

مطالعه آزمایشگاهی افزایش انتقال گرما درون مبادله‌کن‌های گرمایی با استفاده از نانوسیال اکسید آلومینا و کویل سیمی در رژیم‌های جریان متفاوت

محمدقلی منگلی زاده دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، شاهرود، ایران
محمدمحمدیون* دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، شاهرود، ایران
مجید مهدویان استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، قوچان، ایران

چکیده

امروزه استفاده از نانو سیالات به عنوان سیال پایه در مبادله‌کن‌های گرمایی گسترش چشم گیری یافته است. در این مطالعه ما سعی نمودیم تا کاربرد نانوذرات اکسید آلومینیوم را به همراه کویل سیمی در افزایش انتقال گرما آب به عنوان سیال پایه را مورد بررسی قرار دهیم. بدین منظور نانو سیال با غلظت های مختلف ساخته شده، با گامهای متفاوت کویل سیمی و در اعداد رینولدز مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. از سیم پیچی برای افزایش آشفستگی جریان در داخل مبادله‌کن بهره گرفته شد، نتایج نشان داد که استفاده از نانو ذرات سبب افزایش بازدهی حرارتی می گردد. هم چنین افزایش غلظت نانو ذرات و افزایش عدد رینولدز در افزایش کارایی سیستمهای حرارتی نقش مستقیمی را ایفا می نمایند. نتایج مبین این است که برای نانوسیال اکسید آلومینا با غلظت ۰.۳۵ و سیم پیچی با نسبت گام ۲ بهترین عملکرد را دارد و برای این شرایط میزان افزایش انتقال گرما ۳۰ الی ۴۵ درصد محاسبه گردید. این در حالی است که میزان افزایش افت اصطکاکی برای این وضعیت ۱-۶٪ قرار دارد. این نتایج نشان می دهد که افزایش انتقال گرما بر افزایش افت فشار غلبه کرده و کنترل کننده عملکرد مبادله‌کن می باشد.
واژه‌های کلیدی: نانوذرات اکسید آلومینا، مبادله‌کن گرمایی، کویل سیمی.

Experimental Study of Al_2O_3 /water Nanofluid Heat Transfer Enhancement in the Heat Exchangers Fitted with Modified Coil Wire in Different flow Regimes

M Gh. Mangelizadeh
M. Mohammadiun
M. Mahdavian3

Chemical Engineering, Shahrood branch. Islamic Azad University, shahrood, Iran
Department of Mechanical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran
Chemical Engineering, Quchan New Technologies University, Quchan, Iran

Abstract

Nowadays the use of nano-fluids as base fluid in the heat exchanger has expanded impressive. in this study, we tried to examine the use of Alumina Nano- particles and coil wires for enhancing heat transfer of water as base fluid. Therefore, Nano-fluid made with different concentrations and difference patches of coil wires tested at different Reynolds numbers. The coil wires inside the heat exchanger was used to increase turbulency. the results shows use of Nano-particles terminated to high thermal efficiency. Also, increasing concentration of Nano particles and increasing of Reynolds numbers play important role in increasing efficiency of heating systems. also, the results shows that for Nano fluid with concentration of 0.35% and coil wire with pitch of 2 has best performance. For this condition the enhanced heat transfer 30-45% calculated. however, the increased friction factor for this situation is 1-6%. the results shows that enhanced heat transfer over come to increased pressure drop and control function is heat exchanger performance.

Keywords: Alumina Nano Particle, Heat Exchanger, Coil Wire.

نانو می‌گویند [۱-۳]. افزایش سطح انتقال گرما در بسیاری از کاربردهای مهندسی مانند مبدل‌های گرمایی، تهویه هوا، راکتورهای شیمیایی و سیستم‌های خنک‌سازی استفاده شده است؛ بنابراین، بسیاری از تکنولوژی‌ها برای افزایش سرعت انتقال گرما و کاهش اندازه و کاهش هزینه تجهیزات مورد نیاز مخصوصاً مبادله‌کن‌های گرمایی، بررسی شده است [۴]. یکی از مهم‌ترین تکنولوژی‌های استفاده شده، تکنولوژی انتقال گرما غیرفعال می‌باشد. انتخاب این تکنیک‌ها در مبادله‌کن گرمایی نشان می‌دهد که عملکرد گرمایی کل سیستم، بهبود می‌یابد. این پژوهش کارهای آزمایشگاهی را روی این تکنولوژی بررسی می‌کند که روی تکنولوژی‌هایی مانند نوار پیچ خورده و سیم پیچ، مورد مطالعه

۱- مقدمه

نانو یکی از پیشوندهای مقیاس اندازه گیری در سیستم SI به معنی یک میلیاردم واحد آن مقیاس است. پیشوند نانو از لغت یونانی (نانوس) به معنای (کوئوله) گرفته شده است و در اصل عملی است که درباره اجسام بسیار کوچک مطالعه می‌کند یک نانومتر یک میلیاردم متر (متر) و ده مرتبه کوچکتر از اتم هیدروژن می‌باشد. بسته به اندازه اتم بین شش تا هفت اتم را می‌توان در یک نانومتر جای داد. با ایجاد ارتباط میان اندازه اتم‌ها و مقیاس نانو می‌توان یک نانومتر را راحت تر تصور کرد. طبق تعاریف مقیاس طولی بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر را مقیاس

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mmohammadiun@yahoo.com

$$K_{nf} = \left[\frac{K_{np} + 2K_w - 2\phi(1+\beta)^3(K_w - K_{np})}{K_{np} + 2K_w + \phi(1+\beta)^3(K_w - K_{np})} \right] \quad (4)$$

در این رابطه، K_{np} ضریب هدایت حرارتی نانوذره، K_{nf} ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، K_w ضریب هدایت حرارتی آب و β ضریب همبستگی با توجه به شکل ذرات می باشد. با دانستن دما در داخل و خارج می شود دمای توده ای (bulk) فیلم را حساب کرد:

$$T_{bf} = \frac{(T_{in} + T_{out})}{2} \quad (5)$$

در این رابطه، T_{out} دمای خارج از لوله و T_{in} دمای نقطه ای داخل لوله می باشد [۱۷].

