**شبیه سازی CFD انتقال حرارت توسط نانوسیال نیکل-آب در مبدل لوله ای**

مسعود ناصری 1، ارسلان پرواره2\*، مصطفی کشاورز مروجی3

1 شرکت راه اندازی و بهره برداری صتایع نفت، ایکو

2 دانشگاه رازی، دانشکده فنی مهندسی، پژوهشکده تحقیقات پیشرفته مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات CFD

3 دانشگاه صنعتی امیر کبیر ( پلی تکنیک تهران)، دانشکده مهندسی شیمی

arsalanparvareh@yahoo.com \*

**چکيده**

در این تحقیق، مدل سازی CFD انتقال حرارت توسط نانوسیال نیکل- آب درون یک لوله افقی در معرض شار حرارتی ثابت انجام شده است. مدل‌سازی برای محدوده رژیم جریان آشفته با محدوده اعداد رینولدز 3000-22000 و غلظت حجمی مختلف نانوسیال شامل 0.02%، 0.1%، 0.3%، 0.6% انجام شده و اثر غلظت نانوسیال بر میزان انتقال حرارت و ضریب اصطکاک در رینولدزهای مختلف بررسی شد. با توجه به کسر پایین نانوذرات در سیال پایه ( آب) مدل سازی به صورت تک فازی صورت گرفت. راستی آزمایی نتایج شبیه سازی CFD بر اساس داده های تجربی منتشر شده در منابع معتبر انجام شد و حداکثر میزان خطا در ننایج پیش بینی CFD برابر 10% مشاهده گردید. پس از تایید نتایج شبیه سازی، دو رابطه برای ارزیابی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک بر اساس اعداد بدون بعد پیشنهاد گردید.

**واژگان كليدي:**

 شبیه سازی، نانوسیال، دینامیک سیالات محاسباتی، انتقال حرارت، ضریب اصطکاک

1. **مقدمه**

بیش از یک قرن از مطالعه و تحقیق در رابطه با افزایش خواص انتقال حرارت سیالات به دلیل اهمیت بالای آن میگذرد، زمانی که ماکسول [1] رساله نظری معروف خود را در مورد تعلیق ذرات جامد چاپ کرد. سیستم های تعلیق با ذرات با اندازه میلی یا میکرو، اگرچه تمایل به ناپایداری و ته نشین شدن دارند و باعث مقاومت جریان اضافی و فرسایش احتمالی می شوند [2]. به این دلایل، علاقه به سیال با ذرات جامد معلق بدون درنظر گرفتن کاربردهای قابل توجه آن، در قرن بیستم نسبتاً محدود شد. اما با توسعه فناوری نانو کاهش اندازه ذرات جامد امکان پذیر شد، که به لطف مساحت بالای سطح ذرات شرایط بهبود پایداری تعلیق و میزان انتقال حرارت فراهم گردید.

اصطلاح "نانو سیال" برای اولین بار توسط چوی و ایستمن [3] در سال 1995 تعریف شد که به معنای نسل جدیدی از سیالات انتقال حرارت با خواص حرارتی افزایش یافته می باشد که نانوذرات با اندازه‌های متوسط ​​زیر 100 نانومتر تعلیق می شوند [4]. تنها با افزودن غلظت کمی از نانوذرات به یک سیال پایه عموما آب یا اتیلن گلیکول بهبود چشمگیری در هدایت حرارتی پدیدار می شود.

Duangthongsuk و Wongwises [5] انتقال حرارت جابجایی اجباری H2O+TiO2 (2/0 درصد حجمی) را ارزیابی کردندکه سیال، درون یک مبدل حرارتی دو لوله ای با آرایش ناهمسو تحت جریان آشفته در جریان می باشد. مشخص شد ضریب انتقال حرارت جابجایی بطور محسوس در حدود 6٪-11٪ بیشتر از سیال پایه می باشد.

