

## بررسی انتقال حرارت و جریان آرام نانوسیال از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک در یک مبدل حرارتی جریان مخالف

کامیار کمانی<sup>۱</sup> و روح... رفعی<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> مبدل حرارتی، نانوسیال، عدد آنتروپی، جریان آرام.</p>	<p>در این مقاله با استفاده از حل عددی معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت آن، تأثیر افزودن کسر حجمی نانوذرات بر عملکرد یک مبدل حرارتی جریان مخالف از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک بررسی شده است. از مدل تکفاز برای مخلوط سیال پایه و نانوذرات استفاده شده است. برای محاسبه چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ویسکوزیته، لزوجت و ضریب رسانش از فرمول‌های تحلیلی و تجربی موجود استفاده شده است. برای حل عددی معادلات حاکم از روش حجم محدود (FVM) استفاده شده است. برای ارتباط بین میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل (SIMPLE) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با اضافه کردن نانوذرات در قسمت حلقوی مبدل، آنتروپی تولید شده‌ی کل به میزان بسیار اندکی افزایش می‌یابد که قابل چشم پوشی است. با افزایش کسر حجمی نانوذرات ضریب انتقال حرارت (<math>U</math>) و انتقال حرارت کل (<math>Q</math>) میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و همچنین نسبت بازگشت‌ناپذیری به گرمای مبادله شده (عدد آنتروپی (<math>N_s</math>)) کاهش خواهد یافت.</p>

### ۱- مقدمه

جامدات منجر به ساخت سوسپانسیونی از ذرات ریز جامد فلزی که نانوسیال نام گرفتند، شد. نانوسیال‌ها مخلوطی از ذرات نانو در یک سیال پایه می‌باشند که باعث بهبود انتقال حرارت سیال می‌شوند. انواع گوناگون این ذرات، از جمله فلزی، غیر فلزی و پلیمری می‌توانند به سیال پایه اضافه شوند. اگر چه ذراتی با ابعاد میکرومتر و میلی‌متر می‌توانند باعث ایجاد مشکلات متعددی از جمله رسوب، خوردگی و افت فشار شوند [۱]، اما ذرات با ابعاد نانو علاوه بر این که پایداری بیشتری از خود نشان می‌دهند، باعث افزایش چشمگیر هدایت حرارتی نیز می‌شوند. همچنین این ذرات نسبت به ذراتی با ابعاد میکرومتر و میلی‌متر افت فشار کمتری ایجاد می‌کنند [۲]. محققان متعددی تأثیر افزودن نانوذرات را بر انتقال حرارت و ویژگی‌های هیدرودینامیکی نانوسیالات بررسی کرده‌اند. ژوان و لی [۱]

با توجه به کاهش منابع انرژی و افزایش سرعت پیشرفت تکنولوژی، افزایش راندمان مبدل‌های حرارتی یک نیاز ضروری می‌باشد که یکی از مهمترین مسائل موجود در صنعت خنک‌کاری است و به عنوان یکی از فاکتورهای اساسی در افزایش راندمان در صنعت مطرح می‌باشد. از موانع اصلی در افزایش راندمان حرارتی، خواص ضعیف انتقال حرارت سیالاتی مانند آب است. بالا رفتن ضریب هدایت حرارتی تأثیر بسزایی در فرآیندهای انتقال حرارت رسانش و جابه‌جایی دارد. زیاد بودن این مشخصه در

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: rafee@semnan.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی، دانشکده‌ی مکانیک، دانشگاه سمنان

۲. استادیار، دانشکده‌ی مکانیک، دانشگاه سمنان

مبدل‌های حرارتی کاربردهای گوناگونی در شاخه‌های مختلف صنعت دارند. کاربرد نانوسیال در مبدل‌های حرارتی نیز توسط برخی از محققان مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال ربیع ناتاج درزی و همکاران [۸] انتقال حرارت و جریان نانوسیال را در یک مبدل دولوله ای بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند آنها نشان دادند که برای محدوده عدد رینولدز ۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ و کسر حجمی صفر تا یک درصد افزودن نانوذرات کارایی حرارتی مبدل را افزایش می دهد، بدون آنکه افزایش قابل ملاحظه ای در افت فشار جریان بوجود بیاید. بررسی عملکرد مبدل‌های حرارتی از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک همواره توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است. در چند دهه‌ی اخیر، محققان سعی بر آن داشته‌اند که بازگشت ناپذیری این وسایل را تا حد امکان کاهش دهند. لذا کمیتی به نام عدد آنتروپی ( $N_s$ ) بیان شد. در این مقاله سعی شده کمیتهای اساسی مانند عدد آنتروپی و ضریب انتقال حرارت کلی برای یک مبدل حرارتی جریان مخالف با جریان نانوسیال بررسی شود. همچنین تأثیر افزودن نانوذرات بر عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نیز ذکر شده است. از اکسید آلومینیوم به عنوان نانوذره در این تحقیق استفاده شده است. زیرا این اکسیدهای فلزی علاوه بر این که دارای ضریب انتقال حرارت بالایی هستند، هیچ گونه ضرری برای محیط زیست ندارند.

