



بررسی مقایسه‌ای انتقال حرارت نانوسیال در کانال حلقوی عمودی با شار حرارتی کسینوسی به روش تجربی و عددی

محمدامین برهانی^۱، امیرسعید شیرانی^۲، منصور طالبی^۳، جواد مختاری^۴

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲استاد، مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۳دانشیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، تهران، ایران

^۴استادیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸

چکیده

یکی از روش‌های بهبود عملکرد انتقال حرارت جابه‌جایی، افزایش ضریب انتقال حرارت سیال عامل است. یکی از راهکارهای افزایش ضریب انتقال حرارت سیال، اضافه کردن نانوذرات فلزی یا غیرفلزی به سیال پایه است که به آن نانوسیال می‌گویند. پژوهش در زمینه نانوسیال‌ها در دو دهه اخیر رشد فراوانی کرده است. در مطالعه حاضر، اثر ترکیب همگن نانوذرات Al_2O_3 و TiO_2 با آب دیونیزه شده، بررسی می‌شود. عملکرد ترموهیدرولیکی نانوسیال داخل کانال عمودی به روش‌های تجربی و عددی برای حالت آشفته و جریان آرام تحلیل می‌شود. مدل اغتشاشی استفاده‌شده در شبیه‌سازی عددی با کمک نرم افزار فلوئنت، مدل $k-\epsilon$ است. میله گرم‌کن محفظه آزمایش، شار حرارتی کسینوسی تولید می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش غلظت نانوذرات، حداکثر دمای میله را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. استفاده از نانوسیال همگن ۱٪ میزان دمای بیشینه را نسبت به آب خالص به میزان ۲۰٪ در رینولدز ۹۵۰ و ۹/۵٪ در رینولدز ۴۲۰۰ کاهش می‌دهد. همچنین ضریب انتقال حرارت با افزودن نانوذرات افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده از مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ و روش تجربی، تفاوت ۱۰٪ تا ۱۳٪ را نشان می‌دهد. پژوهش انجام‌شده نشان می‌دهد، نانوسیال ترکیبی با عملکرد حرارتی مناسب، می‌تواند یکی از سیالات عامل در سیکل‌های حرارتی آینده باشد.

کلمات کلیدی: نانوسیال ترکیبی، مدارآزمون، انتقال حرارت، روش تجربی، روش عددی.

Comparative investigation of nanofluid heat transfer in a vertical annular channel with cosine heat flux by experimental and numerical methods

Mohammad amin Borhani¹, Amir saeed Shirani², Mansour Talebi³, Javad Mokhtari⁴

¹MS. Nuc. Eng., Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

²Prof. Nuc. Eng., Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

³ Assoc. Prof., Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran

⁴ Assist. Prof., Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran

Abstract

One method to improve heat convection is to increase the heat transfer coefficient of the working fluid. Adding metal or non-metal nanoparticles into the base fluid, known as nanofluid, is a technique to enhance the heat transfer coefficient. Research in the field of nanofluids has grown significantly in the last two decades. In this study, the effects of a homogenous combination of Al_2O_3 and TiO_2 nanoparticles with deionized water are investigated. The thermohydraulic performance of the nanofluid inside the vertical channel is analyzed by experimental and numerical methods for turbulent and laminar flow. The turbulence model utilized in computational fluid dynamics is the $k-\epsilon$ model in Fluent software. The heating rod in the test section produces cosine heat flux. The results show that increasing the concentration of nanoparticles significantly reduces the maximum temperature of the rod. The use of 1% homogeneous nanofluid reduces the maximum temperature by 20% at the Reynolds of 950 and 9.5% at the Reynolds of 4200 compared to pure water. Also, the heat transfer coefficient increases with the addition of nanoparticles. The results obtained by the $k-\epsilon$ turbulence model and the experimental method show a difference of 10% to 13%. This research shows that the combined nanofluid with suitable thermal performance can be one of the working fluids in future thermal cycles.

Keywords: Combined nanofluid, test loop, heat transfer, experimental method, numerical method.

۱- مقدمه

انرژی الکتریکی ۲۰٪ از سهم کل انرژی مصرفی در جهان را دارد [۱]. پیش‌بینی می‌شود سهم انرژی الکتریکی در سال‌های آینده با توجه به گسترش حمل‌ونقل الکتریکی و رشد تولید الکتریسیته از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر، افزایش یابد. سهم انرژی هسته‌ای در بین گونه‌های مختلف انرژی برای تولید الکتریسیته حدود ۱۳٪ است [۱].

یکی از چالش‌های طراحی راکتورهای هسته‌ای نسل جدید، بهبود عملکرد انتقال حرارت است. یکی از روش‌های بهبود انتقال حرارت، افزایش خواص حرارتی سیال عامل است. آب رسانندگی گرمایی بالایی در بین سیالات پرکاربرد در صنعت را دارد. با این حال رسانندگی حرارتی آن در دمای محیط در حدود ۰/۶ وات بر متر درجه کلون است. این عدد از فلزات و یا اکسیدهای فلزی بسیار کمتر است.

نانوسیال‌ها در حدود دو دهه قبل با هدف افزایش رسانندگی حرارتی سیالات توسعه یافتند. نانوسیال، سوسپانسیون کلوئیدی از ذرات جامد با ابعاد یک تا صد نانومتر است. نانوذرات به نسبت میکروذرات دیرتر ته‌نشین می‌شوند و خواص حرارتی بهتری دارند.

چوی [۲] برای اولین بار برای یافتن سیالی با هدایت حرارتی بیشتر، از ایده استفاده از نانوذرات در خنک‌کننده‌های رایج استفاده کرد. پس از آن پژوهشگران بسیاری خواص انتقال حرارت نانوسیال‌ها را مطالعه کردند.

