننده موتور کامیون کلاس 8 را با استفاده از کد کامپیوتری مدل‌سازی کردند. آن‌ها از مخلوط آب و اتیلن گلیکول و آب با درصد حجمی 50:50 و نانوذرات CuO برای خنک‌کاری استفاده نمودند. نتایج کاهش قدرت پمپاژ را تا 88 درصد نانوسیال در مقایسه با سیال پایه و کاهش احتمالی سطح سمت هوای سیال را نشان داد. لئونگ و سایدر [۱۳]، افزایش انتقال حرارت رادیاتور خودرو را با خنک‌کننده‌های مبتنی بر نانوسیال بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که حدود 3.8 درصد از افزایش انتقال حرارت را می‌توان با افزودن 2 درصد ذرات مس در سیال پایه در عدد رینولدز 6000 و 5000 برای هوا و خنک‌کننده به‌دست آورد. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که تقریباً 18.7 درصد کاهش سطح پیشانی هوا با افزودن 2 درصد نانوذرات مس در عدد رینولدز 6000 و 5000 به ترتیب برای هوا و خنک‌کننده حاصل می‌شود. علاوه بر این، آن‌ها هم‌چنین دریافتند که 12.13% قدرت پمپاژ اضافی برای یک رادیاتور با استفاده از نانوسیال از ذرات مس 2% با سرعت جریان حجمی 0.2 متر مکعب بر ثانیه در مقایسه با همان رادیاتور که فقط از خنک‌کننده اتیلن‌گلیکول خالص استفاده می‌کند، مورد نیاز است. پیغمبرزاده و هاشم آبادی [۱۴]، انتقال حرارت جابجایی اجباری را در رادیاتور خودرو به صورت تجربی انجام دادند و عملکرد انتقال حرارت آب خالص و اتیلن‌گلیکول خالص را با مخلوط دوتایی خود مقایسه کردند. آن‌ها گزارش کردند که با افزودن تنها یک درصد حجمی نانوذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به آب یا اتیلن‌گلیکول، افزایش عدد ناسلت در حدود 40 درصد در مقایسه با آب خالص و اتیلن‌گلیکول خالص وجود دارد. آن‌ها هم‌چنین دریافتند که افزایش دمای ورودی سیال عملکرد انتقال حرارت را اندکی بهبود می‌بخشد. افزایش دمای ورودی نانوسیالات مبتنی بر آب از 35 درجه سانتی‌گراد به 50 درجه سانتی‌گراد می‌تواند عدد ناسلت را تا 16 درصد افزایش دهد. برای نانوسیالات مبتنی بر اتیلن‌گلیکول، افزایش دما از 45 تا 60 درجه سانتیگراد حداکثر افزایش 7% را ایجاد می‌کند.

بجام<sup>۱۴</sup> و همکاران [۱۵]، شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، سیالات مختلف هم‌چون آب خالص، آب و اتیلن گلیکول با درصد حجمی 50 و مخلوط آب نانوذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در غلظت‌های 0.05، 0.1 و 0.2 درصد را مورد مطالعه قرار دادند. رژیم جریان آشفته و دمای سیال ورودی 95 درجه سانتی‌گراد بوده است.

در سال‌های اخیر، تحقیقات بر روی نانوسیالات به سرعت افزایش یافته و نشان می‌دهد که نانوسیالات، سیالات مفید انتقال حرارت در کاربردهای مهندسی به‌ویژه افزایش راندمان موتور خودروها هستند. در سال 1995 جوی<sup>۱</sup> و ایستمن<sup>۱</sup> [۱]، برای اولین بار سیالات حاوی ذرات جامد در ابعاد نانومتر را تهیه و نانوسیال نامید. بهبود انتقال حرارت نانوسیالات به غلظت حجمی نانوذرات، هدایت حرارتی نانوذرات و نرخ جریان جرمی وابسته است. تحقیقات نشان داده است که هدایت حرارتی نانوذرات می‌تواند با تهیه نانوذرات هیبریدی تغییر کند. نانوذرات هیبریدی به نانوذراتی می‌گویند که از دو یا چند ماده متفاوت در ابعاد نانومتری تشکیل شده‌اند. سیالات تهیه شده از این نانوذرات، نانوسیال هیبریدی نام دارند. برای دست‌یافتن به بیشترین مقدار انتقال حرارت با استفاده از بهبود رسانایی حرارتی این نانوسیالات، تهیه نانوسیالات هیبریدی مورد توجه قرار گرفته است [۲]. از آنجا که ضریب اصطکاک برای نانوسیالات هیبریدی می‌تواند در تعیین قابلیت استفاده از آن‌ها در برنامه‌های تجاری کاربرد حیاتی داشته باشد، در اینجا به آن می‌پردازیم. نانوسیالات هیبریدی تمام کاربردهای نانوسیالات معمولی به‌خصوص در صنعت هم‌چون استفاده در موتورهای، سلول‌های خورشیدی و مبدل‌های حرارتی را دارند.

پورفرهنگ و همکاران [۳]، اثرات پارامترهای مختلف بر افت فشار جریان نانوسیال در رادیاتور پمپاژ با استفاده از نانوسیال CuO بر پایه آب و اتیلن‌گلیکول (W/EG) در سه دمای 35، 44 و 54 درجه سانتی‌گراد با غلظت حجمی کمتر از 0.8 درصد در پنج نرخ حجمی جریان<sup>۴</sup> (4، 5، 6، 7، 8 لیتر بر دقیقه) را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که حضور نانوذرات باعث افزایش افت فشار نانوسیال می‌شود، که با افزایش غلظت نانوذرات و هم‌چنین کاهش دمای سیال ورودی تشدید شد. هم‌چنین با افزایش نرخ حجمی جریان، شاخص عملکرد افزایش یافت و نشان داده است که کاربرد نانوسیال در نرخ جریان بالاتر، مقرون به صرفه بوده است. داورنژاد و همکاران [۴]، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۵</sup> با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت<sup>۶</sup> را برای نانوذره Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بر پایه آب را در غلظت‌های 0.5، 1، 1.5، 2 و 2.5 درصد و اندازه‌های 20 و 50 نانومتر، در یک لوله دایره‌ای با شار ثابت و جریان آرام را انجام داده‌اند. نتایج ثبت شده، بیانگر کاهش دمای متوسط نانوسیال با افزایش اندازه نانوذره است.

سوخال<sup>۶</sup> و همکاران [۵]، به بررسی تجربی اثرات نانوسیال Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بر پایه آب با دمای ورودی 40 - 90 درجه سانتی‌گراد و غلظت ذره 0 و 1 درصد در لوله تخت عمودی رادیاتور پرداخته‌اند. افت فشار با افزایش غلظت حجمی ذرات و عدد رینولدز افزایش می‌یابد، در حالی که با افزایش دمای ورودی سیال کاهش می‌یابد. هم‌چنین ضریب اصطکاک و توان پمپاژ با غلظت ذرات افزایش یافت. ساندر<sup>۸</sup> و همکاران [۶]، آزمایشات ضریب اصطکاک را برای نانوسیال هیبرید MWCNT-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بر پایه آب که در یک لوله جریان داشت را انجام دادند و برای غلظت 0.3 درصد حجمی مشاهده کردند که ضریب اصطکاک نانوسیال در رینولدز 3000 و 22000 به ترتیب 1.11 برابر و 1.18 برابر شده است. سرور و همکاران [۷]، با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی بهبود عملکرد حرارتی نانوسیالات هیبریدی Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> بر پایه آب در یک میکروکانال دولایه را بررسی کردند. نتایج نشان داد افزایش غلظت حجمی نانوسیالات، مقاومت حرارتی را کاهش و باعث افزایش توان پمپاژ می‌شود.