## ۲- تعریف مسأله

مشخصات هندسی مبدل حرارتی جریان مخالف مورد نظر در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. جریان نانوسیال در درصدهای حجمی مختلف و در رینولدزهای ثابت مورد مطالعه قرار گرفته است. محدوده‌ی کسر حجمی ( $\phi$ ) از ۰٪ تا ۶٪ و محدوده‌ی عدد رینولدز هر دو جریان از ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ می‌باشد. عدد رینولدز بر اساس سرعت توده‌ای سیال ( $V_{in}$ )، قطر هیدرولیکی و ویژگی‌های سیال تعریف شده است. جنس دیواره از فولاد ضد زنگ با چگالی  $8030 \text{ kg/m}^3$ ، ضریب هدایت حرارتی  $16.27 \text{ W/mK}$  و ضریب گرمایی ویژه  $502.48 \text{ J/kgK}$  و با ضخامت ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [۹]. همچنین دیواره‌ی پوسته

تحقیقی بر روی هدایت حرارتی نانو سیال شامل نانوذرات مس ارائه داده‌اند. بر اساس این تحقیق اضافه کردن ۲/۵ تا ۷/۵ درصد ذرات نانوی اکسید مس به آب، رسانش گرمایی آن را از ۲۴ تا ۸۷ درصد افزایش می‌دهد. تاهیر و میتال [۳] انتقال حرارت از جریان آرام در حال توسعه نانوسیال را در یک کانال دایروی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه جایی برحسب عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات بصورت خطی است. مقدمی و همکاران [۴] تأثیر افزودن نانوذرات به آب را در یک لوله با شار ثابت روی دیواره بررسی کرده‌اند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داده که اضافه کردن ۱٪ ذرات نانوی اکسید آلومینیوم به آب بازگشت ناپذیری را تا ۳/۶ درصد کاهش می‌دهد. در کنار بهبود رسانش گرمایی، افزودن نانوذرات، افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را به دنبال خواهد داشت. انتقال حرارت از نانوسیالها در محیطهای حلقوی نیز توسط برخی از محققان مورد مطالعه قرار گرفته است [۵و۶]. به عنوان مثال ایزدی و همکاران [۵]، انتقال حرارت جابه جایی اجباری از جریان آرام در حال توسعه نانو سیال در یک محیط حلقوی را بصورت عددی مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که پروفیل سرعت محوری بدون بعد با تغییر کسر حجمی نانوذرات تغییر چندانی نخواهد داشت. اما پروفیل دمای بی بعد با تغییرات کسر حجمی تغییر کرده و ضریب انتقال حرارت جابه جایی با افزایش کسر حجمی ذرات افزایش می یابد. همچنین مختاری و همکاران [۶] انتقال حرارت ترکیبی نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم را در یک محیط حلقوی تحت شار ثابت به کمک مدل مخلوط دوفازی و بروش عددی بررسی نمودند و نشان دادند که برای اعداد رینولدز و گراشف ثابت، عدد ناسلت در دیواره های داخلی و خارجی با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می یابد. ون و دینگ [7] جریان آرام نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در حال توسعه را در یک لوله مسی به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. مطالعه آنها نشان داد که افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم تا ۱/۶ درصد به آب، عدد ناسلت آن را تا ۳۸ درصد افزایش می‌دهد.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی آب و نانوذرات [۹]

ماده	آب	نانوذرات $Al_2O_3$
چگالی ( $kg/m^3$ )	998.2	۳۹۷۰
ظرفیت گرمایی ویژه ( $J/kgK$ )	4180	۷۶۵
ضریب هدایت حرارتی ( $W/mK$ )	0.6	۴۰
لزجت ( $N.s/m^2$ )	0.001003	-----

لزجت و ضریب رسانش گرمایی آب-اکسید آلومینیوم بر اساس مدل مایگا و همکاران [۱۳] محاسبه می‌شود. با توجه به مطالعات آزمایشگاهی ماسودا و همکاران [۱۴]، لی و همکاران [۱۵] و چوی و همکاران [۱۶] برای نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم، لزجت و رسانش موثر با روابط (۳) و (۴) داده می‌شوند:

$$\mu_{nf} = (123\phi^2 + 7.3\phi + 1)\mu_{bf} \quad (3)$$

$$k_{nf} = (4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1)k_{bf} \quad (4)$$

با توجه به معادلات (۲)، (۳) و (۴) مقدار عدد پراختل نانوسیال مورد مطالعه در این تحقیق بین ۶/۵ تا ۹/۵ متغیر است.

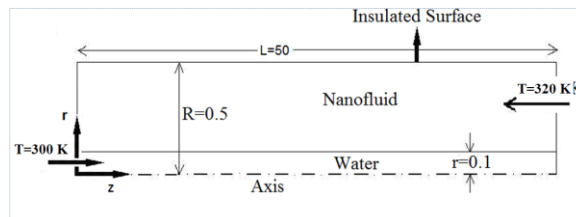
#### ۴- معادلات حاکم

معادله پیوستگی یا بقای جرم در حالت پایا با رابطه (۵) بیان می‌شود.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

در معادله فوق به ترتیب چگالی و بردار سرعت می‌باشند. توجه کنید که چگالی سیال ثابت بوده و تولید جرم نیز وجود ندارد. معادله بقای ممنتوم خطی برای جریان سیال تراکم ناپذیر به صورت معادله (۶) نوشته می‌شود.

خارجی مبدل، کاملاً عایق فرض می‌شود. جریان آب با دمای  $320\text{ K}$  وارد لوله و جریان نانوسیال با دمای  $300\text{ K}$  وارد محیط حلقوی می‌شود.



شکل ۱- شکل شماتیک مبدل حرارتی

#### ۳- ویژگی‌های ترموفیزیکی نانوسیال

با توجه به بازه‌ی اندک تغییرات دما، خصوصیات ترموفیزیکی (گرمای مخصوص، لزجت، ضریب رسانش گرمایی و چگالی) نانوسیال را می‌توان به صورت تابعی از درصد حجمی نانوذرات ( $\phi$ ) و ویژگی‌های سیال پایه و نانوذرات محاسبه کرد. خواص ترموفیزیکی آب و نانوذرات در دمای  $310\text{ K}$  در جدول ۱ داده شده است [۹]. چگالی نانوسیال از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (1)$$

اندیس‌های  $p$  و  $nf$  و  $bf$  به ترتیب نشانگر نانوذره، نانوسیال و سیال پایه می‌باشد. ویژگی‌های ترموفیزیکی آب و نانوذرات مطابق جدول ۱ است.