ون و دینگ [۳] ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب و Al_2O_3 را درون لوله مسی بررسی کردند. آن‌ها این آزمایش را در رژیم جریان آرام انجام دادند. هی و همکاران [۴] به صورت تجربی ویژگی‌های انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال آب مقطر و TiO_2 را مطالعه کردند. آن‌ها این آزمایش‌ها را در جریان آرام و جریان آشفته انجام دادند. وانگ و همکاران [۵] افت فشار و انتقال حرارت را برای نانوسیال TiO_2 و آب در یک مبدل حرارتی با ساختار جریان دو لوله افقی مخالف تجزیه و تحلیل کردند. یافته‌ها نشان داد که استفاده از نانوسیال در غلظت پایین هزینه افت فشار کمی دارد.

عباسی و همکاران [۶] به روش تجربی ویژگی‌های انتقال حرارت نانوسیال TiO_2 را در کانال عمودی ارزیابی کردند. آن‌ها آزمایش‌ها را در اعداد رینولدز مختلف انجام دادند. نتایج نشان

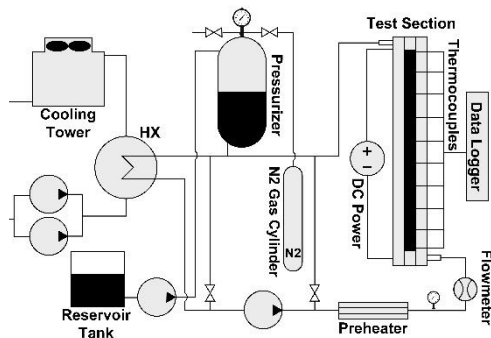
داد که دمای سطح میله با بالا رفتن عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات کاهش می‌یابد.

ساندار و همکاران [۷] عملکرد یک مبدل حرارتی را با استفاده از نانوسیال هیبریدی Fe_3O_4 و آب بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند، با دبی ۷ لیتر بر دقیقه و غلظت حجم ذرات ۰/۳٪، عملکرد انتقال حرارت ۱۰/۵٪ بهبود می‌یابد. کانتی و همکاران [۸] ضریب اصطکاک نانوسیال‌هایی که از طریق یک لوله مسی با خاکستر پایدار مبتنی بر آب را مطالعه کردند.

مروجی و همکاران [۹] به روش عددی انتقال حرارت نانوسیال Al_2O_3 را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها دریافتند که خطای بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی شده تنها ۵٪ است. تحقیقات مشابهی برای نانوسیال‌های CuO و نانولوله کربنی (CNT) [۱۰] انجام شده است. موسوی زاده و همکاران [۱۱] شبیه‌سازی نانوسیال TiO_2 را در راکتور VVER-1000 انجام دادند. آن‌ها در این تحقیق اثرات DNBR را نیز برای نانوسیال بررسی کردند. در مطالعات عددی صورت گرفته، به‌طور معمول روش تک‌فاز برای سیستم‌های تبادل مانند رادیاتور و مبدل حرارتی صفحه‌ای استفاده شده است [۱۲].

بیشتر پژوهش‌های گذشته به بررسی عملکرد حرارتی یک نوع نانوذره در شارحرارتی یکنواخت پرداخته‌اند. در مطالعه حاضر، ترکیب کاملاً همگن نانوذرات TiO_2 و Al_2O_3 استفاده شده و اثرات استفاده هم‌زمان از دو نوع نانوذره در داخل شار محفظه آزمایش با شار حرارتی کسینوسی بررسی شده است. شار حرارتی کسینوسی در داخل راکتورهای هسته‌ای تولید می‌شود. استفاده از این نوع شار حرارتی در پژوهش‌های انجام‌شده در گذشته کمتر مورد توجه بوده است. برای انجام آزمایش‌ها، از مدارآزمون تحت فشار اصفهان استفاده شد. اثرات ترموهیدرولیکی غلظت مختلف نانوذرات ترکیبی و عدد رینولدز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. از داده‌های به‌دست‌آمده در شرایط مختلف، اطلاعات کاربردی در زمینه‌ی ضریب انتقال حرارت استخراج شد. سپس شبیه‌سازی عددی برای بررسی اثرات ترموهیدرولیکی نانوسیال همگن در محفظه آزمایش با استفاده از نرم افزار فلونت انجام شد. هدف از شبیه‌سازی عددی، ارزیابی روش $k-\epsilon$ در شبیه‌سازی انتقال حرارت نانوسیال به روش تک‌فاز در محفظه آزمایش بود. این شبیه‌سازی عددی در شبکه‌های مختلف و با همگرایی مناسب بررسی شده است و مقایسه در این زمینه انجام شده است. در

اندازه‌گیری دمای کانال آزمایش به فواصل مساوی تعداد ۲۲ عدد ترموکوپل نوع K نصب شده است که اطلاعات آن‌ها به سیستم کنترل، منتقل شده و ثبت می‌شود. دبی‌سنج استفاده شده از نوع روتامتر است. شکل ۲ تصویر شماتیک این مدارآزمون را نشان می‌دهد.



شکل ۲- تصویر شماتیک از مدارآزمون

۲-۲- روش تهیه نانوسیال

برای تولید نانوسیال دو روش وجود دارد. روش اول ساخت نانوسیال با اضافه کردن مقداری مواد پایدارکننده از جمله فعال‌ساز سطحی (سورفکتانت‌ها) است. این روش معمولاً انتقال حرارت را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۷]. روش دوم استفاده از دستگاه همزن آلتراسونیک است که می‌تواند ترکیب پایداری از نانوذرات در مایع را ایجاد کند.

برای تولید نانوسیال، نانوذرات به آب دیونیزه شده افزوده می‌شوند. آب دیونیزه آبی است که نسبت به آب مقطر دارای خلوص بیشتری است و یون‌زدایی از آن با خلوص بالا انجام شده است. برای داشتن یک مخلوط کاملاً همگن و برای جلوگیری از پدیده خوشه‌ای شدن نانوذرات، باید از همزن آلتراسونیک استفاده شود. استفاده از دستگاه همزن آلتراسونیک علاوه بر ایجاد مخلوطی همگن، پایداری نانوسیال را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. در این مرحله برای تولید نانوسیال، نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید و نانوذرات آلومینا مخلوط در آب به مدت ۴ ساعت در دستگاه آلتراسونیک قرار گرفت تا نانوسیال ترکیبی همگن و با غلظت موردنظر به دست آید. جدول ۱ مشخصات نانوذرات و سیال آب را نشان می‌دهد.

