

Sci. and Tech. note یادداشت علمی و فنی

# بررسی تجربی ضریب انتقال حرارت جابه جایی اجباری نانوسیال آلومینیم اکسید در یک لولهی عمودی با شار حرارتی غیریکنواخت (سینوسی)

جواد رشید<sup>ا</sup>، منصور طالبی<sup>\*۲</sup>، کمال حداد<sup>ا</sup>، جمشید خورسندی<sup>۲</sup> ۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، صندوق پستی: ۲۱۳٤٥–۱۵۸۵، شیراز -ایران ۲. پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، صندوق پستی: ۱۵۸۹-۱۶۱۵۸، اصفهان -ایران

**چکیدد:** مطالعهی آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت جابهجایی نانوسیال ۱۹۲۰/۸ آب در یک لولهی حلقوی عمودی با شار حرارتی غیریکنواخت (سینوسی) در ناحیهی در حال توسعهی جریان با قطر متوسط ۲۰ نانومتر انجام شد. هدف اولیهی این پژوهش بررسی دمای سطح لولهی داخلی (منبع گرمایی) بود. مشخص شد دما در نقطهای بالاتر از وسط میله برای دماهای ورودی مختلف بیشینه می شود و دمای سطح میله برای نانوسیال کم تر از سیال پایه بود هر چند که نانوسیال بر مکان نقطهی بیشینهی سطح اثر خاصی نداشت. سپس ضریب انتقال حرارت جابهجایی و عدد ناسلت نانوسیال کم تر از سیال پایه بود هر چند که نانوسیال بر مکان نقطهی بیشینهی سطح اثر خاصی نداشت. سپس ضریب انتقال حرارت جابهجایی حرارت (٪۱۹) برای غلظت ٪۱/۸ و عدد رینولدز حدود ۲۱۰۰ اتفاق افتاد. اثر دمای ورودی بر انتقال حرارت نانوسیال بررسی و افزایش ضریب انتقال حرارت (راه) برای غلظت ٪۱/۸ و عدد رینولدز حدود ۲۰۱۰ اتفاق افتاد. اثر دمای ورودی بر انتقال حرارت نانوسیال بررسی و افزایش ضریب انتقال حرارت رایا افزایش دمای ورودی مشاهده شد. از بررسی اثر فشار بر انتقال حرارت نانوسیال مشخص شد که فشار، اثر محسوسی بر ضریب انتقال حرارت با افزایش دمای ورودی مشاهده شد. از بررسی اثر فشار بر انتقال حرارت نانوسیال مشخص شد که فشار، اثر محسوسی بر ضریب انتقال حرارت جابهجایی نانوسیال ندارد. بررسی افت نام سی انه نمان داد که با افزایش غلطت حجمی، افت نشار نسبی نانوسیال افزایش می باید. هم چنین افت فشار نسبی نانوسیال به علت رسوب بیش تر، در سرعتهای پایین، بیش تر بود و با افزایش عدد رینولدز کاهش یافت.

كليدواژه ها: نانوسيال آلومينيم اكسيد، شار حرارتي سينوسي، ضريب انتقال حرارت جابه جايي، افت فشار

## Experimental Investigation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluid Force Convection Heat Transfer Coefficient in Vertical Tube with Cosine Heat Flux

J. Rashid<sup>1</sup>, M. Talebi<sup>\*2</sup>, K. Haddad<sup>1</sup>, J. Khorsandi<sup>2</sup>

1. Department of Mechanical Engineering, Shiraz University, P.O.Box: 1585-71345, Shiraz – Iran 2. Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 81465-1589, Isfahan – Iran

Abstract: An experimental study for the convection heat transfer coefficient in a region of nanofluid containing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxide nanoparticles of 20 nanometer diameter in water as a base fluid through circular annular tube in the cosine thermal flux boundary condition was carried out. The primary purpose of this investigation was accomplished on the surface temperature of the heat source (inner pipe) determined at the maximum upper than the middle of pipe for the whole entry temperatures and surface temperature for nanofluid which was less than that of the base fluid. However, the nanofluid did not have any effect on the location point on the maximum temperature surface. Then, the convection heat transfer coefficient and Nusselt number were scrutinized showing that both of them increase by increasing of the volume fraction and Reynolds number. The maximum value of the heat transfer coefficient of nanofluid belongs to the volume fraction of 1.5% and the Reynolds number near 2100 which is 19%, compared to that of the base-fluid. The effect of entrance temperature and pressure of nanofluid on the heat transfer coefficient was also studied. The experimental data have shown that by increasing the entrance temperature, the heat transfer coefficient improves but the pressure has a negligible effect on heat transfer. The results demonstrated that the relative pressure drop of nanofluid increased remarkably by increasing the volume fraction. Furtheremore, we observed that by decreasing the Reynolds number the pressure drop increased because of more sediment of nanoparticle at lower velocities.

