



# افت فشار و انتقال حرارت جریان نانوسیال آب/اکسید تیتانیوم درون کانال دایره‌ای، مربعی و مستطیلی

امیر دهشیری پاریزی، محمدرضا سلیمپور<sup>\*2</sup>

1- دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

\* اصفهان، کد پستی 83111-84156، salimpour@cc.iut.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 دی 1393

پذیرش: 02 فروردین 1394

ارائه در سایت: 23 فروردین 1394

کلید واژگان:

انتقال حرارت

نانوسیال

سطح مقطع‌های مختلف

تجربی

هزینه انرژی در دهه‌های اخیر شدت افزایش پیدا کرده است. لذا نیاز مبرم به نوع جدیدی از سیال کاری برای بهبود عملکرد گرمایی سیستم‌ها و کاهش مصرف انرژی احساس می‌شود. یکی از سیستم‌های گرمایی پرکاربرد مبدل‌های حرارتی هستند. در طراحی مبدل حرارتی مطالعه مشخصه‌های هیدرولیکی و گرمایی جریان کاملاً توسعه یافته داخل کانال با سطح مقطع‌های مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین در پژوهش حاضر رفتار گرمایی و هیدرولیکی جریان آرام سیال پایه (آب) و نانوسیال آب/اکسید تیتانیوم درون کانال با سطح مقطع‌های دایره‌ای، مربعی و مستطیلی بطور تجربی مطالعه می‌شود. این پژوهش کمک می‌کند تا تأثیر غلظت نانوذرات، عدد رینولدز و شکل سطح مقطع را روی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال بررسی کنیم. آزمایش‌ها برای نانوسیال آب/اکسید تیتانیوم با سه غلظت حجمی 0.0، 0.2 و 0.5 تحت رژیم جریان آرام با دمای ثابت سطح انجام شده‌اند. تحلیل اطلاعات نشان می‌دهد که افت فشار کانال غیردایروی نسبت به کانال‌های دایروی کمتر است و اضافه شدن نانوذرات به سیال پایه افت فشار جریان داخل کانال‌ها را چندان افزایش نمی‌دهد. همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که عدد ناسلت کانال دایره‌ای نسبت به کانال‌های غیر دایروی برای سیال پایه و نانوسیال بیشتر است. اما افزایش نسبی عدد ناسلت کانال‌های غیر دایروی نسبت به کانال دایره‌ای بیشتر است زیرا افزودن نانوذرها به سیال پایه موجب کاسته شدن از اثرات منفی گوشه‌های تیز کانال‌های غیر دایروی و بهبود انتقال حرارت می‌شود.

## Water/TiO<sub>2</sub> nanofluid flow heat transfer and pressure drop through ducts with circular, square and rectangular cross-sections

Amir Dehshiri-Parizi, Mohammad Reza Salimpour<sup>\*</sup>

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

\* P.O.B. 84156-83111 Isfahan, Iran, salimpour@cc.iut.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 17 January 2015  
Accepted 22 March 2015  
Available Online 12 April 2015

**Keywords:**  
Heat Transfer  
Nanofluid  
Different Cross-Sections  
Empirical

## ABSTRACT

Energy costs have soared rapidly in the last decades. Thus, there is a tremendous need for new kinds of working fluids to improve the heating systems performances and to reduce energy consumption. One of the most applicable heating systems is heat exchangers. Study of thermal hydraulic characteristics for laminar fully developed flow through conduits with different cross-sections is significant in the design of heat exchangers. In the present investigation, the thermo-hydraulic behavior of nanofluid through conduits with circular, square and rectangular cross sectional shapes is studied, experimentally. This investigation aims to study the effect of Reynolds number and shape of cross-section on heat transfer and pressure drop of nanofluid flow. The experiments were conducted for TiO<sub>2</sub>/water nanofluid with three volume fractions 0, 0.2 and 0.5 under laminar flow regime with constant wall temperature. Analyzed data indicate that friction factors of square and rectangular cases are more than that of circular cross section. Also, it is seen that the addition of nano powder with low volume fraction (0-0.5%) to base fluids does not increase the friction factor remarkably at both circular and non-circular cases. The results show that the Nusselt number of flow through the conduit with circular cross-section is higher than that of non-circular cases. Moreover, it is observed that adding nano powder to base fluid improves heat transfer in sharp corners and therefore its effect is more pronounced in non-circular cross sections.

