

مجموعه مقالات هشتمین همایش ملی مبدل گرمایی

دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی کیمیا

ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

www.Mobadel.ir



## شبیه سازی جریان نانو سیالات در لوله های مجهز به نوار پیچ خورده برای ایجاد جریان توربولانسی

**سالار کلانتری:** دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد فراهان

**مریم ادیمی:** دکتری تخصصی مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد فراهان

**محمود سلیمی:** دکتری تخصصی مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک

Salar\_2006\_kalan@yahoo.com

### چکیده

انتقال حرارت، ضریب اصطکاک سطحی و عملکرد حرارتی نانو سیال آب-اکسید مس در این تحقیق درون یک لوله مدور مجهز به نوار پیچ خورده به صورت عددی و با استفاده از نرم افزار قدرتمند حجم محدود انسیس فلونت ۱۴ مورد بررسی قرار گرفته است. کسر حجمی نانو ذرات در سیال پایه آب ۰/۳ و ۰/۵ و ۰/۷ درصد است و رژیم جریان نیز آرام در نظر گرفته شده است. جریان نانو سیال وارد لوله ای می شود که مجهز به نوار پیچ خورده است و دور تا دور لوله شار حرارتی ثابت ۳ کیلووات بر مترمربع اعمال می شود. نرخ دبی جرمی نیز متفاوت بوده و شامل هشت دبی متفاوت است که در گستره ی عدد رینولدز ۸۸۰ تا ۱۹۹۰ قرار گرفته است. در پایان مشاهده می شود که ارتباط کاملاً مستقیمی بین اعداد رینولدز و ناسلت وجود دارد و با افزایش عدد رینولدز، ناسلت نیز افزایش پیدا می کند. تکنیک استفاده از نوار پیچ خورده کاملاً بازدهی مناسبی دارد، البته این نوار باعث افزایش ضریب اصطکاک سطحی و افت فشار نیز می شود.

**واژگان کلیدی:** مبدل حرارتی، نوار پیچ خورده، نرم افزار فلونت، نانو سیال، بهبود انتقال حرارت.

DEMO



## ۱- مقدمه

مبحث انرژی به عنوان یکی از مهم‌ترین بحث‌ها در جامعه بشری در پنجاه سال اخیر مطرح است. روش‌های موجود برای بهبود انتقال حرارت در سیال در تمام شرایط مختلف به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: روش‌های فعال و غیر فعال. در روش‌های فعال باید به سیستم کار داده شود (انرژی به سیستم از بیرون تزریق گردد). در روش‌های غیر فعال بهبود انتقال حرارت با اصلاح خواص فیزیکی سیال، اصلاح شکل مبدل حرارتی، افزایش زبری و اضافه نمودن سطوح به مبدل حرارتی برای افزایش سطح انتقال حرارت و ایجاد اغتشاش در جریان صورت می‌پذیرد.

بهبود مبدلهای حرارتی متداول، به طور معمول با تکنیک‌های افزایشی مرسوم انجام می‌پذیرد که مبنای بیشتر آنها افزایش سطح می‌باشد. در مبدلهای حرارتی فشرده، دو تکنیک افزایش انتقال حرارت هدایتی وجود دارد. یکی از آنها افزایش مساحت سطح انتقال حرارت مثل پره‌ها می‌باشد و دیگری افزایش ضریب انتقال حرارت بین سطح جامد و سیال، مثلاً با استفاده از مغتشش‌کننده‌ها به عنوان تولیدکننده جریان گردابی می‌باشد. در طراحی کانال‌های سرمایش و کانال مبدل حرارتی، معمولاً به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت هدایتی، از دنده، پره، و باله مغتشش‌کننده استفاده می‌شود؛ که این باعث فشردگی مبدل حرارتی، بازده بالا، قیمت پایین و در کنار آن کوچکترین حجم و سبکترین وزن ممکن می‌گردد. استفاده از باله‌های مغتشش‌کننده، جریان سیال را به طور کامل تغییر داده و بدین ترتیب ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی نیز تغییر می‌کند. به منظور افزایش انتقال حرارت، باله‌ها به طور موفقیت‌آمیزی در سیستم‌های حرارتی مدرن بکار گرفته شده‌اند؛ دلیل آن این است که آنها با کمترین خطا در اتلاف فشار، توانایی ایجاد گردابه طولی و کمک به اختلال جریان اصلی را دارند. گردابه‌هایی که باعث افزایش انتقال حرارت می‌شوند، یک روش افزایشی غیر فعال می‌باشند که بستگی به گردابه تولید شده عمودی و در جهت جریانی دارند که هدف آن افزایش انتقال حرارت است. VG در مبدلهای حرارتی فشرده صفحه‌ای و تخت بکار گرفته می‌شوند تا عملکرد حرارتی آنها را بهبود ببخشند. در مجموعه VGها، چینش مرسوم گردابه‌های طولی در لایه مرزی آشفته نصب می‌شود؛ مجموعه VGهای نصب شده در لایه مرزی آشفته، سبب تغییرات دوره‌ای اصطکاک سطحی می‌شود که این سبب افزایش انتقال حرارت می‌گردد.