Keywords: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluid, Cosine Heat Flux, Convection Heat Transfer Coefficient, Pressure Drop

<sup>\*</sup>email: mstalebi@aeoi.org.ir



#### ۱. مقدمه

افزایش انتقال حرارت همواره یکی از مسایل مهم و مورد بحث در صنعت بوده است. این افزایش در بسیاری از پدیده های انتقال حرارت مثل تراشههای الکترونیکی، سامانههای لیزری، نیرو گاههای هستهای، فضاپیماها، دستگاههای تهویهی مطبوع، ریخته گری و سایر تجهیزهای صنعتی کاربرد دارد. در نیروگاههای هستهای با توجه به نحوهي توليد حرارت و شرايط مرزي خاص حاكم بر میلههای سوخت، شار حرارتی تولیدی تابع شار نوترون و از ایـنرو تابعي نايكنواخت و سينوسي است. جريان سيال نقش بسيار مهمي در زمینهی تبادل گرما در سرمایش یا گرمایش ایفا میکند. در دهه های اخیر با پیشرفت فن آوری، روش های جدید و مؤثرتری مورد مطالعه قرار گرفتهاند. یکی از این روش ها، استفاده از ذرات فلزي يا اکسيدهاي آنها است که داراي خواص حرارتي بسيار خوبی هستند. می توان با اضافه نمودن این ذرات جامد به سیال ها، خواص انتقال حرارتی آن ها را بهبود بخشید. پژوهش ها نشان مىدهد كه مخلوط غوطهور شدهى يك فلزيا اكسيد آن، ضريب انتقال حرارت بیش تری نسبت به سیال پایه دارد [1]. ماسودا نشان داد که ضریب انتقال حرارت نانوسیال با ۴٫۳ درصد حجمی ذرات Al<sub>r</sub>O<sub>r</sub> به قطر ۱۳ نانومتر تا ٪۳۰ افزایش می یابد [۲]. مرشد و همكاران [۳] قابليت انتقال حرارت نانوسيال آب يونيده شده تيتانيم اكسيد با ذرات كروى به قطر ١٥ نـانومتر و ذرات لولـهاى بـه قطر ۱۰ و ارتفاع ۴۰ نانومتر را اندازه گیری کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که قابلیت انتقال حرارت سیال پایه با افزودن نانوذرات افزایش می یابد و برای غلظت حجمی ۵ درصد، قابلیت انتقال حرارت نانوسیال حاوی ذرات لولهای و کروی، افزایشی، به ترتیب، برابر با ۳۳ و ٪۳۰۰ نسبت به سیال پایه دارد. مطالعهی یو و همکاران [۴] بر روی انتقال حرارت اتیلن گلیکول حاوی نانوذرات مس نشان داد که در غلظت حجمی ۵ درصد، ٪۴۶ بهبودی در ضریب انتقال حرارت نانوسيال نسبت به سيال يايه حاصل مي شود. پژوهش های چو و همکاران [۵] نشان داد که ضریب انتقال حرارت نانوسیال با دما افزایش می یابد. یکی از عامل های مهم افزایش ضريب انتقال حرارت نانوسيال حركت هاي كاتورهاي نانوذرات است. در زمینهی انتقال حرارت به روش جابه جایی در نانوسیال ها، آزمایش های متعددی توسط افراد مختلف طراحی و اجرا شده است. مطالعه های ژان و لی [۶] نشان داد که با افزایش غلظت نانو ذرات مـس محلـول آب/Cu از ۲٫۵ تـا ٪۷٫۵، ضـریب انتقـال

حرارت از ۱٫۷۴ تا ۱٫۷۸ افزایش می یابد. مطالعه ی آزمایشگاهی هریس و همکاران [۷] بر روی ضریب انتقال حرارت نانوسیال های مختلف نشان داد که نانوسیال حاوی ذرات فلزی مس در مقایسه با ذرات ۲۰۳۰ و CuO بیش ترین میزان انتقال حرارت را دارد. مطالعه ی آزمایشگاهی فتو کیان و نصر اصفهانی [۸] بر روی نانوسیال رقیق حاوی CuO در یک جریان مغشوش، افزایش ضریب انتقال حرارت به میزان ٪۲۵ را نشان داد. هم چنین آن ها نشان دادند که بیش ترین افت فشار در سیال نانو ٪۲۰ از سیال خالص بیش تر است و افت فشار با غلظت حجمی ذرات جامد افزایش می یابد.

این مقاله اثر نانوسیال آلومینیم اکسید بر ضریب انتقال حرارت جابـهجـایی اجبـاری در یـک لولـهی عمـودی بـا شـار حرارتـی نایکنواخت، و تغییرات خواص جریان انتقال حرارت بـه واسطهی وجود نانوسیال را گزارش میکند.