 فرج اللهی و همکاران [6] ویژگی های انتقال حرارت یک مبدل حرارتی پوسته و لوله که با H2O+𝛾-Al2O3 و H2O+TiO2 بعنوان نانوسیال تحت شرایط جریان آشفته را ارزیابی کردند. در یک عدد پکلت خاص ، ویژگی های انتقال حرارت H2O+TiO2 در غلظت بهینه خود بالاتر از نانوسیال دیگر بود. درصورتیکه نانوسیالH2O+𝛾-Al2O3 ، در غلظت های بالاتر ویژگی‌های انتقال حرارت بهتری گزارش شد.

کشاورز مروجی و حجازیان [7] با استفاده از ابزار CFD عملکرد حرارتی و افت فشار نانوسیال مغناطیسی Fe3O4 در غلظت های مختلف درون یک لوله افقی تحت شرایط جریان آشفته را بررسی کردند. نتایج نشان داد که میزان ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز و کاهش غلظت نانو سیال و به نتیجه آن میزان افت فشار کاهش می یابد.

 المغلانی و همکاران[8] در سال 2016 عملکرد حرارتی یک مبدل حرارتی دو لوله افقی جریان ناهمسو که از H2O+Cu به عنوان سیال سرد استفاده می شد را مورد بررسی قرار دادند. کسرهای حجمی در محدوده 1%-3% ارزیابی شد. بهبود قابل توجهی درسرعت انتقال حرارت به دلیل استفاده از نانوسیال مشاهده شد.

دیگلیو و همکاران [9] یک مدل عددی برای ارزیابی عملکرد حرارتی یک مبدل حرارتی ارائه دادند. در این تحقیق از انواع مختلف نانوسیالات حاوی غلظت نانوذرات در محدوده 1/0– 1درصد حجمی استفاده شد. نانوسیال با 1 درصد حجمی بیشترین کاهش مقاومت حرارتی را ایجاد کرد (3.8٪ نسبت به سیال پایه).

Bellos و همکاران [10] راندمان انرژی و اگزرژی کلکتورهای فتوولتائیک هیبریدی با استفاده از H2O+Cu و H2O+Al2O3 به عنوان سیالات عامل را به صورت عددی بررسی کرد ند. در مقایسه با آب خالص، H2O+Cu افزایش بازده انرژی و اگزرژی به ترتیب 8/4% و 66/0% مشاهده شد.

در سال 2020، دو و همکاران [11] عملکرد حرارتی یک سیستم مبدل حرارتی زمین گرمایی با استفاده از H2O+CuO به عنوان سیال را تجزیه و تحلیل کردند. نتایج، افزایش نرخ انتقال حرارت و توان مصرف پمپاژ برابر با 84/39 درصد و 75/16 درصد را نشان دادند.

در سال 2021، خدابنده و همکاران[12] مدل اختلاط دو فازی برای رفتار نانوسیال H2O+Ag در یک مبدل حرارتی مارپیچی را به صورت عددی بررسی کردند. نتایج تجزیه و تحلیل ها نشان می دهد که با افزایش غلظت حجمی نانوذرات ، عدد رینولدز و تعداد چرخش، ضریب کلی انتقال حرارت بهبود می یابد.

در این تحقیق، به مدل سازی جریان آشفته حاوی نانوذرات نیکل با قطر متوسط ​​نانوذره (75 نانومتر) در سیال پایه آب در یک افقی لوله با استفاده ازابزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بررسی می شود. هدف اصلی بررسی اثرات رینولدز جریان و غلظت نانوسیال بر روی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک می باشد. همچنین پارامتر ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی به عنوان معیاری که اثرات افزایش میزان انتقال حرارت (به عنوان یک اثر مثبت) و افزایش میزان افت فشار (به عنوان یک اثر منفی) به واسطه وجود نانوذرات در سیال پایه در آن لحاظ شده است، مورد مطالعه قرار می گیرد. اعتبار نتایج شبیه سازی با استفاده از داده های تجربی حاصله از مراجع [13] مورد بررسی قرار گرفته و سپس روابطی برای ارزیابی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک با استفاده از داده های شبیه سازی ارائه شده است.