خواص ضعیف انتقال حرارتی سیالات اولین مانع تاثیر گذار در بهبود راندمان مبدلهای حرارتی به شمار می‌رود. نکته کلیدی بهره‌برداری از هدایت بسیار بالای ذرات جامد حدوداً صد‌ها برابر بیشتر از سیالات رایج در انتقال حرارت در ترکیب این سیالات می‌باشد. راه مبتکرانه‌ای که کشف شد، ساخت سوسپانسیون‌های از ذرات ریز جامد در سیالات خالص بود و این ایده یک راهکار برای افزایش خواص انتقال حرارتی سیالات رایج حامل انرژی بوده است. انواع گوناگون ذرات همچون ذرات فلزی، غیر فلزی و پلیمری را می‌توان به سیال پایه افزود و یک محصول دوغابی شکل تهیه کرد. اما سوسپانسیون‌ها با ذرات معلق در اندازه‌های میکرومتری و حتی میلی‌متری مشکلاتی همچون اثر ساییدگی ذرات، مسدود شدن مسیر کانال، فرسایش شبکه لوله و کاهش انتقال مومنوم و افزایش افت فشار ایجاد می‌کنند (۱). راهی که به کمک مهندسی سیالات آمد و به بهبود ویژگی‌های انتقال حرارتی سیالات منتهی شد، علم

DEMO



DEMO

نانو تکنولوژی بود. استفاده از ذرات ریز جامد با اندازه نانومتری در سیال خالص پایه برای اولین بار در آزمایشگاه ملی آرگون آمریکا توسط ژوان (۲) مطرح شد و اولین سوسپانسیون را نانو سیال نامید. در ده سال گذشته بسیاری از محققین خواص انتقال حرارت نانوسیالات گوناگون را مطالعه و مورد بررسی قرار دادند.

هندسه مورد نظر که طی این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، هندسه برگرفته از طرح تجربی آقای ونگ چار [۳] در سال ۲۰۱۲ می باشد که طول مبدل مورد استفاده ۵۰ سانتی متر و قطر آن ۸ سانتی متر است. مواردی که در بحث انتقال حرارت از قسمت جامد به سیال دخیل هستند را می توان ضریب هدایت حرارتی دیواره های مبدل و نیز سطح تبادل حرارت دیواره های مبدل و سیال معرفی نمود. در طرح تجربی ونگ چار [۳] این مبدل گرمایی به منظور تبادل حرارتی با هیتز که شار ثابت ۳ کیلو وات بر مترمربع را ایجاد می کند، ساخته شده است. دمای سیال ورودی به مجموعه ۲۹۳ درجه ی کلوین در نظر گرفته شده است. عمل تبادل حرارتی بین نانوسیال و محفظه ی آب برای ۸ نرخ جرمی متفاوت و در گستره ی اعداد رینولدز بین ۸۳۰ تا ۱۹۹۰ مورد آزمایش قرار گرفته است. همچنین نانوسیال استفاده شده، نانوسیال آب-اکسید مس است که طی ۳ حالت مختلف نانوسیال ۰/۳٪، نانوسیال ۰/۵٪ و نیز نانوسیال ۰/۷٪ مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۲ - مساله