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

$$Q_{nf} = \dot{m}_{nf} C_{p,nf} (T_{out} - T_{in})_{nf} \quad (6)$$

در این رابطه، دبی جرمی نانوسیال \dot{m}_{nf} ، ظرفیت گرمایی نانوسیال $C_{p,nf}$ ، کل حرارت جذب و دفع شده توسط نانوسیال Q_{nf} ، دمای ورودی نانوسیال $T_{(nf)in}$ و دمای خروجی نانوسیال $T_{(nf)out}$ است. $Q = I.V$ (۷)

در این رابطه، Q انرژی الکتریکی ورودی به سیستم معادل با شدت جریان در اختلاف پتانسیل می باشد که این مقدار انرژی به دلیل ایزوله بودن سیستم و نبود هیچگونه اتلاف در جهت شعاعی به بیرون تماما به گرما تبدیل شده و به نانوسیال منتقل می شود. کل انتقال گرما صورت گرفته را می توان با میانگین گیری روابط بالا محاسبه نمود:

$$Q_{ave} = \frac{Q + Q_{nf}}{2} \quad (8)$$

با بدست آوردن میزان انتقال گرما می توان رسانایی گرمایی جابجایی را محاسبه نمود:

$$h_{nf} = \frac{q_{ave}}{\bar{T}_{wall} - T_{b,nf}} \quad (9)$$

در این رابطه، h_{nf} رسانایی گرمایی جابجایی نانوسیال می باشد. با محاسبه رسانایی گرمایی، عدد ناسلت قابل محاسبه می باشد:

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} D}{K_{nf}} \quad (10)$$

در این رابطه، ناسلت نانوسیال Nu_{nf} ، رسانایی گرمایی نانوسیال K_{nf} و قطر لوله D است. رسانایی گرمایی کلی توسط فرمول زیر محاسبه می گردد:

قرار گرفته است تا بازده گرمایی مبادله کن های گرمایی افزایش یابد و این برای طراحان ابزارهای مرتبط با تکنولوژی انتقال گرما غیرفعال مفید است [۹-۱۱]. قرارگیری نوارهای مارپیچ درون لوله یک تکنولوژی غیرفعال ساده ای را برای افزایش رسانایی گرمایی جابه جایی 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 نوارهای منجر به آشفتگی و تحمیل حرکت گردابه (جریان چرخشی) می گردد که منجر به لایه مرزی نازکتر و در نتیجه رسانایی گرمایی بهتر و عدد ناسلت بالاتر به علت تغییرات در هندسه نوار مارپیچی می شود [۱۳] این در حالی است که در شرایط اخیر بیشترین میزان افت فشار ایجاد می شود که در نتیجه افزایش اصطکاک می باشد [۱۴]. بنابراین با افزودن کوئل سیمی درون لوله مبادله کن گرمایی افت فشار افزایش می یابد [۱۵] در غلظتهای مختلف نانوذرات همچنین گام های متفاوت کوئل سیمی ضریب اصطکاک با کاهش اعداد رینولدز افزایش می یابد [۱۶].

در این مطالعه سعی خواهد شد با بدست آوردن معادلات حاکم بر عملکرد مبادله کن در حضور گام های مختلف کوئل سیمی، کارایی نانوسیال با غلظتهای متفاوت را در بهبود عملکرد مبادله کن مورد بررسی قرار گیرد. ابتدا معادلات حاکم بررسی و سپس فرایند آزمایشگاهی تشریح خواهد گردید. سپس نتایج بدست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت.

۲- روش انجام محاسبات

چگالی و ظرفیت گرمایی نانو ذرات اکسید آلومینیوم در کل گستره دمایی بررسی شده ثابت است از روابط زیر برای محاسبه ظرفیت گرمایی و چگالی نانو سیال استفاده شده است [۳]:

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

در این رابطه، C_{nf} ظرفیت گرمایی نانوسیال، ϕ غلظت نانوسیال، C_w ظرفیت گرمایی آب و C_{np} ظرفیت گرمایی نانو ذره می باشد. چگالی نانوسیال با استفاده از معادله ارایه شده توسط Pak and Cho مورد ارزیابی قرار میگیرد [۱۸]:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_w + \phi\rho_{np} \quad (2)$$

در این رابطه، ρ_{nf} چگالی نانوسیال، ρ_{np} چگالی نانو ذره و ρ_w چگالی آب است. 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 سوسپانسیون رقیق ذرات کروی سخت و کوچک است [۲]:

$$\mu_{nf} = \mu_w(1 - \phi)^{2/5} \quad (3)$$

در این رابطه، μ_{nf} لزجت نانوسیال، μ_w لزجت آب می باشد. به منظور ارزیابی نتایج اندازه گیری شده از رابطه ضریب هدایت گرمایی از رابطه Choi و Yu می توان بهره گرفت [۴]:

خاص و ویژه ای است. برخی از این شرایط خاص عبارتند از یکنواخت بودن سوسپانسیون، پایدار بودن سوسپانسیون و توده ای شدن کم ذرات و عدم تغییر ماهیت شیمیایی سیال. برای رسیدن به چنین خواص ویژه ای از راهکارهای مختلف استفاده می شود. بهبود خواص حرارتی نانوسیال احتیاج به انتخاب روش تهیه مناسب این سوسپانسیون ها دارد تا از ته نشینی و ناپایداری آنها جلوگیری شود. متناسب با کاربرد، انواع بسیاری از نانوسیالات از جمله نانوسیال اکسید فلزات، نیتريت ها، کربید فلزات و غیرفلزات که به وسیله یا بدون استفاده از سورفکتانت در سیالاتی مانند آب، اتیلن گلیکول و روغن به وجود آمده است [5]. مطالعات زیادی روی چگونگی تهیه نانوذرات و روش های پراکنده سازی آنها در سیال پایه انجام شده است. یکی از روش های متداول تهیه نانوسیال، روش دو مرحله ای است. در این روش ابتدا نانوذره یا نانولوله معمولاً به وسیله روش رسوب بخار شیمیایی (CVD) در فضای گاز بی اثر به صورت پودرهای خشک تهیه می شود رسوب دهی شیمیایی بخار (CVD) یکی از کاربردی ترین متد ها در تهیه سطوح ویژه جهت ساخت تجهیزات با فناوری بالاست در فرآیند CVD یک لایه از ماده در معرض یک یا چند پیش ماده در فاز گاز قرار می گیرد، و طی آن بطور معمول مواد اولیه در سطح زیرلایه ی مذکور واکنش داده (یا تجزیه شده) و محصول رسوبی مورد نظر را به وجود می آورند. بر اثر واکنش محصولات جانبی نیز به وجود می آیند که به وسیله گاز حامل خارج می شوند. انواع مختلفی از این روش در مقاله اول معرفی روش CVD آورده شده است که اصطلاحات و روش های گوناگونی را در بر می گیرد. رسوب دهی شیمیایی بخار به طور وسیع در تولید نیمه هادی ها (به عنوان یک بخش از فرآیند تولید ساختارهای نیمه هادی) و برای رسوب فیلم های گوناگون نظیر سیلیکون های پلی کریستال، آمورف، همبافته (Epitaxial)، ژرمانیوم، تنگستن، سیلیکون نیتريد، سیلیکون اکسی نیتريد و تیتانیم نیتريد استفاده می شود. فرآیند CVD برای تولید الماس سنتزی نیز کاربرد دارد. همچنین می توان پوشش های فلزی متنوع از جنس طلا، تنگستن، مس، نیکل، آلومینیوم و ... را با این روش بر سطوح مورد نظر انجام داد. بنابراین روش CVD برای پوشش دهی قطعات مختلف و رسیدن به خواص نوری، الکتریکی، گرمایی، مکانیکی و مقاومت خوردگی ماده به کار می رود [6]. این روش همچنین برای تشکیل فیلم ها و الیافی که برای فیلتر کردن مواد کامپوزیت مصرف می شوند، کاربرد دارد. در مرحله بعد نانوذره یا نانولوله در داخل سیال پراکنده می شود. برای این کار از روش هایی مانند لرزاننده های مافوق صوت و یا از سورفکتانت ها استفاده می شود تا توده های نانوذره ای به حداقل رسیده و باعث بهبود رفتار پراکندگی شود. روش دو مرحله ای برای بعضی موارد مانند اکسید فلزات در آب، دیونیزه شده بسیار مناسب است [7-8].