رمضان<sup>۸</sup> و همکاران [۸]، عملکرد حرارتی نانوسیالات هیبریدی Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> بر پایه آب و اتیلن گلیکول با درصد 40 و 60 را در غلظت‌های مختلف 0.05 تا 0.3 درصد با نرخ جریان نانوسیال سه هیبریدی بین 2 تا 12 لیتر بر دقیقه و دمای 70 درجه سانتی‌گراد را به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد افزایش غلظت حجمی نانوسیال سه هیبریدی و دما، موجب افزایش بهبود عملکرد حرارتی و

1. Choi
2. Eastman
3. Water/Ethylene Glycol
4. Flow Rate
5. Computational Fluid Dynamics (CFD)
6. Ansys Fluent
7. Sokhal
8. Sundar
9. Ramadhan

10. Okello
11. Xian
12. Abbas
13. Saripella
14. Bejjam

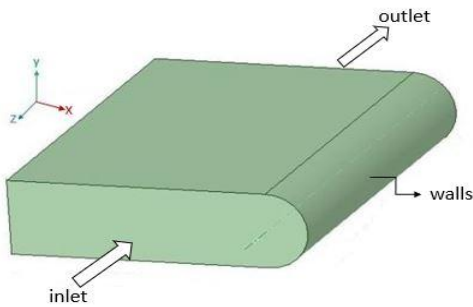


Fig. 2. Geometry of the problem.

شکل ۲. هندسه مسئله.

### ۱-۲- معادلات حاکم

مایع خنک کننده درون رادیاتور شامل آب و اتیلن گلیکول با درصد حجمی 50:50 و نانوذرات هیبریدی  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  با کسر حجمی 1 و 2 درصد می باشد. از اتلاف لزجت صرف نظر شده است. سیال تراکم ناپذیر، تک فاز، سه بعدی و جریان آرام در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم به شرح زیر می باشند:

رابطه پایستگی جرم [۱۷]:

$$(\nabla \cdot V) = 0 \quad (1)$$

رابطه پایستگی مومنوم [۱۷]:

$$(\nabla \cdot V \rho_{nf} (\nabla \cdot V) V = -\nabla p + \mu_{nf} \nabla^2 V) = 0 \quad (2)$$

رابطه پایستگی انرژی [۱۷]:

$$\rho_{nf} C_{pnf} (\nabla \cdot V) T = k_{nf} \nabla^2 T \quad (3)$$

در معادلات فوق،  $p$  و  $V$  و  $T$  به ترتیب فشار، بردار سرعت جریان و دما هستند. علاوه بر این،  $\rho_{nf}$ ،  $\mu_{nf}$ ،  $C_{pnf}$  و  $k_{nf}$ ؛ چگالی، لزجت دینامیکی، گرمای ویژه و هدایت حرارتی سیال هستند.

مطالعات اخیر نشان می دهد که کسر حجمی پایین نانوذرات در سیال پایه باعث می شود که نانوسیال مانند یک سیال تک فاز رفتار کند [۱۸]. جهت به دست آوردن خواص نانوسیالات مورد استفاده در این مطالعه در دمای 60 درجه سانتی گراد به ترتیب از روابط زیر استفاده شده است.

چگالی موثر نانوسیال هیبریدی، تعیین می شود [۱۷]:

$$\rho_{hnf} = (1 - \varphi) \rho_f + \varphi_{np1} \rho_{np1} + \varphi_{np2} \rho_{np2} \quad (4)$$

ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت نانوسیال هیبریدی به صورت زیر محاسبه می شود [۱۷]:

$$C_{p,hnf} = \frac{(1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi_{np1}(\rho C_p)_{np1} + \varphi_{np2}(\rho C_p)_{np2}}{\rho_{hnf}} \quad (5)$$

لزجت دینامیکی و رسانایی حرارتی نانوسیال هیبریدی به ترتیب در زیر ارائه شده است [۱۷]:

$$\mu_{hnf} = \frac{\mu_f}{(1.0 - 34.87 \left(\frac{dp}{df}\right)^{-0.3} \varphi^{1.03})} \quad (6)$$

نتایج نشان داد که 0.05 درصد حجمی  $\text{Al}_2\text{O}_3$  بهترین عملکرد را دارد. میزان افزایش عدد ناسلت 10.64 درصد و ضریب انتقال حرارت 3.82 درصد را نسبت به آب خالص گزارش کردند.

آلوس<sup>۱</sup> و همکاران [۱۶]، مطالعه تطبیقی مایع خنک کننده موتور با استفاده از شبیه سازی انتقال حرارت مزدوج<sup>۲</sup> را انجام دادند. ابتدا از مخلوط 50 درصد اتیلن گلیکول و 50 درصد آب به عنوان خنک کننده پوشش آبی استفاده شد و سپس از نانوسیالات مبتنی بر  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{CuO}$  استفاده شد. افزودن نانوذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{CuO}$  در سیال پایه باعث بهبود ظرفیت خنک کننده شد و مقدار عدد ناسلت را به ترتیب 12.25% و 16.64% افزایش داد و در نتیجه انتقال حرارت کل 2.22% برای نانوسیال با  $\text{Al}_2\text{O}_3$  افزایش یافت. برای نانوسیال  $\text{CuO}$  مقدار افزایش 2.79 درصد بوده است. اجرای نانوسیال ها پیامدهای منفی در سرعت های جریان به همراه داشت و میانگین سرعت خنک کننده را تا 39 درصد برای نانوسیال  $\text{CuO}$  کاهش داد.

تاکنون تحقیقات بسیاری در مورد نانوسیالات صورت گرفته است، زیرا خواص نانوسیالات در هر دما و غلظت خاص، متفاوت می باشد. از طرفی برای سیال پایه با کسر حجمی مختلف، تغییرات ثبت شده است. بهبود خواص نانوسیالات منجر به تولید نانوسیالات هیبریدی شده که همان تاثیرات خواص را به خاطر هم ماهیت بودن با نانوسیالات تک دارند. تاکنون پژوهش های بسیاری در زمینه انتقال حرارت با استفاده از نانوسیالات صورت گرفته است. بررسی ادبیات نشان داد که نانوسیالات معمولی به طور گسترده در رادیاتور خودرو استفاده می شود. با این حال، استفاده از نانوسیال های هیبریدی مختلف در رادیاتور نیاز به توجه بیشتری دارد.

در این مطالعه؛ با استفاده از شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۳</sup>، به افزایش نرخ انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی اکسیدسلسیوم- اکسیدتیتانیوم ( $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ ) در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول با درصد حجمی برابر، در دمای 60 درجه سانتی گراد، برای اولین بار پرداخته شده است. هم چنین چندین پارامتر مانند مقاومت حرارتی، عدد ناسلت، افت فشار، قدرت پمپاژ و ضریب اصطکاک در غلظت های حجمی مختلف مورد بررسی قرار گرفته اند.

### ۲ مدل هندسی

هندسه مورد تجزیه و تحلیل در اینجا، همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده، یک لوله مسطح در رادیاتور خودرو با پره های صفحه ای، برای خنک کردن مایع درون لوله با استفاده از جریان هوای بیرون می باشد. لوله های مسطح آیرودینامیکی، بهترین عملکرد قابل حصول در مقایسه با لوله های دایره ای را دارند. زیرا لوله مسطح دارای افت فشار نسبتاً کمتری در سمت هوا، با افزایش سطح انتقال حرارت، دارد [۱۷]. در این تحقیق، یکی از لوله های رادیاتور جهت کوتاه تر شدن روند محاسبات، طبق شکل (۲) ساده سازی شده است. ابعاد هندسه مسئله 8.09، 2.54 و 500 میلی متر به ترتیب در جهت محورهای X، Y و Z می باشد.