### روابط حاکم و روش مدل سازی

معادلات در این تحقیق، شامل معادلات مرسوم پیوستگی، مومنتوم و معادله انرژی می باشد. از معادلات مومنتوم و پیوستگی برای محاسبه بردار سرعت و از معادله انرژی برای محاسبه توزیع دما و ضریب انتقال حرارت دیوار استفاده می شود. در ادامه معادلات پایستاری جرم، مومنتوم و انرژی آورده می شود.

معادله پایستاری جرم یا معادله پیوستگی می تواند به صورت زیر نوشته شود:

(۱)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

معادله پایستاری مومنتوم به صورت زیر می باشد:

(۲)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

که  $p$  فشار استاتیکی،  $\bar{\tau}$  تانسور تنش و  $\vec{g}$  و  $\vec{F}$  نیروی گرانش و نیروی حجمی بیرونی می باشد. تانسور تنش به صورت زیر تعریف می شود:

(۳)

$$\bar{\tau} = \mu[(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T) - \frac{2}{3}\nabla\cdot\vec{v}I]$$

که  $\mu$  ویسکوزیته مولکولی،  $I$  تانسور واحد و ترم دوم در سمت راست معادله، ناشی از انبساط حجمی می‌باشد. فلوننت معادله انرژی که به صورت زیر می‌باشد، حل می‌کند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla\cdot(\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla\cdot[\kappa_{eff}\nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff}\cdot\vec{v})] + S_h$$

(۴)

که  $\kappa_{eff}$  ضریب هدایت موثر ( $\kappa + \kappa_\tau$ ) که  $\kappa_\tau$  ضریب هدایت حرارتی اغتشاش می‌باشد، که بر اساس مدل تربولانسی استفاده شده، تعریف می‌شود و  $\vec{J}_j$  شار پخش گونه  $j$  می‌باشد. سه ترم اول سمت راست معادله، انتقال حرارت هدایت، پخش گونه‌ها و اضمحلال ویسکوزیته را نشان می‌دهد.  $S_h$  شامل حرارت ناشی از واکنش شیمیایی و یا هر منبع حرارتی حجمی دیگری می‌باشد.

در معادله انرژی  $E$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

(۵)

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$$

که  $h$  همان آنتالپی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

(۶)

$$h = \sum_j Y_j h_j$$

که  $Y_j$  کسر جرمی گونه  $j$  می‌باشد، و:

(۷)

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT$$

### ۳- مدل سازی

با توجه به هندسه مسئله در این تحقیق، تحلیل در فضای سه‌بعدی انجام شده است. برای شبکه‌بندی هندسه جریان، اندازه المان در جهت شعاعی ۱ میکرون و اندازه المان در جهت طول لوله ۵ میکرون در نظر گرفته شده است و از روش Tetrahedrons استفاده شده است.

## مجموعه مقالات هشتمین همایش ملی مبدل گرمایی

دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی‌های شیمیایی

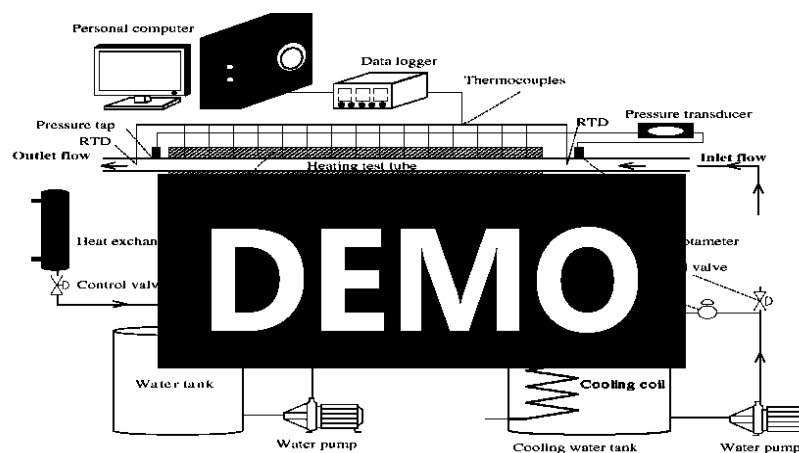
ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

