

## بررسی مقایسه‌ای انتقال حرارت جابه‌جایی آرام و افت فشار نانوسیالات در هندسه‌های خمیده

احسان ابراهیم‌نیا بجستان<sup>۱\*</sup> و حمید نیازمند<sup>۲</sup>

۱. پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی،

دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

۲. گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۱۵ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۳/۰۸)

DOI: 10.18869/acadpub.jcme.36.1.19

**چکیده** - در این مقاله شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت نانوسیال اکسید آلومینیوم / آب، در سه هندسه مختلف لوله مستقیم، لوله دارای خم  $90^\circ$  و لوله دارای خم  $180^\circ$  تحت شرایط شار حرارتی دیواره ثابت انجام شده است. معادلات انرژی و ناویر-استوکس تراکم‌ناپذیر و آرام با در نظر گرفتن مدل تک فاز برای نانوسیال، در یک سیستم مختصات منطبق بر جسم با استفاده از برنامه نوشته شده توسط نویسندگان بر مبنای روش حجم‌کنترلی حل شده‌اند در حالی که تمام خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال تابع دما در نظر گرفته شده‌اند. اثر کسرهای حجمی مختلف نانوذرات و همچنین نیروی گریز از مرکز بر روی میدان دما و فشار مورد مطالعه قرار گرفته است. تطابق نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی موجود، بیانگر صحت مدل‌سازی عددی به کار رفته برای شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت داخل لوله خمیده و همچنین صحت مدل تک فاز ارائه شده برای نانوسیال است. با توجه به نتایج به دست آمده، وجود لوله خمیده و همچنین استفاده از نانوسیال‌ها باعث بهبود چشم‌گیر مشخصه‌های انتقال حرارت می‌شوند، در حالی که افت فشار قابل توجهی نیز ایجاد می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که برای شرایط بهینه عملکرد نانوسیال، متغیرهای مختلفی چون افزایش انتقال حرارت و افت فشار را باید به صورت هم‌زمان مدنظر قرار داد. در انتها روشی برای انتخاب نانوسیال و هندسه مناسب برای کاربردهای خاص ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: حل عددی، انتقال حرارت جابه‌جایی، نانوسیال، لوله خمیده، افت فشار.

## Comparative Study of Laminar Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Nanofluids through Curved Geometries

E. Ebrahimi-Bajestan<sup>1\*</sup> and H. Niazmand<sup>2</sup>

1. Department of Energy, Center of Science, High Technology and Environmental Science, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

2. Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

**Abstract:** In this paper, numerical simulation of flow and heat transfer of  $Al_2O_3$ /water nanofluid has been carried out through

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی e.ebrahimi@kgut.ac.ir

three different geometries involving a straight pipe, a 90° curved pipe and a 180° curved pipe under constant heat flux condition. Employing single-phase model for the nanofluid, the Navier-Stokes and energy equations for an incompressible and laminar flow have been solved in a body fitted coordinate system using a homemade code based on control-volume approach, while all thermophysical properties of the nanofluid are dependent on considered temperature. The effects of different nanoparticle concentration and centrifugal forces on the temperature and pressure field have been examined in detail. The accordance of numerical results with experimental data expresses the accuracy of the employed numerical method for simulating flow and heat transfer in the curved pipes, as well as the accuracy of the single-phase model of the nanofluid. The Presented results indicated that both the nanoparticle and curvature effects improve the heat transfer characteristics dramatically, but at the expense of considerable increase in pressure drop. Furthermore, the results showed that in order to obtain the optimum operating conditions of nanofluids, different parameters such as heat transfer enhancement and pressure drop must be considered simultaneously. Finally, a method has been proposed to indicate the proper nanofluid and flow geometry for special practical applications.

