

بررسی انتقال حرارت و تحلیل اگزرژی مبدل حرارتی دو لوله‌ای مجهز به آشفته‌ساز با بکارگیری نانوسیال TiO_2

سید مرتضی حسینی، محمد محمدیون* و سعید مرتضوی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۴/۱۰/۱۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۵/۰۲/۱۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۵/۰۳/۲۲

چکیده

این تحقیق تاثیر آب و نانوسیال اکسید تیتانیم بر ضریب کلی انتقال حرارت، نرخ انتقال حرارت، انتقال حرارت متوسط، افت فشار و آنتروپی تولیدی در مبدل حرارتی دو لوله‌ای مجهز به نوار مارپیچی را مورد تحلیل قرار می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد ضریب انتقال حرارت آب/اکسید تیتانیم در حدود ۱۰/۱۸ تا ۲۲/۱۸٪ افزایش می‌یابد و باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می‌گردد. آنتروپی تولیدی با به کارگیری نانوسیال در مقایسه با سیال پایه آب، ۲۴٪ افزایش نشان می‌دهد. علاوه بر این انتقال حرارت موثر هنگام استفاده توام از نانوذرات با غلظت وزنی ۰/۳٪ و نوار مارپیچی به عنوان آشفته‌ساز جریان در حدود ۲۴/۳ و ۳۸٪ افزایش را نشان می‌دهد. در نتیجه راندمان مبدل حرارتی می‌تواند با استفاده از سیال کاری با نانوسیال آب/ TiO_2 افزایش یابد.

واژه‌های کلیدی: راندمان، مبدل حرارتی، نانوسیال، اگزرژی.

۱- مقدمه

خواص انتقال گرمای آن می‌باشد [۲]. امروزه تحقیقات در زمینه نانوسیالات ابعاد گسترده‌ای پیدا کرده است. از یک سو محققین در رابطه با افزایش هدایت حرارتی سیالات و افزایش انتقال حرارت، پیگیر ساخت و تهیه نانوسیالات با انواع نانوذرات و نانولوله‌ها با توزیع اندازه‌های مختلف هستند، در حالی که برخی دیگر از محققین به بررسی مسئله پایداری و عدم ته‌نشینی نانوذرات در طی فرآیند انتقال حرارت و عدم کلوخه شدن یا مهاجرت آنها می‌پردازند. ایجاد تغییرات در خواص رئولوژیکی سیال پایه با افزودن نانوذرات، بخشی از تلاش‌های محققین را به بررسی این

مقوله نانوفناوری علیرغم نوپا بودن آن، توجه بسیاری از پژوهشگران، برنامه‌ریزان و حتی سیاستگذاران کشورهای پیشرفته و در حال توسعه را به خود جلب کرده است. یکی از زمینه‌هایی که اخیراً کاربرد نانوفناوری در آن چشمگیر است انتقال حرارت به کمک نانومواد می‌باشد [۱،۲].

انتظار می‌رود که در آینده نانوسیالات به نوع جدیدی از سیالات مورد استفاده در انتقال حرارت پیشرفته برای کاربردهای مهندسی تبدیل شود. بیشترین تاثیر نانوسیال در

* عهده‌دار مکاتبات: محمد محمدیون

نشانی: شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، دانشکده فنی و مهندسی

تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۹۴۵۳۰، دورنگار: ۰۲۳-۳۲۳۹۴۵۳۰، پست الکترونیکی: mmohammadiun@yahoo.com

سیستم‌های حرارتی با استفاده از موازنه انرژی است. محاسبات اتلاف انرژی یک تحول، بیانگر میزان غیربازگشتی بودن آن می‌باشد. تحلیل پارامترهای تاثیرگذار این اتلاف می‌تواند در شناخت نقش فاکتورهای مختلف و تبیین چگونگی تغییر آن در فرآیند به گونه‌ای که به کاهش میزان غیربازگشتی، افزایش کارایی و در نهایت بهینه‌سازی فرآیند منجر شود کمک قابل توجهی نماید [۷،۸]. انرژی در واقع بیشترین کار تئوری مفید قابل دستیابی است، زمانی که سامانه به سوی تعادل با محیط حرکت می‌کند و تنها با محیط تبادل گرما انجام می‌دهد. البته می‌تواند به صورت کمترین کار محوری یا الکتریکی تئوری مورد نیاز برای این که یک مقدار از ماده را از حالتی که در تعادل با محیط است به یک حالت مشخص ببریم نیز تعریف شود. بنابراین می‌توان چنین برداشت کرد که انرژی، بیانگر میزان انحراف حالت یک سامانه نسبت به حالت محیط می‌باشد. محیط، یک سامانه بسیار بزرگ در حالت تعادل می‌باشد که متغیرهای حالت (P_0, T_0) و پتانسیل شیمیایی اجزای موجود در آن هنگامی که در فرآیندهای ترمودینامیکی به تبادل جرم و گرما با سامانه‌های دیگر می‌پردازد، ثابت می‌ماند. برای یک مبدل حرارتی با جریان همسو می‌توان موازنه انرژی را به صورت زیر نوشت [۹،۱۰]:

$$E = E_c + E_h \quad (1)$$

در رابطه فوق، E ، انرژی، E_c ، انرژی سیال سرد و E_h ، انرژی سیال گرم می‌باشد. تغییرات انرژی هر کدام از سیالات خنک کننده و خنک شونده را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$E_c = T_e [m_c (s_{c,o} - s_{c,i})] \text{ or } E_c = T_e [C_c \ln(\frac{T_{c,o}}{T_{c,i}})] \quad (2)$$

$$E_h = T_e [m_h (s_{h,o} - s_{h,i})] \text{ or } E_h = T_e [C_h \ln(\frac{T_{h,o}}{T_{h,i}})] \quad (3)$$