در این تحقیق از روش ۲ مرحله ای برای ساخت نانو سیال استفاده شد. بدین منظور نانو ذرات با اندازه ۲۰ نانومتر و مشخصات ذکر شده در جدول ۱ تهیه گردید. سپس برای تهیه غلظت های مختلف نانو سیال از معادله زیر بهره گرفته شد:

$$U_o = \frac{Q}{LMTDA_o} \quad (11)$$

در این رابطه، رسانایی گرمایی کلی U_o ، کل سطح انتقال گرما A_o ، Q انتقال گرما کل، LMTD اختلاف دمای میانگین لگاریتمی متوسط می باشد.

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

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (12)$$

برای تعیین رژیم جریان نیازمند محاسبه عدد رینولدز می باشد. عدد رینولدز برای سیالات نیوتنی را می توان با استفاده از روابط زیر می توان محاسبه نمود:

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} u_{nf} d_i}{\mu_{nf}} \quad (13)$$

در این رابطه، Re_{nf} عدد رینولدز، سرعت نانوسیال u_{nf} ، قطر داخلی $\rho_{nf} d_i$ چگالی نانوسیال و μ_{nf} لزجت نانوسیال می باشد. همانند ضریب انتقال حرارت، ضریب اصطکاک نانو سیال جاری در بخش تست با رابطه (۱۴) محاسبه می شود:

$$f_{nf} = \frac{\gamma D \Delta P_{nf}}{L \rho_{nf} U_m^2} \quad (14)$$

در این رابطه، f_{nf} ضریب اصطکاک نانو سیال، ΔP_{nf} افت فشار اندازه گیری شده نانو سیال، L طول لوله، ρ_{nf} چگالی نانو سیال و U_m سرعت متوسط نانو سیال است.

ضریب عملکرد مبادله کن عبارت است از میزان بهبود انتقال گرما با استفاده از تکنیک های افزایشنده به میزان انتقال گرما با آب و لوله خالی:

$$\eta = \frac{Nu_{EN} / Nu}{(f_{EN} / f)^{1/3}} \quad (15)$$

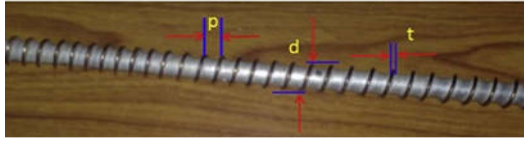
در این رابطه، Nu_{EN} ناسلت بهبود یافته، ضریب اصطکاک بهبود یافته می باشد عامل بهبود انتقال گرما نمایانگر مزیت های عملی بهبود کاربردی دستگاههایی می شود که از معادله فوق الذکر در شرایط یکسان مورد بررسی قرار می گیرند [۱۷].

۳- مراحل انجام آزمایش

۳-۱- تهیه نانوسیال

طرز تهیه نانوسیال اولین قدم کلیدی در کاربردی کردن این مفهوم برای تغییر راندمان انتقال گرما می باشد تهیه نانوسیال را که از طریق افزودن نانوذرات به سیال پایه صورت می گیرد نباید مانند یک اختلاط ساده جامد مایع در نظر گرفت. زیرا تهیه نانوسیال مستلزم ایجاد شرایط

سیم پیچ (d) و ضخامت وایر کوپل، p و d دو مولفه اصلی برای مبادله کن های در نظر گرفته شده اند. در شکل ۲ سیم پیچ لوله و نوار مارپیچی را مشاهده می نمایید.



شکل ۲- وایر کوپل یا لوله سیم پیچدار

به اصطلاح عامیانه p گام وایر کوپل و d به عنوان شعاع داخلی شناخته می شود. زمانی که از وایر کوپل استفاده می گردد قطر هیدرولیک مبادله کن از رابطه زیر به دست می آید:

$$d_h = \frac{d^2 - \frac{\pi \cdot d_c \cdot t^2}{4}}{\pi \cdot d + \frac{p}{d_c}} \quad (17)$$

که در آن (dc) قطر وایر کوپل و فاصله میان پیچ ها (p) ضخامت سیم (t) و قطر لوله به همراه سیم پیچ (d) می باشد.