۲. معادله های حاکم بر نانوسیال
 چگالی نانوسیال می تواند چنین به دست آید [۹]

$$\rho_{\rm nf} = (1 - \phi)\rho_{\rm l} + \phi\rho_{\rm p} \tag{1}$$

براساس مدل تعادل گرمایی، گرمای ویژهی نانوسیالها چنین به دست میآید [۱۰]

$$(\rho Cp)_{\rm nf} = (1 - \phi)(\rho Cp)_{\rm l} + \phi(\rho Cp)_{\rm p} \tag{(Y)}$$

یکی از معروف ترین رابط ه ای ارایه شده برای تعیین گرانروی سوسپانسیونهای حاوی ذرات میلیمتری و میکرومتری، رابطهی انیشتین (۱۹۲۴) است که چنین نوشته می شود [۹، ۱۰، ۱۱]

$$\mu = \mu_1 (1 + r_2 \Delta \phi) \tag{(7)}$$

$$\frac{k_{eff}}{k_{f}} = \mathbf{1} + \mathbf{F} \mathbf{F}_{/} \mathbf{V} * \boldsymbol{\phi}^{\mathbf{V} \mathbf{F} \mathbf{F}} (\frac{d_{f}}{d_{p}})^{\mathbf{V} \mathbf{F} \mathbf{F}} (\frac{k_{p}}{k_{f}})^{\mathbf{V} \mathbf{F} \mathbf{F}} P r^{\mathbf{V} \mathbf{F} \mathbf{F}} R e^{\mathbf{V} \mathbf{F} \mathbf{T}}$$
(F)

که در آن، پارامترهای بدون بعد Re (رینولدز) و Pr (پرانتل) چنین تعریف می شوند

$$Pr = \frac{\mu_f}{\rho_c \alpha_c} \tag{(b)}$$

$$Re = \frac{\rho_f K_b T}{r \pi \mu^{\rm Y} L_{bf}}$$
(\$

$$\mu = A \times v^{\left(\frac{B}{T-C}\right)}$$
 (V)

 $A = r_{i} F i F \times i \cdot a (P\alpha.s), \quad C = i F \cdot K, \quad B = r F \vee K, \quad K_{b} = i_{j} F \wedge v \times i \cdot a (\frac{j}{k})$ 

$$q_{h}^{"} = \text{Fatf} \pi \sin(\frac{\pi x}{l}) \quad \circ \leq x \leq l \tag{9}$$

با محاسبهی شار میانگین در فاصلهی بین دو ترموکوپل، دمای تودهی سیال در مکان نصب هر ترموکوپل چنین به دست می آید

$$Q^{x} = m.C_{p}(T_{b}^{x} - T_{i})$$
(1.)

که در آن، <sup>x</sup> Q گرمای منتقل شده به سیال از ابتدای لوله تا محل ترموکوپل (نقطهی x) و T<sub>b</sub><sup>x</sup> دمای تودهی سیال نظیر نقطهی x است.

$$h = \frac{q''}{T_s - T_h} \tag{11}$$

$$\overline{h} = \frac{1}{L} \int h dx = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^{N_{Tc}} h_k \Delta x_k$$
(1)

که در آن،  $N_{TC}$  تعداد ترموکوپل.ها و  $\Delta x_k$ فواصل بین ترموکوپل.ها است.

> ۳. دستگاه آزمایش ۱.۳ کلیات

برای اندازه گیری ضریب انتقال حرارت نانوسیال، یک زنجیرهی واکنشی تحت فشار (۲۵ بار) طراحی و ساخته شد. این زنجیره شامل تجهیزهای مکانیکی (پمپ، مبدل حرارتی، گرم کنها، لوله کشی و برج خنک کن) و تجهیزهای برقی و الکتریکی بود. فشار زنجیره، توسط یک تنظیم گر فشار و با تزریق گاز نیتروژن تأمین و تنظیم شد. بر روی دستگاه، ۱۸ عدد ترموکوپل نوع k نصب شد که دو تا از آنها در ورودی و خروجی جریان و بقیه بر روی سطح (در ۸ مکان، در هر مکان دو ترموکوپل در دو طرف راست و چپ سطح برای افزایش دقت دمای سطح) در ۱/۱، ۱/۱، ۱۹/۱، ا۵/۱، ا۶/۱، ا/۱، ا/۱، ا۸/۱ مدار مختلف دستگاه برای اندازه گیری فشار تعبیه شد. در شکل ۱ مدار کامل زنجیرهی واکنشی و همچنین کانال آزمایش به همراه ترموکوپل های نصب شده در طول آن نشان داده شده است.