1. **مدل سازی ریاضی**

**2-1. معادلات حاکم**

تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای شبیه سازی جریان پایای نانوسیال به عنوان سیال تک فاز با خواص فیزیکی متغیر در یک لوله افقی مورد استفاده قرار گرفت و معادلات حاکم برای سیتم جریان تکفازی به همراه نانوذرات پراکنده شده در آن به شرح زیر استفاده شد [14]:

 معادله پیوستگی:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | معدله پیوستگی | $$∇.\left(ρ\_{nf}.V\_{m}\right)=0$$ |
| (2) | معادله مومنتوم | $$∇.\left(ρ\_{nf}.V\_{m}.V\_{M}\right)=-∇P+∇\left(μ\_{nf}.∇V\_{m}\right)$$ |
| (3) | معادله انرژی | $$∇.\left(ρ\_{nf}.C.V\_{m}.T\right)=∇.\left(k\_{nf}.∇T\right)$$ |

با توجه به محدوده رینولدزهای در نظر گرفته شده برای جریان درون لوله، رژیم جریان آشفته بوده و برای مدل سازی اغتشتاش درون جریان ، از مدل آشفتگی k-ε استاندارد استفاده شد که معادلات آن به شرح زیر می باشد [15و16]:

|  |  |
| --- | --- |
| (4) | $$div\left(ρVε\right)=div\left\{\left(μ+\left(\frac{μ\_{t}}{σ\_{k}}\right)\right)gradε\right\}C\_{1ε}\left(\frac{ε}{k}\right)G\_{k}+C\_{2ε}ρ\left(\frac{ε^{2}}{k}\right)$$ |
| (5) | $μ\_{t}=ρC\_{μ}\frac{k^{2}}{ε}$ , $G\_{k}=μ\_{t}\left(∇V+∇V^{T}\right)$ $C\_{1ε}=1.44 $, $C\_{2}=1.92$ , $C\_{μ}=0.09$ , $σ\_{k}=1 $ , $σ\_{ε}=1.3$ |

**2-2. خواص ترموفیزیکی نانوسیال**

با فرض پراکندگی مناسب و همگن نانوذرات درون سیال پایه، دانسیته و گرمای ویژه نانوسیال در غلظت های حجمی متفاوت بر اساس روابط زیر ارزیابی شده اند [17]

|  |  |
| --- | --- |
| (6) | $$ρ\_{nf}=\left(1-φ\right)ρ\_{f}+φρ\_{np} : φ=volume fraction of nanoparticle$$ |
| (7) | $$C\_{Pnf}=φC\_{Pnp}+\left(1-φ\right)C\_{Pf}$$ |

با توجه به اینکه شبیه سازی بر اساس شرایط آزمایشگاهی منتشر شده در متون علمی برای نانوسیال آب-نیکل انجام شده است ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته بکار رفته در شبیه سازی CFD در غلظت های مختلف نانوسیال بر اساس مقادیر در نظر گرفته شده در مطالعات تجربی لحاظ شده است [13].

**2-3. تعریف مسئله، هندسه و مبانی حلگر**

شبیه سازی CFD به صورت دوبعدی برای لوله ای به قطر m 014/0 و طول m 5/1 که درون آن نانوسیال نیکل- آب با غلظت های مختلف و در محدوده رینولدزهای رژیم آشفته تحت شرایط اعمال شار حرارتی ثابت (w/m2 13400) به دیواره جانبی لوله صورت گرفته است. نانوسیال شامل نانوذرات Ni با قطر متوسط nm 75 بوده که با کسرهای حجمی مختلف (02/0-6/0 درصد حجمی ) در سیال پایه آب مقطر در رینولدزهای مختلف جریان (رینولدز بین 3000-22000) در نظر گرفته شده است. شماتیک هندسه در نظر گرفته شده در شبیه سازی در شکل 1 ارائه شده است.

هندسه سیستم با استفاده از مش های مربع و سازمان یافته به تعداد 300×14 المان تقسیم شده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 1. هندسه ترسیمی در نرم افزار |

در ورودی لوله سرعت های مختلف نظیر اعداد رینولدز در نظر گرفته شده در مطالعه آزمایشگاهی و در خروجی لوله فشار به صورت فشار اتمسفریک در نظر گرفته شد. برای دیواره لوله شرط عدم لغزش جریان روی دیواره و همچنین دیواره جانبی لوله تحت شار حرارتی ثابت در نظر گرفته شد.