**Keywords:** Numerical solution, Convective heat transfer, Nanofluid, Curved pipe, Pressure drop.

## فهرست علائم

$U_m$	سرعت ورودی (m/s)	A	مساحت ( $m^2$ )
$v$	سرعت (m/s)	$C_p$	ظرفیت گرمایی (J/kgK)
$\nabla$	حجم ( $m^3$ )	$D_{pipe}$	قطر لوله (m)
bf	سیال پایه	De	عدد دین، $De = Re\sqrt{\alpha}$
eff	نانوسیال	h	ضریب انتقال حرارت محلی ( $W/m^2K$ )
m	میانگین	$\bar{h}$	ضریب انتقال حرارت میانگین ( $W/m^2K$ )
np	نانوذره	k	ظریب هدایت حرارتی ( $W/mK$ )
علائم یونانی		$L_{pipe}$	طول لوله (m)
$\alpha$	نسبت انحنا، تصحیح فشار	n	بردار نرمال سطح، گام زمانی
$\rho$	چگالی ( $kg/m^3$ )	p	فشار (Pa)
$\mu$	ویسکوزیته (Pa s)	Re	عدد رینولدز $Re = \rho_{eff} U_m D_{pipe} / \mu_{eff}$
$\Phi_p$	تابع پتانسیل	$R_c$	شعاع انحنای لوله خمیده (m)
$\phi$	کسر حجمی نانوذرات	t	زمان (s)
$\xi$	راستای محوری لوله (m)	T	دما ( $^{\circ}C$ )

## ۱- مقدمه

لوله مستقیم است و مطالعات زیادی در زمینه جریان و انتقال حرارت در انواع لوله‌های خمیده صورت گرفته که توسط نافون و ویگویسس [۱] مرور جامعی بر آن انجام شده است. از این میان، ون‌دی‌وس و همکاران [۲] نیم‌رخ جریان داخل خم  $90^{\circ}$  را بررسی کردند. کومار و همکاران [۳] اثر خصوصیات تابع دما را بر جابه‌جایی اجباری سیال آب داخل یک لوله خمیده  $180^{\circ}$  به‌روشنی عددی مطالعه کردند. اگرول و همکاران [۴] مطالعه آزمایشگاهی جامعی بر روی اندازه‌گیری سرعت جریان داخل

کاربرد وسیع مبدل‌های حرارتی در صنایع مختلف و نیاز شدید به صرفه‌جویی انرژی و کوچک‌سازی این تجهیزات، مطالعه روش‌های بهبود بازده مبدل‌های حرارتی را ضروری ساخته است. استفاده از لوله‌های خمیده یکی از انواع روش‌های پرکاربرد به‌منظور افزایش بازده مبدل‌های حرارتی است. جریان در لوله خمیده دارای پیچیدگی‌های زیادی نسبت به جریان در

چند خم  $180^\circ$  انجام دادند.

از طرف دیگر، مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که نانوسیال‌ها نه تنها باعث بهبود ضریب هدایت حرارتی می‌شوند بلکه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را نیز نسبت به سیال پایه افزایش می‌دهند. این نتیجه توسط لی و زووان [۵]، ون و دینگ [۶]، و همچنین یانگ و همکاران [۷] برای نانوسیال‌های شامل ذرات مس، اکسید آلومینیوم و گرافیت گزارش شده است. حسینی‌پور و همکاران [۸] نیز افزایش قابل ملاحظه ضریب انتقال حرارت نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی را در جریان داخل لوله مشاهده کردند. به این ترتیب استفاده از این مواد جدید به‌عنوان یکی از روش‌های بهبود انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی مطرح شده است. در کنار بررسی‌های آزمایشگاهی نانوسیال‌ها، برخی به مطالعه تئوری و شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت نانوسیال‌ها داخل هندسه‌های مختلف پرداخته‌اند. هدف از تحقیقات عددی، ارزیابی صحت مدل‌های موجود در پیش‌گویی رفتار انتقال حرارتی نانوسیال‌ها و همچنین ارائه زمینه‌های جدید برای کاربرد نانوسیال‌ها است. از طرف دیگر مطالعات عددی می‌تواند با افزایش دانش نسبت به مکانیزم‌های حاکم در انتقال حرارت نانوسیال‌ها، به توسعه مدل‌های موجود کمک شایان توجهی کند.

