



## بررسی تجربی ضریب انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال نانولوله کربن-آب تحت بار حرارتی ثابت

ابراهیم حسینی پور<sup>1</sup>، سعید زینالی هریس<sup>2\*</sup>، مهدی شنبدی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- دانشیار، مهندسی شیمی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

3- دانشجوی دکتری، مهندسی شیمی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\* مشهد، صندوق پستی 9177948974، zeinali@ferdowsi.um.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 31 فروردین 1393

پذیرش: 31 اردیبهشت 1393

ارائه در سایت: 12 مهر 1393

کلید واژگان:

نانوسیال

نانولوله‌های کربنی

صمغ عربی

بهبود انتقال حرارت جابجایی

افت فشار اضافی

در این مطالعه، رفتار انتقال حرارت جابجایی اجباری و افت فشار نانوسیال نانولوله‌های کربنی چند جداره بر پایه آب دیونیزه در حال جریان از طریق لوله مدور افقی تحت شرایط مرزی بار حرارتی دایره ثابت به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته است. به همین منظور، ابتدا سوسپانسیون آبی همگن نانولوله‌های کربنی به کمک فعال کننده سطحی صمغ عربی در غلظت‌های 0/05، 0/1 و 0/2% وزنی تهیه شده است. سپس، نانوسیال‌های فوق‌الذکر در رژیم جریان آرام و گستره اعداد رینولدز 800 تا 2000 در دستگاه بار حرارتی ثابت مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که با افزودن مقدار بسیار کمی از نانولوله‌های کربنی به آب، ضریب انتقال حرارت جابجایی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی و عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. با این حال، تأثیر افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی نسبت به افزایش عدد رینولدز بیشتر بوده است. علاوه بر این، داده‌های افت فشار در غلظت‌ها و اعداد رینولدز مختلف بررسی شده است. در غلظت‌های پایین نانولوله‌های کربنی، مقدار افت فشار در نانوسیالات محتوی نانولوله‌های کربنی و سیالات پایه تقریباً برابر شده است و اختلاف بین آن‌ها قابل چشم‌پوشی است. در نتیجه توان اضافی برای پمپ نانوسیال نانولوله کربنی/آب در غلظت‌های پایین مورد نیاز نیست. بیشترین میزان افزایش ضریب انتقال حرارت 42/8% بوده است که در رینولدز 2027 و غلظت 0/2% وزنی رخ داده است.

## Experimental investigation of heat transfer coefficient and pressure drop of carbon nanotubes-water nanofluid under constant heat flux

Ebrahim Hosseinipour, Saeed Zeinali Heris\*, Mehdi Shanbedi

Department of Chemical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

\* P.O.B. 9177948974 Mashhad, Iran, zeinali@ferdowsi.um.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 20 April 2014  
Accepted 21 May 2014  
Available Online 04 October 2014

**Keywords:**  
Nanofluid  
Carbon Nanotubes  
Gum Arabic  
Convective Heat Transfer Enhancement  
Extra Pressure Drop

### ABSTRACT

In this study, forced convective heat transfer and pressure drop behavior of multi walled carbon nanotubes (CNT)-water nanofluid were evaluated under constant heat flux in a circular tube. For this purpose, first, homogeneous aqueous suspension of CNT using gum Arabic (GA) surfactant was prepared in concentrations 0.05%, 0.1% and 0.2% wt. Then, the above mentioned nanofluids were evaluated in Reynolds number range of 800-2000 under constant heat flux. The results indicate a significant increase in convective heat transfer coefficient of nanofluids with the addition of small amounts of CNT in deionized water. Also, heat transfer coefficient is enhanced with increasing concentration and Reynolds number. However, the effect of increasing concentrations of CNT is higher than the increase in Reynolds number. In addition, the pressure drop data on the different concentrations and Reynolds numbers are also investigated. At low weight concentrations of CNT, the deal of pressure drop of nanofluids containing CNT and base fluids is approximately similar and the gap between them is negligible. This means that no extra pump power is required for low concentration CNT/water nanofluid. The maximum increase in heat transfer coefficient is 42.8%, which occurred at Re=2027, and a concentration of 0.2% wt.

### 1- مقدمه

خواص انتقال حرارت سیالات پایه انتقال حرارت از قبیل آب، اتیلن گلیکول، روغن موتور و غیره یکی از راه‌های غلبه بر این چالش است که در دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. افزودن نانوذراتی از قبیل نانوساختارهای کربنی، فلزی و اکسید فلزی با هدایت حرارتی بالا به سیالات پایه انتقال حرارت فوق‌الذکر می‌تواند تا حدود

امروزه نگرانی‌های مربوط به بخش انرژی یکی از دغدغه‌های کشورهای در حال توسعه و صنعتی است که دانشمندان را بر آن داشته است که برای مقابله با این معضل به دنبال راه حل‌های نوین باشند. به همین منظور، محققان روش‌های متعددی را برای غلبه بر این چالش ارائه داده‌اند. تغییر در

Please cite this article using:

E. Hosseinipour, S. Zeinali Heris, M. Shanbedi, Experimental investigation of heat transfer coefficient and pressure drop of carbon nanotubes-water nanofluid under constant heat flux, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 19-26, 2015 (In Persian)

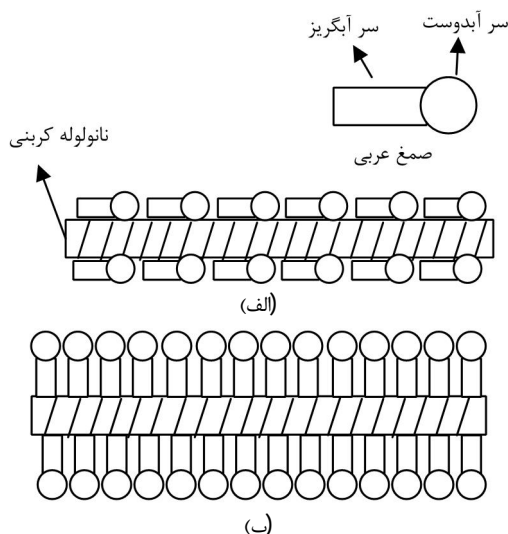
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

استفاده از فعال کننده سطحی صمغ عربی در آب پراکنده شدند. سپس نانوسیال در غلظت‌های مختلف تهیه و در شدت جریان‌های مختلف در دستگاه مورد آزمایش قرار داده شد. علی‌رغم این که عوامل مختلفی بر عملکرد حرارتی دستگاه در شرایط بار حرارتی دیواره ثابت تأثیرگذار است، اما در کار حاضر به بررسی ضریب انتقال حرارت و همچنین تغییرات افت فشار در شدت جریان‌ها و غلظت‌های گوناگون پرداخته می‌شود.