## 1- مقدمه

قرار می‌گیرند و در این رابطه کانال‌ها با سطح مقطع‌های مختلف بکار گرفته می‌شوند. نرخ انتقال حرارت بالا و افت فشار پایین، دارای بالاترین اولویت در طراحی مبدل‌های حرارتی می‌باشد. در سال‌های اخیر یک محیط جدید

مبدل‌های حرارتی در گستره وسیعی از کاربردها از قبیل فرآیندهای پتروشیمی، بازیافت حرارت، تهویه مطبوع و سیستم‌های قدرت مورد استفاده

Please cite this article using:

A. Dehshiri-Parizi, M. R. Salimpour, Water/TiO<sub>2</sub> nanofluid flow heat transfer and pressure drop through ducts with circular, square and rectangular cross-sections, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 377-382, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

انتقال حرارت برای کمک به افزایش نرخ انتقال حرارت معرفی شده است. این محیط انتقال حرارت که یک محلول پایدار نانوذرات در سیال‌های مرسوم انتقال حرارت می‌باشند، نانوسیال نامیده می‌شوند. نانوسیال‌ها به علت استفاده همزمان از هدایت حرارتی بالای نانوذرات و ضریب انتقال حرارت بالای سیالات، محیط‌های پیشرفته انتقال حرارت محسوب می‌شوند. انتظار می‌رود که نانوسیال‌ها با خواص انتقال حرارت بهبود یافته، بتوانند ضریب انتقال حرارت داخل کانال را افزایش دهند و افت حرارتی ناشی از ایجاد نقاط داغ در گوشه‌های تیز را جبران نمایند. عدم اطلاعات آزمایشگاهی کافی در این رابطه موجب گردید تا در این پژوهش، انتقال حرارت و افت فشار جریان نانوسیال داخل کانال را بصورت تجربی بررسی کنیم.

پاک و چوی [1] از اولین محققینی هستند که به بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری در نانوسیال پرداخته‌اند. آزمایش‌های آن‌ها برای نانوسیال آب/اکسید تیتانیوم و آب/اکسید آلومینیم در جریان با رژیم آشفته با شرط مرزی شار حرارتی ثابت دیواره صورت گرفت. یافته‌های آن‌ها افزایش 75% انتقال حرارت برای غلظت 2/78% از نانوذره  $Al_2O_3$  را نشان می‌دهد.

تاکنون مطالعات زیادی روی انتقال حرارت جابجایی و افت فشار جریان داخل کانال با سطح مقطع دایروی انجام شده است. ون و دینگ [2] انتقال حرارت جابجایی جریان آرام درون لوله‌ای به طول 970 و قطر 4/5 میلی‌متر را بصورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که ضریب انتقال حرارت نانوسیال از سیال پایه بیشتر است و همچنین با افزایش عدد رینولدز و غلظت حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد.

هوانگ و همکارانش [3] افت فشار و ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب / اکسید آلومینیم جریان یافته در یک لوله که بطور یکنواخت گرم می‌شد در رژیم آرام در ناحیه کاملاً توسعه یافته را اندازه گرفتند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد که ضریب اصطکاک نانوسیال می‌تواند بصورت تحلیلی از رابطه داری برای جریان تک فاز پیش‌بینی شود. از سوی دیگر، ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال تا 8% برای غلظت 0/3% در مقایسه با آب خالص افزایش یافت و این افزایش نمی‌توانست توسط رابطه شاه پیش‌بینی شود. در مطالعه لی و ژوان [4] که برای ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب اصطکاک نانوسیال آب با ذرات مس با قطر زیر 100nm انجام داده بودند، نتایج نشان داد که برای هر دو جریان آرام و مغشوش افزایش قابل توجهی برای افت فشار آب-مس وجود ندارد. این بدین معنی بود که نانوسیال سبب افزایش قدرت پمپاژ نمی‌شود.

فوتوکیان و نصرصفهانی [5] نیز افت فشار و انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید مس در داخل لوله دایروی با شرایط مرزی دما ثابت برای جریان مغشوش را بررسی کردند. در این پژوهش غلظت حجمی نانوسیال کمتر از 0/3% بود. آن‌ها مشاهده کردند که افت فشار جریان لزوماً با افزایش غلظت نانوذرات افزایش نمی‌یابد و بیشترین افزایش در افت فشار حدود 20% برای نانوسیال با غلظت حجمی 0/03% ارائه شد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که باید غلظت بهینه‌ای برای هر نانوسیال بدست آید تا سبب انتقال حرارت بیشتر و افت فشار کمتر شود.

دربسیاری از موارد از اکسیدهای فلزی برای تهیه نانوسیالات استفاده می‌شود. زینالی‌هریس و همکارانش [6] انتقال حرارت اجباری جریان آرام نانوسیال آب/اکسید آلومینیم داخل لوله دایروی با دمای ثابت سطح را بصورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت ذرات نانو در نانوسیال افزایش می‌یابد.

آن‌ها معتقد بودند که ذرات نانو اکسیدهای فلزی رفتار متفاوتی در انتقال حرارت از خود نشان می‌دهند. برای مقایسه رفتار ذرات نانو اکسیدهای فلزی، زینالی‌هریس و همکارانش [7] انتقال حرارت جریان آرام نانوسیالات آب/اکسید آلومینیم و آب/اکسید مس داخل لوله دایروی با شرط مرزی دمای ثابت سطح را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که برای هر دو سیستم نانوسیال، ضریب انتقال حرارت با افزایش تجمع نانوذره‌ها و نیز عدد پکلت افزایش می‌یابد. اما نانوسیال آب/اکسید آلومینیم افزایش بیشتری نسبت به نانوسیال آب/اکسید مس نشان می‌دهد.