همان‌طور که بونگیورنو [۱۰] ذکر کرده است، با فرض این که سیال پایه با نانوذرات در تعادل گرمایی می‌باشد، گرمای ویژه‌ی نانوسیال با رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$c_p = \frac{(1 - \phi)\rho_{bf}c_{bf} + \phi\rho_p c_p}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

دقت این معادلات که بر پایه‌ی ویژگی‌های نانوسیال می‌باشند، توسط پک و چو [۱۱] و ژوان و رتزل [۱۲] سنجیده شده که بر اساس داده‌های آزمایشگاهی آن‌ها این معادلات مناسب می‌باشند.

عایق فرض شده است، حجم کنترل، تبادل حرارتی با محیط ندارد. پس می‌توان نوشت:

$$\oint_{C.S.} \frac{\delta \dot{Q}}{T} = 0 \quad (10)$$

همچنین با توجه به عدم تغییر نرخ تغییر آنتروپی کل درون حجم کنترل:

$$\frac{\partial S_{c.v.}}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

در نتیجه مقدار آنتروپی تولید شده با رابطه (۱۲) بیان می‌شود:

$$\dot{S}_{gen} = \int_{Ae_{cold}} S d\dot{m} - \int_{Ai_{cold}} S d\dot{m} + \int_{Ae_{warm}} S d\dot{m} - \int_{Ai_{warm}} S d\dot{m} \quad (12)$$

لازم به ذکر است که محاسبه عبارتهای مختلف معادله (۱۲) با انتگرال گیری از نتایج حل عددی در ورودی و خروجی های میدان حل عددی انجام شده است. همان‌طور که کاکاک و لیو [۱۹] بیان کرده‌اند، برای محاسبه‌ی گرمای مبادله شده بین سیال گرم و سیال سرد و ضریب کلی انتقال حرارت از معادلات (۱۳) و (۱۴) استفاده می‌شود.

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (13)$$

$$U = \frac{Q}{A \Delta T_{lm}} \quad (14)$$

$\Delta T_{lm}$  اختلاف دمای لگاریتمی است که در آن  $\Delta T_1$  اختلاف دمای سیال گرم و سرد در سمت راست و  $\Delta T_2$  اختلاف دمای سیال گرم و سرد در سمت چپ در شکل ۱ می‌باشند.

$$(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = -\frac{\vec{\nabla} P}{\rho} + \frac{\mu \nabla^2 \vec{V}}{\rho} + \vec{g} \quad (6)$$

که معادله‌ی اخیر معادله‌ی نویر-استوکس می‌باشد.

برای تحلیل‌های دمایی سیال، از معادله‌ی انرژی (رابطه (۷)) استفاده شده است:

$$\rho C \vec{V} \cdot \vec{\nabla}(T) = k_{eff} \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} T) \quad (7)$$

کمیت‌های  $T$  و  $C$  به ترتیب، دما و ظرفیت گرمایی نانوسیال می‌باشند. با استناد به اینکروپرا [۱۷] دمای میانگین وزنی با استفاده از رابطه‌ی (۸) قابل محاسبه است.

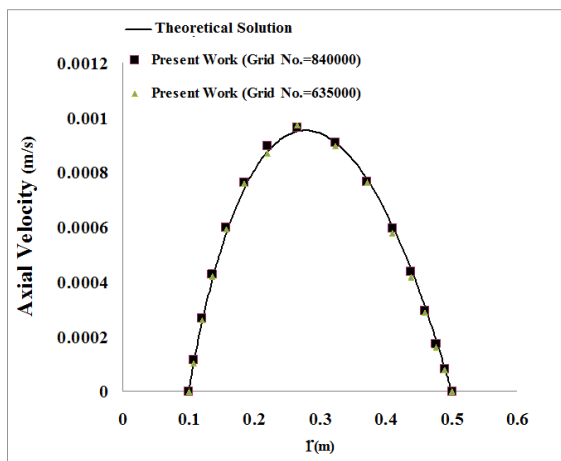
$$T_m = \frac{\int \rho c T dA}{\dot{m} c} \quad (8)$$

همان‌طور که اشاره شد، هدف این مقاله تحلیل بازگشت ناپذیری مبدل حرارتی جریان مخالف با جریان نانوسیال می‌باشد. بنابراین یافتن رابطه‌ای برای آنتروپی تولید شده ( $\dot{S}_{gen}$ )، با توجه به هندسه و شرایط مسأله، نقش مهمی را در این تحقیق ایفا می‌کند. برای تحلیل آنتروپی تولید شده از قانون دوم ترمودینامیک برای حجم کنترل استفاده می‌شود [۱۸]. معادله‌ی موازنه‌ی آنتروپی بیان می‌کند که نرخ تغییر آنتروپی کل درون حجم کنترل برابر است با مقدار خالص مجموع شارهای عبور کرده از حجم کنترل به علاوه‌ی نرخ تولید آنتروپی. در نتیجه می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial S_{c.v.}}{\partial t} = - \oint_{C.S.} s \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} + \oint_{C.S.} \frac{\delta Q}{T} + \dot{S}_{gen} \quad (9)$$

لازم به ذکر است که کل میدان حل عددی در این مقاله به عنوان یک حجم کنترل در نظر گرفته شده است. در معادله‌ی بالا شارها عبارتند از جریان‌های جرم همراه با انتقال آنتروپی و نرخ انتقال حرارت در یک درجه حرارتی خاص. از آن‌جا که دیواره‌ی قسمت حلقوی مبدل حرارتی

به منظور نشان دادن اعتبار و صحت جوابهای به دست آمده، توزیع سرعت محاسبه شده در این مقاله برای جریان آب خالص در رینولدز ۵۰۰ با معادلات توزیع سرعت در محیط حلقوی در قسمت توسعه یافته هیدرودینامیکی (مانسون و همکاران [۲۰]) مقایسه شده است. شکل ۳ تطابق مناسبی را بین نتایج حاصل از این مقاله و معادلات نظری نشان می‌دهد.