## 2- بخش تجربی

برای تهیه نانوسیال، نانولوله‌های کربنی با قطر متوسط 30 نانومتر، طول 10-20 میکرومتر و خلوص 95% از شرکت شنزن (چین) خریداری شده است. در اینجا، برای پایداری نانوسیال نانولوله‌های کربنی-آب از مقداری صمغ عربی به‌عنوان فعال کننده سطحی استفاده شده است.

فعال کننده‌های سطحی مختلفی از قبیل سدیم دودسیل سولفات (SDS)، ستیل تری متیل آمونیوم بروماید (CTAB) و غیره جهت پایداری نانولوله‌های کربنی در حلال‌های قطبی همچون آب وجود دارد. اما دلیل اصلی استفاده از فعال کننده سطحی صمغ عربی، حلالیت بسیار بالا (500 گرم در لیتر) در آب و همچنین دمای تخریب نسبتاً بالا بوده است [14]. صمغ عربی از گروه‌های قطبی آبدوست و گروه‌های غیر قطبی آبریز تشکیل شده است. این مولکول یک نوع مخلوط پلیمری دارای زنجیره طولانی می‌باشد که از خود جذب مطلوبی بین سطح مشترک دو فاز نشان می‌دهد. جذب صمغ عربی بر روی نانولوله‌های کربنی طی دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله اول مولکول‌های طولانی صمغ عربی مطابق شکل 1- الف به‌صورت افقی سطح نانولوله کربنی را پوشش داده و یک مانع فضایی با ضخامت کم برای جلوگیری از بهم پیوستن نانولوله‌ها به وجود می‌آورند. در مرحله دوم با افزایش تدریجی غلظت صمغ عربی، این مولکول‌ها به هم چسبیده و بر روی سطح نانولوله تجمع پیدا می‌کنند و به‌صورت خودکار توسط جاذبه آبریز قوی بین سطح نانولوله کربنی و قسمت آبریز صمغ عربی به صورت شکل 1- ب درمی‌آیند. گروه‌های آبدوست توسط مولکول‌های قطبی آب جذب شده، درحالی‌که گروه‌های آبریز به‌صورت منظم به جذب بر روی سطح نانولوله‌های کربنی ادامه می‌دهند.



شکل 1 شماتیک جذب صمغ عربی بر روی نانولوله کربنی (الف) مرحله اول، جذب به‌صورت افقی (ب) مرحله دوم، عمودی شدن مولکول‌های جذب شده به‌صورت خودکار با افزایش غلظت صمغ عربی

زیادی عملکرد انتقال حرارت سیالات را بهبود بخشد [1-4]. با این حال، افزودن نانوذرات فوق‌الذکر به سیالات پایه انتقال حرارت را "نانوسیال" می‌نامند. نانوسیالات به دلیل مزیت‌های فراوان در کنار هدایت حرارتی بالا، انتخابی امیدوار کننده برای افزایش انتقال حرارت به شمار می‌روند.

در دهه اخیر، تلاش‌های بسیاری جهت تعیین ضریب انتقال حرارت و افت فشار نانوسیالات مختلف انجام شده است. پاک و چو [5] به‌صورت تجربی انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات اکسید آلومینیوم-آب و دی‌اکسید تیتانیوم-آب را در جریان آشفته بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که عدد ناسلت با افزایش غلظت حجمی نانوذرات و عدد رینولدز افزایش می‌یابد. ژوان و لی [6] انتقال حرارت جابجایی نانوسیال مس-آب در حال جریان درون لوله مسی را تحت شرایط بار حرارتی ثابت و در حالت جریان آرام و آشفته بررسی کردند. آن‌ها افزایش حدود 60% در ضرایب انتقال حرارت با استفاده از 2% حجمی نانوذرات مس گزارش کردند. با این حال، عملکرد انتقال حرارت جابجایی نانوسیال گرافیت-آب نیز درون لوله مدور در شرایط جریان آرام توسط یانگ و همکاران به‌صورت تجربی مطالعه شده است [7]. آن‌ها نشان دادند که نانوذرات منجر به بهبود ضرایب انتقال حرارت شده است اما این بهبود از مقادیر پیش‌بینی شده توسط روابط بر پایه هدایت حرارتی کمتر است. زینالی هریس و همکاران [8] انتقال حرارت جابجایی اجباری جریان آرام نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب را درون لوله مدور با شرایط دمای دیواره ثابت بررسی کردند. آن‌ها نیز نتیجه‌گیری کردند که افزایش هدایت حرارتی تنها دلیل ممکن برای افزایش انتقال حرارت نیست اما یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار است. بزرگان و همکاران [9] از نانوسیال اکسید آلومینیوم-اتیلن گلایکول به‌عنوان سیال خنک‌کننده در مبدل حرارتی دو لوله‌ای استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین افزایش انتقال حرارت مربوط به نانوذرات میله‌ای شکل اکسید آلومینیوم است. زیرا افزایش هدایت حرارتی سیال پایه با ذرات استوانه‌ای شکل به دلیل کشیدگی این ذرات و همچنین افزایش سطح انتقال حرارت در مقایسه با ذرات کروی بیشتر است. مطالعه عددی بررسی اثر نانوذرات بر انتقال حرارت جابجایی در کانال افقی توسط پیشکار و قاسمی انجام شد [10]. آن‌ها دریافتند که استفاده از نانوسیال موجب پخش بهتر حرارت می‌شود. همچنین با افزایش کسر حجمی نانوذرات انتقال حرارت بیشتر شده و میزان این افزایش در اعداد رینولدز بالاتر بیشتر است.

فولکنر و همکاران [11] افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیال نانولوله کربنی-آب را در رینولدزهای پایین (2 تا 17) و در غلظت‌های حجمی ذرات بین 1/1 تا 4/4% درون میکرو کانال گزارش کردند. دینگ و همکاران [12] نانوسیال نانولوله کربنی-آب را در منطقه ورودی لوله و در گستره اعداد رینولدز 800-1200 بررسی کردند. آن‌ها افزایش بیش از 350% در ضرایب انتقال حرارت را در رینولدز 800 برای 0/5% وزنی از نانولوله کربنی چندجداره مشاهده کردند. اگرچه هر دو محقق افزایش انتقال حرارت را گزارش کردند، اما روند افزایش با توجه به غلظت حجمی ذرات در یک مقاله در تضاد با کار دیگر بوده است. وانگ و همکاران [13] به‌صورت تجربی انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانوسیالات شامل نانولوله‌های کربنی را در جریان آرام اندازه‌گیری کردند. آن‌ها افزایش انتقال حرارت 70 و 190% را برای غلظت‌های حجمی 0/05 و 0/25% در رینولدز 120 گزارش کردند، در حالی که افزایش هدایت حرارتی کمتر از 10% بوده است.