بخش نتایج به صورت مقایسه‌ای، اطلاعات مربوط به شبیه‌سازی آمده است. بررسی مقایسه‌ای، روشی تحلیلی برای ارزیابی شباهت و تفاوت داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی است. این بررسی می‌تواند عملکرد روش عددی را در پیش‌بینی داده‌های جدید ارزیابی کند.

۲- آزمایش تجربی

۲-۱- تجهیزات مدارآزمون

مدارآزمون مرکز اصفهان با حداکثر فشار ۲۵ بار، برای انجام آزمایش‌های ترموهیدرولیکی طراحی و ساخته شده است. شکل ۱ نمایی از این مدارآزمون را نشان می‌دهد.



شکل ۱- تصویر مدارآزمون (الف) و محفظه آزمایش (ب)

مدارآزمون تحت فشار، شامل تجهیزات مختلف مکانیکی، مانند لوله‌کشی، پمپ، مبدل حرارتی، برج خنک‌کن و تجهیزات برقی و الکترونیکی مربوط به خود است. این مدار برای آزمایش یک میله تا فشار ۲۵ بار طراحی شده است و پارامترهای مختلف را اندازه‌گیری می‌کند. فشار مدارآزمون توسط یک فشارنده و با تزریق گاز نیتروژن تأمین و تنظیم می‌شود. گنجایش فشارنده ۱۰۰ لیتر است. مبدل حرارتی استفاده شده در این سیستم قابلیت برداشت حداکثر ۳۰ کیلووات گرما را از مدار دارد.

محفظة آزمایش یک مجرای حلقوی است که در قسمت میانی آن میله‌ای با المنت حرارتی قرار دارد. این میله شار حرارتی کسینوسی یک کیلوواتی تولید می‌کند. برای

معادله انرژی برای محاسبه دمای بالک موردنیاز است. حالت ساده‌شده برای به دست آوردن دمای بالک سیال در معادله ۹ نشان داده شده است.

$$T_b = T_{inlet} + \frac{\dot{q}}{\dot{m}C_{nf}} \quad (9)$$

جایی که T_b ، T_{inlet} و \dot{m} به ترتیب دبی جریان، دمای بالک و دمای ورودی هستند. \dot{q} مقدار حرارت تولیدشده توسط المنت حرارتی تا ارتفاع H را نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، شار حرارتی در محفظه آزمایش دارای پروفیل کسینوسی است. فرمول شار حرارتی به صورت زیر است:

$$q'' = \frac{Power}{2} \times \sin\left(\frac{H}{l}\right) \quad (10)$$

ضریب انتقال حرارت یک عنصر کوچک به صوت زیر به دست می‌آید:

$$h_i = \frac{d\dot{q}}{dA \times \Delta T_i} \quad (11)$$

ΔT_i تفاوت بین دمای توده و دمای سطح یک عنصر است. که در آن dq و dA به ترتیب گرما تولیدی و سطح هستند.

۲-۴- طراحی آزمایش

این آزمایش برای بررسی اثر غلظت نانوسیال ترکیبی همگن و عدد رینولدز بر دمای سطح میله در شار حرارتی کسینوسی طراحی شده است. بر اساس متغیرهای به دست آمده از دمای سطح میله و داشتن دبی جرمی و دمای سیال ورودی، ضریب انتقال حرارت در حالت‌های مختلف محاسبه می‌شوند.

این آزمایش‌ها برای آب خالص و نانوسیال با درصد حجمی ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ و با دمای ورودی سیال ثابت ۲۵ درجه سلسیوس انجام شد. جدول ۲ تمام حالت‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲- تعداد آزمایش‌های انجام‌شده

رینولدز	۲۸۰۰، ۲۲۰۰
غلظت نانوسیال	آب خالص، ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی نانوذرات

k (W/m.K)	Cp (J/kg.K)	ρ (g/cm ³)	
۴۰	۹۳۰	۳/۹۵	آلومینا
۱۱/۷	۶۸۳	۴/۲۶	تیتانیوم دی‌اکسید
۰/۵۹۸	۴۱۸۲	۰/۹۹۸	آب (۲۰°C)

۲-۳- معادلات مربوطه به نانوسیال

برای به دست آوردن مشخصات مربوط به نانوسیال از روابط مربوط به نانوذرات ترکیبی استفاده شده است. نانوسیال در غلظت پایین رفتار نیوتونی دارد. از اطلاعات نانوذرات جدول ۱ برای محاسبه مقادیر ثابت استفاده شده است [۱۳، ۱۴].

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (1)$$

$$\rho_{np} = \frac{\phi_1 \rho_{np1} + \phi_2 \rho_{np2}}{\phi_1 + \phi_2} \quad (2)$$

$$C_{np} = \frac{\phi_1 C_{np1} + \phi_2 C_{np2}}{\phi_1 + \phi_2} \quad (3)$$

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi_1 \rho_{np1} + \phi_2 \rho_{np2} \quad (4)$$

$$C_{nf} = \frac{(1 - \phi)(\rho_{bf} c_{bf}) + (\phi)(\rho_{np} c_{np})}{(1 - \phi)\rho_{bf} + (\phi)\rho_{np}} \quad (5)$$

$$K_{np} = \frac{\phi_1 k_{np1} + \phi_2 k_{np2}}{\phi_1 + \phi_2} \quad (6)$$

در معادلات بالا، ϕ غلظت نانوذرات را نشان می‌دهد. ρ_{nf} ، ρ_{np} ، C_{nf} و C_{np} به ترتیب چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه برای نانوسیال و نانوذرات است. K_{np} رسانایی حرارتی برای نانوذرات است.

مقادیر شار حرارتی (q) نیز از معادله زیر به دست می‌آید

$$q = \int q'' \cos\left(\frac{\pi z}{H_e}\right) A_f dz \quad (7)$$

که در آن H_e ارتفاع و A_f سطح مقطع است. عدد رینولدز برای سیال پایه از معادله ۸ محاسبه می‌شود [۶].

$$Re = \frac{\dot{m} D_h}{\mu A} \quad (8)$$

که در آن D_h و A قطر هیدرولیکی و سطح مقطع است. μ و \dot{m} نشان‌دهنده دبی جریان و ویسکوزیته دینامیکی سیال است.