در مناطق سرد اتیلن‌گلیکول با درصد‌های حجمی متفاوت را با آب مخلوط می‌کنند تا با پایین آوردن دمای انجماد مانع از یخ زدگی سیال عامل در فرآیندهای انتقال گرما شوند. یو و همکارانش [8] یک بررسی آزمایشگاهی از رفتار جریان و خواص انتقال حرارت نانوسیال اکسید آلومینیم بر پایه مخلوط 45% حجمی اتیلن‌گلیکول و 55% حجمی آب انجام دادند. بررسی‌های آنان نشان داد که افزایش ضریب انتقال حرارت را نباید تنها به افزایش ضریب هدایت حرارتی نسبت داد.

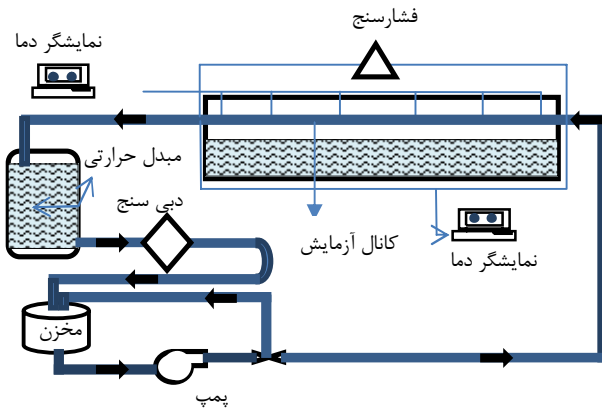
بررسی پژوهش‌های منتشر شده تاکنون نشان‌دهنده این موضوع است که اکثر بررسی‌های انجام‌شده مربوط به جریان نانوسیال داخل مجراهای دایروی است و انتقال حرارت جریان نانوسیال درون کانال‌های غیردایروی خیلی کم بررسی شده است. از آن جمله می‌توان به پژوهش نصیری و همکارانش [9] اشاره کرد. این محققین خصوصیات انتقال حرارت نانوسیالات آب/اکسید آلومینیم و آب/اکسید مس داخل یک کانال با سطح مقطع مربعی را بصورت آزمایشگاهی تحت رژیم جریان آرام با شار حرارتی یکنواخت بررسی کردند و نتایج افزایش انتقال حرارت برای هر دو نانوسیال در مقایسه با سیال پایه را ارائه دادند. در مطالعه دیگری، نسان و همکارانش [10] عملکرد انتقال حرارتی نانوسیالات آب/اکسید آلومینیم و آب/اکسید تیتانیوم داخل کانال حلزونی تحت رژیم جریان مغشوش را بررسی کردند. براساس نتایج آزمایشگاهی آن‌ها، ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت نانوسیالات از سیال پایه بیشتر بوده این افزایش با زیاد شدن غلظت نانوذره‌ها افزایش می‌یابد.

از آنجا که انتقال حرارت جابجایی و افت فشار در جریان آرام نانوسیال آب / اکسید تیتانیوم داخل مجراهای مربعی و مستطیلی تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است، در پژوهش حاضر به بررسی این موضوع بصورت تجربی پرداخته شده جهت مقایسه داده‌های مربوط به مجرا با سطح مقطع دایره نیز مورد جمع‌آوری و تحلیل قرار می‌گیرد.

## 2- دستگاه آزمایش

یک دستگاه آزمایشگاهی به منظور اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در کانال‌های دایره‌ای، مربعی و مستطیلی با شرط مرزی دمای ثابت دیواره طراحی و ساخته شد. دستگاه آزمایش شامل یک مدار جریان اصلی و یک مدار فرعی می‌باشد. نمودار دستگاه آزمایش در شکل 1 نشان داده شده است.

مدار اصلی، مدار گردش نانوسیال است. نانوسیال تهیه شده ابتدا داخل مخزن ریخته می‌شود و سپس توسط پمپ از کف مخزن مکیده شده و به جریان در می‌آید. برای کمک به تنظیم دبی نانوسیال و نیز جلوگیری از فشار زیاد به پمپ از یک مسیر جریان برگشتی استفاده می‌شود. جریان خروجی پمپ وارد قسمت آزمایش می‌شود. قبل از ورودی قسمت آزمایش یک شیر برای تنظیم دبی تعبیه شده است. قسمت آزمایش مطابق شکل از یک مخزن مکعب مستطیل گالوانیزه به طول یک متر، عرض 0/3 متر و ارتفاع 0/4 متر



شکل 1 نمودار اجزای مختلف دستگاه آزمایش

در این تحقیق به منظور تهیه نانوسیال همگن و نسبتاً پایدار از دستگاه اولتراسونیک UP200S که ساخت شرکت آلمانی هیلشر<sup>3</sup> می باشد، استفاده شده است. این دستگاه دارای یک پراب بوده که داخل سیال مورد نظر قرار می گیرد و توانایی ایجاد فرکانس 24 کیلوهرتز در توان 200 وات را دارد. سیستم اولتراسونیک دو تأثیر مهم دارد: ذرات به هم چسبیده را می شکند و نیز ذرات را بطور یکنواخت پراکنده می سازد. مشاهده شد که نانوسیال بدست آمده از روش مذکور حتی با بیشترین غلظت به مدت 48 ساعت پایداری خود را حفظ کرده و رسوب کامل نانوذره ها هفت روز بعد از آماده سازی نانوسیال صورت گرفت.