با این حال، هدایت گرمایی بسیار بالای نانولوله‌های کربنی نسبت به نانوذرات فلزی و اکسید فلزی جایگاه این نانومواد را در نانوسیالات بیش از پیش بهبود بخشیده است. بنابراین در این پژوهش، ابتدا نانولوله‌های کربنی با

پتانسیل زتا این نمونه را نشان داده است.

مقدار پتانسیل زتا برای نسبت‌های 1-0/5، 1-1 و 1-2 به ترتیب 28/3-، 29/7- و 25/9- میلی ولت بدست آمده است. با این حال، مراحل آماده‌سازی نانوسیال به شرح زیر است.

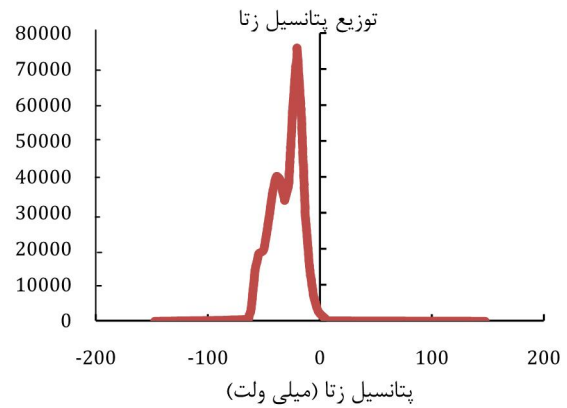
ابتدا مقدار از پیش تعیین شده صمغ عربی به آرامی درون ظرف حاوی آب دیونیزه که بر روی همزن مغناطیسی قرار دارد اضافه می‌شود. محلول فوق‌الذکر به مدت سی دقیقه به خوبی حل می‌شود. سپس همان مقدار نانولوله کربنی چند جداره به آرامی به محلول اضافه و به مدت سی دقیقه به کمک همزن مغناطیسی مخلوط می‌گردد. لازم به ذکر است که نمونه‌های تهیه شده با این روش به مدت چندین ماه بدون هیچ‌گونه رسوب و ته‌نشینی قابل مشاهده پایدار مانده‌اند. شکل 3 نانوسیال حاوی 0/1% وزنی نانولوله‌های کربنی را قبل و بعد از اضافه کردن صمغ عربی (شکل 3- الف و 3- ب)، و همچنین نانوسیال خروجی از سیستم پس از انجام آزمایش را بعد از گذشت چهار ماه نشان می‌دهد (شکل 3- پ). این شکل می‌تواند نشان‌دهنده پایداری مناسب نانوسیال تهیه شده باشد.

مورفولوژی نانولوله‌های کربنی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) در شکل 4 نشان داده شده است. در این شکل، چند دیواره بودن نانولوله‌های کربنی به وضوح به چشم می‌خورد. آنچه مسلم است اینکه نانولوله‌های کربنی تمایل به تجمع به دلیل تعاملات نیروی واندروالس دارند. به همین منظور، برای جلوگیری از تجمع نانولوله‌های کربنی در آب، از صمغ عربی به‌عنوان فعال‌کننده سطحی استفاده شده است.

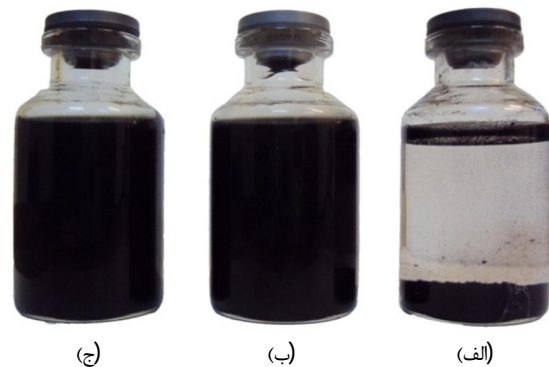
در شکل 5 شماتیک سیستم آزمایشگاهی ساخته شده به منظور بررسی افت فشار و ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال نانولوله کربنی-آب در حال جریان از طریق لوله مدور افقی تحت شرایط مرزی بار حرارتی دیواره ثابت در رژیم جریانی آرام نشان داده شده است.

این دستگاه شامل یک بخش آزمایش، یک پمپ، یک مخزن جمع‌آوری سیال، یک منبع تغذیه، یک مبدل حرارتی مارپیچ و بخش اندازه‌گیری افت فشار است. بخش آزمایش از یک لوله مسی صاف به قطر 7 میلی‌متر و طول یک متر ساخته شده است. تمام طول بخش آزمایش با استفاده از دو المنت متصل به منبع تغذیه با قابلیت ایجاد توان 425 وات به منظور تولید بار حرارتی ثابت پوشش داده شده است. همچنین، به منظور حداقل کردن افت حرارت از لوله به محیط، تمامی بخش آزمایش بوسیله عایق پشم شیشه پوشیده شده است. به منظور اندازه‌گیری دماهای دیواره خارجی لوله آزمایش، پنج سنسور دمایی از نوع PT100 کالیبره شده به فاصله مساوی از یکدیگر و در مکان‌های 10، 30، 50، 70 و 90 سانتی‌متری طول لوله نصب شده است. دماهای ورودی و خروجی سیال به بخش آزمایش نیز به کمک دو ترموکوپل PT100 غوطه‌ور درون جریان اندازه‌گیری می‌شود. همچنین به منظور اندازه‌گیری افت فشار مانومتر LA شکل در سیستم نصب شده است.