www.Mobadel.ir

DEMO



این تحقیق با شرط مرزی شار گرمایی ثابت روی جداره‌ها انجام شده است. میزان این شار گرمایی ۳۰۰۰ وات بر مترمربع یا ۳ کیلووات بر مترمربع فرض شده است. دمای سیال ورودی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و به‌طور یکنواخت بوده و سرعت سیال در ورودی لوله نیز در عرض لوله یکنواخت است که مقدار این سرعت با توجه به عدد رینولدز متفاوت خواهد بود. برای تحلیل مسئله با نرم‌افزار FLUENT از مدل جریان لمینار استفاده می‌شود.



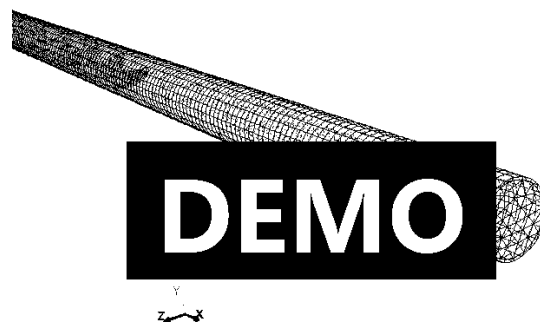
شکل (۱) فرم کلی مدل تجربی مورد آزمایش قرار گرفته شده در طرح تجربی ونگ چار [۲]

هندسه‌های مسئله در نرم‌افزار Gambit 2.4.6 تولید و شبکه‌بندی شده است. شبکه‌ی مورد استفاده همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده ساخت یافته‌ی غیریکنواخت از نوع O-Grid بوده است. معادلات دیفرانسیل غیرخطی همبسته حاکم بر مسئله نیز با استفاده از نرم‌افزار ANSYS FLUENT14 بر اساس روش حجم محدود حل شده‌اند.

DEMO



DEMO



Mesh Aug 09, 2016  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, dp, pbn, lam)

شکل ۲) هندسه ی مش خورده با استفاده از نرم افزار انسیس

#### ۴ - حل مساله

در تنظیمات حل کننده‌ی مورد نظر در نرم افزار فلونت امکان استفاده از دو روش حل وجود دارد که یکی حل کننده‌ی غیر وابسته و دیگری حل کننده‌ی وابسته می‌باشد. در این نرم افزار معادلات انتگرالی بقای جرم و مومنتوم قابل حل می‌باشد و زمانی که لازم باشد معادلات انرژی و دیگر اسکالرها مانند مدل اغتشاشی و معادلات مربوط به فعل و انفعالات شیمیایی نیز قابل حل است. در هر دو مورد از یک تفکیک حجم کنترل استفاده می‌شود که شامل: تقسیم دامنه به حجم‌های کنترلی جداگانه با استفاده از یک شبکه بندی محاسباتی، انتگرال گیری معادلات در هر یک از حجم‌های کنترلی برای ایجاد معادلات جبری با متغیرهای وابسته (مجهولات) مانند سرعت، فشار، دما و کمیت‌های بقایی (مانند جرم و انرژی) و در نهایت، خطی سازی معادلات مستقل و حل این سیستم معادلات خطی برای دستیابی به مقادیر جدید متغیرهای وابسته می‌باشد.