#### 4- آنالیز اطلاعات

برای بدست آوردن عدد ناسلت و ضریب افت فشار از اطلاعات تجربی، نیازمند خواص ترموفیزیکی نانوسیال می باشیم. در این تحقیق دانسیته و ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال از روابط پاک وچو [1] بدست می آیند که به- ترتیب طبق رابطه (2) و (3) عبارتند از:

$$C_p = \phi C_{p,p} + (1 - \phi) C_{p,bf} \quad (2)$$

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_{bf} \quad (3)$$

همچنین ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته به ترتیب از روابط اینشتین [11] و ماکسول [12] بدست می آیند.

$$k = \frac{k_p + 2k_{bf} - 2\phi(k_{bf} - k_p)}{k_p + 2k_{bf} + \phi(k_{bf} - k_p)} \quad (4)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\phi) \quad (5)$$

خواص نانوسیال به کمک خواص نانوذرات و خواص آب در دمای میانگین ورودی و خروجی کانال آزمایش بدست می آیند.

اندازه گیری افت فشار نانوسیال ها برای بکار گرفتن آن ها در واحدهای صنعتی، در کنار انتقال حرارت ضروری می باشد. بر اساس افت فشارهای آزمایشی بدست آمده، ضریب اصطکاک داری را که یک پارامتر بدون بعد است و به صورت رابطه (6) تعریف می شود، بدست می آوریم.

$$f = \frac{2\Delta P D_h}{L \rho V^2} \quad (6)$$

برای جریان سیال تک فاز کاملاً توسعه یافته درون کانال این رابطه به صورت (7) بیان می شود.

شامل پنج المنت برقی که توان هر کدام 2000 وات است ساخته شده است. تا ارتفاع 0/2 متری مخزن قسمت آزمایش آب ریخته می شود، سپس المنت ها روشن می شوند و نیمه دیگر مخزن را پر از بخار می کنند. جهت جلوگیری از هدر رفتن انرژی از طریق جداره های مخزن، دیواره های مخزن را عایق کاری می کنیم. بعد از پر شدن نیمه بالایی مخزن توسط بخار، برای داشتن حالت پایا و کاهش مصرف انرژی سه عدد از المنت ها را خاموش می کنیم. دو ترموکوپل نوع PT100 با دقت 0/1 °C در ورودی و خروجی جهت اندازه گیری دمای میانگین سیال ورودی و خروجی تعبیه شده است. در قسمت بالای مخزن محل هایی برای بستن کانال های آزمایش در نظر گرفته شده است. جریان ورودی به قسمت آزمایش وارد کانال آزمایش می گردد که کاملاً با بخار احاطه شده است تا شرط مرزی دمای ثابت سطح را مهیا کند. برای اندازه گیری دمای سطح کانال آزمایش و اطمینان از ثابت بودن دما در سطح کانال از شش ترموکوپل نوع K با دقت 0/1 °C در فواصل مساوی روی دیواره کانال آزمایش استفاده می شود. این ترموکوپل ها به یک نمایشگر دیجیتالی دما با دقت قرائت 0/1 °C متصل هستند.

دماهای خوانده شده در یک برگه یادداشت ثبت می شوند. جریان گرم شده سیال خروجی از قسمت آزمایش، جهت خنک کاری ابتدا وارد مبدل حرارتی می شود. جریان خروجی از مبدل داخل مخزن ریخته می شود، بدین ترتیب سیال ورودی پمپ خنک بوده و مانع از داغ شدن زیاد و آسیب رسیدن به پمپ می شود. به گردش درآوردن سیال در مدار توسط پمپ دنده ای که به یک الکتروموتور تک فاز با توان 0/5 اسب بخار کوپل می شود، انجام می شود. برای اندازه گیری دبی سیال از روش دستی استفاده می شود. در این روش سیال قبل از ورود به مخزن، داخل یک بشر مدرج 400 میلی لیتری ریخته می شود و با اندازه گیری زمان لازم برای پر شدن بشر می توان دبی سیال را اندازه گیری کرد. دستگاه اندازه گیری افت فشار که در این تحقیق به کار گرفته شد، دستگاه فشارسنج دیفرانسیلی مدل PMD-75 بوده که ساخت شرکت آلمانی اندرس هارز<sup>1</sup> می باشد و برای افت فشارهای در محدوده صفر تا 150kPa توسط خود شرکت کالیبره شده است. حداکثر خطای این دستگاه 0/75±٪ از میزان اندازه گرفته شده، می باشد.

#### 3- تهیه نانوسیال

در این بررسی نانوسیال آب/اکسید تیتانیوم مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین از آب مقطر بعنوان سیال پایه و از نانوذره اکسیدتیتانیوم استفاده می شود. این نانوذره ها از نمایندگی شرکت تکنان<sup>2</sup> اسپانیا خریداری شده است. عکس TEM تهیه شده از نانوسیال در شکل 2 و خواص نانوذرات مورد استفاده در جدول 1 آورده شده است.