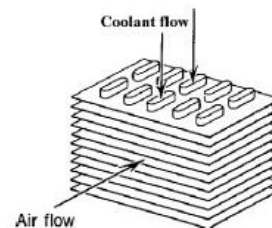


Fig. 1. Specifications of a car radiator [17].

شکل ۱. مشخصات یک رادیاتور اتومبیل [۱۷].

1. Alves  
2. Conjugate Heat Transfer (CHT)  
3. Computational Fluid Dynamics

افت فشار در طول لوله به صورت زیر محاسبه شده است [۱۷]:

$$\Delta p = C_{f,avg} \frac{4L}{D_h} \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (14)$$

توان پمپاژ مورد نیاز برای گردش سیال [۱۷]:

$$W = AV(\Delta p) \quad (15)$$

### ۲-۲- شرایط مرزی

مطابق با شکل (۱)، در ورودی لوله؛ دما و سرعت به صورت یکنواخت تعریف شده‌اند. مقدار دما؛ 60 درجه سانتی‌گراد و سرعت؛ به صورت سرعت ورودی<sup>۳</sup> و مقدار آن 0.3952 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است، خروجی؛ به صورت فشار خروجی<sup>۴</sup> و دمای آن 30 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده و در تمام طول دیواره‌های لوله، شرط عدم لغزش برقرار است. ضریب انتقال حرارت همرفتی برای سمت هوای لوله  $h_0 = 50 \text{ (Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)}$  و دمای هوای محیط، 30 درجه سانتی‌گراد (303 درجه کلوین) در نظر گرفته شده است. این  $h_0$  برابر با حرکت اتومبیل با سرعت 72 کیلومتر بر ساعت است [۱۷]. جنس لوله رادیاتور مورد نظر، آلومینیوم بوده، طول آن 0.5 متر و قطر هیدرولیک  $D_h = 4.577 \times 10^{-3} \text{ m}$  می‌باشد. برای سهولت در انجام محاسبات و کوتاه شدن مدت زمان شبیه‌سازی در نرم‌افزار، مقطع لوله به صورت متقارن در نظر گرفته شده است.

### ۳ روش تحقیق

#### ۳-۱- روش حل مسئله

معادلات حاکم با شرایط مرزی ذکر شده در بالا، به صورت سیستم‌های غیرخطی<sup>۵</sup> حل شده‌اند. برای حل معادلات سرعت و فشار از الگوریتم جفت شده<sup>۶</sup> استفاده شد. برای جداسازی جملات همرفتی<sup>۷</sup> از روش پادبادسو مرتبه دوم<sup>۸</sup> و برای گسسته سازی جملات بخش<sup>۹</sup>، از روش تفاضل مرکزی<sup>۱۰</sup> استفاده شده است. در طول فرآیند حل، باقی‌مانده‌ها به دقت بررسی می‌شوند. مقدار باقی‌مانده‌ها بر روی عدد  $10^{-6}$  تنظیم شده است تا با اتمام راه حل تکراری برای باقی‌مانده‌های فوق، نتایج همگرا شود.

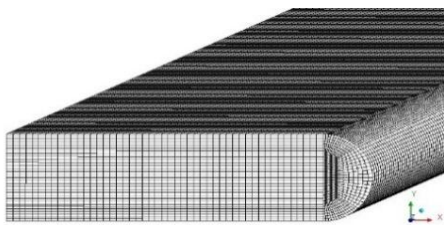


Fig. 3. Meshing plan in the present analysis.

شکل ۳. طرح شبکه بندی در تحلیل حاضر.

#### ۲-۳- استقلال نتایج از شبکه

یک شبکه سه‌بعدی، که در شکل (۳) نشان داده شده، به صورت بی‌سازمان تولید شده است. به منظور تایید استقلال از شبکه و رسیدن به حداقل تعداد عناصر شبکه، که می‌تواند نتایج محاسباتی دقیق را به همراه داشته باشد، چهار شبکه‌بندی مختلف مطابق با جدول (۲)، برای گسسته‌سازی انتخاب شده‌اند. در هر مورد راه‌حل برای محاسبه دماها و سرعت‌ها در معادلات ذکر شده در بالا، همگرا شد، نتایج به دست آمده و بیان شده است.

3. Inlet Velocity
4. Pressure Outlet
5. Nonlinear
6. Coupled Systems
7. Convective Terms
8. Second Order Upwind
9. Diffusive Terms
10. Central-Differenced

$$K_{hmf} =$$

$$K_f (1. + 4.4 Re_p^{0.4} Pr^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10} \left(\frac{\varphi_{np1} K_{np1} + \varphi_{np2} K_{np2}}{\varphi K_f}\right)^{0.03} \varphi^{0.66}) \quad (V)$$

در معادلات (۴) تا (۷)،  $\rho$ ،  $C_p$ ،  $\mu$ ، و  $K$  به ترتیب نشان‌دهنده چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، لزجت دینامیکی و هدایت حرارتی هستند. اندازه نانوذرات و مولکول‌های سیال پایه به ترتیب با  $dp$  و  $df$  در معادله (۶) نشان داده شده است. مقادیر این پارامترها برای هر نانوذره در جدول (۱) آورده شده است.

غلظت حجمی نانوذرات در نانوسیال هیبریدی را با  $\varphi$  نشان می‌دهیم و می‌توان آن را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\varphi = \varphi_{np1} + \varphi_{np2} \quad (A)$$

زیرنویس‌های  $np1$  و  $np2$  به ترتیب نشان‌دهنده اولین و دومین نانوذرات در نانوسیال هیبریدی هستند.

عدد رینولدز نانوذرات و عدد پراوتل سیال پایه در معادله (۷) به شرح زیر تعریف شده است [۷]:

$$Re_p = \frac{2\rho_f K_b T}{\pi \mu_f^2 d_p} \quad (9)$$

$$Pr = \frac{C_{p,f} \mu_f}{k_f} \quad (10)$$

ثابت بولتزن که در معادله (۹) تعریف شده است [۷]:

$$K_b = 1.380649 \times 10^{-23} \text{ (JK}^{-1}\text{)} \quad (11)$$

نیبی [۲۲]، هدایت حرارتی نانوذرات و نانوسیال هیبریدی با کسر حجمی 1 و 2 درصد را با استفاده از دستگاهی به نام KD2<sup>۱</sup> به صورت تجربی اندازه‌گیری نموده است، و برای اندازه‌گیری لزجت به طور تجربی، از لزجت‌سنج استوانه‌ای بروکفیلد<sup>۲</sup> استفاده کرده است. چگالی نانوذرات [۱۹] و گرمای ویژه نانوذرات [۲۰] و سیال پایه با درصد حجمی 50:50 در دمای 60 درجه سانتی‌گراد [۲۱]، در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. چگالی، گرمای ویژه و قطر نانوذرات و سیال پایه [۱۹، ۲۰، ۲۱].

Table 1. Density, specific heat and diameter of nanoparticles and base fluid [19, 20, 21].