#### ۵ - نتایج نرم افزاری

به منظور مقایسه نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی با نتایج در طرح تجربی ونگ چار [۳] با در نظر گرفتن هشت نرخ جرمی، متناسب با هشت عدد رینولدز ۸۳۰، ۹۸۰، ۱۱۸۰، ۱۳۱۰، ۱۶۸۰، ۱۸۵۰، ۱۹۹۰ و ۱۵۰۰ سه نوع نانو سیال محاسبات عددی انجام شده و به علت حجم وسیع محاسبات فقط از شکل ۳ برای نشان دادن میزان صحت و دقت استفاده شده است. همانطور که در شکل ۳ مشخص است خروجی کار عددی حاضر، تفاوت بسیار کمی با کار تجربی مدل شده دارد. عدد ناسلت متوسط خروجی در شکل ۳ در مجموع برای سه وضعیت مختلف با مقادیر ذکر شده در منبع در طرح تجربی [۳] مقایسه گردیده اند. با توجه به مقادیر به دست آمده از مدل سازی عددی تطابق خوبی با مقادیر تجربی مشاهده می شود، به گونه ای که تفاوت ها همیشه کمتر از ۱۴٪ می باشد لذا از اعتبار نتایج مدل سازی عددی اطمینان حاصل می شود. لازم به ذکر است که با توجه به طبیعت کارهای تجربی و محدودیتهای مربوط اندازه گیری و وسایل اندازه گیری تفاوت حداکثر ۱۴٪ پذیرفته است.

مجموعه مقالات هشتمین همایش ملی مبدل گرمایی

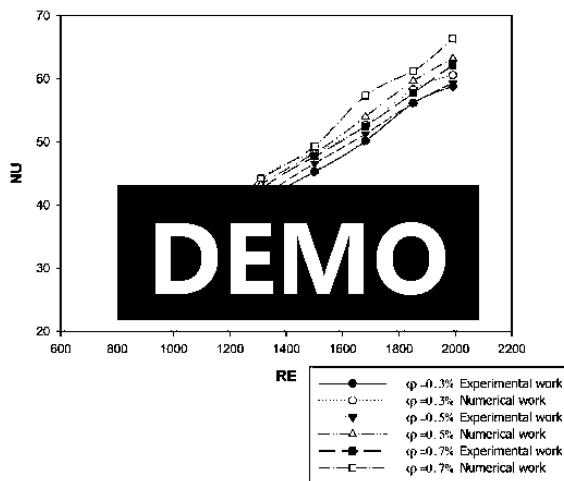
دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی‌کیما

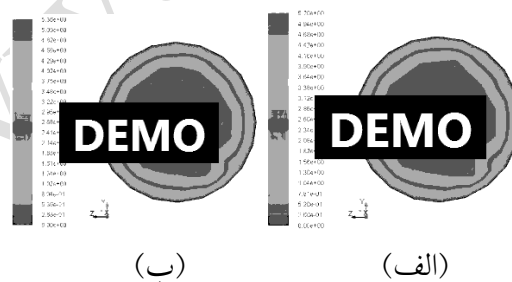
ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

www.Mobadel.ir



شکل ۳) مقایسه ی عدد ناسلت متوسط خروجی حاصل از کار آقای ونگ چار و حاصل از کار عددی بر حسب عدد رینولدز

شکل ۴) مراحل توسعه یافتگی جریان نانوسیال را در مقطع خروجی برای  $Re=1990$  و کسر حجمی نانوذرات  $0.7\%$  نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، پروفیل سرعت محوری رفته رفته تثبیت شده و به حالت توسعه یافتگی می‌رسد. نحوه ی ثبت این پروفیل‌های به این گونه است که پس از هر ۵۰۰ بار تکرار حل معادلات، حل قطع می‌شود و از مقطع خروجی کانتور گرفته می‌شود. همانگونه که به خوبی در شکل مشخص است پس از تکرار حل معادلات و در نهایت همگرایی آنها، پروفیل سرعت نیز به خوبی پایدار می‌شود و تشکیل لایه مرزی در اطراف لوله به خوبی نمایان است.