موضوع معطوف داشته است و این در حالی است که محققین دیگر در حال تهیه و ساخت نانوسیالات هیبریدی پیشرفته، اعم از نانوسیالات پلیمری (Polymer-nanofluids) و نانوسیالات کاهش دهنده میزان اصطکاک (Drag-Reduction-Nanofluids) می‌باشند [۳،۴]. مطالعه نانوسیالات حقایق فریبنده‌ای درباره ساختار، ترکیب و رسانایی حرارتی نانوسیالات نشان می‌دهد. علاقه اولیه در نانوسیالات از یک دیدگاه فنی امکان استفاده از این سیالات برای اهداف سرمایشی است. اگر چه رسانایی بالاتر یک اتفاق دلگرم کننده است، اما به هیچ وجه مدرک قطعی از توانایی‌های سرمایشی چنین سیالاتی نیست. برای این منظور، لازم است که یک تایید معین از عملکرد چنین سیالی تحت یک محیط جابجایی داشته باشیم. اینها نه تنها برای نشان دادن رفتار جابجایی نانوسیالات مهم است بلکه همچنین تئوری‌های جامع دینامیک سیالات و انتقال حرارت نانوسیالات را ارائه می‌دهد. با اولین کار روی جریان جابجایی و انتقال حرارت نانوسیالات، درون یک لوله با قطر $10/66 \text{ mm}$ و همکارانش نانوسیال را معرفی کردند [۵]. بررسی مهم بعدی در رابطه با انتقال حرارت جابجایی در نانوسیالات توسط Wen و Ding انجام شد، که در بسیاری از جنبه‌ها مهم است [۶]. نتایج آزمایش‌هایی که در رابطه با نحوه انتقال حرارت بر چندین نمونه نانوسیال انجام شد، نشان می‌دهد که عملکرد نانوسیالات در انتقال حرارت عموماً بیشتر از آن چیزی است که به صورت نظری پیش‌بینی شده است. این واقعیت یک کشف اساسی در مسئله انتقال حرارت می‌باشد.

۱-۱- آنالیز انرژی

آنالیز انرژی ابزار قدرتمندی در طراحی، بهینه‌سازی و ارزیابی عملکرد سیستم‌های انرژی می‌باشد. از انرژی به عنوان معیاری از کیفیت انرژی و میزان از بین رفتن آن توسط برگشت ناپذیری‌ها در یک سیستم حرارتی استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای اصلی مفهوم انرژی، آنالیز

ویسکوزیته نانو سیال را می توان با روابط موجود برای مخلوط دو فازی تخمین زد فرمول انیشتین را برای ارزیابی ویسکوزیته موثر ارائه دادند که سیال شامل سوپانسیون رقیق ذرات کروی سخت و کوچک است:

$$\mu_{nf} = \mu_w (1 - \phi)^{-2.5} \quad (8)$$

در رابطه فوق، μ_{nf} ، ویسکوزیته نانو سیال و μ_w ، ویسکوزیته آب می باشد. برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی از رابطه Choi و Yu می توان بهره گرفت:

$$K_{nf} = \left[\frac{K_{np} + 2K_w - 2\phi(1 + \beta)^3 (K_w - K_{np})}{K_{np} + 2K_w + \phi(1 + \beta)^3 (K_w - K_{np})} \right] \quad (9)$$

در رابطه فوق، K_{nf} ، ضریب هدایت گرمایی نانو سیال، K_w ، ضریب هدایت گرمایی آب و K_{np} ، ضریب هدایت گرمایی نانو ذره می باشد.

با دانستن دما در داخل و خارج، ما می توانیم دمای کل (bulk) فیلم را محاسبه کنیم:

$$T_{bf} = \frac{(T_2 + T_1)}{2} \quad (10)$$

گرمای جذب شده و دفع شده توسط سیالات سرد و گرم را می توان با روابط زیر محاسبه نمود. در این مطالعه فرض شده است که انتقال حرارت به محیط ناچیز می باشد و تمامی گرمای دفع شده، جذب گردیده است:

$$Q_{nf} = \dot{m}_{nf} C_{p_{nf}} (T_{out} - T_{in})_{nf} \quad (11)$$

$$Q_w = \dot{m}_w C_{p_w} (T_{out} - T_{in})_w \quad (12)$$

در رابطه فوق، m_c ، دبی سیال سرد، m_h ، دبی سیال گرم، $s_{h,o}$ ، آنتروپی سیال گرم خروجی، $s_{c,o}$ ، آنتروپی سیال سرد خروجی، $s_{h,i}$ ، آنتروپی سیال گرم ورودی، $s_{c,i}$ ، آنتروپی سیال سرد ورودی، $T_{h,o}$ ، دمای سیال گرم خروجی، $T_{c,o}$ ، دمای سیال سرد خروجی، $T_{h,i}$ ، دمای سیال گرم ورودی و $T_{c,i}$ ، دمای سیال سرد ورودی می باشد. با جای گذاری معادلات ۲ و ۳ در معادله ۱ خواهیم داشت [۱۱]:

$$E = T_e [C_c \ln(\frac{T_{c,o}}{T_{c,i}}) + C_h \ln(\frac{T_{h,o}}{T_{h,i}})] \quad (4)$$

هدف از انتقال حرارت در تعیین بازدهی اگزرژی سیستم نقش اصلی را دارد. چنانچه هدف خنک نمودن سیال گرم باشد می توان بازدهی اگزرژی را به صورت زیر نوشت [۱۲، ۱۳]:

$$\varepsilon = \frac{E_h}{E_c} = \frac{C_h \ln(\frac{T_{h,o}}{T_{h,i}})}{C_c \ln(\frac{T_{c,o}}{T_{c,i}})} \quad (5)$$

در رابطه فوق ε ، بازده اگزرژی می باشد.

۲-۱- روش انجام محاسبات

چگالی و ظرفیت گرمایی نانو ذرات اکسید آلومینیم در کل گستره دمایی بررسی شده ثابت است. از روابط زیر برای محاسبه ظرفیت گرمایی و چگالی نانو سیال استفاده شده است:

$$C_{nf} = (1 - \phi)C_w + \phi C_{np} \quad (6)$$

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_w + \phi\rho_{np} \quad (7)$$

C_{nf} ، ظرفیت گرمایی نانو سیال، C_w ، ظرفیت گرمایی آب، C_{np} ، ظرفیت گرمایی نانو ذره، ϕ ، کسر حجمی، ρ_{nf} ، چگالی نانو سیال، ρ_w ، چگالی آب و ρ_{np} ، چگالی نانو ذره می باشد.