همانگونه که بیان شده برای شبیه سازی مشخه های اغتشاش جریان از مدل استاندارد k-ε استفاده شد. برای حل معادلات مومنتوم و انرژی از روش first-order upwind و برای ارتباط میدان سرعت و فشار از الگوریتم SIMPLE استفاده گردید. معیار همگرایی برای میدان های سرعت، فشار و دما با استفاده از معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی مرتبه 6-10 در نظر گرفته شد.

**2-4. مبانی تئوری انجام محاسبات**

با توجه به اعمال شار حرارتی ثابت به دیواره جانبی لوله، ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط برای جریان درون لوله با استفاده از میانگین اختلاف دمای دیواره لوله ($T\_{wall}$) و دمای توده سیال ($T\_{b}$) در طول لوله با استفاده از رابطه زیر ارزیابی می شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (8) | $$\overline{h}=\frac{q^{''}}{\overline{T\_{w}-T\_{b}}}$$ |

با تعیین ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط، عدد ناسلت متوسط جریان در صول لوله به صورت زیر ارزیابی می شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (9) | $$\overline{Nu}=\frac{\overline{h}.D}{k}$$ |

 در روابط فوق، پارامترهای Tb و Twall به ترتیب دمای توده سیال در هر مقطع لوله و دمای دیواره لوله می باشند. K ضریب هدایت حرارتی سیال درون لوله که در دمای متوسط جریان درون لوله از داده های آزمایشگاهی مرجع ذکر شده[13] استخراج شده است. پارامتر $q^{''}$ شار حرارتی اعمال شده بر دیواره لوله و D قطر داخلی لوله می باشد. در نهایت، $\overline{h} $ ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط برای جریان درون لوله می باشد.

1. **نتایج شبیه سازی و بحث**

نتایج حاصل از شبیه سازی برای غلظت های مختلف نانوسیال آب-نیکل در رینولدزهای مختلف رژیم جریان آشفته در این قسمت ارائه خواهد شد.

**3-1. تاثیر غلظت نانوذره بر روی عدد ناسلت متوسط**

در شکل 2 تغییرات عدد ناسلت در رینولدزهای مختلف برای آب خالص و همچنین نانوسیال با کسرهای حجمی مختلف نانوذره نیکل شامل 0.02%، 0.1%، 0.3%، 0.6% ارائه شده است. همانگونه که قبلا بیان شد لوله تحت شار حرارتی ثابت بوده است. مشاهده می شود که با افزایش عدد رینولدز جریان مقدار عدد ناسلت و به تبع آن میزان انتقال حرارت افزایش می یابد که این موضوع با مطالعات تجربی مختلف و همچنین روابط ارائه شده در توافق است. همچنین، در تمام گستره های بررسی شده رینولدز، افزایش غلظت نانوسیال باعث افزایش میزان عدد ناسلت شده است که دلیل آن به افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال به واسطه وجود نانوذرات و همچنین وجود حرکت های براونی در نانوسیال بوده که باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت جریان می شوند. مقادیر اعداد ناسلت ارزیابی شده بر مبنای اطلاعات حاصل از پیش بینی CFD تطابق خوبی با مقادیر محاسبه شده بر مبنای داده های آزمایشگاهی را نشان داده است. در اعداد رینولدز پایین تر جریان، تطابق بین نتایج شبیه سازی و تجربی بهتر بوده و بیشترین مقدار خطا بین نتایج شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی حدود 10% می باشد. همچنین نتایج نشان می دهد که در اعداد رینولدز بالاتر، تاثیر نانوذرات در افزایش اعداد ناسلت محسوس تر می باشد به نحویکه در بالاترین رینولدز بررسی شده، میزان عدد ناسلت در بیشترین غلظت نانوسیال (0.6% حجمی) حدود 50% بیشتر از ناسلت مربوط به آب خالص می باشد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل2. مقایسه اعداد ناسلت ارزیابی شده بر مبنای نتایج شبیه سازی CFD و داده های آزمایشگاهی در رینولدزهای مختلف جریان و غلظت های مختلف نانوسیال نیکل- آب  |