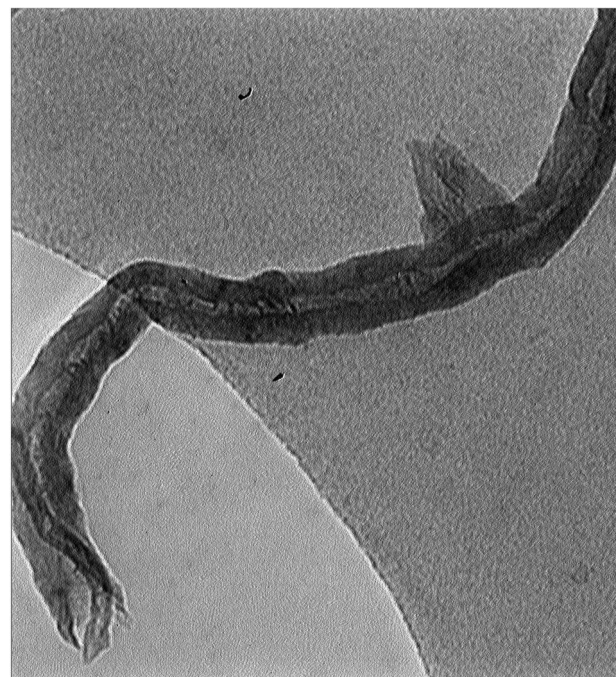
از پمپ گریز از مرکز برای به حرکت درآوردن نانوسیال در سیکل استفاده شده است. بعد از ورود نانوسیال به بخش آزمایش و گرم شدن آن، نانوسیال وارد مبدل مارپیچی می‌شود. در این مبدل آب شهری ورودی و خروجی جهت خنک‌سازی نانوسیال وارد پوسته مبدل می‌شود. در نهایت نانوسیال در مخزنی به حجم دو لیتر جمع‌آوری می‌شود. همچنین، یک شیر سه‌راهی در محل اتصال لوله به بخش سردکننده و مخزن به منظور اندازه‌گیری دبی جریان تعبیه شده است. دبی جریان به کمک یک ظرف اندازه‌گیری دقیق و زمان‌سنج با جمع‌آوری سیال در یک دوره زمانی مشخص تعیین می‌شود.



شکل 2 توزیع پتانسیل زتا برای نمونه 1:1 صمغ عربی - نانولوله کربنی

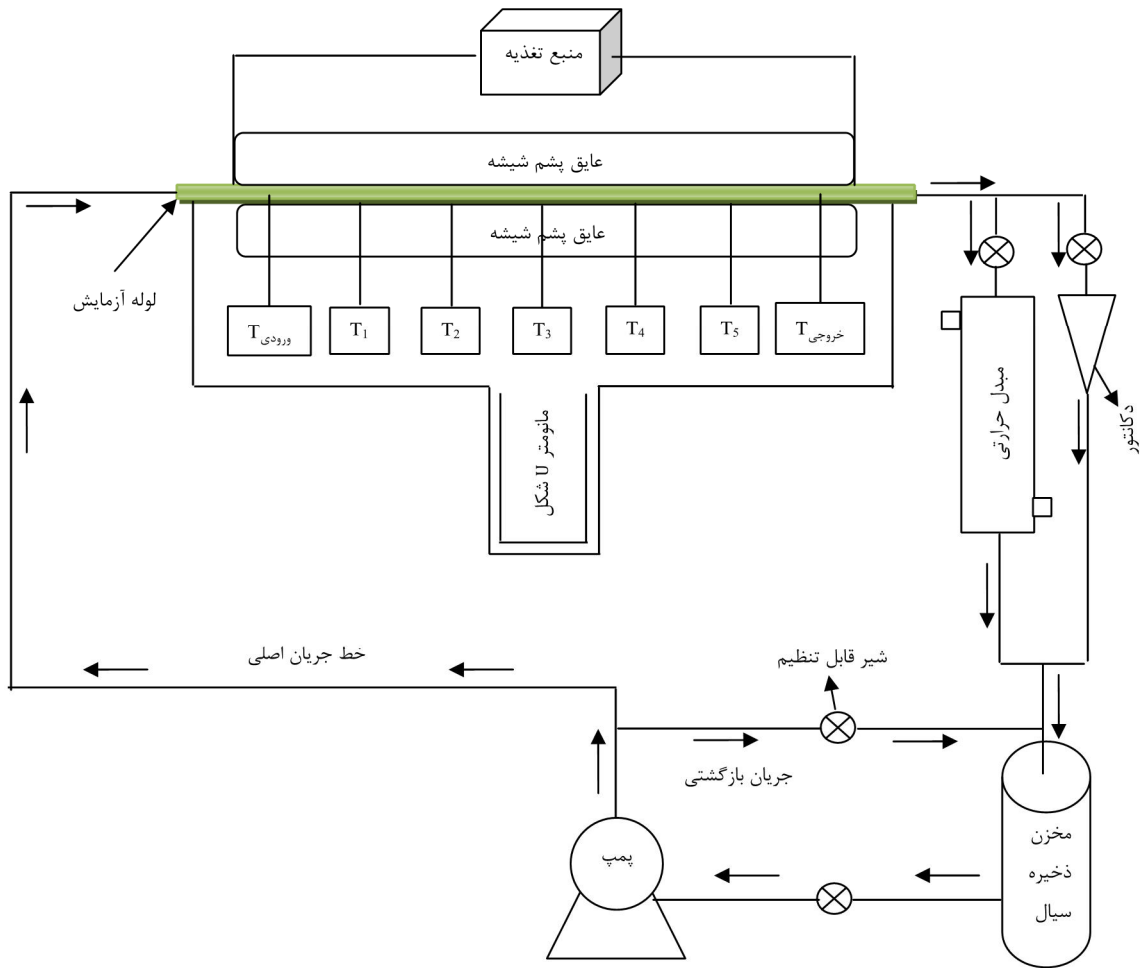


شکل 3 نانوسیال نانولوله کربنی-آب، (الف) بدون صمغ عربی، (ب) با صمغ عربی و (پ) با صمغ عربی بعد از چهار ماه



شکل 4 تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) سوسپانسیون آبی نانولوله‌های کربنی چند جداره

در کار حاضر، برای تولید نانوسیال پایدار نانولوله‌های کربنی-آب، ابتدا سوسپانسیون آبی صمغ عربی-نانولوله کربنی در نسبت‌های 1-0/5، 1-1 و 1-2 تهیه شده است. سپس با استفاده از آنالیز پتانسیل زتا نسبت 1-1 صمغ عربی-نانولوله کربنی به‌عنوان بهترین نمونه انتخاب شده است. شکل 2 توزیع



شکل 5 شماتیک دستگاه آزمایش

شده مدل ماکسول است بدست می‌آید [15].