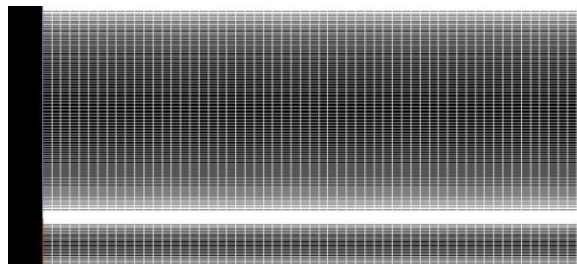


شکل ۳- مقایسه‌ی پروفیل سرعت ناحیه‌ی توسعه یافته در قسمت حلقوی با معادلات نظری

برای نشان دادن صحت معادله‌ی انرژی، از روابط توزیع دما در لوله با فرض تغییرات خطی دمای دیواره استفاده شده است. (گنیپ و همکاران [۲۱]). محاسبات برای آب خالص در رینولدز ۵۰۰ و در مقطع میانی لوله می‌باشد. بر اساس شکل ۴، در قسمت‌های میانی ( $10 < X < 30$ ) تغییرات دمای دیواره‌ی لوله تقریباً خطی است. داده‌های شکل ۴ از حل عددی به دست آمده‌اند.

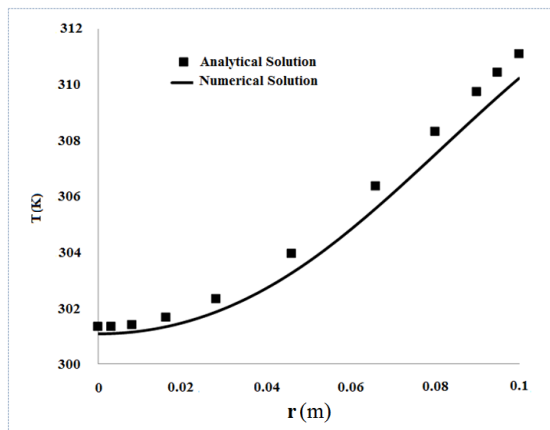
## ۵- اعتبارسنجی حل و استقلال جوابها از شبکه

برای حل عددی جریان از نرم افزار فلونت استفاده شده است. میدان جریان و انتقال حرارت به صورت متقارن محوری در نظر گرفته شده است و از روش حجم محدود برای تجزیه معادلات استفاده گردیده است. برای ارتباط بین میدان سرعت و فشار نیز از الگوریتم سیمپل<sup>۲</sup> استفاده گردیده است. در تجزیه عبارتهای جابه جایی در معادلات بقا نیز از روش بالادست<sup>۳</sup> استفاده شده است. فرض شده است که در دو ورودی، جریان با دما و سرعت یکنواخت وارد می‌شود. شبکه بندی در شکل ۲ نشان داده شده است. برای نشان دادن استقلال جواب از شبکه، در ابتدا سه شبکه متفاوت با تعداد ۳۵۰۰۰، ۶۳۵۰۰۰ و ۸۴۰۰۰۰ سلول تولید شده است. اختلاف جوابهای این دو شبکه آخر قابل چشم‌پوشی می‌باشد. برای حل عددی از شبکه سوم با تعداد ۸۴۰۰۰۰ سلول استفاده شده است. شبکه حل به گونه ای تولید شده است که بیشترین تراکم سلولها را در نزدیکی دیواره های جامد داشته باشد. برای قسمت آب مرکز اولین سلول مجاور دیواره در فاصله ۰,۰۰۰۲۶۹ متر از دیواره قرار دارد و ضریب انبساط ۱,۰۷ در راستای دور شدن از دیواره اعمال گردیده است. برای سمت نوسیال، مرکز اولین سلول در فاصله ۰,۰۰۰۴۲۲ متر از دیواره بوده و ضریب انبساط ۱,۰۲۸ در راستای دور شدن از دیواره اعمال گردیده است. نتایج در نمودار پروفیل سرعت (شکل ۳) نشان داده شده‌اند.



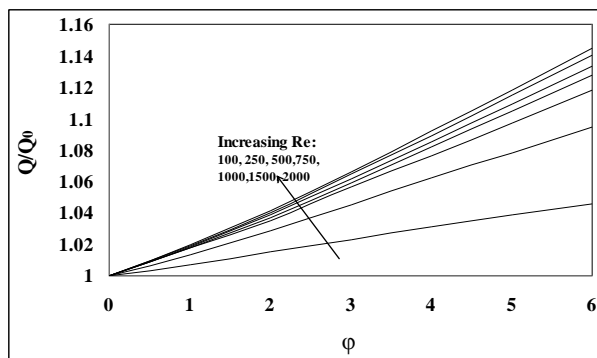
شکل ۲- نمونه‌ی شبکه‌ی تولید شده

- 2 SIMPLE Algorithm
- 3 Upwind Scheme

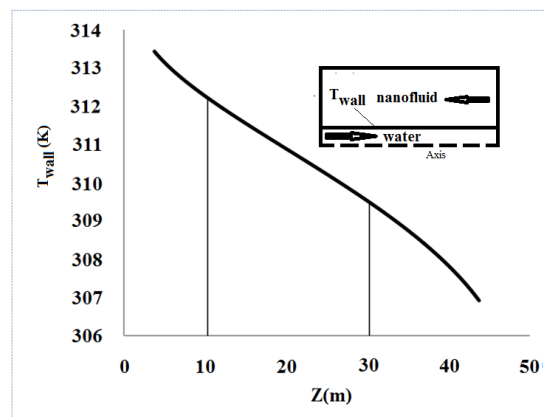


شکل ۵- مقایسه‌ی پروفیل دمایی عددی به دست آمده در قسمتی که دمایی دیواره تقریباً خطی تغییر می‌کند با نتایج حل تحلیلی