**3-2. رابطه برازش شده عدد ناسلت بر مبنای نتایج شبیه سازی**

انتقال حرارت جابجایی توسط نانوسیال به پارامترهای مختلفی مانند ضریب هدایت حرارتی، گرمای ویژه، ویسکوزیته و غلظت نانوسیال بستگی دارد. با استفاده از نتایج مدل‌سازی، یک معادله همبستگی برای تخمین عدد ناسلت برای نانوسیال نیکل- آب در لوله افقی به عنوان تابعی از عدد رینولدز (Re) (22000 > Re > 3000) ، عدد پراندتل (Pr) و کسر حجمی ذرات ایجاد شد($φ$) ارائه شد:

|  |  |
| --- | --- |
| (10) | $$Nu\_{corr.}=0.00242Re^{1.041}Pr^{0.5}(1+φ)^{60.55}$$ |

در شکل 3 همبستگی بین نتایج ناسلت ارزیابی شده بر مبنای اطلاعات پیش‌بینی‌شده توسط CFD و مقادیر ناسلت محاسبه شده با استفاده رابطه (10) نشان داده شده است. همانگونه که نمودار نشان می دهد حداکثر خطای حدود 10 درصد می باشد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 3. مقایسه نتایج ناسلت ارزیابی شده توسط شبیه سازی CFD و محاسبه شده توسط رابطه برازش شده  |

**3-3. تاثیر غلظت حجمی نانوسیال روی ضریب اصطکاک**

وجود نانوذرات در سیال پایه به طور کلی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و بهبود انتقال حرارت شده ( که یک اثر مطلوب محسوب می شود) و از طرف دیگر تا حدودی باعث افزایش ضریب اصطکاک و افت فشار درون سیستم شده که یک اثر نامطلوب تلقی می شود.

در شکل 4 تغییرات ضریب اصطکاک را برای نانوسیال آب-نیکل با غلظت های مختلف در رینولدزهای مختلف بر مبنای مقادیر افت فشار پیش بینی شده در شبیه سازی CFD و استفاده از رابطه دارسی- ویسباخ نشان داده شده است. مشاهده می شود که به طور کلی با افزایش رینولدز، ضریب اصطکاک کاهش یافته است که در توافق با روند دیاگرام مودی می باشد. همچنین در عدد رینولدزهای یکسان، ضریب اصطکاک در نانوسیالات بیشتر از آب خالص بوده و با افزایش غلظت نانوسیال، ضریب اصطکاک نانوسیال اندکی افزایش یافته است. مقایسه با نتایج شبیه سازی و اندازه گیری های تجربی نشان می دهد که ضریب اصطکاک پیش بینی شده توسط شبیه سازی در رینولدزهای پایین تطابق بهتری با مقادیر ارزیابی شده بر مبنای داده های آزمایشگاهی داشته و با افزایش عدد رینولدز، خطای شبیه سازی افزایش می یابد که آن را می توان در نوع مدل آشفتگی بکار رفته در شبیه سازی بررسی نمود.

|  |
| --- |
|  |
| شکل4. مقایسه ضریب اصطکاک ارزیابی شده بر مبنای نتایج شبیه سازی CFD و داده های آزمایشگاهی در رینولدزهای مختلف جریان و غلظت های مختلف نانوسیال نیکل- آب  |