### ۲.۳ سازو کار تولید شار سینوسی

ساز و کار تولید شار سینوسی مهم ترین بخش دستگاه آزمایش است. میلهی قرار گرفته در داخل محفظهی آزمایش از سه قسمت اصلی تشکیل شده است. قسمت اول، لولهی داخلی میله است که از جنس سرامیک بوده و دارای قطر و طول، به ترتیب، ۲۵ و ۱۰۰۰ میلی متر است. بر روی این لوله شیارهایی برای قرار دادن سیم المنت با طول گامهای مختلف برای تولید شار سینوسی تراشیده شده است. المنتی که در این شیارها قرار می گیرد قسمت دوم میله را تشکیل می دهد که با عبور جریان الکتریسیته از آن شار حرارتی تولید می شود. المنت از جنس ۲۰۵۵ CrAl است. طول المنت، ۴۳۰۰ میلی متر و قطر آن ۶٫۰ میلی متر است. فاصلهی مایین سیم المنت (سطح خارجی لولهی داخلی) و سطح داخلی میله از پودر منیزم سولفات مخلوط شده با یک مایع مخصوص، که از نظر الکتریکی نارسانا است. بر شده است. نقشهی لولهی داخلی در شکل ۲ آورده شده است.

www.SID.ir



شکل ۱. تصویر کانال آزمایش (راست)، مدار کامل و دیگر تجهیزهای زنجیرهی واکنشی تحت فشار (چپ).



### ٤. انجام آزمایش و نتایج

برای تولید نانوسیال، ذرات ۲۹٬۵۰٬۸ به قطر ۲۰ نانومتر، ساخت یک شرکت آمریکایی<sup>(۱)</sup>، به آب مقطر به عنوان سیال پایه اضافه شد. تولید نانوسیال، بدون استفاده از فعالکننده ی سطحی و تنها با استفاده از دستگاه همزن فراآوایی مدل پارسونیک ۳۰۱ انجام شد زیرا فعالکننده ممکن بود انتقال حرارت را تحت تأثیر قرار دهد. از آنجا که کار فراتر از مقیاس آزمایشگاهی و در یک مقیاس تقریباً نیمه صنعتی انجام می شد و به دلیل بزرگ بودن حجم آب، که تقریباً نزدیک به ۳۰ لیتر بود، برای بررسی اثر غلظت و سرعت جریان، نانوسیال با غلظتهای حجمی ۰٫۲۵، ۰٫۱۰ و ۱٫۵۰٬ تهیه شد.

در این مطالعه، جریان در بین دو لوله ی هم محور بررسی شد؛ در لوله ی داخلی به قطر ،D، برای تولید شار متغیر (شار سینوسی) یک المنت حرارتی قرار داشت. از لوله ی خارجی به قطر D<sub>0</sub> نانوسیال از پایین به بالا عبور داده می شد. با مجموعه ای که ساخته شد، اثر نانو ذرات ۲۰۵۰ Al بر ضریب انتقال حرارت چنین مطالعه شد - ابتدا ضریب انتقال حرارت اجباری برای آب خالص محاسبه شد.

 سپس با تزریق نانوسیال به مجموعه، ضریب انتقال حرارت برای غلظتهای حجمی مختلف نانوسیال «Al<sub>Y</sub>O/ آب محاسبه و با آب خالص مقایسه شد.

 در ادامه، نانوسیال با نرخ جریانهای مختلف آزمایش و ضریب انتقال حرارت در نقاط مختلف و افت فشار در مسیر جریان، اندازه گیری و با سیال پایه مقایسه شد.

### ۱.٤ بررسی دمای سطح لوله برای نانوسیال و سیال پایه

برای انجام آزمایش های نانوسیال و مقایسهی آن با سیال پایه، ابتدا آزمایش ها با آب مقطر خالص انجام شد. در شکل ۳ تغییرات دمای سطح میله، برحسب ارتفاع میله برای دماهای ورودی مختلف رسم شده است.

از آنجا که شار به صورت سینوسی است، انتظار میرود که حداکثر دما در نقطهای بالاتر از وسط میله رخ دهد؛ نتایج حاصل از اندازه گیری در شکل ۳ مؤید این مطلب است. دمای بیشینه در نقطهی با ۲/L برابر ۰٫۷ مشاهده شد. مشاهده میشود که قلهی منحنی برای دماهای ورودی مختلف، تغییر چندانی نداشته و مکان دمای بیشینهی سطح میله مستقل از دمای ورودی سیال است. در شکل ۴ تغییرات دمای سطح میله با ارتفاع میله برای نانوسیال و سیال پایه رسم شده است.

تغییرات دمای سطح میله برای سیال و نانوسیال تقریباً یکسان، ولی دمای سطح میله برای نانوسیال نسبت به سیال پایه کم تر است و از آنجا که شار حرارتی لوله ثابت است این کاهش ناشی از انتقال حرارت بهتر نانوسیال نسبت به سیال پایه است. همچنین با افزایش غلظت نانوذرات، کاهش دمای سطح لوله بیش تر می شود که ناشی از افزایش انتقال حرارت در غلظتهای بالاتر است. بر پایه ی نتایج، بیشینه دمای سطح مستقل از نانوذرات است.