برای تعیین رژیم جریان نیازمند محاسبه عدد رینولدز می‌باشیم. عدد رینولدز برای سیالات نیوتنی را با استفاده از رابطه زیر می‌توان محاسبه نمود:

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} u_{nf} d_i}{\mu_{nf}} \quad (18)$$

در رابطه فوق، Re_{nf} ، عدد رینولدز نانوسیال، u_{nf} ، ضریب انتقال حرارت کلی نانوسیال و d_i ، قطر داخلی لوله می‌باشد. امروزه استفاده از نانوسیالات به عنوان سیال پایه در مبدل‌های حرارتی گسترش چشمگیری یافته است. بررسی که توسط جعفر البدر و همکاران [۱۴] صورت پذیرفت کارآیی نانوسیال اکسید آلومینیم با غلظت ۰/۳ و ۲ درصد وزنی در مبدل حرارتی پوسته لوله جریان مخالف انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات نسبت به سیال پایه بالاتر بوده و با افزایش در غلظت حجمی و دبی جریان افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد.

آقایاری و همکاران [۱۵] ضریب کلی انتقال حرارت نانوسیال اکسید آلومینیم با غلظت حجمی ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ را درون مبدل حرارتی دو لوله‌ای، گزارش دادند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مقدار متوسط و ضریب کلی انتقال حرارت در حدود ۸ تا ۱۰٪ بالاتر از سیال پایه آب می‌باشد.

در بررسی که توسط محمدیون و همکارانش [۱۶] صورت پذیرفت از نانوسیال اکسید آلومینیم اتیلن گلیکول و نوارهای مارپیچی در افزایش انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی دو لوله‌ای استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد با استفاده توام از نوار مارپیچی با گام ۲ و نانوسیال با غلظت ۰/۵ درصد حجمی در محدوده اعداد رینولدز ۶۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ مقدار انتقال حرارت افزایش بسیار زیادی پیدا می‌کند.

کیهانی و همکارانش [۱۷، ۱۸] به بررسی انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانوسیال آب-آلومینا و تیتانیم-آب در محدوده گسترده‌ای از غلظت‌های ۰/۱ تا ۲٪ در سیال پایه آب درون لوله مستقیم با شار حرارتی ثابت پرداخته‌اند. نتایج آنها نشان دهنده افزایش ۲۶٪ برای آب-آلومینا و ۸٪ برای

در روابط فوق، Q_{nf} ، گرمای نانوسیال، Q_w ، گرمای آب، Q_{np} ، گرمای نانوذر، m_{nf} ، دبی جرمی نانوسیال، m_w ، دبی جرمی آب، Cp_{nf} ، ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال و Cp_w ، ظرفیت گرمایی ویژه آب می‌باشد. کل انتقال حرارت صورت گرفته را می‌توان با میانگین‌گیری روابط بالا محاسبه نمود:

$$Q_{ave} = \frac{Q_w + Q_{nf}}{2} \quad (13)$$

با بدست آوردن میزان انتقال حرارت می‌توان ضریب انتقال حرارت جابجایی را محاسبه نمود:

$$h_{nf} = \frac{q_{ave}}{T_{wall} - T_{b,nf}} \quad (14)$$

در رابطه فوق، h_{nf} ، ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال می‌باشد. با محاسبه ضریب انتقال حرارت، عدد ناسلت قابل محاسبه می‌باشد.

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} D}{K_{nf}} \quad (15)$$

در رابطه فوق، Nu_{nf} ، عدد ناسلت نانوسیال می‌باشد. ضریب انتقال حرارتی کلی U_0 ، توسط فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$U_0 = \frac{Q}{LMTDA_0} \quad (16)$$

در رابطه فوق، U_0 ، ضریب انتقال حرارت کل، A_0 ، مساحت و $LMTD$ ، متوسط لگاریتمی دماها می‌باشد.

متوسط لگاریتمی دماها، اساس محاسبات بر اساس تفاوت دماهای لوله داخلی و تفاوت دماهای لوله خارجی است:

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)} \quad (17)$$

۲ m می باشد عبور می کند. نانوسیال نیز درون پوسته با قطر داخلی ۰/۰۲۴۶ m و قطر خارجی ۰/۰۳۴ m و طول ۲ m جریان دارد و هفت بافل نیز با فاصله ۲۵ cm از هم استفاده شده اند. مبدل حرارتی و خطوط لوله ها به منظور کاهش افت حرارتی، عایق گرمایی شده اند. دبی جریان با استفاده از دو شیر، یکی در حلقه اصلی جریان و دیگری در خط بای پس، کنترل می گردد (شکل ۱). دبی سنج های آب و نانوسیالات با استفاده از روش وزن کردن آب و نانوسیال جمع آوری شده در دوره زمانی معینی کالیبره شده اند. ۴ ترموکوپل از نوع K در ورودی و خروجی لوله های مبدل حرارتی نصب شده اند. ترموکوپل ها با استفاده از ترموکوپل مرجع نوع PT100 کالیبره شده اند. خطای اندازه گیری دمای سیال که با استفاده از ترموکوپل نوع K انجام شده است $\pm 0.1^\circ\text{C}$ می باشد. دو ترموکوپل ۱ و ۲، دماهای نانوسیال را در ورودی و خروجی سمت پوسته مبدل حرارتی و دو ترموکوپل دیگر، ۳ و ۴، دماهای آب را در ورودی و خروجی لوله مبدل حرارتی، اندازه گیری می نمایند و یک عدد کنترلر PID دمای سیال گرم را کنترل می کند. قبل از شروع کار با دستگاه، دستگاه مطابق با استاندارد، کالیبره شده است. بدین صورت که آزمایشات متفاوتی با سیال پایه ارائه گردید تا صحت عملکرد دستگاه تایید گردد و در نهایت آزمایشات با نانوسیال صورت پذیرفت. این کار به منظور اطمینان از تطابق اندازه گیری های انجام شده با استانداردهای جهانی مورد استفاده قرار گرفت. در واقع کالیبراسیون، کارآمدی دستگاه یا مواد مرجع را به وسیله انجام مقایسات مستقیم مشخص می کند. قرارگیری نوارهای ماریچ درون لوله، یک تکنولوژی غیرفعال ساده ای را برای افزایش ضریب انتقال حرارت با چرخش توده سیال و به هم زدن لایه مرزی سیال در سطح لوله به علت تغییرات تکرار شده در هندسه سطح، ایجاد می کند. قابل بیان است که چنین نوارهایی منجر به آشفته گی و تحمیل حرکت گردابه (جریان چرخشی) می گردد که منجر به لایه مرزی نازک تر و در نتیجه ضریب انتقال