در شکل ۶،  $Q$  نرخ انتقال حرارت کلی از سیال گرم به سیال سرد را نشان می‌دهد و  $Q_0$  مقدار این انتقال حرارت را وقتی که کسر حجمی نانوذرات صفر باشد، بیان می‌کند. به عبارت دیگر، ضریب رسانش سیال زیاد می‌شود باعث می‌گردد که اختلاف دمایی ورودی و خروجی مبدل حرارتی با افزایش درصد حجمی نانوذرات زیاد شود. نتیجه‌ی این بالا رفتن اختلاف دما، افزایش انتقال حرارت کل می‌باشد. همچنین بر اساس این نمودار، در یک درصد حجمی خاص از نانوذره، با افزایش عدد رینولدز انتقال حرارت کل زیاد می‌شود. دلیل آن را می‌توان در افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی که ناشی از افزایش دبی حجمی می‌باشد، دانست.



شکل ۶- اثر افزایش کسر حجمی نانوذرات بر نرخ انتقال حرارت کلی در اعداد رینولدز مختلف



شکل ۴- نمایش تغییرات دمایی دیواره‌ی لوله

بر اساس حل تحلیلی اگر توزیع دمایی دیواره لوله به صورت خطی  $(T_{wall} = T_0 + Az)$  باشد که  $T_0$  و  $A$  به ترتیب، دمایی دیواره در ورودی سیال سرد و شیب تغییرات دمایی دیواره در نظر گرفته شده‌اند، می‌توان توزیع دما در داخل لوله را با رابطه (۱۵) بیان کرد:

$$T_{fluid} = T_{wall} + f(r) \quad (15)$$

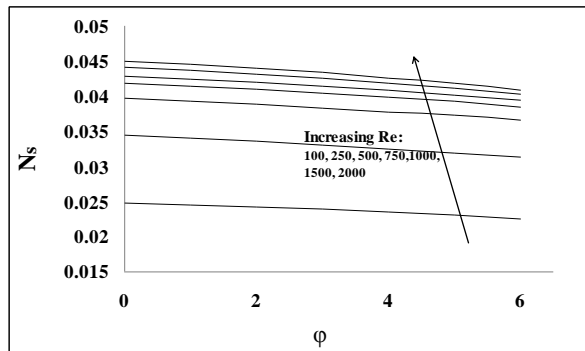
که در آن:

$$f(r) = -\frac{\overline{VAR}^2}{2\alpha} \left[ \frac{3}{4} - \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{r}{R}\right)^4 \right] \quad (16)$$

شکل ۵ تطابق مناسبی را میان پروفیل دمایی به دست آمده در مقاله‌ی حاضر و معادلات نظری نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اختلاف بوجود آمده به این دلیل است که در مسأله فعلی تغییرات دمایی دیواره لوله کاملاً خطی نیست و روش تحلیلی فقط به عنوان یک تقریب مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۶- تحلیل نتایج عددی

همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه، باعث افزایش انتقال حرارت کل می‌شود.

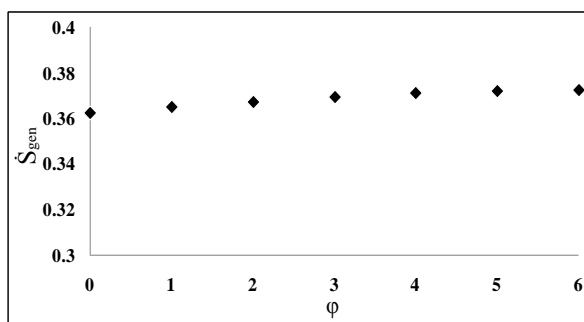


شکل ۸- کاهش عدد آنتروپی با افزایش درصد حجمی نانوذرات

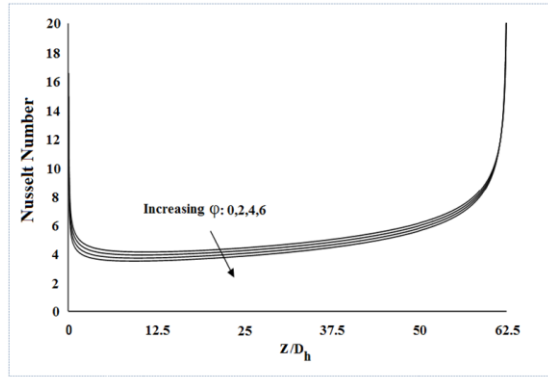
همچنین نشان داده شده که با افزایش عدد رینولدز در یک درصد حجمی خاص، عدد آنتروپی افزایش می‌یابد. تولید آنتروپی در هریک از بخشهای سرد و گرم مبدل ناشی از دو عامل انتقال حرارت و اصطکاک لزج است. در مساله مورد بحث، دماهای مطلق سیال به هم نزدیک است. بنابر این کاهش آنتروپی ناشی از انتقال حرارت از بخش گرم، تقریباً با افزایش آنتروپی ناشی از انتقال حرارت به بخش سرد برابر است. اما تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک در هر دو قسمت مثبت بوده و با افزایش عدد رینولدز (که در اینجا ناشی از افزایش سرعت است) افزایش می‌یابد. همان‌طور که در توضیحات شکل ۶ گفته شد، اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه، به دلیل افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، افزایش ضریب انتقال حرارت کل را به دنبال خواهد داشت. بر اساس شکل ۹، با افزایش درصد حجمی نانوذرات، نسبت ضریب انتقال حرارت کل نانوسیال به ضریب انتقال حرارت کل سیال پایه زیاد می‌شود. به طوری که با توجه به نتایج عددی به دست آمده اگر کسر حجمی نانوذرات ۶ درصد باشد، ضریب انتقال حرارت کلی به طور متوسط ۱۵ درصد نسبت به حالتی که فقط از سیال پایه استفاده شود، افزایش می‌یابد (البته با توجه به شکل ۹ این افزایش ضریب انتقال حرارت برای اعداد رینولدز مختلف اندکی متفاوت است).