وسایل مربوط به اندازه‌گیری، شامل فلومتر و ترموکوپل‌ها، قبل از انجام آزمایش کالیبره شدند. برای کالیبراسیون ترموکوپل‌ها از روش حمام آب استفاده شد. همچنین برای کالیبره کردن فلومتر از فلومتر مرجع استفاده شد.

۲-۵- تحلیل عدم قطعیت

دما (T)، دبی جریان (m)، فشار (P)، ولتاژ (V) و جریان الکتریکی (I) متغیرهای فیزیکی هستند که مستقیماً ثبت می‌شوند. جدول ۳ عدم قطعیت این متغیرها را نشان می‌دهد.

متغیر	عدم قطعیت
دما (T)	$\pm 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$
دبی جرمی (m)	$\pm 0.5 \text{ Lit/h}$
فشار (P)	$\pm 0.01 \text{ bar}$
ولتاژ (V)	$\pm 0.1 \text{ V}$
جریان الکتریکی (I)	$\pm 0.01 \text{ A}$

معادلات ۱۲ و ۱۳ انتشار عدم قطعیت را در حالت کلی نمایش می‌دهد [۱۵].

$$y = \phi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (12)$$

$$e_y = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_i} e_{x_i} \right)^2} \quad (13)$$

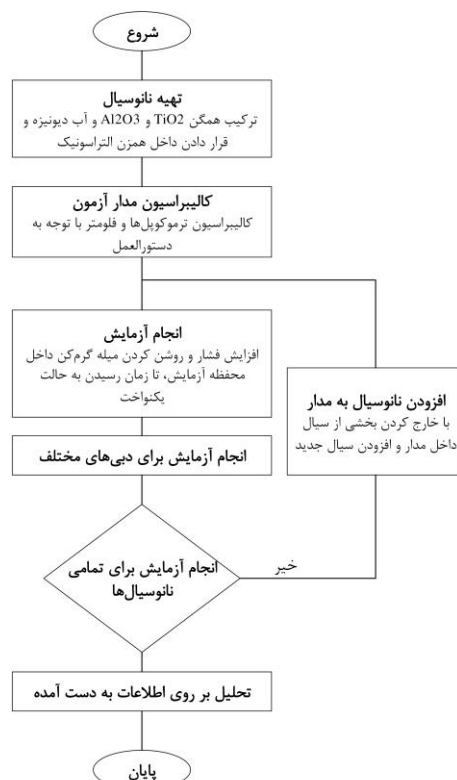
در رابطه بالا x_i و e_{x_i} به ترتیب متغیر و عدم قطعیت آن است. از معادله ۱۳ برای محاسبه عدم قطعیت توان، عدد رینولدز و ضریب انتقال حرارت استفاده می‌شود. مقدار عدم قطعیت برای توان کل ۰.۲٪ است. عدد رینولدز به صورت میانگین دارای ۰.۶٪ و ضرایب انتقال حرارت دارای عدم قطعیت ۰.۸٪ است.

۳- شبیه‌سازی عددی

به‌منظور مقایسه روش‌های عددی با داده‌های تجربی، جریان درون محفظه آزمایش به‌صورت عددی شبیه‌سازی شد. این شبیه‌سازی کمک می‌کند عملکرد مدل اغتشاشی $k - \epsilon$ برای نانوسیال‌های تک‌فاز مورد ارزیابی قرار بگیرد. شکل ۴ هندسه

در ابتدا، آزمایش با آب خالص در فشار ۵ بار انجام شد. با استفاده از سیستم کنترلی سرعت پمپ اصلی در مقدار مورد نظر قرار گرفت. ترموکوپل و فالومتر کالیبره شدند و بعد از آن تولید کننده شار حرارتی روشن شد تا محاسبه دمای سطح میله به وسیله ۲۲ ترموکوپلی که در دو طرف کانال قرار دارند، اندازه‌گیری شود. آزمایش آب خالص برای رینولدزهای مختلف انجام گرفت.

سپس مطابق بخش ۲-۲ نانوسیال آماده شد و در داخل تانک مخصوص نانوسیال در بالاترین غلظت قرار گرفت. با توجه به محاسبات انجام‌شده، مقدار مشخصی آب از داخل مدار خارج شد و سیال با غلظت بالا داخل آن قرار گرفت. بعد از هر مرحله آزمایش برای رینولدزهای مختلف، مقداری از سیال داخل مدار خارج شده و به جای آن آب خالص قرار گرفت تا مدار به درصد حجمی مورد نظر برسد. شکل ۳ روندنمای مربوط به انجام آزمایش‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل ۳- روندنمای انجام آزمایش

در شبیه‌سازی سیالاتی با روش ناویر-استوکس میانگیری شده است و از سرعت همگرایی مناسبی برخوردار است. ویسکوزیته اغتشاشی در این روش با استفاده از دو پارامتر k و ε محاسبه می‌شود [۱۲].

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (15)$$

برای شبیه‌سازی از مدل اغتشاشی استاندارد $k-\varepsilon$ در فلوننت استفاده شده است. مقادیر انرژی جنبشی اغتشاشی (k) و نرخ اتلاف (ε) از روابط جابه‌جایی ۱۶ و ۱۷ محاسبه می‌شوند [۱۲].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (17)$$

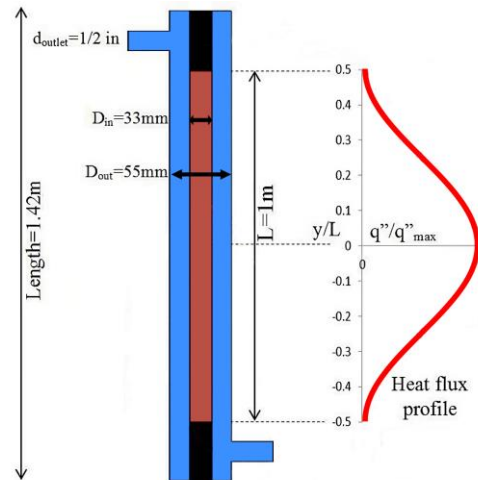
جدول ۴ مقادیر ثابت استفاده شده در معادلات مدل اغتشاشی را نشان می‌دهد.