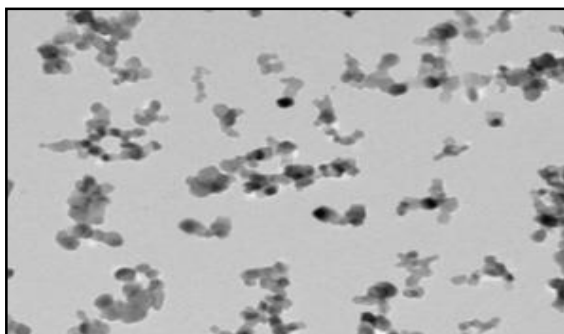
تیتانیم-آب با غلظت ۲٪ بود. افزایش ۳۳ و ۴۰٪ ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال کربنی با غلظت حجمی ۰/۲۵٪ و دمای 20°C نسبت به سیال پایه به ترتیب برای جریان آرام و آشفته در یک لوله تحت شار ثابت نیز توسط امراللهی و همکاران [۱۹] نشان داده شده است. کیم و همکاران [۲۰] انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آلومینا و کربن در رژیم های جریان آشفته و آرام درون یک لوله تحت شار حرارتی ثابت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نیز افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت جابجایی نسبت به سیال پایه را نشان می دهد. آنها همچنین نشان دادند که افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیال بسیار بیشتر از افزایش هدایت حرارتی این سیالات است. هیهات و همکاران [۲۱] تحقیقی را روی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب-آلومینا در لوله ای با شار حرارتی ثابت در محدوده جریان آرام و آشفته انجام دادند که نتایج آنها نیز از افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت جابجایی در اثر استفاده از نانوسیال حکایت می کند.

۲- فعالیت های تجربی

۲-۱- دستگاه آزمایش

آزمایشات تجربی توسط دستگاه مبدل حرارتی لوله-لوله ساخت شرکت ژاپنی توکیومتر مدل HEP-200F شکل ۱ انجام شده است. این سیستم به طور کلی شامل دو حلقه جریان (نانوسیال و آب) می باشد. مبدل حرارتی لوله-لوله از جنس فولاد ضد زنگ بوده و تجهیزات دیگری همچون مخزن گرمایشی ۲۰ لیتری، سیستم سرمایشی نانوسیالی، مخزن ۱۰ لیتری جمع آوری نانوسیال، خط لوله کنارگذر (بای پس)، ترموکوپل ها، دو جریان سنج و دو پمپ که در جهت تامین دبی لازم به کار می روند در این سیستم استفاده شده است.

قسمت اصلی آزمایش یک مبدل لوله-لوله است که آب گرم از درون یک لوله که قطر خارجی آن ۰/۰۱۹ m و قطر داخلی آن ۰/۰۱۷ m و دارای ضخامت ۰/۰۰۲ m و طول



شکل ۳: تصویر TEM نانوذرات اکسید تیتانیم.

اکسید فلزات در آب دیونیزه شده بسیار مناسب است و برای نانوسیالات شامل نانوذرات فلزی سنگین، کمتر موفق بوده است.

۲-۲- آزمایش انتقال حرارت یک نانوسیال در مبدل لوله-لوله

هدف این تحقیق بررسی خواص انتقال حرارتی نانوسیال آب-اکسید تیتانیم به عنوان سیال سرد در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای تحت شرایط رژیم جریان متلاطم است و همچنین اثر استفاده از آشفته‌ساز (نوار مارپیچی) مورد بررسی قرار گرفته است. تاثیرات اعداد رینولدز متفاوت و غلظت نانوذرات معلق اکسید تیتانیم نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج، افزودن نانوذرات به سیال پایه موجب افزایش قابل توجهی در خواص انتقال حرارتی آن می‌شود. جداول، متغیرها و نمودارهای آزمایشگاهی، برای آب و آب-نانو اکسید تیتانیم با درصد وزنی ۰/۱ تا ۰/۳ و دمای نانوسیال ورودی با دمای ۲۶/۵ °C و ۳۲/۵ °C و سیال گرم با دبی ثابت، راندمان آگزرژی و ضریب کلی انتقال حرارت در رینولدز ثابت سیال گرم نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

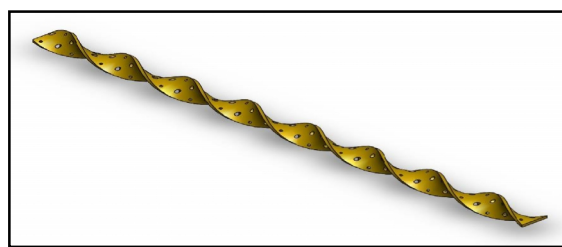
۲-۳- دبی سیال گرم ثابت (متلاطم) و دبی سیال سرد متغیر با دمای ورودی ۲۶/۵ °C (متلاطم)

در این حالت ۹ سری آزمایش با دبی‌های متفاوت (دبی سیال سرد متغیر از ۰/۱۰۶۱ kg/h تا ۰/۲۵۰۳ kg/h افزایشی و دبی سیال گرم ثابت ۰/۲۷ kg/h) برای چهار نمونه آب و



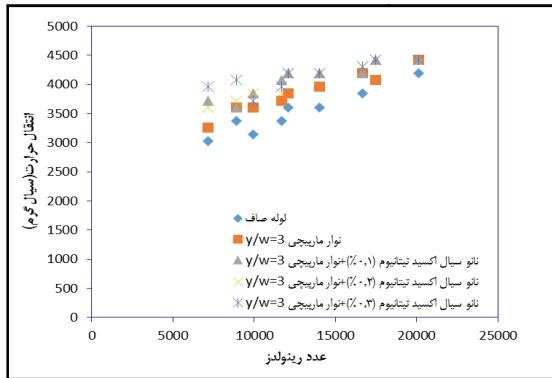
شکل ۱: دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده.