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)(1 + \beta)^3 \varphi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)(1 + \beta)^3 \varphi} k_f \quad (4)$$

که در آن  $\beta = t/r_p$  می‌باشد.  $k$ ,  $\varphi$ ,  $t$  و  $r_p$  به ترتیب هدایت حرارتی، کسر حجمی ذرات، ضخامت و شعاع نانولوله‌های حول ذرات می‌باشند. معمولاً جهت محاسبه هدایت حرارتی نانوسیال  $\beta = 0.1$  در نظر گرفته می‌شود.

ویسکوزیته نانوسیال از طریق رابطه برینکمن محاسبه می‌شود [16].

$$\mu_{nf} = \frac{1}{(1 - \varphi)^{2.5} \mu_f} \quad (5)$$

دانسیته و ظرفیت گرمایی ویژه نیز به کمک روابط پاک و چو محاسبه می‌شوند [5].

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_p + (1 - \varphi) \rho_f \quad (6)$$

$$C_{p,nf} = \varphi C_{p,p} + (1 - \varphi) C_{p,f} \quad (7)$$

در این آزمایش ترموکوپل‌ها دقت 0/1 درجه سانتی‌گراد، آمپرسنج دقت 0/001 آمپر و ولت‌متر دقت 1 ولت را دارند. با استفاده از رابطه هولمن [17]

خطای آزمایش به صورت روابط (8-11) محاسبه می‌شود.

$$\text{Max } E_h = \pm [(E_Q)^2 + (-E_A)^2 + (-E_{(T_w - T_m)})^2]^{0.5} \quad (8)$$

$$\text{Max } E_Q = \pm [(E_V)^2 + (E_t)^2]^{0.5} \quad (9)$$

$$\text{Max } E_A = \pm [(-E_D)^2 + (-E_x)^2]^{0.5} \quad (10)$$

$$\text{Max } E_{\Delta P} = \pm [(E_{\mu_{nf}})^2 + (E_U)^2 + (E_L)^2 + 2(-E_D)^2]^{0.5} \quad (11)$$

در نهایت حداکثر خطای ضریب انتقال حرارت و افت فشار در محاسبات به ترتیب 3/5 و 4 درصد بدست می‌آید.

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال نانولوله کربنی-آب نسبت به آب دیونیزه از روابط موجود در منابع مختلف استفاده می‌شود.

ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی،  $h(x)$ ، نانوسیال در فاصله محوری  $x$  از ورودی لوله به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود.

$$h(x) = \frac{q''}{T_s(x) - T_m(x)} \quad (1)$$

که در این رابطه  $q''$ ،  $T_s(x)$  و  $T_m(x)$  به ترتیب بار حرارتی وارد شده به سیال، دمای دیواره در فاصله محوری  $x$  از ورودی و دمای متوسط سیال هستند. همچنین، با نوشتن موازنه انرژی اطراف یک لوله دمای متوسط سیال از طریق رابطه (2) بدست می‌آید.

$$T_m(x) = T_{in} + \frac{q'' \pi D}{\dot{m} C_p} x \quad (2)$$

که در این رابطه  $T_{in}$ ،  $D$ ،  $m$  و  $C_p$  به ترتیب دمای سیال در ورودی بخش آزمایش، قطر لوله، دبی جرمی سیال و ظرفیت گرمایی ویژه هستند. بنابراین ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی به کمک روابط (1) و (2) بدست می‌آید.

افت فشار نانوسیال نیز به کمک رابطه (3) بدست می‌آید.

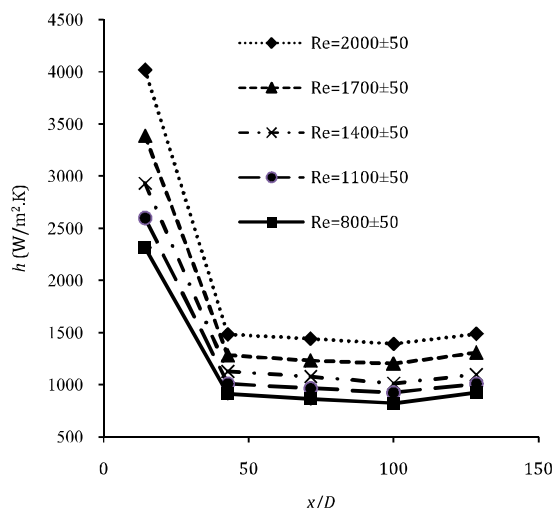
$$\Delta P = \frac{32 \mu_{nf} L U}{D^2} \quad (3)$$

که در آن  $\mu_{nf}$ ،  $L$ ،  $U$  و  $\Delta P$  به ترتیب ویسکوزیته نانوسیال، طول لوله، سرعت جریان و افت فشار خط لوله هستند.

همچنین به منظور محاسبه خواص نانوسیال از روابط (4) تا (7) استفاده شده است. هدایت حرارتی نانوسیال با استفاده از رابطه یو و چوی که اصلاح

### 3- بحث و نتیجه گیری

در مطالعه حاضر از نانوسیال نانولوله کربنی-آب به عنوان سیال کاری استفاده شده است. آزمایشات در جریان آرام و در گستره اعداد رینولدز 2000-800 انجام شد. غلظت‌های مورد استفاده در این کار 0/05، 0/1 و 0/2 وزنی بودند. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی آب و نانوسیالات نانولوله کربنی-آب در غلظت‌های وزنی مختلف نسبت به طول بدون بعد لوله،  $x/D$ ، در اعداد رینولدز 2000 و 800 در شکل 6 نشان داده شده است. نتایج به وضوح نشان می‌دهد که معلق کردن مقدار کمی از نانولوله‌های کربنی چندجداره درون آب ضرایب انتقال حرارت را به صورت قابل توجهی نسبت به آب دیونیزه افزایش می‌دهد. همچنین ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت ذرات نیز افزایش می‌یابد. بیشترین میزان افزایش در منطقه ورودی لوله رخ می‌دهد، که این مقدار با افزایش فاصله محوری کاهش می‌یابد. این یافته در توافق با تعداد زیادی از مطالعات گزارش شده در نشریات مختلف است [19،18،12،6]. به عنوان مثال در رینولدز برابر 2000 و  $x/D=14/3$  میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی برای غلظت‌های 0/05، 0/1 و 0/2 وزنی نانوسیال نانولوله کربنی نسبت به آب دیونیزه به ترتیب 13٪، 27٪ و 45٪ است. در حالی که، در  $x/D=42/8$  این مقادیر به ترتیب 11٪، 22/8٪ و 37٪ می‌باشند.