جدول ۴- ضرایب ثابت استفاده شده در مدل اغتشاشی

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε
۱٫۴۴	۱٫۹۲	۰٫۰۹	۱٫۰	۱٫۳

برای بهبود عملکرد این مدل اغتشاشی در نزدیکی سطوح، از قابلیت بهبود عملکرد نزدیک به دیواره در فلوننت استفاده شد. استفاده از این قابلیت محدودیت مدل $k-\varepsilon$ را در تحلیل مسائل مرزی کاهش می‌دهد. همچنین برای شبیه‌سازی بهتر برای لایه‌مرزی از شبکه ریزتر استفاده شد. مقدار میانگین y^+ برای این مدل در حدود ۴۰ قرار داشت.

محفظه آزمایش را نشان می‌دهد. با استفاده از ابزار طراحی داخلی انسیس ۲۰۱۹ شکل موردنظر به صورت کامل و سه‌بعدی طراحی شد.



شکل ۴- هندسه محفظه آزمایش

۳-۱- معادلات حاکم بر روش عددی

معادلات حاکم بر جریان‌های سیالاتی، همان معادلات بقای جرم، تکانه و انرژی هستند.

- معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

- معادله تکانه

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}^*}{\partial x_i} + (\mu + \mu_t) \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (13)$$

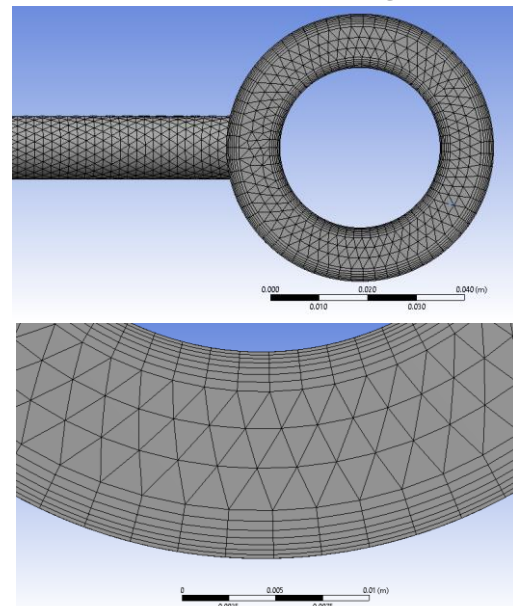
- معادله انرژی

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) \quad (14)$$

در معادلات بالا μ_t ویسکوزیته اغتشاشی و Pr_t پرانتل اغتشاشی است. مدل اغتشاشی $k-\varepsilon$ یک مدل دومعادله‌ای

۳-۲- بررسی استقلال شبکه

بعد از طراحی هندسه، با استفاده از قابلیت تولید شبکه در انسیس، یک شبکه مناسب برای این هندسه ایجاد شد. دیواره دارای شبکه ریزتر و نواحی میانی شبکه درشت‌تر در نظر گرفته شد. شکل ۵ نمایی از این شبکه را نمایش می‌دهد. ریزتر شدن شبکه نزدیک به دیواره، به همگرایی بهتر و رسیدن به نتایج دقیق‌تر کمک می‌کند.



شکل ۵- شبکه‌بندی هندسه محفظه آزمایش

برای بررسی استقلال شبکه، سه شبکه مختلف از درشت به ریز طراحی شد. اطلاعات به دست آمده برای این سه شبکه در جدول ۵ زیر آمده است.

جدول ۵- شبکه‌های استفاده‌شده در تحلیل عددی

ردیف	تعداد سلول‌ها (میلیون شبکه)	ضریب انتقال حرارت (w/m ² K)
۱	~ ۱,۹	۱۲۱۰
۲	~ ۱,۶	۱۲۰۳
۳	~ ۱,۳	۱۱۷۰

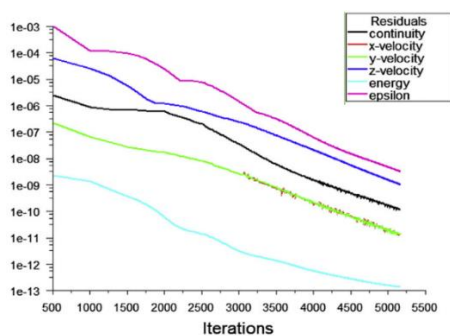
نتایج به دست آمده از سه شبکه مختلف، همگرایی مناسبی را نشان می‌دهد. برای شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده از شبکه ۱/۶ میلیونی استفاده شد.

مشخصات مربوطه به شبکه و لایه مرزی در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶- اطلاعات مربوطه شبکه و لایه مرزی

بیشینه مقدار چولگی	۰,۷
کمینه مقدار کیفیت تعامد	۰,۵۴
ضخامت لایه اول (میلی‌متر)	۰,۲
نرخ رشد	۱,۲
تعداد لایه نزدیک دیواره	7
میانگین y^+	40

مشخصات مربوط به نانوسپال برای شبیه‌سازی عددی از روابط بخش ۲-۳ استخراج شد. شکل ۶، نمونه‌ای از همگرایی به دست آمده در شبیه‌سازی عددی را نمایش می‌دهد. حد در نظر گرفته شده برای همگرایی در شبیه‌سازی 10^{-8} است.



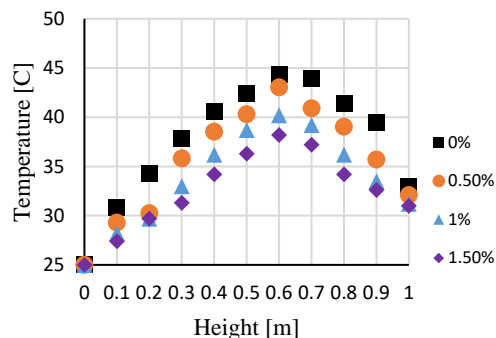
شکل ۶- نمونه همگرایی به دست آمده در محاسبات

۴- نتایج

در ابتدا نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها در غلظت و رینولدزهای مختلف بررسی می‌شود. سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی برای دمای سطح میله و ضریب انتقال حرارت مقایسه می‌شود.