Property(unit)	Sio <sub>2</sub>	Tio <sub>2</sub>	W/EG
Density (kg m <sup>-3</sup> )	2400	3900	1055
Specific heat (Jkg <sup>-1</sup> k <sup>-1</sup> )	745	692	3596
Diameter (m)	25 * 10 <sup>-9</sup>	18 * 10 <sup>-9</sup>	-

ضریب انتقال حرارت برای جریان داخلی درون لوله [۱۷]:

$$h = \frac{q''}{T_w - T_{bulk}} \quad (12)$$

عدد ناسلت نیز به شرح زیر می‌باشد [۱۷]:

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (13)$$

1. Decagon Devices, WA, USA
2. DV-1-PRIME Model



جدول ۲. مطالعات استقلال از شبکه.

Table 2. Mesh independence studies.

Mesh	Number of elements	Speed (ms <sup>-1</sup> )	Temperature (K)
Mesh 1	360000	0.628076	362.997192
Mesh 2	477750	0.630197	362.998169
Mesh 3	616000	0.630056	362.998291
Mesh 4	776250	0.6306318	362.998505

همان طور که از جدول (۲) پیداست، شبکه بندی ۱ درشت ترین شبکه بوده است و نتایج شبکه بندی های ۲، ۳ و ۴ نزدیک به هم می باشند. بنابراین استقلال شبکه برای شبکه بندی ۲ به دست آمده است. پس از این مطالعه ی شبکه، تمام محاسبات با شبکه بندی ۲ اجرا شده است.

### ۳-۳- صحنه گذاری مدل

پس از مدل سازی اولیه، شبیه سازی به صورت تک فاز، تحت جریان آرام، تراکم ناپذیر و شرایط پایه، صورت گرفت. جهت محاسبات و حل معادلات، مدل مورد استفاده در این تحقیق، با مطالعات واجهه و داس [۱۷]، برای نانوذره CuO با کسر حجمی ۱ و ۲ درصد در حضور سیال عامل آب و اتیلن گلیکول با درصد حجمی ۴۰ و ۶۰، اعتبار سنجی شده است. هندسه مورد مطالعه مربوط به لوله مسطح رادیاتور مینیون کرایسلر<sup>۱</sup> به طول ۰.۵ متر بوده که نتایج مدل عددی به کار رفته در این تحقیق با نتایج مرجع [۱۷]، مقایسه شده اند.

شکل (۴)، (۵) و (۶) ضریب اصطکاک در طول لوله، به ترتیب برای سیال پایه و نانوذرات CuO با غلظت های ۱ و ۲ درصد، برای یک سرعت ورودی یکسان، نشان داده شده است.

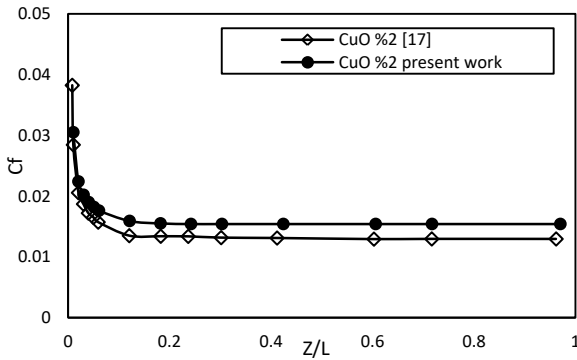


Fig. 6. Model validation diagram with reference simulation results [17], in the presence of CuO nanoparticles with a concentration of 2%.

شکل ۶. نمودار صحنه گذاری مدل با نتایج شبیه سازی [۱۷]، در حضور نانوذره CuO با غلظت ۲ درصد.

مشاهده می شود که ضریب اصطکاک با افزایش کسر حجمی نانوذره افزایش می یابد. در تمام موارد سرعت ورودی جریان یکسان است. نتایج در عدد رینولدز ۲۰۰۰ ثبت شد. با توجه به شکل (۴) نتایج حاصل از این شبیه سازی با داده های گزارش شده از مطالعه واجهه و همکاران [۱۷]، مطابقت بسیار خوبی دارد. صحنه گذاری نتایج با میانگین خطای ۱۱ درصد انجام شد.

### ۴- بحث و نتایج

#### ۴-۱- ضریب اصطکاک

جریان آرام با نسبت طول به قطر زیاد، یک جریان توسعه یافته خواهد شد، این بدین معناست که توزیع سرعت در هر مقطع از لوله یکسان است، یعنی پروفیل سرعت در امتداد جریان تغییر نمی کند. ضریب اصطکاک که تابعی از تنش دیواره می باشد، در ورودی جریان، از آنجا که در طول لوله گرادیان سرعت وجود دارد، متغیر است و با توسعه یافتگی، به یک مقدار ثابت می رسد [۲۳].

شکل (۷)، تغییرات ضریب اصطکاک سیال خنک کننده در امتداد کانال را نشان می دهد. نانوسیال هیبریدی در تمام کسر حجمی ها به صورت تک فاز مدل سازی شده است. همان طور که انتظار می رفت، افزایش کسر حجمی نانوذرات ضریب اصطکاک جریان را افزایش می دهد. این پدیده ناشی از افزایش لزجت دینامیکی نانوسیال نسبت به سیال پایه است [۶]. به عنوان مثال استفاده از نانوسیال SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> با کسر حجمی ۱ و ۲ درصد، ضریب اصطکاک را به ترتیب ۱۱.۷ درصد و ۴۴.۷ درصد نسبت به سیال پایه افزایش می دهد. عدنان و همکاران [۲۴] برای نانوسیال منفرد TiO<sub>2</sub> سیال پایه آب در همان غلظت ۱ و ۲ درصد مقدار ضریب اصطکاک ۱۲ درصد را ثبت کرده اند. مومنی و همکاران [۲۵] متوسط ضریب اصطکاک برای نانوسیال منفرد SiO<sub>2</sub> بر پایه آب و اتیلن گلیکول با کسر حجمی ۱ و ۲ درصد را ۲۳ و ۹۳ درصد و برای نانوسیال منفرد TiO<sub>2</sub> با کسر حجمی ۱ و ۲ درصد به ترتیب ۲.۲ و ۱۷ درصد ثبت کرده اند. مطالعات نشان می دهد برای کسر حجمی با درصدهای بالاتر، شبیه سازی به صورت تک فاز، رفتار جریان نانوذرات در سیال پایه را به خوبی توصیف نمی کند. با توجه به شکل (۷) می توان بیان کرد که با افزایش لزجت نانوسیال هیبرید از ۱ درصد به ۲ درصد به اندازه ۱.۹۱ درصد، مقدار میانگین ضریب اصطکاک به اندازه ۲۱.۱۶ درصد افزایش پیدا کرده است. و برای ۲ درصد به ۳ درصد به ترتیب ۴.۵ و ۰.۵۳ درصد افزایش مشاهده شده است.

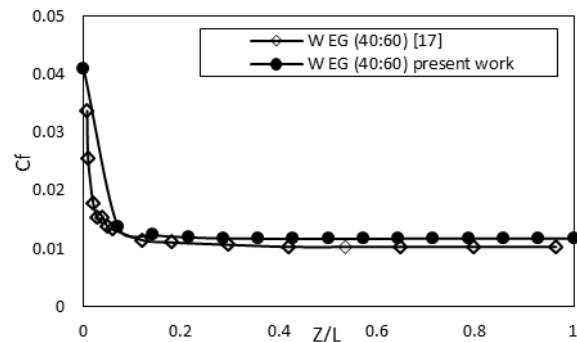


Fig. 4. Model validation diagram with reference simulation results [17], without the presence of CuO nanoparticles.

شکل ۴. نمودار صحنه گذاری مدل با نتایج شبیه سازی مرجع [۱۷]، بدون حضور نانوذره CuO.