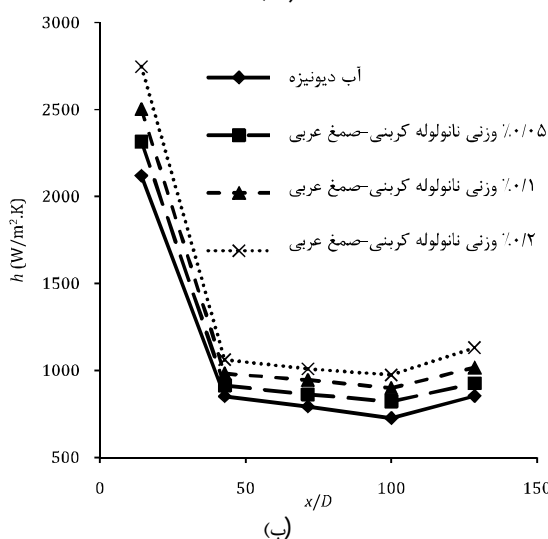
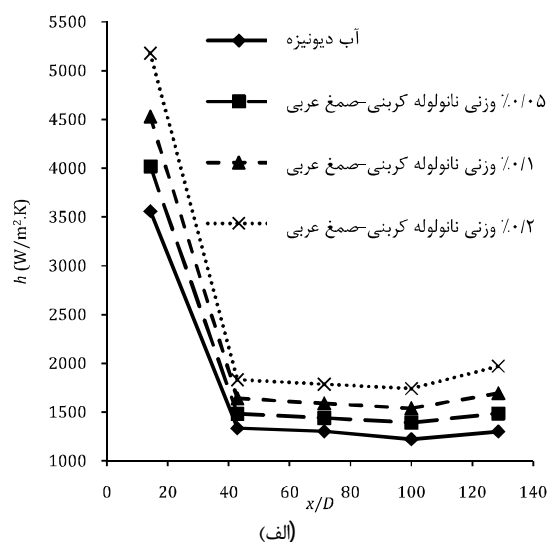


شکل 7 ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی بر اساس طول بدون بعد لوله در رینولدزهای متوسط مختلف برای غلظت وزنی 0/05

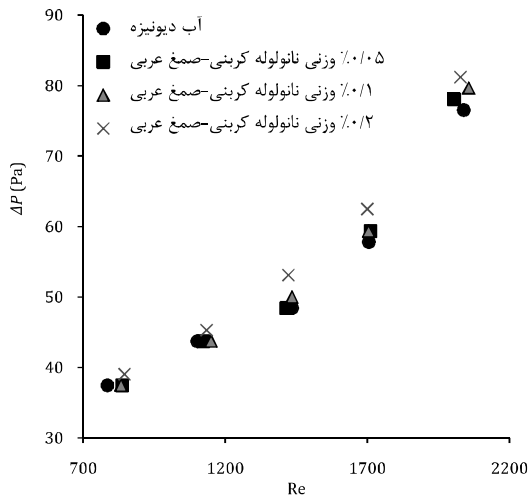
شکل 7 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی نانوسیال 0/05 وزنی نانولوله کربنی-آب را نسبت به طول بدون بعد لوله،  $x/D$ ، برای اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. از این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عدد رینولدز ضرایب انتقال حرارت به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. این نتایج مطابق با یافته‌های دینگ و همکاران [12]، آنوپ و همکاران [20] و سورش و همکاران [21] است. برای نمونه با تغییر عدد رینولدز از 800 به 2000 ضریب انتقال حرارت 62٪ و 60/5٪ به ترتیب در  $x/D=42/8$  و  $x/D=128/5$  افزایش یافته است.

شکل 8 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی را بر حسب عدد رینولدز در آب و غلظت‌های وزنی مختلف نانوسیال نانولوله کربنی-آب در طول بدون بعد ثابت لوله نشان می‌دهد. این تصویر بیانگر موارد زیر است: الف) در یک رینولدز ثابت و  $x/D=14/3$ ، با افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. ب) در یک غلظت وزنی ثابت با افزایش عدد رینولدز ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. ج) با افزایش غلظت وزنی شیب تغییرات ضرایب انتقال حرارت افزایش می‌یابد (شیب افزایش ضریب انتقال حرارت برای غلظت وزنی 0/2 بیشتر از 0/1 و 0/05 است).

به منظور درک بهتر تأثیر غلظت نانولوله‌های کربنی و عدد رینولدز بر عملکرد انتقال حرارت، نسبت ضرایب انتقال حرارت جابجایی متوسط نانوسیال به آب دیونیزه به عنوان تابعی از عدد رینولدز در شکل 9 نمایش داده شده است. نتایج برای غلظت‌های 0/05، 0/1 و 0/2 وزنی گزارش شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزودن مقدار بسیار کمی نانولوله کربنی به آب ضرایب انتقال حرارت به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در رینولدز برابر 1100 میزان بهبود ضریب انتقال حرارت نسبت به آب برای غلظت‌های 0/05، 0/1 و 0/2 وزنی به ترتیب 10/8٪، 19/9٪ و 31/1٪ است. همچنین این نمودار می‌توان دریافت که با افزایش عدد رینولدز نسبت  $h_{ni}/h_w$  برای تمامی غلظت‌های مورد استفاده در این مطالعه افزایش می‌یابد. با این حال، با یک نگاه کلی به نمودار می‌توان فهمید که تأثیر افزایش عدد رینولدز نسبت به افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی در این پژوهش کمتر است. مثلاً با افزایش رینولدز از 800 به 2000 در غلظت وزنی ثابت 0/05 ضریب انتقال حرارت نانوسیال نسبت به آب از 9/3٪ به 12/4٪ افزایش یافته است، در حالی که در رینولدز ثابت 800 این نسبت با تغییر غلظت از 0/05 به 0/2 وزنی از 9/3٪ به 29/4٪ رسیده است.