۲.٤ بورسی ضریب انتقال حرارت جابه جایی نانوسیال ضریب انتقال حرارت (W/m<sup>۲</sup> K) جریان آرام نانوسیال بر حسب رینولدز در غلظت های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. این ضریب با افزایش عدد رینولدز و غلظت نانوذره افزایش می یابد البته شیب تغییرات در غلظت و سرعت های بالا بیش تر است. با افزایش عدد رینولدز از حدود ۴۰۰ به ۲۰۰۰ ضریب های انتقال حرارت سیال پایه و نانوسیال دچار تغییرات چشم گیری می شود. با توجه به این که ضریب انتقال حرارت با افزایش پرانتل نسبت مستقیم دارد، افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش



شکل ۳. دمای سطح میله بر حسب ار تفاع میله در رینولدز ۲۰۷۹ برای آب مقطر.



**شکل ٤**. تغییرات دمای سطح میله با ارتفاع میله برای نانوسیال با غلظتهای متفاوت.



**شکل 0.** رابطه بین ضریب انتقال حرارت نانوسیال و عدد رینولدز در غلظتهای مختلف.

# - 625

#### ۳.٤ عدد ناسلت نانوسيال

عدد ناسلت نانوسیال برحسب غلظت در عدد رینولدزهای مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. از این شکل مشاهده می شود که به طور کلی، عدد ناسلت با افزایش غلظت نانوذرات و عدد رینولدز افزایش می یابد ولی با شیبی متفاوت. حتی در برخی از شرایط (نظیر رینولدز ۴۸۵) کاهش عدد ناسلت با وجود افزایش ناچیز انتقال حرارت مشاهده می شود که ناشی از افزایش بیش تر ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی در مقایسه با افزایش انتقال حرارت است. بنابراین با افزایش غلظت و سرعت، عدد ناسلت نیز افزایش می یابد.

٤.٤ بررسی ضریب انتقال حرارت نسبی نانوسیال

شکل ۷ تغییرات ضریب انتقال حرارت نسبی نانوسیال با عدد رینولدز را در غلظتهای حجمی مختلف نشان می دهد. با افزایش عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت نسبی افزایش می یابد؛ البته این افزایش در غلظتهای مختلف متفاوت است. به عنوان مثال برای غلظت ٪۲۵/۰۰ با افزایش عدد رینولدز از ۴۸۶ به ۲۰۷۰ تنها ۳ درصد بهبودی مشاهده می شود در حالی که در غلظت ٪۰/۰۰ ۵ درصد بهبودی و در غلظت ٪۱ حجمی، شاهد ۱۲ درصد بهبودی هستیم.

### ٥.٤ اثر دما بر ضريب انتقال حرارت نانوسيال

ضریب انتقال حرارت نسبی نانوسیال در گسترهی دمایی ۱۳ تـا ۳۱ درجه، در دو عدد رینولدز ۶۹۳ و ۱۷۹۳ و غلظت های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. افزایش غلظت در تمام دماهای ورودی، افزایش انتقال حرارت را به دنبال داشت، ولي اين افزايش، تحت تأثير غلظت و سرعت جريان قرار دارد. به عنوان مثال تغییر دمای ورودی از ۱۶ درجه تا ۳۰ درجـه در رينولدز ۶۹۳ و غلظت ٪۲۵٪ افزايش ۱٫۵ درصدي انتقال حرارت را به دنبال داشت در حالی که برای همین گسترهی دمایی در همین عدد رينولدز، ولي در غلظت ١،٥ درصد ٧ درصد افزايش مشاهده شد، در حالي كه درصد افزايش انتقال حرارت در عدد رينولدز ۱۷۳۲، در گسترهی دمایی ۱۳ تا ۳۱ درجه و در غلظت ٪۲٫۵، ۲٫۵ و در غلظت ۱٫۵ درصد ۹ بود. دلایل متعددی برای افزایش انتقال حرارت نانوسیال با افزایش دما وجود دارد. افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال با افزایش دما [۱۳، ۱۴، ۱۵] یکی از مهم ترین آن ها است. به عنوان مثال، افزایش دما از ۲۰ تا ۳۵ درجه در غلظت حجمی ٪٬۲۵، باعیث افزاییش ۳ درصد در ضریب انتقال حرارت نانوسیال می شود در حالی که در همین محدودهی دمایی



**شکل ۲.** رابطه بین عدد ناسلت و غلظت حجمی نانوسیال در عدد رینولدزهای مختلف.



**شکل ۲.** رابطه بین ضریب انتقال حرارت نسبی نانوسیال و عدد رینولدز در غلظتهای مختلف.



**شکل ۸.** تغییرات ضریب انتقال حرارت نسبی نانوسیال با دمای ورودی، در دو عدد رینولدز ۱۷۹۳ و ۶۹۳ و غلظتهای مختلف.

و در غلظت ٪۱٫۵، ۶٫۵ درصد افزایش در ضریب انتقال حرارت مشاهده می شود، به همین علت افزایش انتقال حرارت در محدودهی دمایی ذکر شده در شکل ۴ در غلظت ٪۰٫۸ بیش تر از غلظت ٪۲۵٫ است. از جملهی دیگر دلایل افزایش انتقال حرارت با افزایش دمای ورودی، افزایش بیش تر اغتشاش در درون نانوسیال با افزایش دما است به گونهای که با افزایش دمای ورودی، حرکتهای کاتورهای (حرکت براونی) نانوذرات در داخل سیال افزایش یافته و اغتشاش بیش تری در درون سیستم ایجاد می شود که این عامل انتقال حرارت را بهبود می بخشد.