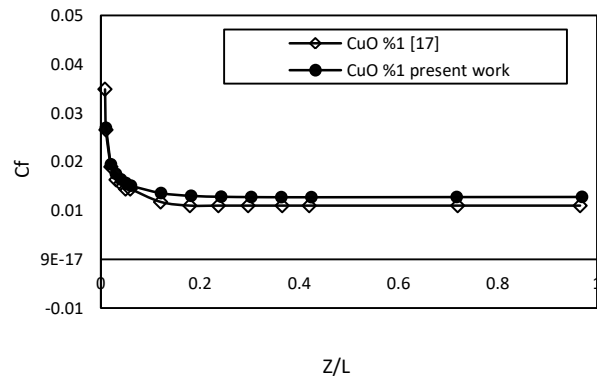


Fig. 5. Model validation diagram with reference simulation results [17], in the presence of CuO nanoparticles with a concentration of 1%.

شکل ۵. نمودار صحنه گذاری مدل با نتایج شبیه سازی مرجع [۱۷]، در حضور نانوذره CuO با غلظت ۱ درصد.

1. Chrysler Minivan

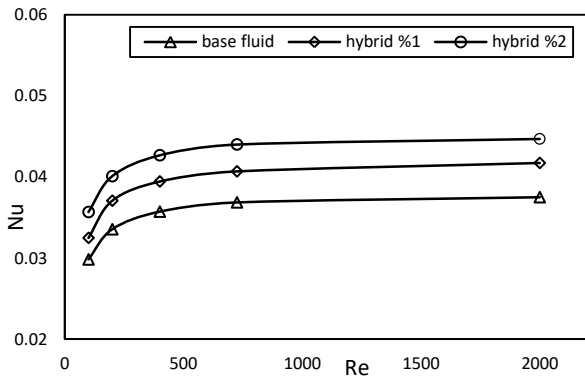


Fig. 8. The graph of changes in Nusselt number in different Reynolds numbers.

شکل ۸. نمودار تغییرات عدد ناسلت در اعداد رینولدز مختلف.

#### ۴-۴- توان پمپاژ

تغییرات توان پمپاژ مورد نیاز در اعداد رینولدز مختلف در شکل (۹)، آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هنگامی که عدد رینولدز افزایش می‌یابد، افزایش قابل توجهی در قدرت پمپاژ وجود دارد. مثلاً برای نانوسیال هیبرید با غلظت ۲ درصد در عدد رینولدز ۷۲۵، ۳۰۲ برابر مقدار مربوطه در عدد رینولدز ۴۰۰ می‌باشد. همچنین، قدرت پمپاژ در رینولدز ۲۰۰۰، ۷۰۰ برابر مقدار متناظر در عدد رینولدز ۷۲۵ می‌باشد. در واقع در غلظت‌های پایین، تفاوت بین قدرت پمپاژ مورد نیاز کاهش می‌یابد.

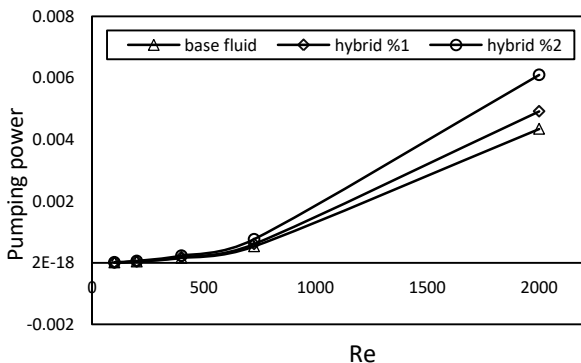


Fig. 9. The changes of pumping power in different Reynolds numbers.

شکل ۹. تغییرات قدرت پمپاژ در اعداد رینولدز مختلف.

شکل فوق اثر غلظت ذرات را بر قدرت پمپاژ در اعداد رینولدز ثابت، نشان می‌دهد. به‌طوری‌که توان مورد نیاز پمپاژ برای نانوسیال  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ -آب-اتیلن گلیکول با کسر حجمی ۲ درصد در رینولدز ۲۰۰۰، ۲۴ برابر بیشتر از همان نانوسیال در غلظت ۱ درصد در همان عدد رینولدز است و ۴۰ درصد بیشتر نسبت به سیال پایه می‌باشد.

#### ۴-۵- افت فشار

میزان افت فشار و متوسط ضریب اصطکاک حاصل از شبیه‌سازی نانوذرات در طول لوله بیضوی رادیا تور مورد مطالعه، در جدول (۴)، گزارش شده است. همان‌طور که در معادله (۱۴) دیده می‌شود، افت فشار با ضریب اصطکاک رابطه مستقیم دارد، به‌طوری‌که با افزایش ضریب اصطکاک، افت فشار نیز افزایش می‌یابد.

طبق جدول (۴)؛ مطابق با مطالعات پیشین، با افزایش کسر حجمی نانوذرات هیبریدی، افت فشار افزایش می‌یابد. این مشاهدات با نتایج گزارش شده از مطالعه مدهش<sup>۱</sup> و همکاران [۲۷]، مطابقت دارد. افزایش افت فشار برای کسر حجمی ۱ و ۲ به‌ترتیب به میزان ۱۳.۱ و ۳۹.۷ درصد و برای مدهش و همکاران، عدد ۱۴.۹ درصد

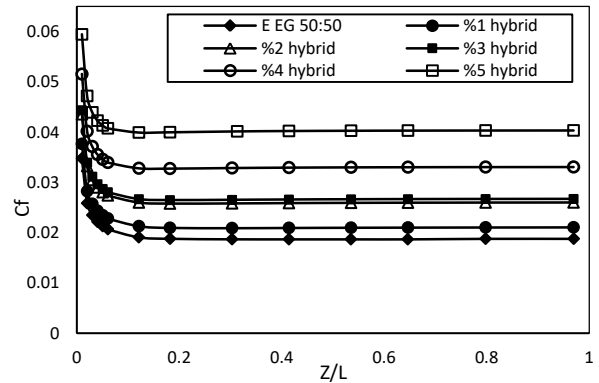


Fig. 7. The graph of changes in friction coefficient along the pipe for the nanofluids studied in this research.

شکل ۷. نمودار تغییرات ضریب اصطکاک در امتداد لوله به ازای نانوسیالات مورد مطالعه در این تحقیق.

#### ۴-۲- ضریب انتقال حرارت

استفاده از نانوذرات هیبریدی به عنوان فاز پراکنده در آب می‌تواند به طور قابل توجهی انتقال حرارت همرفتی را در رژیم جریان آرام افزایش دهد و با افزایش عدد رینولدز و همچنین غلظت ذرات تحت شرایط این کار افزایش می‌یابد.

در جدول (۳)، مشاهده می‌شود ضریب انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی برای غلظت ۱ و ۲ درصد نسبت به سیال پایه به‌ترتیب ۸.۲۶ و ۱۳ درصد افزایش داشته است. در واقع بر اساس افزایش نسبت خواص، نانوسیال هیبرید  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  به‌عنوان یک نانوسیال خوب انتقال حرارت، برای غلظت‌های حجمی بالاتر از ۱ درصد، است. این بیان با نتایج تجربی نایل و همکاران [۲۶]، که برای غلظت ۳ درصد از نانوسیال هیبرید  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  افزایش انتقال حرارت در دمای ۸۰ درجه تا ۲۲.۸ درصد را نشان دادند، تطابق خوبی دارد.

جدول ۳. ضریب انتقال حرارت، عدد ناسلت متوسط و توان پمپاژ.

Table 3. Heat transfer coefficient, average Nusselt number, and pumping power.