با افزودن نانوذرات (که ضریب هدایت حرارتی بیشتری نسبت به سیال پایه دارند)، مقدار ضریب هدایت حرارتی موثر سیال زیاد می‌شود. از سوی دیگر در مجاورت دیواره جامد هرچه ضریب هدایت حرارتی سیال بیشتر باشد، رسانایی حرارتی و به دنبال آن انتقال حرارت بیشتر می‌شود و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی روی دیواره که از رابطه  $h = \frac{-k_{nf} \frac{\partial T}{\partial y}|_{y=0}}{T_w - T_{bulk}}$  به دست می‌آید، زیاد می‌شود.

با توجه به شکل ۷ آنتروپی تولید شده با افزایش درصد حجمی نانوذرات به میزان خیلی کمی (از ۰/۶ تا ۲/۵ درصد) زیاد می‌شود که قابل چشم‌پوشی است. این که این مسأله شار ثابت نیست، تأثیر بسزایی در کاهش نیافتن آنتروپی تولید شده دارد. زیرا با افزایش درصد نانوذرات، انتقال حرارت بین دو قسمت سرد و گرم زیاد می‌شود که این امر یکی از عوامل بازگشت‌ناپذیری است. براساس مطالعه ژو و همکاران [۲۲] بازگشت‌ناپذیری مبدل‌های حرارتی را با توجه به نسبت بازگشت‌ناپذیری به گرمای مبادله شده یا به عبارت دیگر، عدد آنتروپی ( $N_s$ ) محاسبه می‌کنند. این کمیت نقش اساسی در طراحی مبدل‌های حرارتی دارد که با توجه به شکل ۸ با افزایش درصد حجمی نانوذرات روند کاملاً نزولی دارد.



شکل ۷- اثر افزایش کسر حجمی نانوذرات بر نرخ تولید آنتروپی

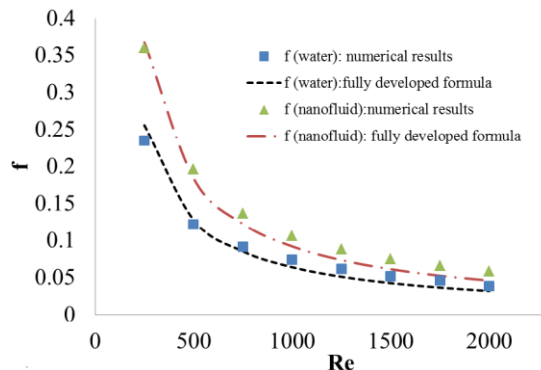


شکل ۱۰- تغییر عدد ناسلت سمت نانوسیال روی جداره داخلی لوله

اختلاف اندک بین نتایج فرمولهای تحلیلی و نتایج عددی به دست آمده به این دلیل است که در فرمولهای تحلیلی اثرات جریان در حال توسعه در هر دو قسمت نانوسیال و آب در نظر گرفته نشده است. ضریب اصطکاک داریسی با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است.

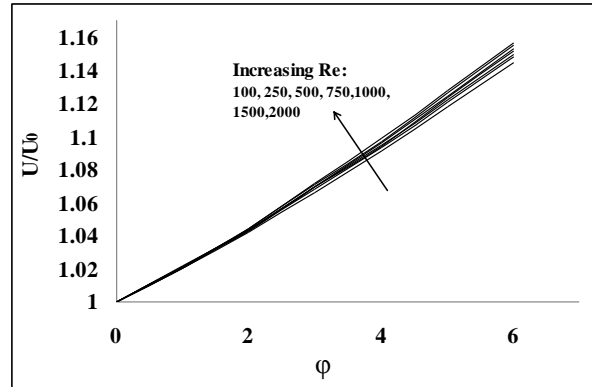
$$f = \frac{C_f}{4} = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D_h}\right) \rho \bar{V}^2} \quad (18)$$

که در آن  $L$ ،  $D_h$  و  $\bar{V}$  به ترتیب طول و قطر هیدرولیکی و سرعت متوسط جریان در هندسه مورد نظر هستند و  $C_f$  ضریب اصطکاک است. مقادیر  $C_f$  برای جریان آرام در هندسه های مختلف و در جریان توسعه یافته، توسط وایت [۲۳] ارائه شده است.