برای تهیه این نانوسیال ابتدا به اندازه لازم از سیال پایه را توزین کرده و سپس به مقدار لازم نانوذره به آن اضافه می کنیم. برای محاسبه جرم نانوذرات مورد نیاز در غلظت های حجمی متفاوت از رابطه (1) استفاده می شود.

$$x = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{bf}}{\rho_p} \left( \frac{1-\phi}{\phi} \right)} \quad (1)$$

که رابطه (1)، x درصد وزنی نانوذره و  $\phi$  غلظت حجمی نانوذره می باشد. با توجه به اهمیت پراکنده کردن صحیح و کامل نانوذره ها در درون سیال پایه، مخلوط سیال پایه و نانوذره را ابتدا به کمک همزن دور بالا هم زده و سپس آن را به مدت 3 ساعت در معرض نوسان های مافوق صوت قرار می دهیم.

1- Endress Hauser  
2- Thecnan

خروجی می‌باشند.

$T_s$  نیز دمای سطح کانال آزمایش می‌باشد که از میانگین‌گیری دماهای اندازه‌گیری شده در فاصله‌های مساوی روی سطح کانال بدست آمده است.

$$T_s = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6}{6} \quad (14)$$

در این پژوهش، برای بررسی صحت عملکرد دستگاه از معادله مشهور سیدر-تیت [13] استفاده می‌شود.

$$Nu = 1.86 \left( \frac{Re Pr D_h}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu_{nf}}{\mu_{wnt}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

آنالیز خطای آزمایش برای تمام آزمایش‌ها انجام شد و مشاهده شد که حداکثر آن کمتر از 5% می‌باشد.

## 5- نتایج

در این قسمت نتایج افت فشار آزمایش‌های جریان آب خالص و نانوسیال با غلظت‌های جرمی 0/2% و 0/5% درون کانال‌ها ارائه می‌شود. شکل‌های 3، 4 و 5 بترتیب ضریب افت فشار جریان سیال پایه و نانوسیال درون کانال دایروی، مربعی و مستطیلی بر حسب عدد رینولدز را نشان می‌دهد.

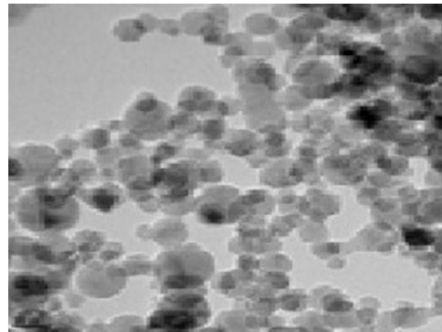
با توجه به شرط توسعه‌یافتگی هیدرودینامیکی برای جریان آرام ( $\frac{x}{d_h} \geq 0.05 Re$ ) و خصوصیات هندسی مسئله، جریان نانوسیال داخل کانال کاملاً از نظر هیدرودینامیکی توسعه یافته فرض می‌شود. نمودارها نشان می‌دهند که سازگاری خوبی بین نتایج آزمایشی و نتایج پیش‌بینی شده توسط روابط تئوری برای افت فشار آب وجود دارد. بنابراین عملکرد دستگاه قابل اطمینان بوده می‌توان آزمایش‌ها را برای نانوسیال انجام داد.

با کمک آزمایش‌های طراحی شده، تأثیر عواملی چون عدد رینولدز و همچنین غلظت نانوذرات بر افت فشار و تغییرات ضریب اصطکاک، تحت بررسی قرار گرفت. نمودارها نشان می‌دهند که اضافه شدن نانوذرات با غلظت حجمی کم (صفر تا 0/5 درصد) موجب افزایش قابل توجه ضریب افت فشار جریان نانوسیال نمی‌شود. این مسئله ناشی از کوچکی ابعاد نانوذرات (10 تا 15 نانومتر) و پراکندگی بسیار خوب نانوذرات درون سیال پایه می‌باشد.

ارتعاشات مافوق صوت دستگاه اولتراسونیک مانع از خوشه‌ای شدن نانوذرات و موجب پراکندگی بسیار خوب آن‌ها می‌شود. با افزایش عدد رینولدز ضریب افت فشار برای سیال پایه کاهش می‌یابد و نانوسیال نیز رفتاری کاملاً مشابه با سیال پایه از خود نشان می‌دهد. همچنین این نمودارها نشان می‌دهند نتایج آزمایشگاهی با خطای کمتر از 2% در تطابق خوبی با معادله داری می‌باشد. این دلالت می‌کند که رابطه افت فشار سیال تک فاز می‌تواند برای نانوسیال آب/اکسیدتیتانیوم بکار گرفته شود.