حرارت بهتر به علت تغییرات در هندسه نوار مارپیچی می‌شود. بنابراین افت فشار ایجاد شده درون لوله با افزودن لوله مارپیچ به درج، افزایش یافته است. افزایش انتقال حرارت با استفاده از نوارهای مارپیچ به نسبت Pitch و Twist بستگی دارد. نوار مارپیچی مورد استفاده با نسبت گام ۳ بوده و از جنس لوله مسی می‌باشد (شکل ۲).

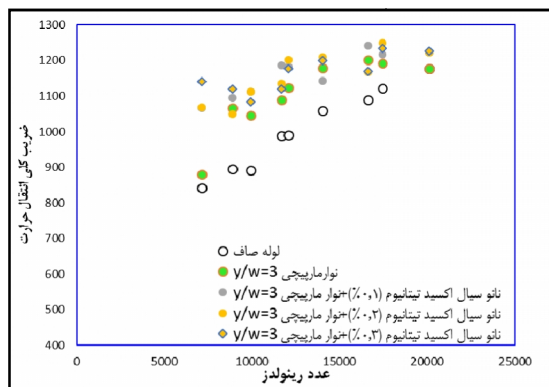


شکل ۲: نوار مارپیچی استفاده شده.

شکل ۳ تصویر TEM نانوذرات اکسید تیتانیم مورد استفاده در این بررسی را نشان می‌دهد که دارای اندازه تقریبی ۳۰ nm می‌باشند. در مرحله بعد نانوذره در داخل سیال پراکنده می‌شود. برای این از روش‌هایی مانند لرزاننده‌های مافوق صوت و یا از سورفکتانت‌ها استفاده می‌شود تا توده‌های نانوذره‌ای به حداقل رسیده و باعث بهبود رفتار پراکندگی شود. روش دو مرحله‌ای برای بعضی موارد مانند



شکل ۴: تغییرات انتقال حرارت سیال گرم (W) بر حسب عدد رینولدز.



شکل ۵: تغییرات ضریب کلی انتقال حرارت (W/m²K) بر حسب عدد رینولدز.

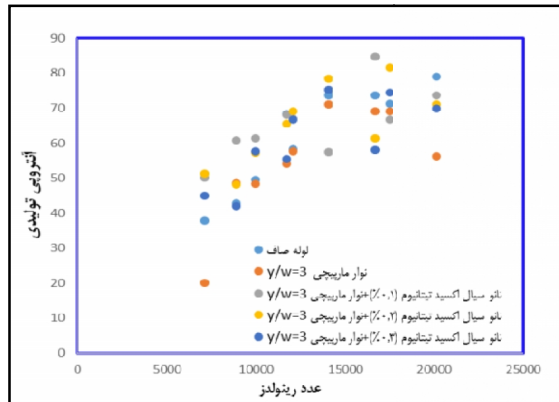
۳۱۰۰، ۸۷۰، ۴۰۰۰ و ۱۱۵۰ می‌باشد. شکل ۶، تغییرات آنتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت نانو سیال اکسید تیتانیوم/آب در مبدل حرارتی دو لوله‌ای ذکر شده را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که افزودن نانوذره به سیال پایه، موجب افزایش آنتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت و آنتروپی جریانی می‌شود. آنتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد به عنوان مثال در عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ به ترتیب در لوله صاف بدون نانو سیال و نوار ماریچ، مقدار آنتروپی تولیدی ۴۸/۴۱ بوده و هنگام استفاده از نوار ماریچ بدون نانو سیال این مقدار به مقدار تقریبی ۴۹ رسیده و هنگام استفاده توام از نانو سیال و نوار ماریچی به عنوان آشفته‌ساز این مقدار به ۵۳ رسیده است. در شکل ۷ مقادیر انتقال حرارت متوسط ناشی از سیال گرم و سرد در محدوده‌ای متفاوت از عدد رینولدز دیده

آب-نانو اکسید تیتانیوم با درصدهای وزنی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ انجام داده و با استفاده از روابط مربوطه، مقدار گرمایی که سیال گرم از دست می‌دهد، گرمایی که سیال سرد می‌گیرد، عدد رینولدز سیال گرم، عدد رینولدز سیال سرد، ضریب کلی انتقال حرارت، انتقال حرارت ثابت، عدد آنتروپی و آنتروپی تولیدی محاسبه گردید.

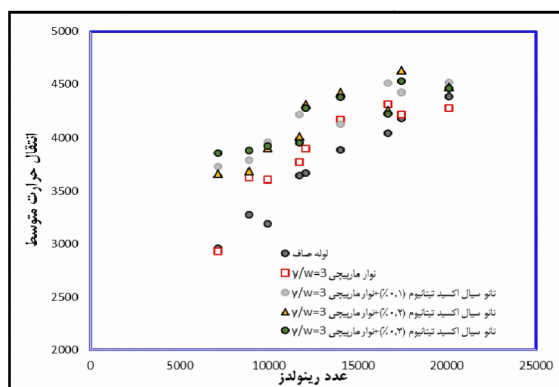
کاهش اندازه ذرات جامد که توام با افزایش تعداد آنها در واحد جرم می‌باشد، منجر به افزایش سطح مخصوص می‌گردد. به طوری که سطح مخصوص ذراتی با اندازه نانومتری در حدود ۱۰۰۰ برابر سطح مخصوص ذراتی با ابعاد میکرومتر می‌باشد. با کاهش ذرات به حدود نانومتر، درصد بیشتری از اتم‌های آن در نزدیکی سطح قرار می‌گیرند. سطح ذرات در انتقال حرارت موثر بوده و استفاده از نانو سیال به افزایش سطح انتقال حرارت منجر می‌گردد. نانوذرات سطح بسیار زیادی را برای انتقال حرارت ایجاد می‌کنند و همین عامل یک مزیت بالقوه برای نانو سیال می‌باشد. با توجه به این که نانوذرات سطح ویژه و ظرفیت گرمایی بالاتری نسبت به سیالات معمولی دارند، هدایت گرمایی موثر (ظاهری) سیالات را افزایش می‌دهند، اثر متقابل و برخورد ذرات و سیال تشدید می‌شود، میزان درهمی جریان زیاد می‌شود و انتشار نانوذرات، گرادیان عرضی دمای سیال را افزایش می‌دهد، بازدهی آگزرژی در نانو سیالات بهبود می‌یابد.