Type of nanofluid (volume percentage)/ Parameter	W/EG (50:50)	$\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ (1)	$\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ (2)
Heat transfer coefficient	78.114	84.566	88.243
Average Nusselt number	0.03750	0.04172	0.04469
Pumping power (W)	0.00434	0.00491	0.00609

#### ۴-۳- عدد ناسلت

در شکل (۸)، تغییرات عدد ناسلت در اعداد رینولدز ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۷۲۵ و ۲۰۰۰ نشان داده شده است. تغییرات نشان می‌دهد که عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز جریان، افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش غلظت نانوذرات هیبرید، افزایش عدد ناسلت حاصل خواهد شد. در واقع اضافه کردن کسر حجمی باعث به‌دست آمدن اعداد ناسلت بالاتر می‌شود.

همان‌گونه که در جدول (۳)، گزارش شده است؛ بیشترین عدد ناسلت برای کسر حجمی ۲ درصد از نانوسیال هیبرید، نسبت به سیال پایه، مخلوط آب و اتیلن گلیکول، برابر با ۱۹.۱۸ درصد می‌باشد. درحالی‌که بیشترین عدد ناسلت برای نانوسیال منفرد  $\text{SiO}_2$  و  $\text{TiO}_2$  در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول برای کسر حجمی ۱ و ۲ درصد در همان دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد ۷.۳ درصد ثبت شده است [۲۵]. بنابراین افزودن نانوسیال هیبریدی به سیال پایه باعث بهبود عدد ناسلت نسبت به نانوسیال منفرد می‌شود.

<sup>1</sup>. Madhesh

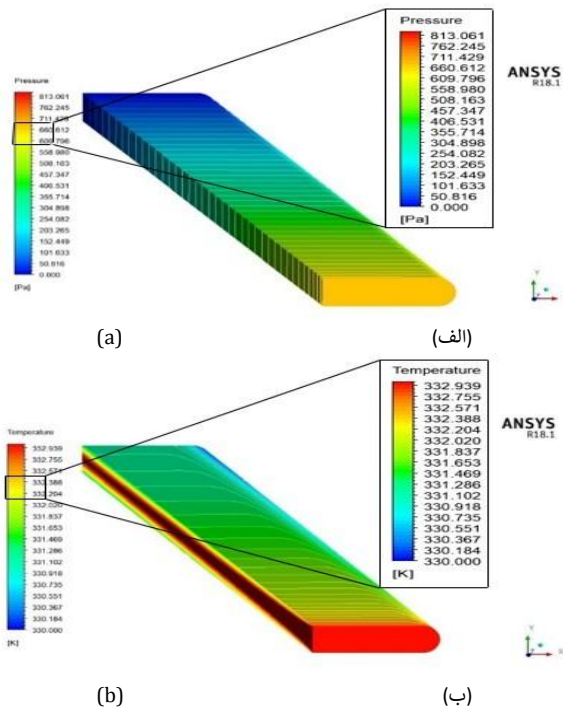


Fig. 10. (a) pressure contour - base fluid and (b) temperature contour - base fluid.

شکل ۱۰. (الف) کانطور فشار- سیال پایه و (ب) کانطور دما- سیال پایه.

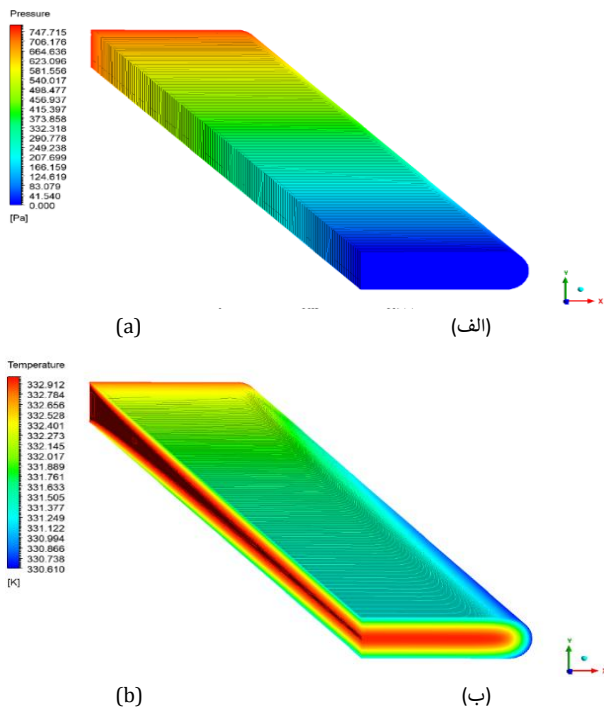


Fig. 11. (a) pressure contour - 1% hybrid nanofluid, (b) temperature contour - 1% hybrid nanofluid.

شکل ۱۱. (الف) کانطور فشار- نانوسیال هیبرید ۱ درصد، (ب) کانطور دما- نانوسیال هیبرید ۱ درصد.

برای کسر حجمی ۲ درصد گزارش شده است که البته این اختلاف ناشی از اختلاف نوع ترکیبات مورد استفاده است. شایان ذکر است نانوسیال مدھش و همکاران Cu-TiO<sub>2</sub> است.

جدول ۴. ضریب انتقال حرارت، متوسط ضریب اصطکاک و افت فشار نانوسیال هیبرید و نانوسیال منفرد.

Table 4. Heat transfer coefficient, average friction coefficient and pressure drop of hybrid nanofluid and single nanofluid.

Type of nanofluid	Volume percentage	Average friction coefficient	Pressure drop (Pa)
W/EG	50:50	0.019641	681.218
SiO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub>	1	0.021949	770.623
SiO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub>	2	0.028438	956.075
SiO <sub>2</sub>	1	0.0243273	842.071
SiO <sub>2</sub>	2	0.0379684	1302.74

همانطور که پیش از این گفته شد، استفاده از نانوسیال هیبریدی افت فشار را افزایش می‌دهد. در نتیجه این مسئله سبب افزایش توان پمپاژ سیستم می‌گردد. این مشاهدات با نتایج مطالعه سرور و همکاران [۷]، مطابق است. این افزایش توان پمپاژ برای غلظت‌های ۱، ۲ به ترتیب ۱۳.۴، ۴۰ نسبت به سیال پایه می‌باشد (به جدول ۳) مراجعه شود.

باید توجه داشت افزودن نانوذرات هیبریدی به سیال پایه رادیاتور خودرو، رفتار رئولوژیکی این سیال را به شدت تغییر می‌دهد چرا که:

نانوسیال مبتنی بر اتیلن گلیکول دارای مزایایی نسبت به نانوسیال مبتنی بر آب از نظر پایداری و نقطه انجماد پایین است [۲۸].

لزجت نسبی نانوسیالات هیبریدی با افزایش غلظت نانوذرات به دلیل تشکیل خوشه‌ها افزایش و با افزایش دما کاهش یافت [۲۹].

هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی نسبت به نانوسیالات مونو و سیال پایه نسبتاً بالاتر است. با این حال، افت فشار و ضریب اصطکاک در مورد نانوسیالات هیبریدی کمی بیشتر است [۲۹].

افزودن نانوذرات بالاتر از حد معین، نرخ انتقال حرارت را به دلیل افزایش پیرویه لزجت دینامیکی کاهش می‌دهد [۳۰].

پایداری نانوسیال هیبریدی به طور مستقیم بر هدایت حرارتی آن تأثیر می‌گذارد و هدایت حرارتی تا حد زیادی به خواص سیالات پایه بستگی دارد [۳۱].

در شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) به ترتیب کانطور دما و افت فشار سیال پایه و نانوسیالات هیبریدی در غلظت‌های ۱ و ۲ درصد حجمی مورد استفاده نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها تغییرات دما در محدوده ۳۳۰ الی ۳۳۳ کلوین و تغییرات فشار در محدوده صفر تا ۸۱۳ پاسکال ثبت شده است. کانطورها نشان می‌دهند که با افزایش غلظت نانوذرات، طول ناحیه توسعه‌یافته هیدرولیکی تغییر می‌کند این بیان، به این معناست که سرعت جریان زودتر بکنواخت شده و جریان زودتر توسعه‌یافته و پایا می‌گردد.

برای اعداد رینولدز ثابت، افزودن نانوذرات منجر به کاهش دمای دیواره، کاهش مقاومت حرارتی می‌شود، اما توان پمپاژ مورد نیاز را افزایش می‌دهد. از طرفی کاهش دما در دبی حجمی ثابت، ناچیز است [۷].

در واقع همان‌طور که مشخص است گرادیان فشار هنگام استفاده از نانوسیال بیشتر از سیال پایه است. زیرا افت فشار به تنش برشی دیواره بستگی دارد [۳۲]، که آن‌هم در جریان آرام به لزجت وابسته است. از طرفی استفاده از نانوسیالات، دمای سیال درون لوله را کاهش می‌دهند. این مورد در کانطورهای دما در شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) (ب) به‌طور واضح دیده می‌شود.

❖ افزودن 1 و 2 درصد نانوذرات هیبریدی به سیال پایه در دمای 60 درجه سانتی‌گراد باعث بهبود انتقال حرارت هدایت به‌ترتیب به‌مقدار 9.38 و 16.3 درصد می‌شود.

مدل تک فاز تا یک حدی از غلظت نانوذرات، نتایج درستی را می‌دهد. از کسر حجمی 3 درصد به بالا، نتایج به گونه‌ای است که توصیه می‌شود شبیه‌سازی جریان به‌صورت دوفازی انجام شود تا آثار ته‌نشینی و پایداری نانوذرات در سیال پایه به خوبی مدل‌سازی شود.

### ۶ فهرست علائم

$A$	مساحت ( $m^2$ )
$C_f$	ضریب اصطکاک
$C_p$	گرمای ویژه در فشار ثابت ( $Jkg^{-1}K^{-1}$ )
$D_p$	قطر نانوذره (nm)
$D_f$	قطر ذره سیال پایه (nm)
$D_h$	قطر هیدرولیک (m)
$h$	ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )
$k$	هدایت حرارتی ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )
$L$	طول لوله (m)
$Nu$	عدد ناسلت
$p$	فشار (Pa)
$Pr$	عدد پرانتل
$Re$	عدد رینولدز
$T$	دما (K)
$T_{fr}$	دمای انجماد (K)
$V$	سرعت ( $ms^{-1}$ )
$W$	توان (Watt)
$Z$	موقعیت محوری محلی (m)

### علائم یونانی

$\Delta p$	افت فشار در لوله (Pa)
$\varphi$	غلظت حجمی نانوذره (%)
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )
$K_b$	ثابت بولتزمن ( $JK^{-1}$ )
$\tau$	تنش برشی (Pa)

### زیرنویس‌ها

$avg$	متوسط
$bulk$	کلی
$f$	سیال پایه
$fr$	نقطه انجماد
$h$	هیدرولیک
$hnf$	نانوسیال هیبرید
$np1$	نانوذره اول
$np2$	نانوذره دوم
$p$	نانوذره
$w$	دیواره

### ۷ مراجع

- [1] S. U. S. Choi, J. A. Eastman, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", ASME international mechanical engineering congress and exposition, 1995.
- [2] H. Babar, H. M. Ali, "Towards hybrid nanofluids: preparation, thermophysical properties, applications, and challenges", Journal of Molecular Liquids, Vol. 281, pp. 598-633, 2019.
- [3] S. Pourfarhang, S. Z. Heris, M. Shokrgozar, M. Kahani, "Pressure drop and thermal performance of

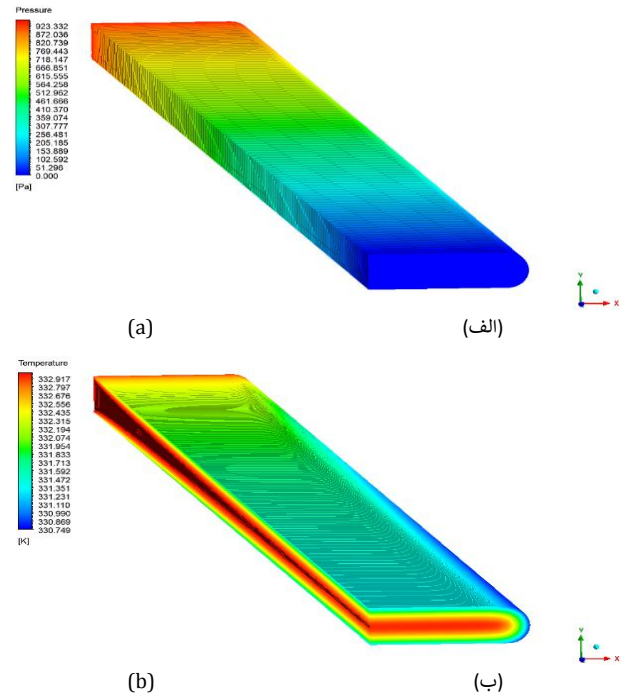


Fig 12. (a) Pressure contour - 2% hybrid nanofluid, (b) Temperature contour - 2% hybrid nanofluid.

شکل ۱۲. (الف) کانتور فشار- نانوسیال هیبرید 2 درصد، (ب) کانتور دما- نانوسیال هیبرید 2 درصد.

### ۵ نتیجه‌گیری

در این مطالعه، برای یک جریان تک فاز و سه‌بعدی، نتایج مربوط به ضریب انتقال حرارت، عدد ناسلت، افت فشار، توان پمپاژ و ضریب اصطکاک در طول لوله ارائه شده است. تغییرات دما و فشار برای غلظت‌های 1 و 2 درصد نانوسیال هیبریدی، به‌صورت کانتور رسم شده است. یافته‌های قابل توجه به شرح زیر است:

- ❖ افزودن نانوسیال هیبریدی به سیال پایه موجب بهبود انتقال حرارت نسبت به سیال پایه و نانوسیال منفرد می‌گردد. برای غلظت 1 و 2 درصد نانوسیال هیبریدی  $SiO_2-TiO_2$ -آب-اتیلن‌گلیکول ضریب انتقال حرارت نسبت به سیال پایه به ترتیب 8.26 و 13 درصد افزایش و نسبت به نانوسیال تک در غلظت 1 و 2 درصد به ترتیب 2.3 و 4.6 درصد افزایش مشاهده شد.
- ❖ با افزایش کسر حجمی نانوذرات هیبریدی افت فشار و توان پمپاژ افزایش می‌یابد. این افزایش برای کسر حجمی 1، 2 به ترتیب به میزان 13.1، 39.7 درصد برای افت فشار و به‌ترتیب 13.4، 40 درصد برای توان پمپاژ نسبت به سیال پایه می‌باشد.
- ❖ افزایش سرعت جریان و عدد رینولدز نیاز به توان پمپاژ بیشتری دارد. بیشترین قدرت پمپاژ با نانوسیال  $SiO_2-TiO_2$ -آب-اتیلن‌گلیکول با کسر حجمی 2 درصد به دست آمد. به‌طوری‌که مقدار افزایش قدرت پمپاژ برای این نانوسیال در رینولدز ثابت 2000، 40 درصد نسبت به سیال پایه می‌باشد.
- ❖ با افزایش غلظت نانوذرات هیبریدی و عدد رینولدز جریان، افزایش عدد ناسلت حاصل خواهد شد.
- ❖ افزایش انتقال حرارت جابجایی را نمی‌توان صرفاً به افزایش هدایت حرارتی مؤثر نسبت داد. مهاجرت ذرات به عنوان دلیلی برای افزایش می‌تواند باشد، که منجر به توزیع غیریکنواخت هدایت حرارتی و میدان لزجت می‌شود و ضخامت لایه مرزی حرارتی را کاهش می‌دهد.