۳-۳- تجهیزات آزمایشگاهی

همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده دستگاه مورد استفاده در این آزمایش متشکل از یک بخش تست، یک دستگاه آنالیز داده، یک روتامتر برای محاسبه شدت جریان، جریان سنج الکتریکی، منبع تامین کننده انرژی، یک تانک (مخزن) دریافت، یک پمپ داغ، یک مخزن خنک کننده، یک مخزن آب داغ. بخش تست یک مبادله کن گرمایی یک لوله ای افقی ۱/۵ متری است که در آن نانو سیال در داخل لوله جریان دارد. لوله از لوله مسی نرم با قطر بیرونی ۹/۵۳ میلی متر و قطر داخلی ۸/۱۳ میلی متر ساخته شده است. بخش آزمون از نظر گرمایی از طریق لوله های پلاستیکی از بخش بالا و پایین جدا می شود تا از اتلاف و فقدان گرما در جهت های محوری بکاهد. جهت اندازه گیری افت فشار و دمای کل نانو سیال در دو انتهای بخش تست، انتقال دهنده (فرستنده) اختلاف فشار و ترموکوپل های نوع T را قرار می دهند. ترموکوپل ها را در مکان های طولی متفاوت روی سطح لوله داخلی دوباره قرار می دهند سه ترموکوپل را به فاصله یکسان در اطراف محیط لوله قرار می دهند. مخزن های دریافت ۲۰ لیتری را به منظور ذخیره و نگه داری نانو سیال که از بخش تست خارج می شود از فولاد ضد زنگ می سازند. به منظور ثابت نگه داشتن دمای نانو سیال از مخزن خنک کننده با ظرفیت خنک سازی ۴/۲ کیلو واتی استفاده می شود. برای ایجاد شار حرارتی، یک گرم کننده الکتریکی ۵ کیلو واتی استفاده شده است. میزان انرژی ورودی به سیستم از طریق شار حرارتی با استفاده از وات متر و جریان سنج قابل اندازه گیری می باشد. سرعت جریان نانو سیال با تنظیم سرعت چرخش پمپ دنده ای مغناطیسی کنترل می شود. سرعت جریان نانو سیال داغ را با روتامتر (جریان سنج) اندازه می گیرند. تمامی ترموکوپل های نوع T را با یک کالبریتور قابل حمل و مدرج تنظیم می کنند. عدم قطعیت اندازه گیری فشار $\pm 0.3\%$ کیلو پاسکال است. بعلاوه سرعت جریان نانو سیال را با استفاده از بالانس (تعادل) الکترونیکی محاسبه می کنند. عدم قطعیت بالانس الکترونیکی $\pm 0.006\%$ کیلوگرم است. در طی آزمایش دمای ورودی و

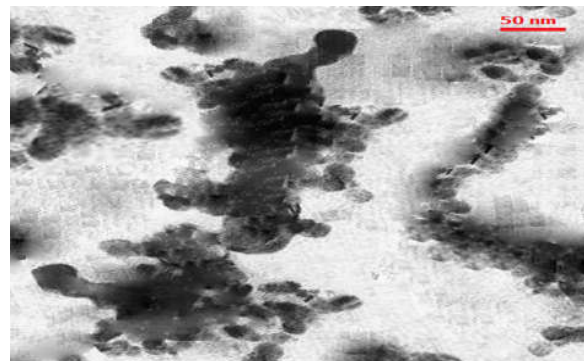
$$\phi = \frac{1}{\left(\frac{100}{\phi_m}\right) \left(\frac{\rho_p}{\rho_w}\right)} 100 \quad (16)$$

در این رابطه، ϕ غلظت نانو سیال، ϕ_m غلظت جرمی، ρ_p چگالی نانو ذرات و ρ_w چگالی آب می باشد.

جدول ۱- ویژگی های نانو ذرات بکار رفته

نانو ذرات	رسانایی گرمایی (w/mK)	چگالی (kg/m ³)	ظرفیت گرمایی ویژه
Al ₂ O ₃	۳۲	۳۸۸۰	۷۷۳

به منظور جلوگیری از کلوخه شدن نانو ذرات از دستگاه مافوق صوت ارتعاشی به مدت ۵ ساعت استفاده شد. اندازه گیری pH سیال نشان داد که در محدوده سیال خنثی قرار دارد. به منظور ارزیابی نانو سیال تهیه شده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM استفاده گردید. همانطور که شکل ۱ نشان می دهد نانو ذرات به خوبی در سیال پایه پراکنده شده اند. هم چنین با توجه به شکل می توان گفت که نانو ذرات کروی بوده و سیال کلوخه نشده است.

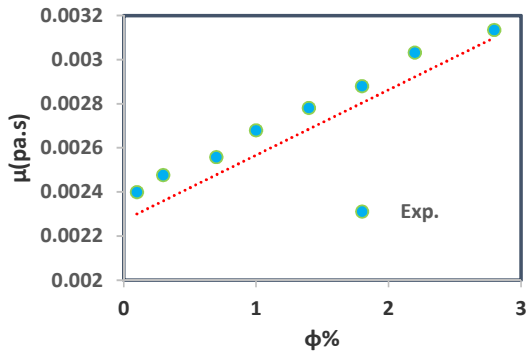


شکل ۱- TEM نانو سیال

۳-۲- سیم مارپیچی (Wire Coil)

سیم های پیچی لوله ای افزایش دهنده های جدید و آشفته سازهای جریان میباشند. که به دلیل آشفتنگی زیادی که برای جریان ایجاد می کنند مورد توجه قرار گرفته اند. نحوه قرارگیری آنها در داخل سیستم به این صورت می باشد که در حول محور لوله ای با فواصل معین پیچیده شده و در مسیر جریان قرار میگیرند و به طور معمول از جنس آلومینیومی می باشند و جنس لوله ای که سیم دور آن پیچ می شود از نوع مس می باشد. در محاسبات مربوط به مبادله کن های دارای Wire Coil از انتقال گرما میان سیم پیچی و لوله ای مرکزی صرف نظر می گردد. میزان دبی مبادله کن های حاوی Wire Coil بر مبنای شعاع هیدرودینامیکی محاسبه می گردد. چهار مشخصه متمایز Wire Coil ها عبارتند از: فاصله میان پیچ ها (p) ضخامت سیم (t) و قطر لوله به همراه

مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مدل انیشتین نشان می دهد که این مدل به خوبی قادر به پیش بینی لزجت نانو سیالات می باشد.