مجموعه مقالات هشتمین همایش ملی مبدل گرمایی

دوم دی ماه ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی‌های شیمیایی

ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

www.Mobadel.ir



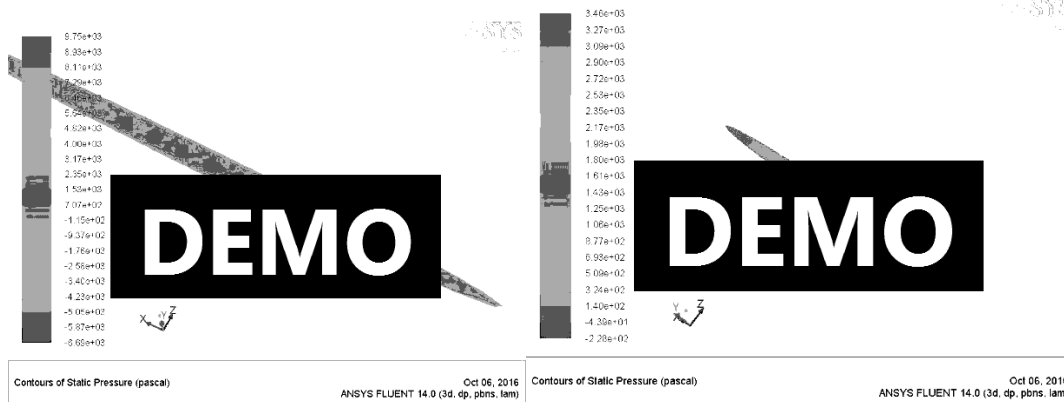
(د)

(ج)

شکل ۴) کانتور سرعت محوری جهت نشان دادن مراحل توسعه یافتگی جریان:

الف) تکرار حل=۵۰۰ (ب) تکرار حل=۱۰۰۰ (ج) تکرار حل=۱۵۰۰ (د) تکرار حل=۱۹۹۶.

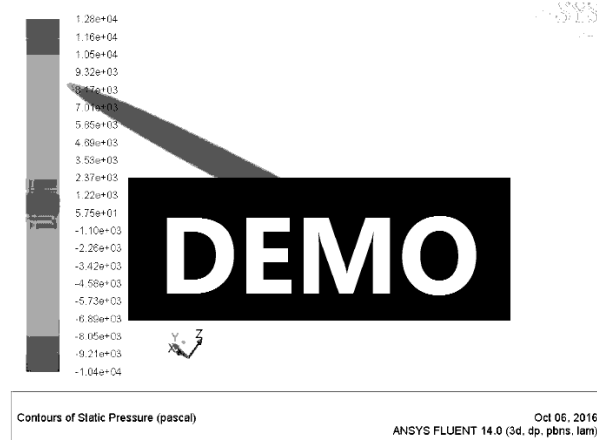
شکل ۵) میزان افت فشار برای سه کسر حجمی نانوذرات (۰.۳٪، ۰.۵٪ و ۰.۷٪) در عدد رینولدز  $Re=1850$  را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان افت فشار با افزایش کسر حجمی بیشتر می‌شود. میزان دقیق این افت فشار را می‌توان با مقایسه رنگها و اعداد سمت چپ کانتورها قرائت نمود. اثرات نوار پیچ خورده بر روی صفحه تعریف شده کاملاً مشهود است



(ب)

(ف)





(ج)

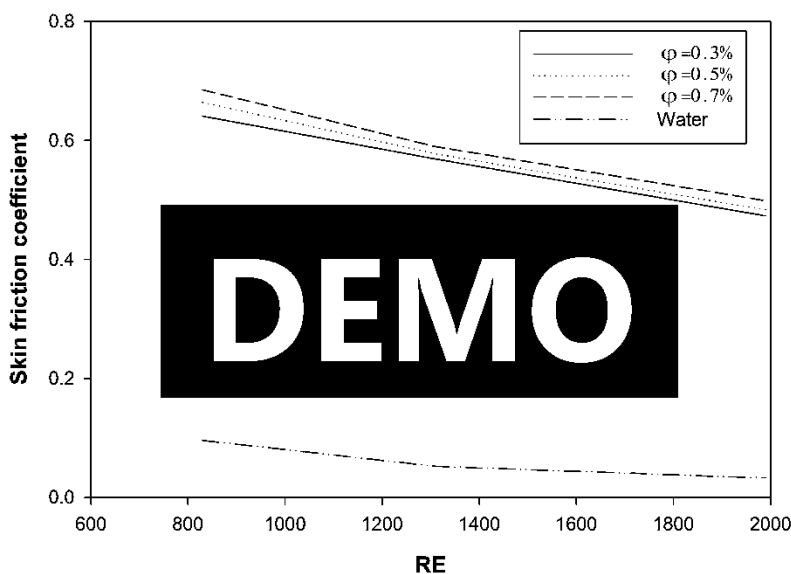
شکل ۵) کانتورهای افت فشار برای سه کسر حجمی (۰.۳٪، ۰.۵٪ و ۰.۷٪) در عدد رینولدز  $Re=1850$ :