- mix of  $Al_2O_3$  and CuO-based nanofluid and ethylene glycol", Energy, Vol. 250, No. 123832, 2022.
- [17] R. S. Vajjha, D. K. Das, P. K. Namburu, "Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of  $Al_2O_3$  and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 31, pp. 613-621, 2010.
- [18] Akbarinia A, Behzadmehr A (2007) "Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in horizontal curved tubes", Thermal Engineering, (27): 1327-1337.
- [19] M. Azadi, A. M. Adeli, A. Nabi E., "Newtonian hybrid cooling nanofluid with improved thermophysical properties and rheological behavior compared to the base fluid", 106215, 2020.
- [20] A. M. Hussein, R. A. Bakar, K. Kadrigama, K. V. Sharma, "Heat transfer augmentation of a car radiator using nanofluids", Heat and Mass Transfer, Vol. 50, No. 11, pp. 1553-1561, 2014.
- [21] Engineering Toolbox, "Ethylene Glycol Heat-Transfer Fluid Properties", [online] Available at: [https://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d\\_146.html](https://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d_146.html), 2003.
- [22] O. Nabiei, "Study of nano-particles effect on thermo-physical properties and rheological behavior of cooling fluid in combustion engines", BSc Thesis, Semnan University, 2018.
- [23] A. Ghasemi Kafrodi, H. Hashimabadi, "Numerical and Analytical Study of Drilling Mud Flow in Analos with Cross Non-Newtonian Fluid Model", Petroleum Research Journal, No. 81, Pages 43-30, 2014, [ in Persian فارسی ].
- [24] A. M. Hussein, H. K. Dawood, R. A. Bakara, K. Kadrigamaa, "Numerical study on turbulent forced convective heat transfer using nanofluids  $TiO_2$  in an automotive cooling system", Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 9, pp. 72-78, 2017.
- [25] N. Momeni, M. Azadi, A. M. Jadidi, "Investigation of pressure drop and friction coefficient in engine cooling fluid with nanoparticles of silicon, copper and titanium oxides", 12th National Conference of Internal Combustion Engines, 2022, [ in Persian فارسی ].
- [26] M. F. Nabi, W. H. Azmi, K. A. Hamid, R. Mamat, F. Y. Hagos "An experimental study on the thermal conductivity and dynamic viscosity of  $TiO_2$ - $SiO_2$  nanofluids in water: ethylene glycol mixture", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 86, pp. 181-189, 2017.
- [27] D. Madhesh, R. Parameshwaran, S. Kalaiselvam, " Experimental investigation on convective heat transfer and rheological characteristics of Cu- $TiO_2$  hybrid nanofluids", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 52, pp. 104-115, 2014.
- [28] B. K. Dandoutiya, A. Kumar, "A Review on thermal conductivity of ethylene glycol/water based nanofluid", palArchs Journal of Archaeology of Egypt/ Egyptology Vol. 18, No. 4, pp. 126-139, 2021.
- [29] J. R. Babu, K. K. Kumar, S. S. Rao, "State-of-art review on hybrid nanofluids", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 77, pp. 551-565, 2017.
- [30] A. A. Minea, W. M. El-Maghlany, "Influence of hybrid nanofluids on the performance of parabolic trough collectors in solar thermal systems", recent findings and numerical comparison. Renewable Energy, Vol. 120, pp. 350-364, 2018.
- CuO/ethylene glycol (60%)-water (40%) nanofluid in car radiator", Korean Journal of Chemical Engineering, Vol. 32, No. 4, pp. 609-616, 2015.
- [4] R. Davarnejad, S. Barati, M. Kooshki, "CFD simulation of the effect of particle size on the nanofluids convective heat transfer in the developed region in a circular tube", SpringerPlus, Vol. 2, No. 1, pp. 1-6, 2013.
- [5] G. S. Sokhal, D. Gangacharyulu, V. K. Bulasara, "Heat transfer and pressure drop performance of alumina-water nanofluid in a flat vertical tube of a radiator", Chemical Engineering Communications, Vol. 205, No. 2, pp. 257-268, 2018.
- [6] L. S. Sundar, M. K. Singh, A. C. M. Sousa, "Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT- $Fe_3O_4$ /water hybrid nanofluids", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 73-83, 2014.
- [7] S. Sarvar-Arde, R. Rafee, S. Rashidi, "Hybrid nanofluids with temperature-dependent properties for use in double-layered microchannel heat sink", hydrothermal investigation, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 124, pp. 53-62, 2021.
- [8] A. L. Ramadhan, W. H. Azmi, R. Mamat, "Heat transfer characteristics of car radiator using tri-hybrid nanocoolant", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 863, no. 1, pp. 012054, IOP Publishing ,2020.
- [9] J. A. Okello, W. N. Mutuku, A. O. Oyem, "Analysis of Ethylene Glycol (EG)-based ( $(Cu-Al_2O_3)$ ,  $(Cu-TiO_2)$ ,  $(TiO_2-Al_2O_3)$ ) Hybrid Nanofluids for Optimal Car Radiator Coolant", Journal of Engineering Research and Reports, Vol. 17, pp. 34-50, 2020.
- [10] H. W. Xian, N. A. Sidik, R. Saidur, "Hybrid nanocoolant for enhanced heat transfer performance in vehicle cooling system", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 133, pp. 105922, 2022.
- [11] F. Abbas, H. M. Ali, M. Shaban, M. M. Janjua, T. R. Shah, M. H. Doranehgar, M. Ahmadlouydarab, F. Farukh, "Towards convective heat transfer optimization in aluminum tube automotive radiators: potential assessment of novel  $Fe_2O_3$ - $TiO_2$ /water hybrid nanofluid", Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 124, pp. 424-436, 2021.
- [12] S. K. Saripella, W. Yu, J. L. Routbort, D. M. France, "Effects of nanofluid coolant in a class 8 truck engine", No. 2007-01-2141, SAE Technical Paper, 2007.
- [13] K. Y. Leong, R. Saidur, S. N. Kazi, A. H. Mamun, "Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator)", Applied Thermal Engineering, Vol. 30, No. 17-18, pp. 2685-2692, 2010.
- [14] S. M. Peyghambarzadeh, S. H. Hashemabadi, S. M. Hoseini, M. S. Jamnani, "Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators", International communications in heat and mass transfer, Vol. 38, No. 9, pp. 1283-1290, 2011.
- [15] R. B. Bejjam, K. Nigusie, T. Wondatir, S. Worku, "Numerical analysis of water, ethylene glycol and nanofluid based radiator using CFD", Materials Today: Proceedings, Vol. 47, pp. 2431-2435, 2021.
- [16] L. O. F. T. Alves, J. R. Henríquez, J. A. P. da Costa, V. Abramchuk, "Comparative performance analysis of internal combustion engine water jacket coolant using a

- [31] M. U. Sajid, H. M. Ali, "Thermal conductivity of hybrid nanofluids: a critical review" , international Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 126, pp. 211–234, 2018.
- [32] A. Bejan , "Convection heat transfer", John Wiley and Sons, 1993.