شکل ۱۱- مقایسه ضریب اصطکاک داریسی در دو قسمت آب و نانوسیال برای کسر حجمی ۳ درصد نانوسیال و در اعداد رینولدز مختلف جریان

در شکل ۱۲ اثرات تغییر کسر حجمی نانوذرات بر افت فشار جریان نانوسیال نشان داده شده است. در این منحنی  $(\Delta P)_0$



شکل ۹- افزایش نسبت ضریب انتقال حرارت کل در نانوسیال با افزایش کسر حجمی نانوذرات

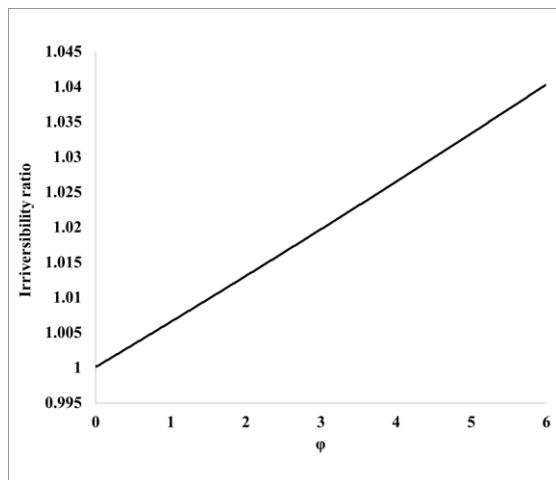
شکل ۱۰ تغییرات عدد ناسلت نانوسیال را بر حسب درصد حجمی نانوذرات در راستای طولی مبدل حرارتی در رینولدز ۵۰۰، نشان می‌دهد. بر این اساس، با افزایش درصد حجمی نانوذرات، عدد ناسلت کاهش می‌یابد. عدد ناسلت با رابطه (۱۷) تعریف می‌شود:

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (17)$$

که در آن  $D_h$  قطر هیدرولیکی محیط حلقوی است که نانوسیال در آن جریان دارد. با افزایش کسر حجمی نانوذرات مقدار ضریب انتقال حرارت کلی  $U$  و ضریب انتقال حرارت جابه جایی  $h$  افزایش می‌یابند. اما عدد ناسلت در سمت نانوسیال با رابطه (۱۷)  $(Nu = \frac{hD_h}{k})$  بیان می‌شود. در این رابطه با افزایش کسر حجمی نانوذرات، هر دو پارامتر  $h$  و  $k$  افزایش خواهند یافت. لیکن افزایش  $k$  بیشتر است و همین امر سبب می‌شود که مقدار عدد ناسلت کاهش یابد. افزودن نانوذرات در درجه اول روی ضریب رسانش تأثیر می‌گذارد.

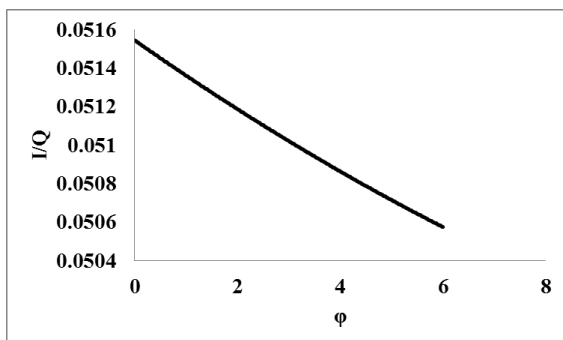
در شکل ۱۱ مقدار ضریب اصطکاک داریسی محاسبه شده جریان در قسمت آب و نانوسیال ترسیم شده است. نتایج عددی با فرمولهای تحلیلی موجود برای جریان توسعه یافته در لوله و محیط حلقوی [۲۲] مقایسه گردیده است.





شکل ۱۳- نسبت بازگشت ناپذیری برحسب کسر حجمی نانوذرات در دبی حجمی ثابت

همانطور که دیده می شود، با افزایش کسر حجمی نانوذرات مقدار بازگشت ناپذیری افزایش می یابد (شکل ۱۳)، اما از سوی دیگر مقدار نرخ انتقال حرارت نیز افزایش می یابد (شکل ۱۴)، اما همیشه درصد افزایش انتقال حرارت بیشتر از درصد افزایش بازگشت ناپذیری است.

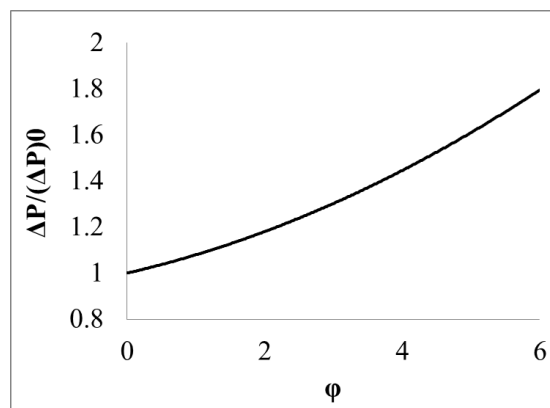


شکل ۱۴- نسبت بازگشت ناپذیری برحسب کسر حجمی نانوذرات در دبی حجمی ثابت

## ۷- نتیجه گیری

نتایج عددی به دست آمده از حل معادلات نشان می دهد که اضافه کردن درصد کسر حجمی نانوذرات به سیال پایه در مبدل های حرارتی عدد آنتروپی را کاهش می دهد. در نتیجه از نظر کاربردی افزودن این ذرات تا جایی که تأثیر آنتروپی تولید شده توسط افت فشار ناچیز است، به صرفه

نشان دهنده افت فشار نانوسیال در کسر حجمی صفر درصد است. این نتایج برای دبی حجمی ثابت به دست آمده اند. دبی حجمی طوری انتخاب شده است که در کسر حجمی ۳ درصد عدد رینولدز جریان نانوسیال ۱۰۰۰ باشد. نتایج نشان می دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات افت فشار زیاد می شود به طوریکه با افزودن ۶ درصد نانوذرات به آب، افت فشار جریان نانوسیال ۸۰ درصد اضافه می شود. افزایش افت فشار به دلیل زیاد شدن لزجت نانوسیال با کسر حجمی نانوذرات اتفاق می افتد.