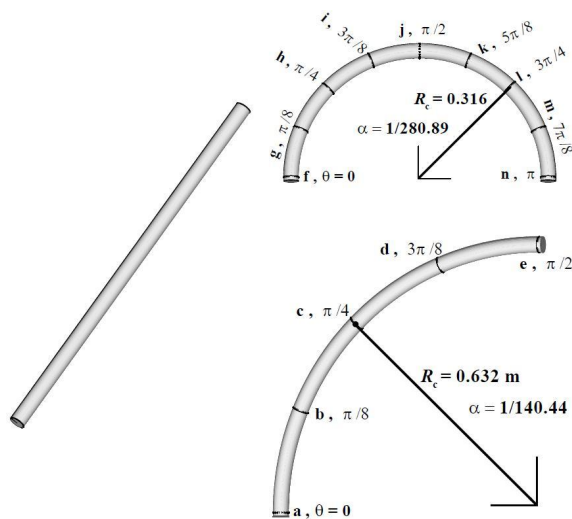
مطالعات عددی صورت گرفته در این زمینه غالباً به شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی درون لوله مستقیم با مقطع دایروی پرداخته‌اند [۹ و ۱۰] و مطالعات بسیار کمی در مورد جریان در سایر هندسه‌ها نظیر لوله مستقیم با مقطع مثلثی [۱۱] و بیضی [۱۲] موجود است. در این بین، مطالعات عددی اندکی نیز توسط اکبری‌نیا و همکاران [۱۳-۱۵] در زمینه انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال‌ها درون لوله خمیده  $180^\circ$  انجام شده است. این مطالعات نشان داده‌اند که جریان نانوسیال در هندسه‌های خمیده بهبود قابل ملاحظه انتقال حرارت را به همراه دارد. ساسمیتو و همکاران [۱۶] نیز با بررسی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری داخل لوله‌های مارپیچ با سطح مقطع مربعی نشان دادند که جریان نانوسیال‌ها باعث بهبود

انتقال حرارت در این هندسه‌ها می‌شود. مشابه این نتیجه توسط بهره‌مند و همکاران [۱۷] برای لوله مارپیچ با مقطع دایروی ارائه شد. مطالعاتی نیز در لوله‌های دارای مانع در مسیر جریان نانوسیال صورت گرفته است که از این میان می‌توان به لوله مجهز به نوار پیچیده [۱۸] و همچنین لوله دارای پره داخلی [۱۹] اشاره کرد. با وجود تحقیقات انجام گرفته، حسین و همکاران [۲۰] با مروری جامع بر مقالات منتشر شده در زمینه انتقال حرارت اجباری نانوسیال‌ها، لزوم انجام تحقیقات بیشتر در زمینه اثر هندسه لوله بر جریان و انتقال حرارت نانوسیال‌ها را بیان کردند.

در تحقیقات موجود به‌منظور مدل‌سازی نانوسیال، از مدل‌های تک فاز و دو فاز استفاده شده است که هر کدام دارای مزیت‌هایی هستند. بررسی‌ها نشان داده است که با توجه به تابعیت خصوصیات نانوسیال از دما، به‌منظور بهبود صحت مدل‌سازی عددی تک فاز، خصوصیات ترموفیزیکی به‌کار رفته در معادلات حاکم باید تابع دما باشند [۲۱].

نویسندگان حاضر نیز در مطالعات قبلی خود به بررسی جریان و انتقال حرارت نانوسیال‌های حاوی ذرات اکسید آلومینیوم [۲۲] و نانولوله کربن [۲۳] داخل یک لوله خمیده  $90^\circ$  پرداختند که در آن خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال مستقل از دما بود و اثرات تغییر هندسه در آن دیده نشده بود. همچنین مدل استفاده شده برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیال رویکرد متفاوتی داشت.

بررسی پژوهش‌های موجود نشان می‌دهد که با وجود کاربرد وسیع هندسه‌های خمیده در مبدل‌های حرارتی، میزان اثر نانوسیال‌ها در این هندسه‌ها، خصوصاً از نظر میزان افت فشار در مقایسه با لوله مستقیم بررسی چندانی نشده است. در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت اجباری نانوسیال‌ها در سه هندسه مختلف لوله مستقیم، لوله دارای خم  $90^\circ$  و لوله دارای خم  $180^\circ$  مطالعه می‌شود که تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. چگالی و ظرفیت حرارتی نانوسیال مورد بررسی که مخلوط آب و نانوذرات اکسید آلومینیوم است،