شکل ۵- لزجت نانو سیال

۲-۴- انتقال گرما

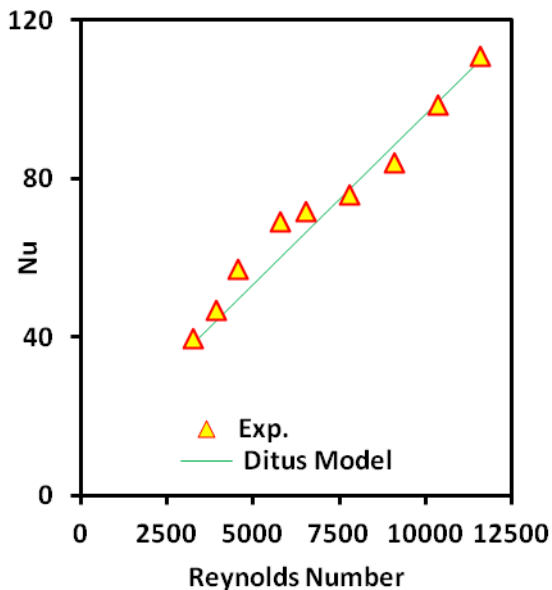
قبل از شروع تعیین ضریب انتقال گرما جابجایی و ضریب اصطکاک نانو سیال، قابل اطمینان بودن و دقت سیستم آزمایشگاهی با استفاده از آب به عنوان سیال برآورد می شود. نتایج ضریب انتقال گرما آزمایشی و ضریب اصطکاک با نتایج به دست آمده از معادله Dittus و معادله Blasius که به صورت زیر هستند، مقایسه می شوند [۱۱].

$$Nu = 0.04Re^{0.75} Pr^{0.4} \quad (18)$$

$$f = 0.316Re^{-0.25} \quad (19)$$

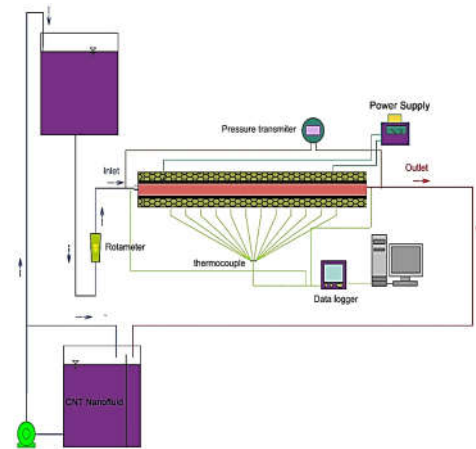
در این رابطه، Nu عدد ناسلت، Re عدد رینولدز، Pr عدد پرانتل و f ضریب اصطکاک است.

همان طور که در شکل های ۶ و ۷ می بینید می توان دید که بین نتایج تجربی و مقادیر محاسبه شده برای آب خالص مطابقت وجود دارد.



شکل ۶- ارزیابی Nu سیستم برای آب با معادله Dittus

خروجی نانو سیالات، دمای دیواره لوله آزمایش، سرعت جریان کل نانو سیال و اختلاف فشار در نانو سیال اندازه گیری خواهد شد.



شکل ۳- تجهیزات آزمایشگاهی

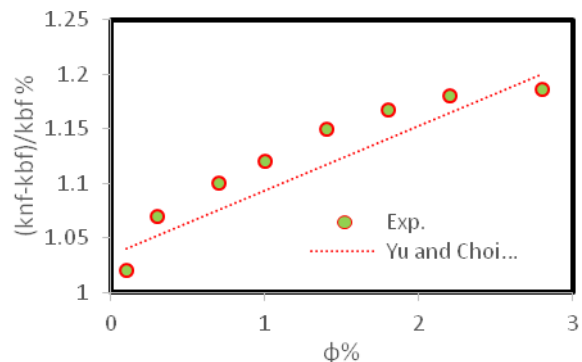
۳-۴- اندازه گیری ویژگی های نانو سیال

رسانایی گرمایی نانو سیال با استفاده از دستگاه KD2 ساخت ژاپن در غلظت های مختلف اندازه گیری گردید [۱۸]. لزجت نانو سیال با استفاده از دستگاه Brookfield و با دقت ± 0.1 در غلظت های مختلف اندازه گیری گردید.

۴- بحث و بررسی نتایج

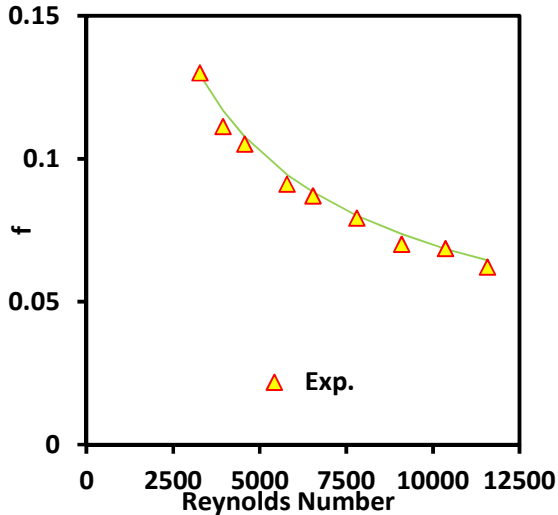
۴-۱- خواص ترموفیزیکی نانو سیال

نمودار شکل (۴) نشان دهنده تغییرات رسانایی گرمایی با غلظت نانو سیال می باشد. همانطور که از نمودار مشخص است افزایش غلظت نانو ذرات سبب افزایش رسانایی گرمایی می گردد. البته باید توجه داشت که افزایش بیش از حد غلظت ممکن است که سبب کلوخه شدن ذرات و در نتیجه کاهش رسانایی را در پی داشته باشد. هم چنین نمودار نشان می دهد که داده های آزمایشگاهی از انطباق خوبی با مدل Yu و Choi دارد [۱۵].



شکل ۴- رسانایی گرمایی نانو سیال

برای لزجت، نتایج نمودار (۵) نشان می دهد که افزایش غلظت سبب افزایش لزجت نانو سیال می گردد. افزایش لزجت سیال به نوبه خود سبب افزایش افت فشار و در نتیجه افزایش اصطکاک خواهد شد.