۳- نتایج و بحث

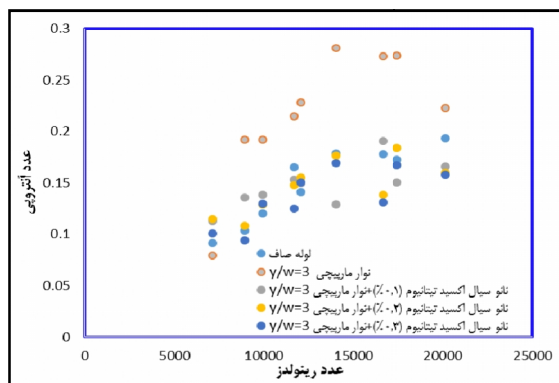
همانطور که در شکل‌های ۴ و ۵ دیده می‌شود محدوده تغییرات عدد رینولدز بین ۷۰۰۰ تا ۲۱۰۰۰ می‌باشد هنگامی که از جریان سیال بدون استفاده از نانو سیال و آشفته‌ساز استفاده می‌شود به عنوان مثال در عدد رینولدز تقریباً ۱۰۰۰۰، مقدار انتقال حرارت و ضریب کلی انتقال حرارت به ترتیب برابر ۳۰۰۰ و ۸۵۰ می‌باشد اما این مقادیر در عدد رینولدز یکسان (۱۰۰۰۰) هنگامی از نوار ماریچی و نانو سیال با غلظت ۰/۳ استفاده می‌کنیم به ترتیب مقادیر



شکل ۶: تغییرات انرژی تولیدی (J/K) بر حسب عدد رینولدز.



شکل ۷: تغییرات انتقال حرارت متوسط (W) بر حسب عدد رینولدز.

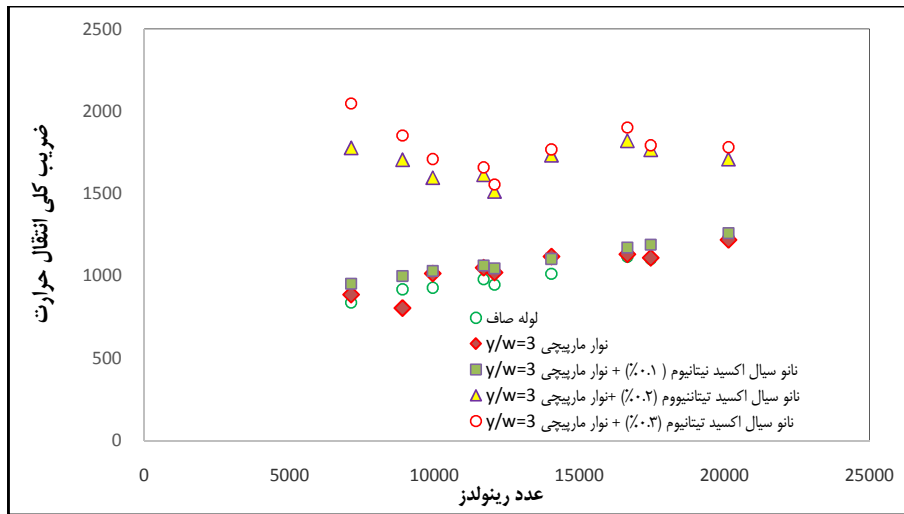


شکل ۸: تغییرات عدد انرژی تولیدی بر حسب عدد رینولدز.

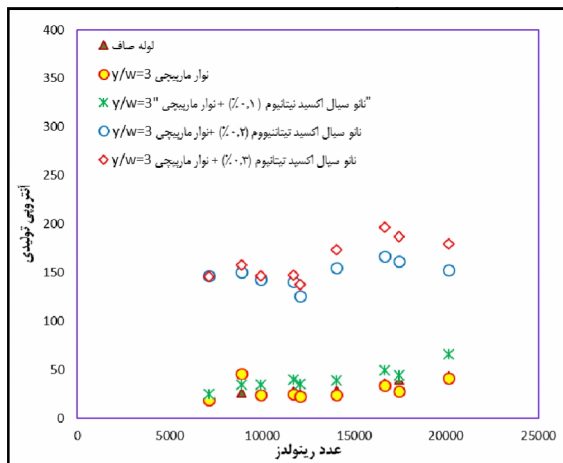
۳۲/۵ °C، نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود انرژی تولیدی و عدد انرژی با افزایش دما و عدد رینولدز افزایش پیدا می‌کند. مقادیر عدد انرژی و انرژی تولیدی در عدد رینولدز تقریبی ۱۶۵۰۰ برای لوله صاف، نوار ماریچی، نوار ماریچی و نانو سیال به ترتیب مقادیر ۰/۰۸، ۰/۰۹، ۰/۴۵ و ۰/۴۴ می‌باشد.

می‌شود. با افزایش عدد رینولدز مقدار متوسط انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همانطور که دیده می‌شود هنگام استفاده از لوله صاف (بدون نانو سیال و آشفته‌ساز جریان) مقادیر انتقال حرارت بسیار پایین می‌باشد و هنگام استفاده از نوار ماریچی مقدار انتقال حرارت افزایش یافته و وقتی که از نانو سیال و نوار ماریچی استفاده می‌کنیم، این روند تشدید یافته و انتقال حرارت بسیار زیادتر می‌شود. به عنوان مثال در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ مقادیر انتقال حرارت به ترتیب برای لوله صاف، لوله صاف با نوار ماریچی با گام ۳ و لوله صاف همراه با نوار ماریچی و نانو سیال، ۳۸۸۴، ۴۲۰۰ و ۴۵۰۰ می‌باشد. شکل ۸ نیز تغییرات عدد انرژی که معیاری از انرژی تولیدی است را بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهد که نتایج، بهبود انتقال حرارت را هنگام استفاده از لوله صاف، لوله صاف با نوار ماریچی با گام ۳ و لوله صاف همراه با نوار ماریچی و نانو سیال، نشان می‌دهد.