برای اطمینان از عملکرد انتقال حرارتی دستگاه، ابتدا آزمایش‌هایی را بوسیله آب انجام می‌دهیم و نتایج آزمایشی را با نتایج بدست آمده از معادله مشهور سیدر-تیت، که یک رابطه تجربی برای عدد ناسلت جریان داخل کانال است، مقایسه می‌کنیم. مقایسه این نتایج برای کانال‌های دایروی، مربعی و مستطیلی نشان می‌دهد که عملکرد دستگاه از لحاظ انتقال حرارت نیز قابل اطمینان است. با توجه به عملکرد قابل قبول دستگاه، آزمایش‌ها را برای نانوسیال انجام می‌دهیم. شکل‌های 6، 7 و 8 بترتیب عدد ناسلت جریان آب و نانوسیال با غلظت‌های 0/2% و 0/5% را داخل کانال‌های دایروی، مربعی و مستطیلی نشان می‌دهند.

نکاتی که از این نمودارها برگرفته می‌شود، عبارتند از: 1) عدد ناسلت نانوسیال از سیال پایه بالاتر است. این نشان می‌دهد که اضافه شدن نانوذرات



شکل 2 عکس TEM نانوسیال

جدول 1 خواص نانوذرات مورد استفاده

فرمول شیمیایی	TiO <sub>2</sub>
رنگ	سفید
مرفولوژی	کروی
درصد خلوص	99%
قطر متوسط (nm)	15±5
سطح ویژه (m <sup>2</sup> /gr)	120
گرمای ویژه (J/kgK)	3840
هدایت حرارتی (W/m.K)	11/7

$$f = \frac{C}{Re} \quad (7)$$

که در رابطه (7)  $Re$  عدد رینولدز سیال کاری می‌باشد. ضریب ثابت  $C$  برای کانال دایروی، مربعی و مستطیلی بترتیب 64، 56/92 و 62/2 می‌باشد. برای تحلیل اطلاعات آزمایشی بدست آمده مرتبط با انتقال حرارت، اعداد بدون بعد ناسلت و رینولدز را بکار می‌گیریم.

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} U_m D_h}{\mu_{nf}} \quad (8)$$

$$Nu = \frac{h D_h}{k_{nf}} \quad (9)$$

در روابط (8) و (9)  $\rho_{nf}$ ،  $\mu_{nf}$  و  $k_{nf}$  بترتیب چگالی، ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال می‌باشند.  $U_m$ ،  $D_h$  و  $h$  بترتیب قطر هیدرولیکی، سرعت میانگین و ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط در طول کانال می‌باشند و از روابط (10) تا (12) بدست می‌آیند.

$$U_m = \frac{m}{\rho_{nf} A_c} \quad (10)$$

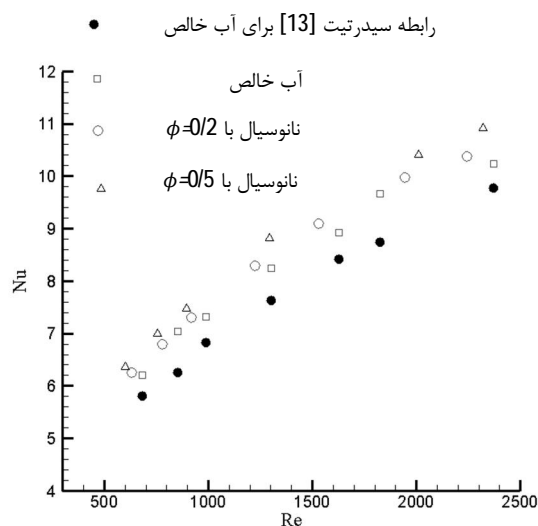
$$h = \frac{m C_{nf} \Delta T}{A_s \Delta T_{lm}} \quad (11)$$

$$D_h = \frac{4P}{A_c} \quad (12)$$

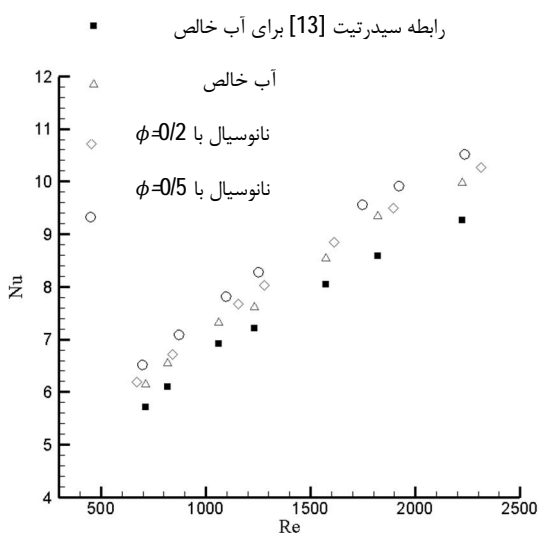
در روابط (10) تا (12)  $A_c$ ،  $\Delta T$ ،  $C_{nf}$ ،  $A_c$ ،  $m$  بترتیب دبی جرمی، سطح مقطع عبوری جریان، ظرفیت گرمایی، اختلاف دمای ورودی و خروجی، سطح در تماس با بخار آب و محیط مقطع عبور جریان نانوسیال می‌باشند. همچنین  $\Delta T_{lm}$  اختلاف دمای لگاریتمی می‌باشد که از رابطه (13) محاسبه می‌شود.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_{nf-in}) - (T_s - T_{nf-out})}{\ln \frac{(T_s - T_{nf-in})}{(T_s - T_{nf-out})}} \quad (13)$$