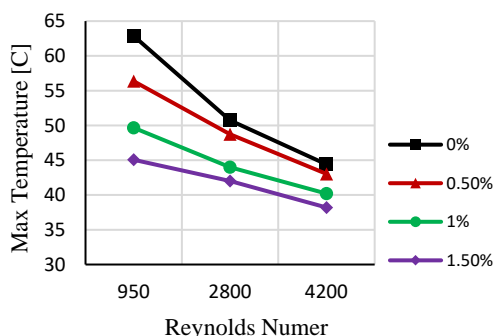
۴-۱- نتایج روش تجربی

با آزمایش بر روی مدارآزمون تحت فشار، نتایج تجربی برای دمای سطح میله در شرایط مختلف به دست آمد. سپس ضریب انتقال حرارت با انجام عملیات ریاضی روی این نتایج حاصل



شکل ۹- نمودار دمایی برای غلظت‌های مختلف نانوسیال در رینولدز ۴۲۰۰

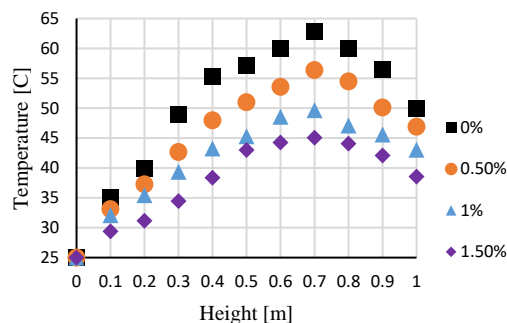
در شکل ۱۰ منحنی بیشینه دمای سطح میله برای اعداد رینولدز و غلظت‌های مختلف آورده شده است.



شکل ۱۰- بیشینه دما سطح میله برای رینولدز و غلظت‌های مختلف

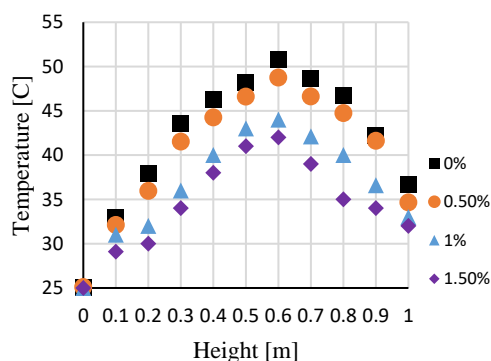
برای نانوسیال ۱٪ در رینولدز ۹۵۰ میزان دمای بیشینه به مقدار ۲۰٪ و در رینولدز ۴۲۰۰ به میزان ۹/۵٪ کاهش می‌یابد. این میزان برای نانوسیال ۱/۵٪ به میزان ۲۶٪ است. با افزایش رینولدز میزان تأثیرگذاری نانوسیال در کاهش دمای میله، کم‌تر می‌شود. پژوهش‌ها درباره علت این پدیده کماکان ادامه دارد. این تغییرات عملکرد در رینولدز بالا بر اساس نوع نانوذرات، ابعاد و شکل می‌تواند متفاوت باشد. به طور خلاصه می‌توان آن را تحت تأثیر غالب شدن اثر انتقال حرارت جابه جایی به انتقال حرارت از طریق رسانایی دانست. همچنین به دلیل نازک تر شدن لایه مرزی در رینولدز بالا، ورود نانوذرات به این لایه و تأثیرگذاری آن‌ها کاهش می‌یابد.

شکل ۷، نمودار دمایی سطح میله در رینولدز ۹۵۰ برای غلظت‌های مختلف را نمایش می‌دهد.



شکل ۷- نمودار دمایی برای غلظت‌های مختلف نانوسیال در رینولدز ۹۵۰

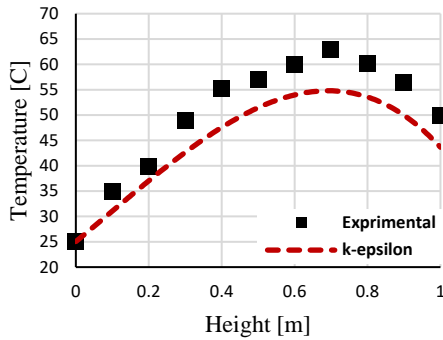
شکل‌های ۸ و ۹ نمودار دما سطح میله گرم‌شونده در رینولدز ۲۸۰۰ و ۴۲۰۰ را برای غلظت‌های مختلف نانوسیال نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است دمای ماکزیمم میله در حدود ۰/۶ ارتفاع میله ایجاد می‌شود. به دلیل تأثیرات دمای بالک سیال و وجود شار حرارتی کسینوسی در میله گرم‌کن، قله دمایی از وسط به مقداری در حدود ۰/۶ متر تمایل پیدا می‌کند. همچنین با افزایش رینولدز و درصد حجمی نانوسیال میانگین دمای میله کاهش می‌یابد.



شکل ۸- نمودار دمایی برای غلظت‌های مختلف نانوسیال در رینولدز ۲۸۰۰

۴-۲-۱ مقایسه دمای سطح برای آب خالص

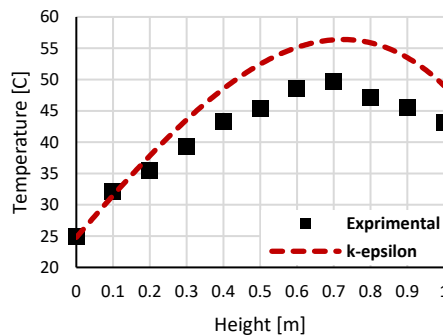
شکل ۱۳ نمودار دمایی آب را در رینولدز ۹۵۰ نشان می‌دهد. تفاوت میانگین دما برای نتایج عددی و تجربی در حدود ۱۳٪ است.