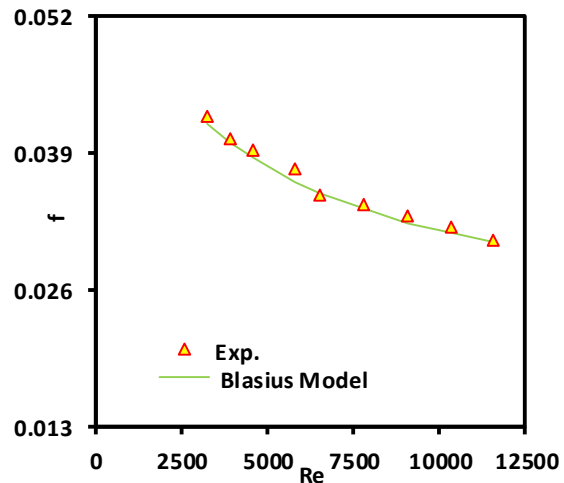


شکل ۹- ارزیابی f سیستم دارای سیم مارپیچی با معادله Garcia

پس از ارزیابی صحت نتایج سیستم، مبادله کن برای نانو سیال آلومینا و سیم مارپیچی مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی عملکرد سیستم ۳ غلظت نانو سیال (۰/۰۵، ۰/۱۵ و ۰/۳۵) و ۲ نسبت گام متفاوت سیم مارپیچی (۲ و ۳) در شار حرارتی ثابت مورد بررسی قرار گرفتند (نمودار ۱۰). نتایج نشان داد که برای تمامی موارد افزایش عدد رینولدز سبب افزایش میزان انتقال گرما می گردد. هم چنین میزان انتقال گرما در سیستم دارای نوار سیمی بسیار چشمگیر تر از سیستم بدون سیم مارپیچی می باشد. دلیل این امر را باید در پدیده اختلاط جست و جو کرد. وجود سیم پیچی سبب افزایش بیشتر آشفتگی جریان به خصوص در مرکز و دیواره مبادله کن شده و سبب می گردد اختلاط قوی برای ذرات نانو پراکنده شده در سیال ایجاد گردد. این اختلاط سبب می شود ذرات به سرعت حرارت را از دیواره جذب کرده و به سمت مرکز لوله حرکت نمایند و ذرات جدید جایگزین آنها در نزدیکی دیواره شوند. هم چنین افزایش اختلاط سبب افزایش حرکت نامنظم ذرات و در نتیجه افزایش تبادل حرارت میان آنها می باشد. یکی دیگر از عواملی که سبب می شود میزان انتقال گرما بهبود پیدا کند تاخیر در ایجاد لایه مرزی است. هر چه لایه مرزی زودتر تشکیل شود سبب ایجاد حایل میان دیواره و نانو سیال شده و میزان انتقال گرما از دیواره به سیال را کاهش می دهد.

نتایج هم چنین نشان می دهد که افزایش غلظت نانو ذرات سبب می گردد میزان انتقال گرما افزایش یابد. با افزایش غلظت نانو ذرات درصد بیشتری از اتمهای آن در نزدیکی سطح قرار می گیرند. سطح ذرات در انتقال گرما موثر بوده و استفاده از نانوسیال به افزایش سطح انتقال گرما منجر می گردد. نانوذرات برگرفته شده یک سطح بسیار زیاد برای موضوع انتقال گرما ایجاد می کند و همین عامل یک مزیت بالقوه برای نانوسیال می باشد. هم چنین افزایش غلظت نانوذرات، هدایت گرمایی موثر (ظاهری) سیالات را افزایش می دهند. از دیگر عوامل تاثیر گذار در افزایش انتقال گرما، با افزایش غلظت نانو ذرات می توان به تشدید شدن اثر متقابل و برخورد ذرات و سیال، افزایش میزان درهمی جریان و افزایش گرادیان عرضی دمای سیال اشاره کرد.

در غلظت ثابت ۰/۳۵، برای مبادله کن با نسبت سیم پیچی (p/d) ۳



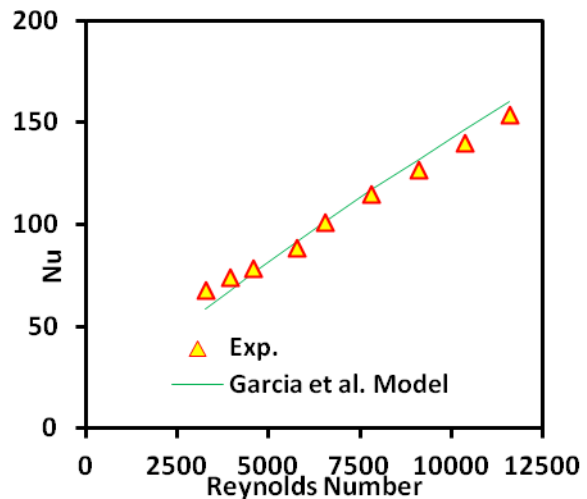
شکل ۷- ارزیابی اصطکاک برای سیستم برای آب با معادله Blasius

همچنین برای بررسی صحت نتایج سیستم دارای نوار مارپیچ، از مدل Garcia استفاده می گردد [۱۲ و ۱۳]:

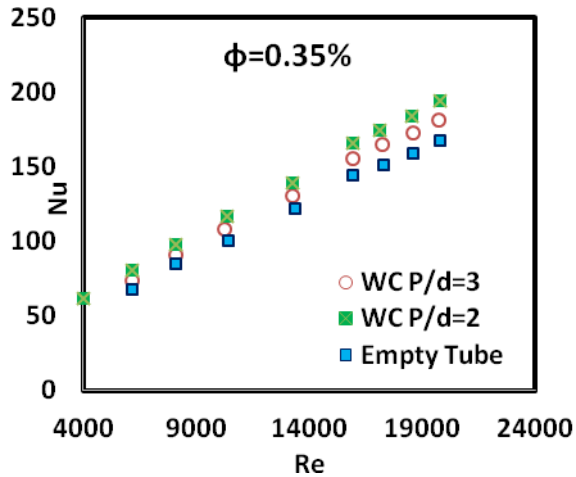
$$Nu = 0.132 \left(\frac{p}{d}\right)^{-0.372} Re^{0.72} Pr^{0.37} \quad (20)$$

$$f = 198.7 Re^{-0.708} \left(\frac{p}{d}\right)^{-0.943} \quad (21)$$

مطابق نمودارهای ۸ و ۹ نتایج آزمایشگاهی از انطباق خوبی با داده های مدل دارد.