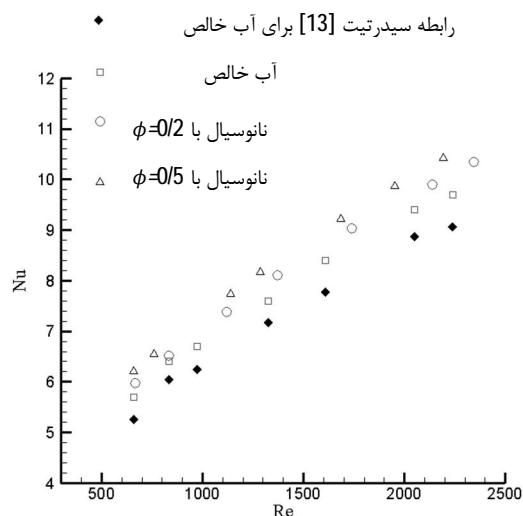
که در اینجا  $T_{nf-in}$  و  $T_{nf-out}$  بترتیب دمای جریان نانوسیال ورودی و



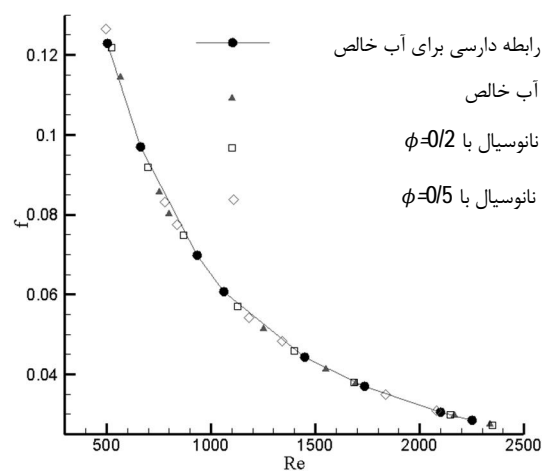
شکل 6 نمودار عدد ناسلت جریان داخل کانال دایروی بر حسب عدد رینولدز



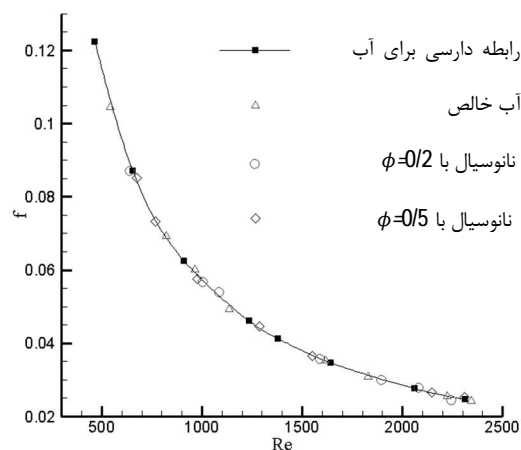
شکل 7 نمودار عدد ناسلت جریان داخل کانال مربعی بر حسب عدد رینولدز



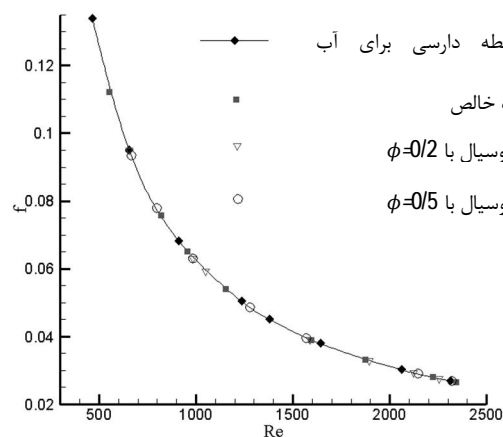
شکل 8 نمودار عدد ناسلت جریان داخل کانال مستطیلی بر حسب عدد رینولدز



شکل 3 تغییرات ضریب افت فشار جریان درون کانال دایره‌ای بر حسب عدد رینولدز



شکل 4 تغییرات ضریب افت فشار جریان درون کانال مربعی بر حسب عدد رینولدز



شکل 5 تغییرات ضریب افت فشار جریان درون کانال مستطیلی بر حسب عدد رینولدز

حتی با غلظت‌های حجمی پایین نیز موجب افزایش قابل ملاحظه‌ای در عدد ناسلت می‌شود. (2) با افزایش غلظت حجمی نانوذرات عدد ناسلت افزایش می‌یابد. برای مثال عدد ناسلت نانوسیال با  $\phi = 0.2\%$  و  $Re = 2000$  برای کانال دایروی، مربعی و مستطیلی به ترتیب  $2/5$ ،  $3/3$  و  $3/15$  می‌باشد و

می‌گردد زیرا وجود نانوذرات در سیال کاری موجب می‌گردد تا بخشی از افت انتقال حرارت در گوشه‌های تیز با افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال جبران شود. بنابراین افزایش نسبی عدد ناسلت در حضور نانوذرات در کانال غیردایروی نسبت به کانال دایروی بیشتر است.