الف)  $\phi=0.3\%$  ب)  $\phi=0.5\%$  ج)  $\phi=0.7\%$

به هنگام عبور سیال از داخل یک لوله مقاومت اصطکاکی سیال باعث ایجاد افت در لوله می‌شود که مقدار این افت به نوع جریان بستگی دارد. هر چه قدر افت فشار بیشتر باشد، مقدار توانی که برای به حرکت درآوردن سیال داخل لوله باسد صرف شود بیشتر است. طبق پیشنهاد طرح تجربی ونگ چار، در این کار میزان افت فشار از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$f = 4 : 487 Re^{-0.297} (1 + \phi)^{101} \quad (۸)$$

طبق رابطه‌ی شماره‌ی (۸)، نمودار ۶ تغییرات ضریب اصطکاک را بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهد



شکل ۶) نمودار ضریب اصطکاک سطحی بر حسب عدد رینولدز

آنچه که در شکل ۶ نمایان است، افزایش ضریب اصطکاک با افزایش کسر حجمی است. هرچقدر غلظت نانو ذرات بیشتر می‌شود، ضریب اصطکاک سطحی بیشتر می‌شود. فاصله‌ی بسیار زیادی بین ضریب اصطکاک برای آب خالص و نانو سیالات با کسرهای حجمی متفاوت وجود دارد. البته بنا به رابطه‌ی ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز که به صورت زیر است:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (۹)$$

کاملاً منطقی است که با افزایش عدد رینولدز، ضریب اصطکاک برای جریان آرام کمتر شود.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق انتقال حرارت جابه‌جایی یک نانوسیال در جریان آرام درون یک لوله مبدل حرارتی مجهز به نوار پیچ خورده با استفاده از نرم‌افزار *FLUENT* شبیه‌سازی شد. اثر غلظت و عدد رینولدز بر ضریب اصطکاک موضعی و عدد ناسلت بررسی و نتایج زیر به دست آمد.

- ۱- عدد ناسلت، بطور قابل توجهی با افزایش رینولدز، بزرگ می‌شود
- ۲- برای محدوده غلظت نانو سیال حاضر، عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی، به مقدار کمی افزایش پیدا می‌کند.
- ۳- در شرایط مشابه، ضریب اصطکاک سطحی برای نانو سیالات به مراتب بیشتر از آب خالص است

مجموعه مقالات هشتمین همایش ملی مبدل گرمایی

دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی‌های شیمیایی

ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

www.Mobadel.ir



۵- مقایسه نتایج این تحقیق با معادله‌ی پیشنهادی ونگ چاربرای ضریب اصطکاک نتایج معقولی را در تحلیل انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال به همراه داشته است.

مراجع:

- [1]. J. C. Maxwell, Electricity and Magnetism, Clarendon Press, Oxford, UK, 1873.
- [2]. Xuan Y. and Li Q., Heat Transfer, 125, (151-155), (2003).
- [3]. Khwanchit Wongcharee a, Smith Eiamsa-ard. Enhancement of heat transfer using CuO/water nanofluid and twisted tape with alternate axis, Thermal Sciences, 46, (57-66), (2012).

www.Mobadel.ir