### ۲.٤ اثر فشار بر ضریب انتقال حرارت نانوسیال

اثر فشار بر ضریب انتقال حرارت نانوسیال در غلظت حجمی ٪۱ و در رینولدزهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در شکل ۹ داده شده است. آزمایش ها در چهار فشار ۲، ۵، ۸ و ۱۰ بار انبر شدند. همان طور که از شکل ۹ پیدا است با افزایش فشار تا ۸ بار اثر محسوسی بر ضریب انتقال حرارت نانوسیال مشاهده نشد ولی در فشار ۱۰ بار کاهش جزیی در ضریب انتقال حرارت مشاهده شد. فشار ۱۰ بار کاهش جزیی در ضریب انتقال حرارت مشاهده شد. بیش ترین میزان کاهش در غلظت حجمی حدود ٪۲ و در رینولذر مفر درصد میل کرد. به نظر می رسد با افزایش فشار سیستم، ضریب انتقال حرارت کاهش می یابد چرا که احتمال انباشته شدن نانوذرات بیش تر می شود هر چند که در این پژوهش تا فشار ۱۰ بار، میزان انباشت نانوذرات چندان چشم گیر نبود.

### ۷.٤ اثر غلظت بر کاهش فشار نانوسیال

در شکل ۱۰ اثر غلظت بر کاهش نسبی فشار در رینولدزهای مختلف نشان داده شده است. کاهش فشار نانوسیال با کاهش فشار در کسر حجمی ٪۰ بی بعد شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش غلظت نانو ذرات، کاهش فشار سیستم افزایش یافته است. دلیل این امر، افزایش گران روی نانوسیال با افزایش غلظت آن است [۲۰، ۱۷، ۱۸]. هر چند که در یک غلظت مشخص با افزایش عدد رینولدز، کاهش فشار به دلیل اغتشاش بیش تر افزایش می یابد ولی کاهش فشار نسبی با افزایش رینولدز کاهش می یابد. به دلیل بالا بودن احتمال رسوب نانو ذرات در مجاری عبوری سیال در رینولدزهای کم، کاهش فشار نسبی هم بیش تر است. البته شیب این کاهش در غلظت های بالا که تعداد ذرات بیش تر است. البته شیب این بزرگتر از غلظت های کم است که تأییدی دوباره بر احتمال رسوب ذرات در مجاری عبوری نانوسیال است.



**شکل ۹.** تغییرات ضریب انتقال حرارت نانوسیال با فشار در غلظت حجمی ٪۱ و در رینولدزهای مختلف.



۸.٤ بررسی نتایج حاصل از روابط موجود برای توزیع دما هرچند که شرایط کار حاضر دقیقاً مشابه رابطههای موجود در مرجعها نیست، برای ارزیابی، ولی در این قسمت نتایج حاصل از رابطههای موجود در مرجع [۱۹] ارایه می شود. برای توزیع دما بر روی غلاف میلهی سوختی که تحت شار حرارتی کسینوسی قرار دارد، این رابطه ارایه شده است

$$t_{c}(Z) = t_{f_{1}} + q_{c}^{"}A_{c}\left[\frac{H_{e}}{\mu C_{p}\dot{m}}(\sin\frac{\pi z}{H_{e}} + \sin\frac{\pi H}{rH_{e}}) + \frac{1}{hC}\cos\frac{\pi z}{H_{e}}\right]$$
(197)

که در آن،  $t_c$  دمای غلاف،  $t_f$  دمای ورودی سیال،  $q_c^{-}$  قدرت چشمهی حرارتی در مرکز میله،  $A_c$  سطح مقطع یک عنصر سوخت،  $H_e$  گام نمایهی چشمهی حرارتی،  $C_p$  گرمای ویژهی سیال، n نرخ جریان جرمی، H ارتفاع میله، h ضریب انتقال حرارت بین غلاف و سیال خنک کننده و C محیط میلهی سوخت است. در رابطهی (۱۳) ضریب انتقال حرارت ثابت است و همچنین  $H_e=H$  که در این صورت معادلهی (۱۳) چنین ساده می شود

$$t_{c}(Z) = t_{f_{1}} + q_{c}^{m}A_{c} \left[ \frac{H}{\pi C_{p}\dot{m}} (\sin\frac{\pi z}{H} + 1) + \frac{1}{hC}\cos\frac{\pi z}{H} \right] (1\%)$$