## 7- مراجع

- [1] B. C. Pak, Y. I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer an International Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 151-170, 1998.
- [2] D. Wen, Y. Ding, 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, No. 24, pp. 5181-5188, 2004.
- [3] K.S. Hwang, S.K. Jang, S.U.S. Chio, Flow and convective heat transfer characteristics of water-based  $Al_2O_3$  nanofluids in fully developed laminar flow regime, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 193-199, 2009.
- [4] Q. Li, and Y. Xuan, Experimental investigation on transport properties of nanofluid, *Heat Transfer Science and Technology*, 5<sup>th</sup>, Beijing, China, Vol. 12, pp. 757-762, 2000.
- [5] S.M. Fotukian, and M. Nasr Esfahany, Experimental investigation of turbulent convective heat transfer of dilute  $Al_2O_3$ /water nanofluid inside a circular tube, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 31, pp. 606-612, 2010.
- [6] S. Zeinali Heris, M. Nasr Esfahany, and S.Gh. Etemad, Experimental Investigation of Convective Heat Transfer of  $Al_2O_3$ /Water Nanofluid in Circular Tube, *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 203-210, 2007.
- [7] S. Zeinali Heris, S.S.Gh. Etemad, M. Nasr Esfahany, Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 529-535, 2006.
- [8] W. Yu, H. Xie, Y. Li, L. Chen, Q. Wang, Experimental investigation on the heat transfer properties of  $Al_2O_3$  nanofluids using the mixture of ethylene glycol and water as base fluid, *Powder Technology*, Vol. 230, pp. 14-19, 2012.
- [9] M. Nasiri, S.Gh. Etemad, R. Bagheri, Experimental heat transfer of nanofluid through an annular duct, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 958-963, 2011.
- [10] T.H. Nassan, S. Zeinali Heris, S.H. Noie, A comparison of experimental heat transfer characteristics for  $Al_2O_3$ /water and  $CuO$ /water nanofluids in square cross-section duct, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 924-928, 2010.
- [11] A. Einstein, Investigation on Theory of Brownian motion, first ed. Dover, New York, 1956.
- [12] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*, 2nd Ed Clarendon Press, Oxford, UK, 1881.
- [13] E.N. Seider, G.E. Tate, Heat transfer and pressure drop of liquid in tubes, *Industrial Engineering Chemistry*, Vol. 28 pp. 1429-1435, 1936.

همچنین عدد ناسلت نانوسیال با  $\phi = 0.5\%$  و  $Re = 2000$  برای کانال دایروی، مربعی و مستطیلی بترتیب  $6/3$ ،  $7/8$  و  $7/2$  می‌باشد. (3) افزایش نسبی عدد ناسلت نانوسیال داخل کانال غیردایروی نسبت به دایروی بیشتر است. برای مثال میانگین افزایش نسبی عدد ناسلت برای نانوسیال با  $\phi = 0.2\%$  برای کانال دایروی، مربعی و مستطیلی بترتیب  $2/74$ ،  $3/17$  و  $3/20$  می‌باشد و همچنین میانگین افزایش نسبی عدد ناسلت برای نانوسیال با  $\phi = 0.5\%$  برای کانال دایروی، مربعی و مستطیلی بترتیب  $5/84$ ،  $7/37$  و  $7/21$  است. این پدیده بیانگر کاهش افت‌های حرارتی گوشه‌های تیز در حضور نانوذرات می‌باشد. وجود گوشه‌های تیز در کانال‌های غیر دایروی سبب می‌گردد به دلیل تشکیل لایه مرزی سه‌بعدی در گوشه‌ها عملکرد این کانال در انتقال حرارت نسبت به کانال دایره‌ای ضعیفتر باشد. بدلیل سرعت کم سیال در این نواحی، مکانیزم اصلی انتقال حرارت در این نواحی پخش مولکولی است. لذا اضافه کردن نانوذرات که موجب افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شود تاثیر بیشتری در افزایش انتقال حرارت در این کانال‌ها دارد.

## 6- نتیجه‌گیری

تحلیل اطلاعات تجربی بدست آمده نکات زیر را بیان می‌کند:

الف) افت فشار کانال‌های غیردایروی از کانال دایروی کمتر است؛ زیرا سطح تماس سیال در کانال‌های غیردایروی نسبت به دایروی کمتر است.

ب) افزودن نانوذرات با غلظت حجمی پایین به سیال‌های مرسوم انتقال حرارت موجب افزایش قابل توجه افت فشار در هیچکدام از مجراها نمی‌شود.

ج) عدد ناسلت با غلظت حجمی نسبت مستقیم دارد. با افزایش غلظت حجمی نانوذرات، افزایش ضریب انتقال حرارت نسبت به افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بیشتر است.

د) عدد ناسلت کانال دایروی نسبت به کانال‌های غیردایروی بیشتر است. زیرا تشکیل لایه مرزی سه‌بعدی در گوشه‌های تیز موجب افت عملکرد انتقال حرارت در کانال‌های غیردایروی می‌گردد.

ه) اضافه کردن نانوذرات حتی با غلظت‌های پایین به سیال کاری انتقال حرارت، موجب بهبود عملکرد انتقال حرارت بویژه در کانال‌های غیردایروی