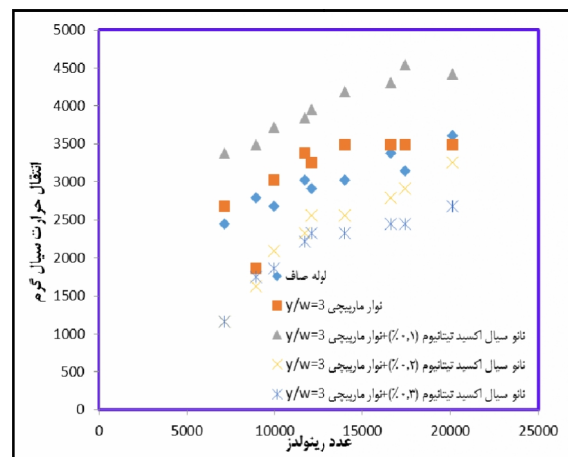
شکل‌های ۹ و ۱۰ تغییرات ضریب کلی انتقال حرارت و انتقال حرارت سیال گرم در دمای ورودی ۳۲/۵ °C را هنگام استفاده از نوارهای ماریچی و نانو سیال بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۹ دیده می‌شود هنگام استفاده از نوار ماریچی به عنوان آشفته‌ساز و متلاطم‌کننده بیشتر جریان، مقدار انتقال حرارت نسبت به لوله صاف افزایش می‌یابد به عنوان مثال در عدد رینولدز تقریباً ۷۰۰۰ مقدار ضریب کلی انتقال حرارت ۸۳۷ و با آشفته‌ساز این مقدار به ۸۸۷ افزایش پیدا می‌کند و هنگام استفاده توام از نانو سیال و آشفته‌ساز این مقدار به ۲۰۰۰ رسیده است. مقدار انتقال حرارت برای شکل ۱۰ تحت همان شرایط یکسان رینولدز و دما ۳۲/۵ °C برای لوله صاف و نوار ماریچی و استفاده توام از نانو سیال با غلظت ۰/۱ درصد وزنی و نوار ماریچی به ترتیب برابر ۲۴۰۰، ۲۶۰۰ و ۳۴۰۰ می‌باشد. البته این روند در طی آزمایشات گاهی تغییر کرده که شاید به دلیل خطای دستگاه و عدم دقت اندازه‌گیری باشد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تغییرات عدد انرژی و انرژی تولیدی را در برابر عدد رینولدز متغیر جریان سرد و دمای



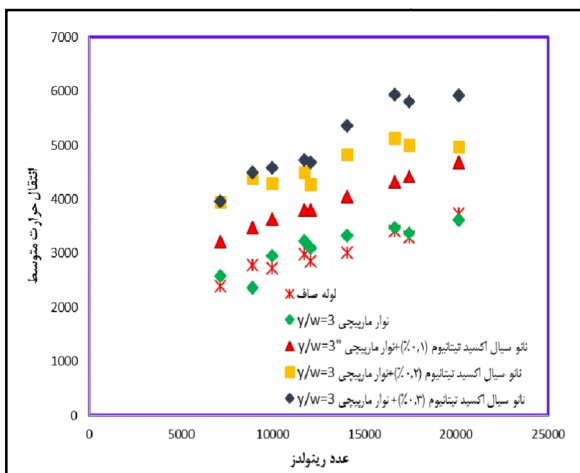
شکل ۹: ضریب کلی انتقال حرارت (W/m^2K) بر حسب عدد رینولدز (دمای سرد ورودی $32/5^{\circ}C$).



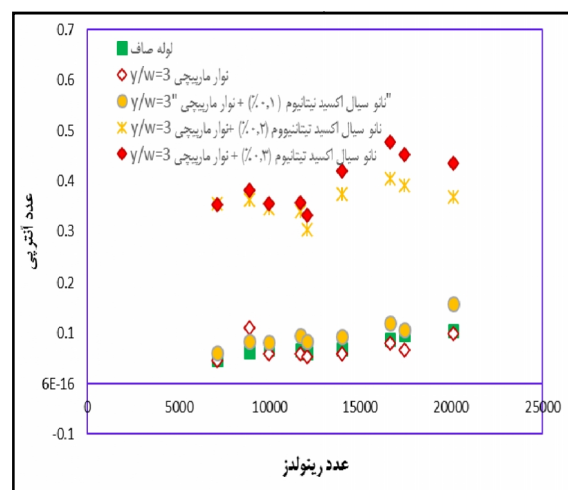
شکل ۱۲: تغییرات عدد آنتروپی تولیدی بر حسب عدد رینولدز.



شکل ۱۰: انتقال حرارت سیال گرم (W) بر حسب عدد رینولدز (دمای سرد ورودی $32/5^{\circ}C$).



شکل ۱۳: انتقال حرارت متوسط (W) بر حسب عدد رینولدز (دمای سرد ورودی $32/5^{\circ}C$).



شکل ۱۱: تغییرات عدد آنتروپی بر حسب عدد رینولدز.

افزایش کسر حجمی نانوسیال، افزایش افت فشار نانوسیال دیده می شود.

۴- نتیجه گیری

- به طور کلی ضریب انتقال حرارت و راندمان مبدل با افزایش هدایت حرارتی سیال و کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی افزایش می یابد.

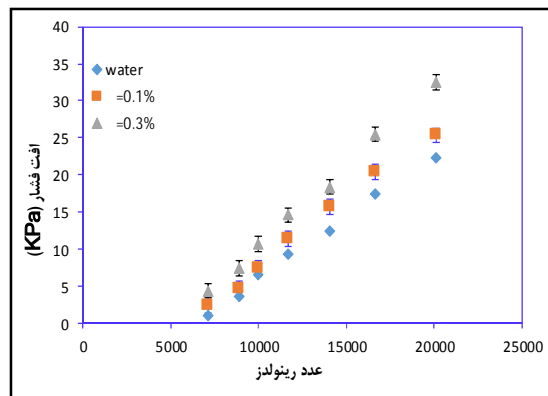
- هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش غلظت حجمی، افزایش می یابد.