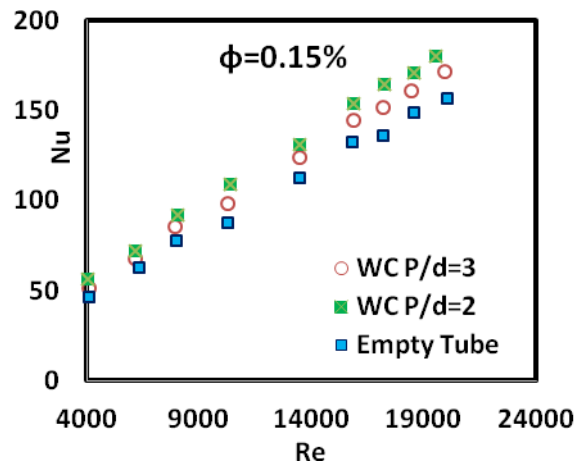
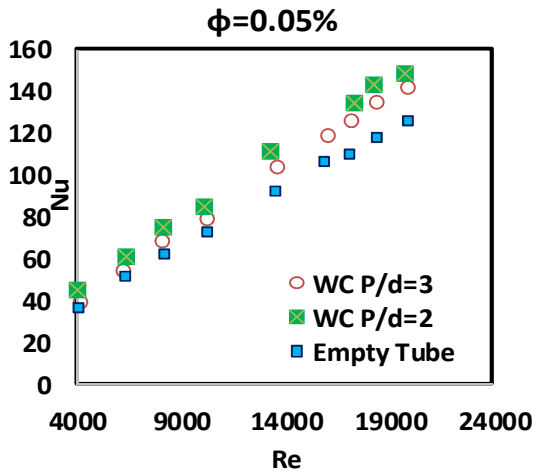
شکل ۸- ارزیابی Nu سیستم دارای سیم مارپیچی با معادله Garcia



شکل ۱۰- تغییرات عدد Nu با شرایط عملیاتی مختلف

نمودارهای شکل ۱۱ نشان می دهد که افزایش غلظت نانو ذرات و نیز کاهش نسبت سیم پیچی سبب افزایش افت فشار و در نتیجه افزایش هدر رفت اصطکاکی می گردد. در غلظت های مختلف نانوسیال و در گامهای متفاوتی از کویل سیمی همانطور که مشاهده می گردد ضریب اصطکاک با افزایش اعداد رینولدز کاهش می یابد و هر چه گام نوار ماریپیچ کمتر ضریب اصطکاک دارای رش خواهد بود. افزایش غلظت نانو سیال سبب افزایش لزجت سیال می گردد که این امر به نوبه خود سبب افزایش مقاومت در برابر حرکت سیال می گردد. هم چنین افزایش غلظت سبب افزایش برخورد ذرات با یکدیگر شده و سبب افزایش افت فشار می گردند. کاهش نسبت سیم پیچی سبب می گردد تلاطم جریان افزایش یابد که این افزایش تلاطم سبب افزایش افت فشار خواهد شد. قرار گرفتن سیم پیچی در مسیر جریان سبب پدیده برگشت جریان در اطراف سیم شده و باعث می گردد افت اصطکاکی افزایش یابد. هم چنین نتایج نشان می دهد که افزایش غلظت نانو سیال تاثیر کمتری بر روی افزایش افت اصطکاکی نسبت به وجود سیم پیچی دارد. برای نانو $-\text{SiO}_2/\text{Si}$ با غلظت 0.35% در سیم پیچی با نسبت افت اصطکاکی $1-6\%$ بیشتر از مبادله کن خالی می باشد. این در حالی است که برای انتقال گرما این میزان $30-45\%$ می بود. بنابراین با توجه به میزان افزایش انتقال گرما، افزایش میزان افت اصطکاک برای مبادله کن با سیم پیچی و جریان نانو سیال ناچیز بوده و افزایش انتقال گرما نسبت به افزایش میزان اصطکاک برتری داشته و کنترل کننده عملکرد مبادله کن می باشد.

میزان افزایش انتقال گرما نسبت به مبادله کن بدون سیم پیچی در بازه $10-17\%$ می باشد این در حالی است که برای نسبت 2% این میزان $15-23\%$ است. دلیل این میزان اختلاف را باید در شدت آشفتگی ایجاد شده توسط سیم پیچی جست و جو کرد. هر چه نسبت سیم پیچی کوچکتر، میزان آشفتگی بیشتر و در نتیجه حرکت ذرات نامنظم و تشکیل لایه مرزی با تاخیر صورت می پذیرد. مقایسه عملکرد مبادله کن برای نانو سیال و آب در نسبت سیم پیچی 3% نشان می دهد که میزان افزایش انتقال گرما برای نانو سیال $28-38\%$ می باشد. این در حالی است که برای نسبت سیم پیچی 2% این مقدار برابر با $30-45\%$ است. نسبتهای حاصل متاثر از کاربرد معادله مربوط به ضریب عملکرد مبادله کن می باشد در هر غلظت از نانوسیال و در گام مشخصی از نوارماریپیچی مقدار معینی از رسانایی گرمایی و ضریب اصطکاک به دست می آید که رسانایی گرمایی و اصطکاک بهبود یافته می باشد