شکل ۱۳- نمودار دمایی آب خالص در رینولدز ۹۵۰

۴-۲-۲ مقایسه دمای سطح برای نانوسیال ۱٪

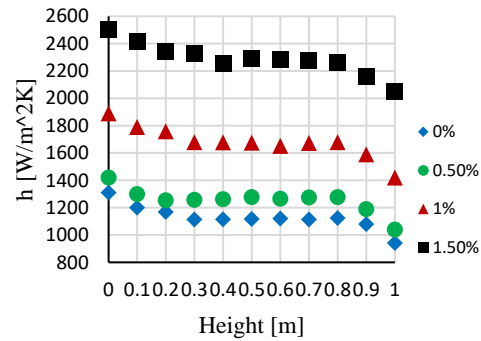
شکل ۱۴ نمودار دمایی نانوسیال ۱٪ را در رینولدز ۹۵۰ نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، نمودارهای ایجاد شده در حالت عددی و تجربی شباهت بسیاری به یکدیگر دارند. در بخش پایینی محفظه مقادیر دمایی به یکدیگر نزدیک تر هستند و در بخش میانی و انتهایی کانال، تفاوت بیشتر می‌شود. علت آن را می‌توان در تفاوت شبیه سازی تک‌فاز در مقایسه با نتایج تجربی دانست.



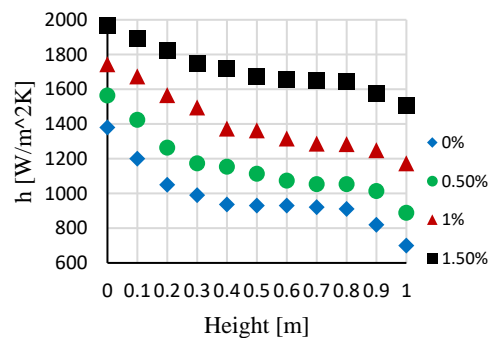
شکل ۱۴- نمودار دمایی نانوسیال ۱٪ در رینولدز ۹۵۰

شکل ۱۵ نمودار دمایی نانوسیال ۱٪ را در رینولدز ۴۲۰۰ نشان می‌دهد. در رینولدز بالا شبیه سازی عددی مقادیر نزدیک تری به نتایج تجربی را نشان می‌دهد که می‌تواند به دلیل

شکل ۱۱ و ۱۲ ضریب انتقال حرارت را برای سطح میله در رینولدز ۹۵۰ و ۴۲۰۰ نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- ضریب انتقال حرارت برای غلظت‌های مختلف در رینولدز ۹۵۰

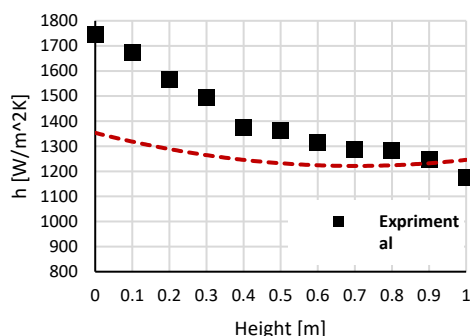


شکل ۱۲- ضریب انتقال حرارت برای غلظت‌های مختلف در رینولدز ۴۲۰۰

با مشاهده دو شکل بالا مشخص می‌شود که افزایش غلظت در رینولدز پایین تأثیر زیادی در افزایش ضریب انتقال حرارت دارد. میزان افزایش ضریب انتقال حرارت برای غلظت ۱٪ در رینولدز ۴۲۰۰ نزدیک به ۲۵٪ و برای رینولدز ۹۵۰ این عدد نزدیک به ۳۵٪ است. همچنین عملکرد نانوسیال در رینولدز بالا کاهش می‌یابد.

۴-۲-۴ مقایسه نتایج عددی و تجربی

در ادامه این بخش، نتایج به دست آمده از آزمایش تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با یکدیگر مقایسه می‌شوند.



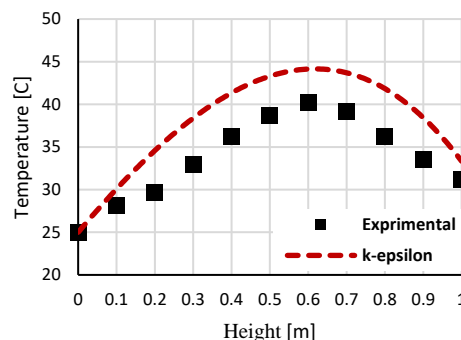
شکل ۱۷- ضریب انتقال حرارت نانوسیال ۱٪ در رینولدز ۴۲۰۰

مقایسه نتایج عددی و تجربی برای ضریب انتقال حرارت نشان می‌دهد در ابتدای مجرای حلقوی تفاوت بیشتری بین نتایج وجود دارد. سپس در قسمت میانی کانال مقادیر عددی و تجربی به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند. دلیل آن را می‌توان در محاسبه دمای بالک سیال دانست. همچنین تفاوت ایجاد شده را می‌توان به علت محدودیت‌های روش شبیه‌سازی تک‌فاز برای نانوسیال دانست. در مجموع با در نظر گرفتن عدم قطعیت نتایج تجربی، مدل عددی ایجاد شده، توانسته است عملکرد حرارتی نانوسیال را به خوبی شبیه سازی کند.

۵- نتیجه‌گیری

نانوسیال نوع جدیدی از سیال با کاربرد خاص است. در این آزمایش، به اثرات نانوسیال ترکیبی همگن TiO_2 و Al_2O_3 بر انتقال حرارت در اطراف یک میله عمودی با شار حرارتی کسینوسی پرداخته شده است. پژوهش انجام شده دارای دو بخش تجربی و عددی است. در پژوهش تجربی از آب مقطر دیونیزه شده برای نانوذرات Al_2O_3 با ابعاد ۲۵ نانومتر و نانوذرات TiO_2 با ابعاد ۱۰ نانومتر به صورت همگن استفاده شده است. با توجه به نتایج آزمایش تجربی بر روی مدارآزمون مشخص شد تأثیر حرارتی نانوسیال ترکیبی در رینولدز پایین قابل توجه است. همچنین نتایج عددی به دست آمده از اعتبار مناسبی برخوردار است که نشان می‌دهد مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ می‌تواند در حالت تک‌فاز برای شبیه‌سازی عملکرد نانوسیال مورد استفاده قرار بگیرد. نتایج به دست آمده از کار تجربی و عددی در زیر آمده است.