ضریب انتقال حرارت برای عدد رینولدزهای مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. طول قسمت حرارتی محفظهی آزمایش برابر ۱ متر است. همچنین با استفاده از عدد رینولدز، نرخ جریان جرمی به دست می آید. با توجه به این که توان حرارتی کل انتقال یافته برابر ۱۰۰۰ وات است و با توجه به کسینوسی بودن چشمهی حرارتی، با انتگرال گیری از نمایهی توان، مقدار قدرت چشمهی حرارتی در مرکز میله به دست می آید

$$\mathbf{q}_{c}^{m} = \frac{\mathbf{q}_{tot} \times \boldsymbol{\pi}}{\mathbf{r} \times \mathbf{H} \times \mathbf{A}_{c}} = \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v} \cdot [watt] \times \boldsymbol{\pi}}{\mathbf{r} \times \mathbf{v} [m] \times \mathbf{A}_{c} \Delta \Delta \times \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}^{-\mathbf{r}} [m^{\mathsf{r}}]}$$
(15)

با جایگذاری q\_ از رابطهی (۱۵) در رابطهی (۱۴)، رابطهی نهایی دمای غلاف چنین به دست میآید

$$t_{c}(z) = t_{r_{1}} + 1 \Delta v_{1} A[\frac{watt}{m}] \times \left[ \frac{v[m]}{\pi \times FY \cdots [\frac{v}{kg^{\circ}C}] \times v_{1} \cdot FY[\frac{kg}{s}]} (v + \sin \frac{\pi z}{H}) + \frac{v_{1}}{v_{1} v_{1} \cdot \frac{watt}{m^{v^{\circ}C}}] \times v_{1} \cdot F[m]} \cos \frac{\pi z}{H} \right]$$

$$(19)$$

در شکل ۱۱ برای دماهای ورودی مختلف و برای عدد رینولدز ۲۰۷۹ نمودار دمای غلاف طبق رابطهی (۱۶) رسم شده است همچنین می توان با مشتق گیری از رابطهی بالا موقعیت قلهی دما (فاصله از مرکز میله) را به دست آورد

$$z_{\rm C} = \frac{H_{\rm e}}{\pi} \tan^{-1} \frac{h C H_{\rm e}}{\pi C_{\rm p} \dot{m}} \tag{W}$$

در نتیجه برای مسئلهی بالا داریم

$$Z_{\rm C} = \frac{{}^{\rm Y}[m]}{\pi} \tan^{-1} \frac{{}^{\rm VYD}[\frac{watt}{m^{*^{\rm C}}}] \times \cdot \cdot \cdot \cdot {}^{\rm Y}[m] \times {}^{\rm Y}[m]}{\pi \times {}^{\rm FY} \cdot \cdot [\frac{J}{kg^{*}C}] \times \cdot \cdot {}^{\rm FY}[\frac{kg}{s}]} = \cdot \cdot \cdot {}^{\rm YVP}$$
(1A)



شکل 11. توزیع دمای سطح محاسبه شده با استفاده از رابطههای مرجع [۱۹].

در نتیجه، قلهی دما برای مسئلهی بالا، که با فرض ثابت بودن ضریب انتقال حرارت حل شد، بالاتر از مرکز قرار دارد. با مقایسهی نتایج شکل ۱۱ با شکل ۳ ملاحظه می شود که نحوهی تغییرات دما و محل دمای بیشینهی محاسبه شده از رابطههای مرجع [۱۹] مشابه نتایج تجربی است. البته اختلاف موجود می تواند به دلیل فرض ثابت بودن ضریب انتقال حرارت باشد.

## ٥. نتيجه گيري

آزمایشها در ۴ غلظت حجمی ۰۰٬۲۵، ۰٫۵ ا و ۱٫۵ درصد در رینولدزهای مختلف در جریان آرام انجام شدند. مشخص شد که برای یک شار سینوسی، دمای سطح نیز تقریباً سینوسی است و در نقطهی نزدیک به ۲/L=۰/۷، به بیشینه مقدار خود میرسد. همچنین مشخص شد که نانوسیال اثری بر مکان دمای بیشینهی سطح ندارد ولی دمای سطح را به علت بهبودی انتقال حرارت کاهش میدهد. علاوه بر این، مشاهده شد که ضریب انتقال حرارت نانوسیال و عدد ناسلت با افزایش غلظت افزایش می یایند هر چند که میزان افزایش عدد ناسلت به علت افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال دارای شیب کمتری است. از جمله دلایل افزایش این پارامترها، می توان بهبودی ضریب انتقال حرارت سیال، ایجاد اغتشاش بیش تر در سیستم را عنوان کرد. اثر دمای ورودی نانوسیال بر ضریب انتقال حرارت بررسی و مشاهده شد که افزایش دمای ورودي نانوسيال، باعث بهبودي ضريب انتقال حرارت مي شود دليل این امر را می توان بهبودی ضریب انتقال حرارت نانوسیال با افزایش دما و همچنین افزایش سرعت براونی نانوذره دانست. مشاهده شد که فشار، اثر خاصی بر ضریب انتقال حرارت نانوسیال ندارد و تنها در فشارهای بالا، اندکی کاهش در ضریب انتقال حرارت مشاهده شد. کاهش فشار در سیستم به علت افزایش گرانروی نانوسیال و

همچنین برخورد ذرات به دیوارهی لوله نسبت به سیال پایه بیش تر است.