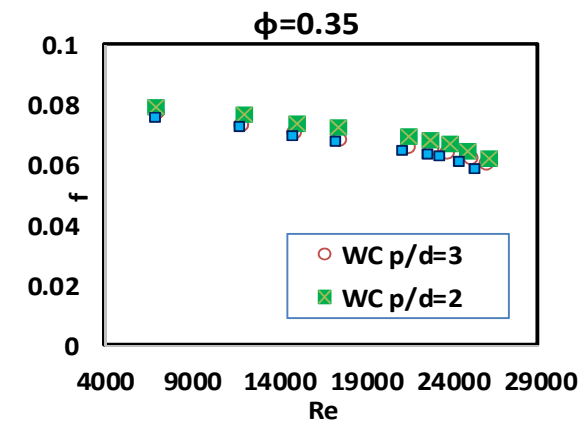
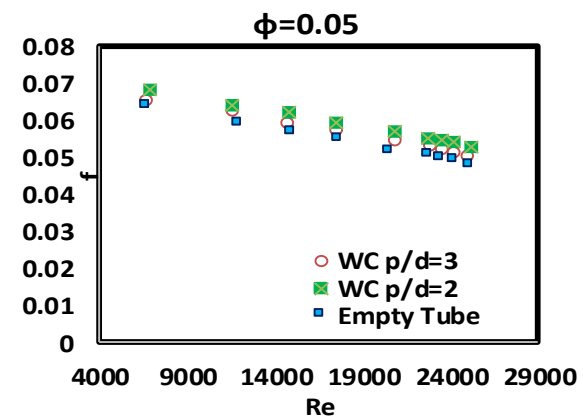
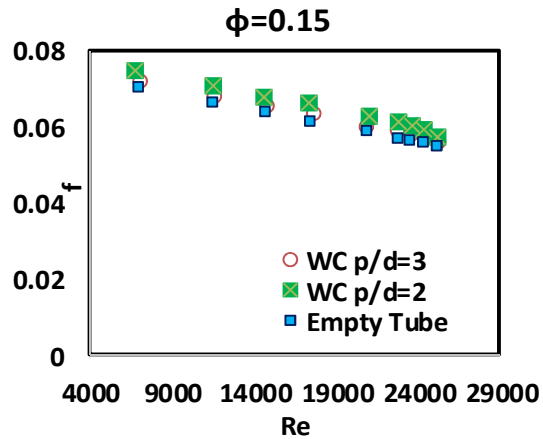
این معادلات برای تمام نانوسیالات پایه آب و صرفاً در مبادله کن های مشابه صادق است. با توجه به تجهیزات مورد استفاده و نانوسیال به پایه حلال مختلف معادلات متنوعی ارایه شده اند ولی نتایج حاصله متاثر از غلظت نانوسیال مورد استفاده و همچنین وجود اشفته سازها درون مبادله کن مورد کاربرد می باشد.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه مبادله کن گرمایی با شار ثابت مورد بررسی قرار گرفت. برای بهینه کردن کارایی مبادله کن از سیم پیچی و جریان نانو سیال آلومینا بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که برای نانو سیال با غلظت ۰/۳۵ و سیم پیچی با نسبت گام ۲ بهترین عملکرد را دارد. برای این شرایط میزان افزایش انتقال گرما ۳۰-۴۵٪ محاسبه گردید. این در حالی است میزان افزایش افت اصطکاکی برای آنها در بازه ۱-۶٪ قرار داشت. این نشان می داد که افزایش انتقال گرما بر افزایش افت فشار غلبه کرده و کنترل کننده عملکرد مبادله کن می باشد. هم چنین با توجه به داده های آزمایشگاهی روابطی برای Nu و f جهت پیش بینی عملکرد مبادله کن ارائه شد.

۶- مراجع

- [1] Choi C., Yoo H.S., Oh J.M., Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants, *Curr. Appl. Phys.* 710-712, 2008.
- [2] Lee J.H., Hwang K.S., Jang S.P., Lee B.H., Kim J.H., Choi S.U.S., Choi C.J., Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles, *Int. J. Heat Mass Transfer* 51, 2651-2656, 2008.
- [3] Choi S.U.S., Nanofluids: From vision to reality through research, *J. Heat Transfer* 131, 033106-1-033106-9, 2009.
- [4] Kang H.U., Kim S.H., Oh J.M., Estimation of thermal conductivity of nanofluid using experimental effective particle volume, *Exp. Heat Transfer* 19, 181-191, 2006.
- [5] Karagedov G. R., Lyakhobv N. Z., Preparation and Sintering of nanosized α -Al₂O₃ Powder, *Nanostructured Materials* 11, 559-572, 1999.
- [6] Ranjan, K., Jagadish C. Panchanan Pramanik R "A novel chemical route for the synthesis of nanocrystalline α -Al₂O₃ powder", *Materials Letters* 44, 299-303, 2000.
- [7] Li J., Yubai P., Xiang C., Qiming G., Guo J., Temperature synthesis of ultrafine α -Al₂O₃ powder by a simple aqueous sol-gel process, *Ceramics International*, 2005.
- [8] Johnson D. W., *Ceramic Powder Preparation*, American Ceramic Society. 71 [1], C, 26-28, 1998.
- [9] Murugesan P., Mayilsamy K., Suresh S, Heat transfer and friction factor studies in a circular tube fitted with twisted tape consisting of wire-nails, *Chinese Journal of Chemical Engineering* 18, 1038-42, 2010.
- [10] Promvong P., Thermal performance in circular tube fitted with coiled square wires, *Energy Conversion and Management* 49, 980-987, 2008.
- [11] Promvong P., Thermal enhancement in a round tube with snail entry and coiled-wire inserts, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35, 623-629, 2000.
- [12] Promvong P., Thermal augmentation in circular tube with twisted tape and wire coil turbulators, *Energy Conversion and Management* 49, 2949-2955, 2008.
- [13] Eiamsa-ard S., Nivesrangsan P., Chokphoemphun S., Promvong P., Influence of combined non-uniform wire coil and twisted tape inserts on thermal performance characteristics, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37, 850-856, 2010.



شکل ۱۱- تغییرات f با شرایط عملیاتی مختلف

با بدست آوردن نتایج آزمایشگاهی می توان معادلات زیر را برای توصیف عملکرد سیستم بدست آورد:

$$Nu = 0.02 Re^{0.8} Pr^{0.4} (\pi + \phi)^{0.5} (1 + p/d)^{0.11} \quad (22)$$

$$f = \frac{0.35(\pi + \phi)^{0.25} (1 + p/d)^{0.11}}{Re^{0.25}} \quad (23)$$

- [14] Akhavan-Behabadi M.A., Kumar R., Salimpour M.R., Azimi R., Pressure drop and heat transfer augmentation due to coiled wire inserts during laminar flow of oil inside a horizontal tube, *International Journal of Thermal Sciences* 49, 373–379, 2010.
- [15] Maddah H., Alizadeh M., Ghasemi N., Wan Alwi S. R., Experimental study of Al₂O₃/water nanofluid turbulent heat transfer enhancement in the horizontal double pipes fitted with modified twisted tapes, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 78,1042–1052, 2014.
- [16] Mohammadiun H., Mohammadiun M., Hazbehian M., Maddah H., Experimental Study of ethylene glycol-based Al₂O₃ nanofluid turbulent heat transfer enhancement in the corrugated tube with twisted tapes, *Heat Mass Transfer* 52, 141–151, 2016.
- [17] Hazbehian M., Maddah H., Mohammadiun H., Alizadeh M., Experimental investigation of heat transfer augmentation inside double pipe heat exchanger equipped with reduced width twisted tapes inserts using polymeric nanofluids, *Heat Mass Transfer* 52, 1–15, 2016.
- [18] Mohammadiun M., Dashtestani F., Alizadeh M., Exergy Prediction Model of a Double Pipe heat Exchanger Using Metal Oxide Nano fluids and Twisted Tape Based on the Artificial Neural Network Approach and Experimental Results, *Journal of Heat Transfer* 138, 011801-1-011801-9, 2015.