**3-4. رابطه برازش شده ضریب اصطکاک بر مبنای نتایج شبیه سازی**

با توجه به مقادیر ضریب اصطکاک ارزیابی شده بر مبنای اطلاعات حاصل از پیش بینی CFD ، رابطه ای برای محاسبه ضریب اصطکاک مربوط به نانوسیال نیکل- آب در جریان درون لوله افقی به عنوان تابعی از عدد رینولدز جریان (22000 > Re > 3000) و کسر حجمی نانوذره (φ) برازش شد که به شرح زیر ارائه می گردد:

|  |  |
| --- | --- |
| (11) | $$f\_{corr.}=0.5254Re^{-0.2937}(1+φ)^{16.18}$$ |

همبستگی مقادیر ضریب اصطکاک ارزیابی شده بر اساس رابطه (11) و مقادیر پیش بینی شده ضریب اصطکاک با استفاده از شبیه سازی CFD برای نانوسیال نیکل- آب در شکل 5 نشان داده شده است. مشاهده می شود که ماکزیمم مقادیر خطا در این همبستگی برابر 8% می باشد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 5. مقایسه نتایج ضریب اصطکاک ارزیابی شده توسط شبیه سازی CFD و محاسبه شده توسط رابطه برازش شده |

**3-5. بررسی عملکرد حرارتی-هیدرولیکی نانوسیال**

با توجه به اینکه به طور کلی وجود نانوذرات در سیال پایه از یک طرف باعث بهبود انتقال حرارت شده و از طرف دیگر افت فشار را افزایش می دهد برای مطالعه این دو اثر متقابل، پارامتر عملکرد حرارتی - هیدرولیکی به صورت زیر معرفی می شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (12) | $$Thermal-Hydrulic Performance (THP)=\frac{\left(^{Nu}/\_{Nu\_{0}}\right)}{\left(^{f}/\_{f\_{0}}\right)^{{1}/{3}}}$$ |

که در آن Nu و f به ترتیب میزان عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در غلظت های متفاوت نانوسیال و Nu0 و f0 میزان عدد ناسلت و ضریب اصطکاک مربوط به آب خالص می باشد. مقادیر ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی برای غلظت های مختلف نانوسیال در محدوه در نظر گرفته شده برای عدد رینولدز در شکل 6 نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است بیشترین ضریب عملکرد حرارتی – هیدرولیکی مربوط به نانوسیال با غلظت 6/0 درصد حجمی بوده که برابر 41/1 می باشد. روند کلی نمودار نشان می دهد که در غلظت های بالاتر نانوسیال، اگر چه میزان افت فشار افزایش می یابد ولی میزان تقویت ضریب انتقال حرارت در حدی بوده که ضریب عملکرد بالاتری حاصل شده است. این موضوع گویای آن است که تاثیر افزایش غلظت نانوسیال در غلظت های بالاتر در افزایش ضریب انقال حرارت جابجایی به مراتب بیشتر از تاثیر آن در افزایش افت فشار می باشد. نکته قابل توجه دیگر آن است که در تمامی غلظت های نانوسیال، در رینولدزهای میانی ( حدود 12000) میزان ضریب عملکرد تقریبا بیشترین مقدار را داشته و با افزایش رینولدز تغییر محسوس در آن مشاهده نشده است.

شکل 6. ضریب عملکرد نانوسیال در غلظت های متفاوت

1. **نتیجه گیری**

شبیه سازی CFD برای انتقال حرارت جابجایی در جریان نانوسیال با غلظت های مختلف درون لوله افقی با رینولدزهای مختلف جریان انجام شد. نتیج حاصل از شبیه سازی در تمام موارد با داده های تجربی مرجع مقایسه شد و تطابق خوبی بین نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و داده‌های تجربی در اعداد رینولدز کمتر برای نانوسیال‌های با غلظت ذرات کمتر وجود داشت. میزان همبستگی روابط برازش شده برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک با نتایج حاصله از شبیه سازی CFD بررسی و تطابق خوبی ملاحظه شد. نتایج این مطالعه نشان داد که عدد ناسلت و به تبع آن مقدار انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز و غلظت حجمی نانوذره افزایش می یابد. همچنین ضریب اصطکاک و به تبع آن مقدار افت فشار با افزایش عدد رینولدز و کاهش غلظت حجمی کاهش می یابد.