همچنین ملاحظه شد که نتایج حاصل از رابطههای مرجع [۱۹] دما در هر دو حالت مشابه است. با نتایج تجربی به دست آمده تطابق خوبی دارد. به عنوان مثال در عدد رینولدرز ۲۰۷۹ توزیع دمای سطح در طول میله حدود ۱۵ هستهای و همچنین اصلاح کدهای کاربردی در زمینهی درصد بیش تر از نتایج به دست آمده از رابطههای مرجع [۱۹] بود

که می توان آن را ناشی از خطاهای اندازه گیری و همچنین فرض ثابت بودن مقدار ضريب انتقال حرارت دانست. البته روند تغييرات

نتایج حاصل، در بررسی رفتار نانوسیال در قلب رآکتورهای ترمو هيدروليک رآکتور کاربر د خواهد داشت.

علامت گذاریها					
علايم		زيرنويس،ها		علايم يوناني	
Cp(J/kg.K)	گرماي ويژه	nf	نانوسيال	ρ(kg/m <sup>r</sup> )	چگالی
K(W/m.K)	ضريب انتقال حرارت	1	سيال پايه	$\mu(n.s/m')$	گرانروی
q"(W/m'.K)	شار حرارتي	Р	نانوذره	α	ضريب پخش حرارتي
Q(W)	گرمای منتقل شده	in	ورودى	γ	شبكهى بلورى آلومينيم
T(k)	دما	Eff	مۇثر	φ	غلظت حجمي
P(pa)	فشار	i	داخلى		
D(m)	قطر لوله	0	خارجى		
d	قطر ذرات	b	تودەي سيال		
Nu	ناسلت				
L(m)	طول	0			

rclu

پىنوشت

1. US Research Nanomaterials, Inc



- A.B. Duncan, G.P. Peterson, Review of Micro scale Heat Transfer, Appl. Mech. Rev, 9 (1994) 397-428.
- S.U.S. Chio, Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles, Developments and applications of non-newtonian flow, D.A. Siginer and H.P. Wang eds., FED, V 231/MD, 66 (1995) 99.
- S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, Enhanced thermal conductivity of TiO2. Water basednanofluids, International Journal of Thermal Sciences, 44 (2005) 367-373.
- 4. W. Yu, H. Xie, L. Chen, Y. Li, Investigation on the thermal transport properties of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, Powder Technology, 197 (3) (2010) 218–221.
- W. Yu, S.U.S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nano fluids a renovated Hamilton-Crosser model, Journal of Nanoparticle Research, 6 (2004) 355-361.
- Y. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, Int. J. Heat Fluid Flow, 21 (2000) 58-64.
- S. ZeinaliHeris, S.Gh. Etemad, M. Nasr Esfahany, Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer, Int. J. Heat and Mass Transfer, 33 (2006) 529-535.
- 8. S.M. Fotukian, M. Nasr Esfahany, Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube, Int. Comm. Heat and Mass Transfer, 37 (2009) 214-219.
- I.C. Bang, S.H. Chang, Boiling heat transfer performance and phenamena of AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid from a plain surface in a pool, Int. J. Heat Mass Transfer, 48 (2005) 2407-2419.
- 10.Y. Xuan, W. Roetzel, Conception for heat transfer correlation of nanofluid, Int. J. Heat Mass Transfer, 43 (2000) 3701-3707.

- 11.S. Mirmasoumi, A. Behzadmehr Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizantal tube, Int. J. Heat Fluid Flow, 29 (2008) 557-556.
- 12.N. Masoumi, N. Sohrabi, A. Behzadmehr, A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids, Journal of Physics, D: Applied Physics, 42 (2009) 1-6.
- 13.W. Yu, S.U.S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nano fluids a renovated Hamilton-Crosser model, Journal of Nanoparticle Research, 6 (2004) 355-361.
- 14.Clement Kleinstreuer, Yu Feng, Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: a review, Kleinstreuer and FengNanoscale Research Letters (2011) 229.
- 15.H.E. Patel, T. Sundararajan, T. Pradeep, A micro-convection model for thermal conductivity of nanofuids, Indian Academy of Sciences, 65 (2005) 863-869.
- 16.D. Weerapun, W. Somchai, Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids, International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science, 33 (2009) 706-714.
- 17.S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, Investigatiton of thermal conductivity and viscosity of nano fluid, International Journal of Thermal Science, 47 (2008) 560-568.
- 18.MadhursreeKole, Dey, T.K., Effect of aggregation on the viscosity of cooper oxide-gear oil naonfluids, International Journal of Thermal Science, 50 (2011) 1741-1747.
- 19.M.M. EL-Wakil, Nuclear Heat Transport, The American Nuclear Society La Grange Park, ILLinois (1993).