شکل 6 ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی بر اساس طول بدون بعد لوله، الف)  $Re=2000\pm 50$  و ب)  $Re=800\pm 50$



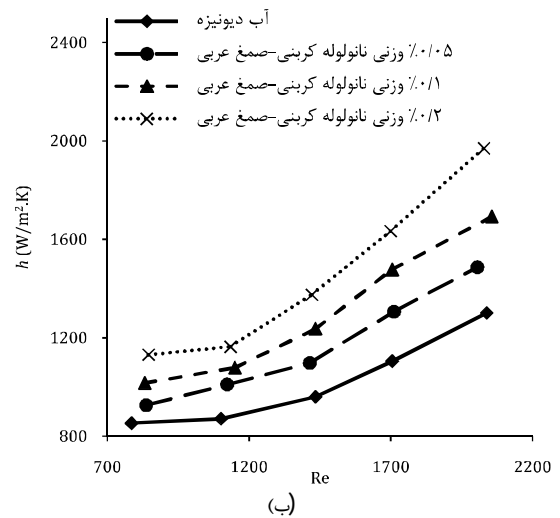
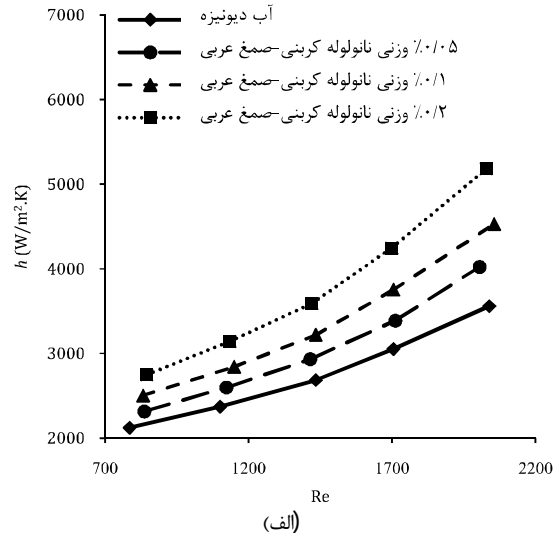
شکل 10 افت فشار آب دیونیزه و نانوسیال نانولوله کربنی در غلظت‌های وزنی مختلف بر حسب عدد رینولدز متوسط

افزایش ضریب انتقال حرارت جایجایی نانوسیال نانولوله کربنی-آب می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی باشد. به طور کلی ضریب انتقال حرارت جایجایی را می‌توان متناسب با  $k/\delta_t$  دانست که  $k$  و  $\delta_t$  به ترتیب هدایت حرارتی سیال و ضخامت لایه مرزی می‌باشند. بنابراین در صورت افزایش هدایت حرارتی و کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی، ضریب انتقال حرارت جایجایی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در مطالعات قبل گزارش شده است، افزودن نانولوله‌های کربنی به آب باعث افزایش هدایت حرارتی آن می‌گردد. از طرفی حرکات بی‌نظم و تصادفی نانوذرات درون جریان سیال، سبب می‌شود توسعه لایه مرزی حرارتی به تأخیر افتد و ضریب انتقال حرارت جایجایی در ناحیه ورودی لوله افزایش یابد و در نهایت ضریب انتقال حرارت متوسط بزرگ‌تری به دست آید. این علت توسط گروه‌های تحقیقاتی مختلفی از جمله دینگ و همکاران [12] و هی و همکاران [22] به منظور توجیه افزایش ضریب انتقال حرارت در حضور نانوذرات بیان شده است.

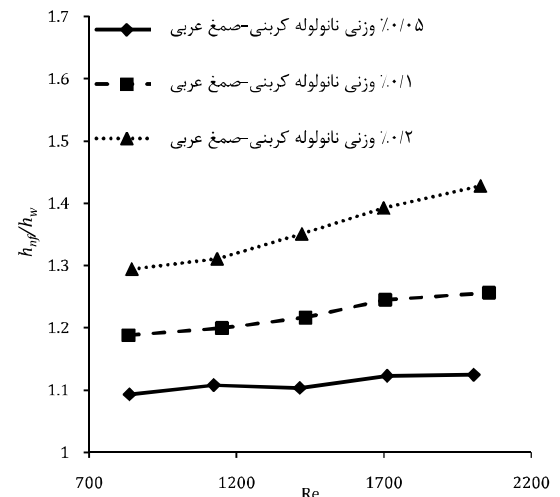
به طور کلی افزودن نانوذرات به سیال، ساختار جریان را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که علاوه بر افزایش هدایت حرارتی عواملی نظیر حرکات بی‌نظم و اتفاقی، پراکندگی نانوذرات معلق شده، آشفتنی نانوذرات و ترموفورسیس منجر به افزایش نرخ تبادل انرژی و در نتیجه بالا رفتن نرخ انتقال حرارت بین سیال و دیواره لوله شود [20,8].

افزایش غلظت حجمی نانوذرات برهم‌کنش و برخورد میان نانوذرات را افزایش می‌دهد. همچنین حرکت نسبی و نفوذ نانوذرات نزدیک دیواره منجر به انتقال حرارت سریع‌تر از دیواره به نانوسیال می‌شود. به عبارت دیگر، افزایش غلظت حجمی نانوذرات مکانیسم‌های مرتبط با افزایش انتقال حرارت را تشدید می‌کند.

به منظور استفاده از نانوسیالات در واحدهای صنعتی، اندازه‌گیری افت فشار علاوه بر بررسی عملکرد انتقال حرارت ضروری به نظر می‌رسد. افت فشار برای آب دیونیزه و غلظت‌های وزنی 0/05، 0/1 و 0/2 نانوسیال نانولوله کربنی به کمک یک مانومتر لاسکال اندازه‌گیری شد. شکل 10 افت فشار آب دیونیزه و نانوسیال نانولوله کربنی-آب را در غلظت‌های وزنی مختلف بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، در غلظت‌های وزنی مورد مطالعه در این پژوهش افزایش قابل توجهی در افت فشار مشاهده نمی‌شود و افت فشار نانوسیالات تقریباً برابر سیال پایه است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نانولوله‌های کربنی در درصد‌های وزنی پایین



شکل 8 ضریب انتقال حرارت جایجایی محلی بر اساس عدد رینولدز در غلظت‌های وزنی مختلف، الف)  $x/D=14/3$  و ب)  $x/D=128/57$



شکل 9 نسبت ضریب انتقال حرارت جایجایی متوسط نانوسیال به آب دیونیزه بر حسب عدد رینولدز متوسط در غلظت‌های وزنی مختلف

همچنین بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت مربوط به بالاترین غلظت و بالاترین عدد رینولدز است (یعنی افزایش 42/8% برای غلظت 0/2 وزنی از نانولوله کربنی در رینولدز 2027).