- ضریب انتقال حرارت نانوسیال و راندمان مبدل نسبت به حالت سیال خالص، حدوداً ۸ الی ۱۴ درصد افزایش می یابد.

- روش آگزرژی یک راهکار برای آنالیز ترمودینامیکی فرآیندها است که به طور تقریبی به صورت اندازه گیری جهانی پتانسیل کار یا کیفیت شکل های مختلف انرژی در ارتباط با یک محیط تعریف می شود. یک کاربرد موازنه آگزرژی بیان می دارد که چقدر از پتانسیل کار قابل استفاده (مفید) وارد شده به فرآیند به وسیله فرآیند مصرف شده است. این میزان اتلاف همان بازگشت ناپذیری است.

مراجع

- [1] S. Ferrouillat, A. Bontemps, O. Poncelet, O. Soriano, *Applied Thermal Engineering*, **51**, 2013, 839.
- [2] M.M. Sarafraz, F. Hormozi, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **52**, 2014, 205.
- [3] M.T. Naika, L. Syam Sundar, K. Singh, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **57**, 2014, 65.
- [4] A. Rabienataj Darzi, M. Farhadi, K. Sedighi, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **57**, 2014, 188.
- [5] S.U.S. Choi, Z.G. Zhang, W. Yu, F.E. Lockwood, E.A. Grulke, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 2001, 2252.
- [6] D. Wen, Y. Ding, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **47**, 2004, 5181.
- [7] K.S. Pawan, K.B. Anoop, T. Sundararajan, S.K. Sarit, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **53**, 2010, 4757.
- [8] W.H. Mah, Y.M. Hung, N. Guo, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **55**, 2012, 4169.
- [9] V. Bianco, S. Nardini, O. Manca, *Nanoscale Res. Lett.*, **6**, 2011, 25.
- [10] M. Moghaddami, S.E. Shahidi, M. Siavashi, *J. Comput. Theor. Nanosci.*, **9**, 2012, 1.
- [11] A. Bejan, "Entropy Generation Through Heat and Fluid Flow", Wiley, New York, 1982.
- [12] H. Khorasanizadeh, M. Nikfar, J. Amani, *Eur. J. Mech. B Fluids*, **37**, 2013, 143.
- [13] M.A. Khairula, M.A. Alim, I.M. Mahbulbul, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **50**, 2014, 8.



شکل ۱۴: افت فشار (kPa) نانوسیال و آب مقطر بر حسب عدد رینولدز در غلظت های مختلف نانوسیال.

شکل ۱۳ تغییرات انتقال حرارت متوسط را نسبت به عدد رینولدز در تراکم های حجمی مختلف نانوذرات اکسید تیتانیم نشان می دهد. از نتایج برمی آید که انتقال حرارت متوسط هنگام استفاده از نانوسیال و نوار مارپیچی بسیار بالاتر از حالت بدون نوار مارپیچ و نانوسیال می باشد. به عنوان مثال می توان دید که در رینولدز تقریبی ۱۲۰۰۰ این مقدار برای آب (لوله صاف) ۲۱۰۰ و نوار مارپیچ بدون نانوسیال ۳۰۰۰ و برای نانوسیال همراه با نوار مارپیچی با غلظت ۰/۳ در حدود ۴۶۰۰ می باشد.

افت فشار نانوسیال اکسید تیتانیم با غلظت های مختلف بر حسب عدد رینولدز به همراه عدم قطعیت در شکل ۱۴ رسم شده است. افت فشار نانوسیال با افزایش عدد رینولدز به صورت غیرخطی افزایش می یابد، به طوری که عددهای رینولدز بالاتر باعث افت فشار بیشتر می شوند.

افت فشار آب از مقدار ۱ kPa در عدد رینولدز ۷۱۳۷ به مقدار ۲۲/۵۳۶ kPa در عدد رینولدز ۲۰۱۴۱ می رسد. افت فشار نانوسیال با غلظت ۰/۰۱ از مقدار تقریبی ۲/۳۶ kPa در عدد رینولدز ۹۰۰۰ تا مقدار ۲۵/۳۴ kPa در عدد رینولدز ۲۰۱۴۱ افزایش می یابد.

افت فشار نانوسیال با کسر حجمی ۰/۳۱ با تغییر عدد رینولدز از مقدار ۷۱۳۷ به ۲۰۱۴۱ از مقدار تقریبی ۴/۳۵ kPa به مقدار تقریبی ۳۲/۵ kPa افزایش می یابد. نانوسیال با کسر حجمی ۰/۱، افت فشار بسیار نزدیکی با افت شار آب دارد با

- [18] M.H. Kayhani, H. Soltanzadeh, M. Heyhat, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **39**, 2012, 456.
- [19] A. Amrollahi, A.M. Rashidi, R. Lotfi, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **37**, 2010, 717.
- [20] D. Kim, Y. Kwon, Y. Cho, C. Li, S. Cheong, Y. Hwang, J. Lee, D. Hong, S. Moon, *Current Applied Physics*, **9**, 2009, 119.
- [21] M.M. Heyhat, F. Kowsary, A.M. Rashidi, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **44**, 2013, 483.
- [14] J. Albadr, S. Tayal, M. Alasadi, *Case Studies in Thermal Engineering*, **1**, 2013, 38.
- [15] R. Aghayari, H. Madah, B. Keyvani, A. Moghadassi, F. Ashori, *ISRN Mechanical Engineering*, **5**, 2014, 1.
- [16] H. Mohammadiun, M. Mohammadiun, M. Hazbehian, H. Maddah, *Heat and Mass Transfer*, **52**, 2016, 141.
- [17] M. Kayhani, M. Nazari, H. Soltanzadeh, M. Heyhat, F. Kowsary, *Micro & Nano Letters*, **7**, 2012, 223.