عملکرد بهتر شبیه سازی عددی به روش تک‌فاز در رینولدز بالا باشد.

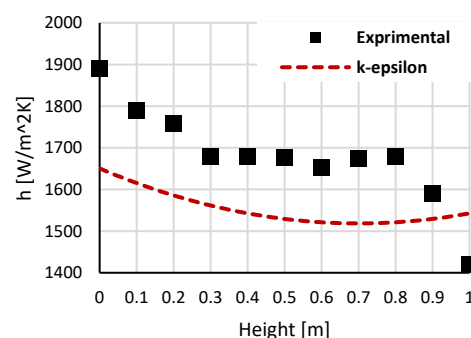


شکل ۱۵- نمودار دمایی نانوسیال ۱٪ در رینولدز ۴۲۰۰

نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی تفاوت ۱۳٪ و ۱۱٪ به ترتیب برای شکل ۱۴ و ۱۵ نشان می‌دهد.

۴-۲-۳- مقایسه ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال

شکل ۱۶ نمودار ضریب انتقال حرارت نانوسیال ۱٪ در رینولدز ۹۵۰ نشان می‌دهد.



شکل ۱۶- ضریب انتقال حرارت نانوسیال ۱٪ در رینولدز ۹۵۰

شکل ۱۷ نمودار ضریب انتقال حرارت نانوسیال ۱٪ در رینولدز ۴۲۰۰ را نشان می‌دهد.

۶- مراجع

- [1] Agency, I.E., World Energy Outlook. (2021): www.iea.org.
- [2] Choi, S.U. and J.A. Eastman (1995) Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).
- [3] Wang, J., et al.(2021) Investigation of Heat Transfer Characteristics of Al₂O₃-Water Nanofluids in an Electric Heater. 42(19-20): p. 1765-1774.
- [4] He, Y., et al. (2007) Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. 50(11-12): p. 2272-2281.
- [5] Duangthongsuk, W., S.J.I.I.o.H (2009) Wongwises, and M. Transfer, Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂-water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger. 52(7-8): p. 2059-2067.
- [6] Abbassi, Y., et al. (2014) Experimental investigation of TiO₂/Water nanofluid effects on heat transfer characteristics of a vertical annulus with non-uniform heat flux in non-radiation environment. 69: p. 7-13.
- [7] Alklaibi, A., L.S. Sundar, and K.V.C.J.I.I.o.T.S. Mouli (2022) Experimental investigation on the performance of hybrid Fe₃O₄ coated MWCNT/Water nanofluid as a coolant of a Plate heat exchanger. 171: p. 107249.
- [8] Kanti, P.K., et al. (2021) Experimental investigation on thermo-hydraulic performance of water-based fly ash-Cu hybrid nanofluid flow in a pipe at various inlet fluid temperatures. 124: p. 105238.
- [9] Moraveji, M.K., et al. (2012) Modeling of forced convective heat transfer of a non-Newtonian nanofluid in the horizontal tube under constant heat flux with computational fluid dynamics. 39(7): p. 995-999.
- [10] Ebrahimnia-Bajestan, E., et al. (2011) Numerical investigation of effective parameters in convective heat transfer of nanofluids flowing under a laminar flow regime. 54(19-20): p. 4376-4388.
- [11] Mousavizadeh, S.M., et al. (2015) Assessment of the TiO₂/water nanofluid effects on heat transfer characteristics in VVER-1000 nuclear reactor using CFD modeling. 47(7): p. 814-826.
- [12] Aly, W.I.J.E.C. and Management (2014) Numerical study on turbulent heat transfer and pressure drop of nanofluid in coiled tube-in-tube heat exchangers. 79: p. 304-316.
- عملکرد نانوسیال در رینولدز پایین بهتر است.
- با افزایش غلظت نانوذرات، دمای دیواره کاهش می‌یابد و ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. برای نانوسیال ۱٪ درصد میزان دمای بیشینه به مقدار ۲۰٪ در رینولدز ۹۵۰ و ۹/۵٪ نسبت به آب خالص کاهش پیدا می‌کند.
- با افزایش عدد رینولدز دمای سطح میله کاهش می‌یابد. این مقدار برای آب خالص از رینولدز ۹۵۰ به ۲۸۰۰ به میزان ۲۰٪ و برای نانوسیال ۱٪ به میزان ۱۰٪ است.
- نتایج عددی نشان می‌دهد مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ استفاده‌شده با توجه به استفاده از قابلیت بهبود عملکرد نزدیک به دیواره، عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی نانوسیال دارد.

فهرست علائم

A	سطح (m ²)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kgK)
k	رسانایی حرارتی (W/mK)
h	ضریب انتقال حرارت (W/m ² K)
\dot{q}	حرارت تولیدی (W)
T	دما (°C)
H	ارتفاع (m)
P	فشار (bar)
Re	عدد رینولدز
q''	شار حرارتی (W/m ²)
\dot{m}	دبی جرمی (kg/sec)

علائم یونانی

ϕ	غلظت نانوسیال
μ	ویسکوزیته (kg/m sec)
ρ	چگالی (kg/m ³)

زیر نویس

bf	سیال پایه
nf	نانوسیال
np	نانوذرات

[۱۳] رشید ج و طالبی م (۱۳۹۱) بررسی آزمایشگاهی اثر دمای سیال ورودی بر ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال اکسید آلومینیوم در یک لوله عمودی باشمار غیر یکنواخت

[15] F. A. Morrison (2021) *Uncertainty Analysis for Engineers and Scientists: A Practical Guide*. Cambridge University Press.

کسینوسی، اولین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی.

[۱۴] عباسی، ی، طالبی م و شیرانی ا (۱۳۹۱) بررسی تغییرات ضریب انتقال حرارت خنک کننده نانوسیال آبی اکسید تیتانیوم در راکتورهای هسته ای، کنفرانس هسته ای ایران.