شکل ۱۲- ضریب افزایش افت فشار برحسب کسر حجمی نانوذرات برای دبی حجمی ثابت

در شکل های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب مقدار نسبت بازگشت ناپذیری به بازگشت ناپذیری در کسر حجمی صفر  $I/I_0$  و نسبت بازگشت ناپذیری به نرخ گرمای مبادله شده به ازای مقادیر مختلف کسر حجمی نانوذرات ترسیم شده است. این نتایج برای جریان با دبی حجمی ثابت ارائه گردیده است. دبی حجمی طوری انتخاب شده است که در کسر حجمی ۳ درصد عدد رینولدز جریان نانوسیال ۱۰۰۰ باشد.

ثابتی از انتقال حرارت، استفاده از این نانوذرات باعث کاهش سطح انتقال گرما و در نتیجه کم شدن حجم مبدل حرارتی می‌شود. محاسبه افت فشار سمت نانوسیال نشان می‌دهد که برای یک دبی حجمی ثابت با افزایش کسر حجمی نانوذرات افت فشار سمت نانوسیال زیاد می‌شود بطوریکه با افزودن ۶ درصد نانوذرات به آب، افت فشار جریان نانوسیال ۸۰ درصد اضافه می‌شود.

می‌باشد. از سوی دیگر مقدار ضریب کلی انتقال حرارت ( $U$ ) و نرخ انتقال حرارت کلی ( $Q$ ) با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد به طوری که با توجه به نتایج عددی به دست آمده اگر کسر حجمی نانوذرات ۶ درصد باشد، ضریب انتقال حرارت کلی به طور متوسط ۱۵ درصد نسبت به حالتی که فقط از سیال پایه استفاده شود، افزایش می‌یابد، که می‌تواند تأثیر چشمگیری بر کوچک سازی مبدل مورد نظر داشته باشد. همچنین در مقدار

## ۸- مراجع

- [1] Xuan, Y., Li, Q. (2000). "Heat transfer enhancement of nanofluids". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, pp. 58-64.
- [2] Daungthongsuk, W., Wongwises, S. (2007). "A critical review of convective heat transfer of nanofluids". *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 11(5), pp. 797-817.
- [3] Tahir, Sh., Mital, M. (2012). "Numerical investigation of laminar nanofluid developing flow and heat transfer in a circular channel". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 39, pp. 8-14.
- [4] Moghaddami, M., Mohammadzade, A., Alem Varzan Esfehiani, S. (2011). "Second law analysis of nanofluid flow". *International Journal of Energy Conversion and Management*. Vol. 52, pp. 1397-1405
- [5] Izadi, M., Behzadmehr, A., Jalali-Vahida, D., (2009). "Numerical study of developing laminar forced convection of a nanofluid in an annulus". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 2119-2129.
- [6] Mokhtari Moghari, R., Akbarinia, A., Shariat, M., Talebi, F., Laur, R. (2011). "Two phase mixed convection Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid flow in an annulus". *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 37 (6), pp. 585-595.
- [7] Wen, D., Ding, Y. (2004). "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 5181-5188.
- [8] Rabienataj Darzi, A.A., Farhadi, M., Sedighi, K. (2013). "Heat transfer and flow characteristics of AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid in a double tube heat exchanger". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 105-112.
- [9] Pathipakka, G., Sivashanmugam, P. (2010). "Heat transfer behaviour of nanofluids in a uniformly heated circular tube fitted with helical inserts in laminar flow". *Superlattices and Microstructures*, Vol. 47, pp. 349\_360
- [10] Buongiorno, J. (2006). "Convective transport in nanofluids". *Journal of Heat Transfer*, Vol. 128, pp. 240-250.
- [11] Pak, B.C., Cho, Y.I. (1998). "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles". *Experimental Heat Transfer*, Vol. 11, pp. 151-70
- [12] Xuan, Y., Roetzel, W. (2000). "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3701-3707.
- [13] Maiga, S.E.B., Nguyen, C.T., Galanis N., Roy, G. (2004). "Heat transfer behaviors of nanofluids in a uniformly heated tube". *Journal of Superlattices Microstructure*, Vol. 35, pp. 543-57.

- [14] Masuda, H., Ebata, A.A., Teramae, K., Hishinuma, N. (1993). "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles". *Netsu Bussei*, Vol. 7, pp. 227–233.
- [15] Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S., Eastman, G. (1999). "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles". *Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 280–289.
- [16] Choi, S.U.S., Wang, X., Xu, W. (1999). "Thermal conductivity of nano-particle-fluid mixture". *Journal of Thermophysics Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 474–80.
- [17] Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., DeWitt, D.P. (2011). "Fundamental of Heat and Mass Transfer". 7th edition, John Wiley & Sons Inc.
- [18] Van Wylen, G.J., Sonntag, R.E., Brognakke, C. (2003). "Fundamentals of Thermodynamics". 6th Edition, John Wiley & Sons Inc.
- [19] Kakac, S., Liu, H. (2002). "Heat exchangers selecting, rating and thermal design". 6th Edition, CRC Press.
- [20] Munson, B., Young, D., Okishi, T. (2002). "Fundamental of fluid mechanics". 4th Edition, John Wiley & Sons Inc.
- [21] Gennip, Y.V., Gramberg, H., Hansen, H., Niels, G.j., Malakpoor, K., Martinsen, K., Ockendon, H., In 't panhuis, P., Rasmussen, C.N., Vonden-hoff, E., Willatzen, M. (2005). "The effects of temperature gradients on ultrasonic flow measurement". Report for the European Study Group Mathematics with Industry, Odense, Denmark.
- [22] Xu, Z.M., Yang, S.R., "A modified entropy generation number for heat exchangers". *Journal of Thermal Sciences*, Vol. 5, No. 4, pp. 257-263.
- [23] White, F.M. (2006). "Viscous Fluid Flow". 3rd Edition, Mc-Grawhill.