**منابع**

1. Maxwell JC. A treatise on electricity and magnetism. Clarendon Press; 1881.
2. Wang X-Q, Mujumdar AS. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. Int J Therm Sci 2007;46(1):1–19.
3. Choi SU, Eastman JA. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. In: International mechanical engineering congress andexhibition, San Francisco, CA (USA). IL, United State: Argonne ational Lab.; 1995.
4. Lee J-H, Lee S-H, Choi C, Jang S, Choi S. A review of thermal conductivity data, mechanisms and models for nanofluids. Int J Micro-Nano Scale Transp 2011.
5. Duangthongsuk W, Wongwises S. Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO2–water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger. Int J Heat Mass Transfer 2009;52(7–8):2059–67.
6. Farajollahi B, Etemad SG, Hojjat M. Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger. Int J Heat Mass Transfer 2010;53(1–3):12–7.
7. M.K. Moraveji, M. Hejazian, Modeling of turbulent forced convective heat transfer and friction factor in a tube for Fe3o4 magnetic nanofluid with computational fluid dynamics, International Communications in Heat and Mass Transfer 39 (2012) 1293–1296.
8. El-Maghlany WM, Hanafy AA, Hassan AA, El-Magid MA. Experimental study of Cu–water nanofluid heat transfer and pressure drop in a horizontal double-tube heat exchanger. Exp Therm Fluid Sci 2016;78:100–11.
9. Diglio G, Roselli C, Sasso M, Channabasappa UJ. Borehole heat exchanger with nanofluids as heat carrier. Geothermics 2018;72:112–23.
10. Bellos E, Tzivanidis C, Nikolaou N. Investigation and optimization of a solar assisted heat pump driven by nanofluid-based hybrid PV. Energy Convers Manage 2019;198:111831.
11. Du R, Jiang D, Wang Y, Shah KW. An experimental investigation of CuO/water nanofluid heat transfer in geothermal heat exchanger. Energy Build 2020;110402
12. Khodabandeh E, Boushehri R, Akbari OA, Akbari S, Toghraie D. Numerical investigation of heat and mass transfer of water-silver nanofluid in a spiral heat exchanger using a two-phase mixture method. J Therm Anal Calorim 2020;1–10.
13. Sundar LS, Singh MK, Bidkin I, Sousa AC. Experimental investigations in heat transfer and friction factor of magnetic Ni nanofluid flowing in a tube. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014 Mar 1;70:224-34
14. M.K. Moraveji, M. Darabi, S.M.H. Haddad, R. Davarnejad, Modeling of convective heat transfer of a nanofluid in the developing region of tube flow with computational fluid dynamics, International Communications in Heat and Mass Transfer 38 (2011) 1291–1295.
15. P.K. Namburu, D.K. Das, K.M. Tanguturi, R.S. Vajjha, Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties, International Journal of Thermal Sciences 48 (2009) 290–302.
16. B.E. Launder, D.B. Spalding, Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, New York, 1972.
17. S. Kakac, A. Pramuanjaroenkij, Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009) 3187–3196.

**CFD simulation of heat transfer using Ni-Water nanofluid in a tubular heat exchanger**

**Masoud Naseri 1, Arsalan Parvareh 2\*, Mostafa Keshavarz Moraveji  3**

1 Oil Industries, Commissioning and Operation Company (OICO)

2 CFD Research Group, Advanced Chemical Engineering Research Center, Faculty of Petroleum and Chemical Engineering, Razi University, Kermanshah 6714967346, Iran

3 Department of Chemical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

**Abstract**

In this study, CFD modeling of heat transfer using Ni-water nanofluid in a horizontal tube exposed to a constant heat flux has been performed. Turbulent flow modeling in the range of 3000-22000 for Reynolds number and various volume concentrations of nanofluid including 0.02, 0.1, 0.3, and 0.6 % was done. The effect of the concentration of nanofluid on the heat transfer and friction factor was studied at different Reynolds numbers. One phase flow model was employed regarding the low fraction of the nanoparticles in the base fluid. Validation of the CFD predictions was performed using experimental results of the literature, and a maximum error of 10% was observed. Two correlations were obtained for evaluating the Nusselt number and friction factor based on the dimensionless groups.

**Key words**: Simulation, Computational Fluid Dynamics, Heat Transfer, Friction factor