مقدار متوسط	m	اثر محسوسی در افت فشار ندارند و باعث ایجاد توان مصرفی اضافی پمپاژ نمی‌شوند.
نانو سیال	nf	
نانوذرات	p	
سیال پایه	f	
دیواره	s	

#### 4- نتیجه گیری

یکی از مراحل مهم آماده‌سازی نانوسیالات محتوی نانولوله‌های کربنی، پراکنده کردن آن‌ها در سیال پایه است. عامل‌دار کردن غیرکوالانسی نانولوله‌های کربنی یکی از راه‌های حل این مشکل بود. از این رو در کار حاضر، ابتدا نانولوله‌های کربنی در حضور فعال‌کننده سطحی صمغ عربی در آب پراکنده شد. سپس نانوسیالات سنتز شده در سه غلظت وزنی 0/05، 0/1 و 0/2% تهیه و در گستره اعداد رینولدز 800 تا 2000 در دستگاه تحت شرایط بار حرارتی ثابت به منظور بررسی ضریب انتقال حرارت و افت فشار، مورد آزمایش قرار گرفت. به طور کلی نتایج حاصل از مطالعه حاضر را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

با افزودن مقدار بسیار کمی از نانولوله‌های کربنی به آب، ضریب انتقال حرارت جابجایی به میزان قابل توجهی افزایش یافت. افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی، بر بهبود عملکرد انتقال حرارت در گستره غلظت مورد مطالعه در این پژوهش اثر چشمگیری داشت. با افزایش عدد رینولدز ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال نانولوله کربنی نسبت به آب دیونیزه افزایش یافت. اثر افزایش عدد رینولدز بر بهبود عملکرد انتقال حرارت نسبت به افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی در کار حاضر کمتر بود. افت فشار نانوسیال حاوی نانولوله کربنی نسبت به سیال پایه افزایش چندانی نداشت، و این موضوع به علت غلظت وزنی پایین نانولوله‌های کربنی درون آب بود.

#### 5- فهرست علائم

A	سطح مقطع ( $m^2$ )
$C_p$	ظرفیت گرمایی ( $kJkg^{-1}K^{-1}$ )
D	قطر لوله (m)
E	خطا
h	ضریب انتقال حرارت ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )
I	آمپر (A)
k	ضریب هدایت حرارتی ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )
L	طول لوله (m)
$m'$	دبی جرمی ( $kgs^{-1}$ )
$\Delta P$	افت فشار ( $kgm^{-1}s^{-2}$ )
Q	توان (W)
$q''$	بار حرارتی ( $Wm^{-2}$ )
T	دما (K)
U	سرعت ( $ms^{-1}$ )
V	ولتاژ (V)

#### علائم یونانی

$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )
$\varphi$	کسر حجمی
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )

#### زیر نویس‌ها

in	ورودی
----	-------

#### 6- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از ستاد ویژه توسعه فناوری نانو ایران، به دلیل حمایت‌های مالی از این پروژه تشکر می‌کنند.

#### 7- مراجع

- [1] A. Amiri, M. Shanbedi, H. Eshghi, S. Z. Heris, M. Baniadam, Highly dispersed multiwalled carbon nanotubes decorated with Ag nanoparticles in water and experimental investigation of the thermophysical properties, *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 116, No. 5, pp. 3369-3375, 2012.
- [2] M. Azizi, M. Hosseini, S. Zafarnak, M. Shanbedi, A. Amiri, Experimental Analysis of Thermal Performance in a Two-Phase Closed Thermosiphon Using Graphene/Water Nanofluid, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 52, No. 29, pp. 10015-10021, 2013.
- [3] M. Shanbedi, S. Z. Heris, M. Baniadam, A. Amiri, M. Maghrebi, Investigation of heat-transfer characterization of EDA-MWCNT/DI-water nanofluid in a two-phase closed thermosiphon, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 51, No. 3, pp. 1423-1428, 2012.
- [4] M. Shanbedi, S. Zeinali Heris, M. Baniadam, A. Amiri, The effect of multi-walled carbon nanotube/water nanofluid on thermal performance of a two-phase closed thermosiphon, *Experimental Heat Transfer*, Vol. 26, No. 1, pp. 26-40, 2013.
- [5] 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.
- [6] Y. Xuan, Q. Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, *Journal of Heat transfer*, Vol. 125, No. 1, pp. 151-155, 2003.
- [7] Y. Yang, Z. G. Zhang, E. A. Grulke, W. B. Anderson, G. Wu, Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 6, pp. 1107-1116, 2005.
- [8] S. Zeinali Heris, M. Nasr Esfahany, S. G. Etemad, Experimental investigation of convective heat transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid in circular tube, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, No. 2, pp. 203-210, 2007.
- [9] N. Bozorgan, F. Panahzadeh, N. Bozorgan, Investigating the using of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/EG nanofluids as coolants in a double-tube heat exchanger, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 75-84, 2011. (In Persian)
- [10] A. Pishkar, B. Ghasemi, Effect of nanoparticles on mixed convection heat transfer in a horizontal channel with heat source, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 95-108, 2012. (In Persian)
- [11] D. J. Faulkner, D. R. Rector, J. J. Davidson, R. Shekarriz, Enhanced heat transfer through the use of nanofluids in forced convection, in *Proceeding of, American Society of Mechanical Engineers*, pp. 219-224.
- [12] Y. Ding, H. Alias, D. Wen, R. A. Williams, Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 1, pp. 240-250, 2006.
- [13] J. Wang, J. Zhu, X. Zhang, Y. Chen, Heat transfer and pressure drop of nanofluids containing carbon nanotubes in laminar flows, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 716-721, 2013.
- [14] R. Bandyopadhyaya, E. Nativ-Roth, O. Regev, R. Y. Rozen, Stabilization of individual carbon nanotubes in aqueous solutions, *Nano Letters*, Vol. 2, No. 1, pp. 25-28, 2002.
- [15] W. Yu, S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 5, No. 1-2, pp. 167-171, 2003.
- [16] H. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solutions, *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, pp. 571, 1952.
- [17] J. D. Holman, *Experimental Methods for Engineers*, fifth ed., New York: McGraw-Hill, 1989.

- [21] S. Suresh, K. Venkataraj, P. Selvakumar, M. Chandrasekar, Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cu/water hybrid nanofluid in heat transfer, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 38, pp. 54-60, 2012.
- [22] Y. He, Y. Jin, H. Chen, Y. Ding, D. Cang, H. Lu, Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 11, pp. 2272-2281, 2007.
- [18] 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.
- [19] H. Chen, W. Yang, Y. He, Y. Ding, L. Zhang, C. Tan, A. A. Lapkin, D. V. Bavykin, Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of titanate nanotubes (nanofluids), *Powder Technology*, Vol. 183, No. 1, pp. 63-72, 2008.
- [20] K. Anoop, T. Sundararajan, S. K. Das, Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 9, pp. 2189-2195, 2009.