شکل ۱- هندسه‌های مورد بررسی

لوله دارای خم  $90^\circ$  و لوله دارای خم  $180^\circ$  تحت شرایط شار حرارتی دیواره ثابت است. نانوسیال اکسید آلومینیوم / آب در کسرهای حجمی مختلف، به منظور مطالعه رفتار نانوسیال‌ها در هندسه‌های خمیده در مقایسه با لوله مستقیم انتخاب شده است. شکل (۱) هندسه‌های مورد بررسی به همراه مقاطع مربوطه را نشان می‌دهد؛ تمام این سه لوله، دارای قطر  $D_{\text{pipe}} = 4/5$  mm و طول  $L_{\text{pipe}} = 1/01$  m (بر مبنای مطالعه آزمایشگاهی موجود [۲۴]) هستند. در این شکل  $R_c$  شعاع انحنای لوله و پارامتر  $\alpha$  که معرف نسبت انحنا است، به صورت نسبت شعاع لوله به شعاع انحنای لوله تعریف می‌شود. لازم به ذکر است که پروفیل سرعت جریان در ورودی همه لوله‌ها یکنواخت در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، با در نظر گرفتن نانوسیال به صورت یک محیط تک فاز، فرض شده است که نانوذرات جامد و سیال پایه از نظر حرارتی و سرعتی در تعادل هستند. محققین زیادی از این روش برای شبیه‌سازی جریان نانوسیال استفاده کرده‌اند. فرض محیط تک فاز برای نانوسیال با توجه به اندازه بسیار کوچک نانوذرات و کسر حجمی بسیار پایین آنها منطقی به نظر می‌رسد. در این حالت نانوسیال مانند یک سیال معمولی عمل می‌کند و تمام معادلات حاکم بر سیال معمولی برای نانوسیال نیز برقرار است؛ اثر نانوذرات نیز در سیال با انتخاب مناسب

به کمک مدل‌های کلاسیک مخلوط دو فاز محاسبه می‌شوند. از آنجایی که تاکنون مدل جامعی برای پیش‌گویی لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ارائه نشده، مقدار این دو خصوصیت با توجه به داده‌های آزمایشگاهی موجود به دست آمده است. هدف نهایی از این مسأله بررسی پتانسیل ترکیب دو روش استفاده از نانوسیال و لوله خمیده به منظور افزایش بازده انتقال حرارتی مبدل‌های حرارتی است.

نکته قابل تأمل دیگر در مطالعات جریان و انتقال حرارت در هندسه‌های خمیده این است که روابط ناسلت و افت فشار موجود برای لوله‌های مارپیچ و یا نامحدود ارائه شده‌اند [۱] که شرط اولیه آن توسعه یافتگی جریان است و از اثرات ورود جریان به خم و خروج از آن صرف‌نظر شده است. اما در لوله‌های خمیده محدود شده (مانند خم  $90^\circ$  درجه و خم  $180^\circ$  درجه) جریان با توجه به نیروی گریز از مرکز رفتار پیچیده‌ای دارد که در ابتدای ورود به خم از حالت توسعه‌یافتگی جریان ورودی خارج می‌شود [۲۲]. از طرف دیگر همین روابط موجود، برای شرایط خصوصیات مستقل از دما ارائه شده‌اند، در نتیجه برای زمانی که تابعیت دما چشم‌گیر باشد دچار خطا هستند. خصوصاً در مورد نانوسیالات، با توجه به مراجع فراوان [۲۱]، تابعیت خصوصیات از دما قابل توجه است. در نتیجه روابط ارائه شده در مراجع برای عدد ناسلت و افت فشار در لوله‌های خمیده محدود شده دچار خطا هستند و این مطالعات جریان و انتقال حرارت در این گونه هندسه‌ها را ضروری می‌سازد. با توجه به مطالب مذکور، تمام خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال به کار رفته در تحقیق حاضر، تابع دما در نظر گرفته شده‌اند و اثرات توسعه نیافتگی جریان و اثرات ورودی و خروجی جریان از خم و تأثیر زاویه خم نیز لحاظ شده است.

## ۲- مدل‌سازی فیزیکی و ریاضی

مسأله مورد بررسی، انتقال حرارت جابه‌جایی آرام و افت فشار ناشی از جریان نانوسیال در سه هندسه مختلف لوله مستقیم،

$$k_{\text{eff}}(\varphi, T) = k_{\text{bf}}(T)(1 + \varphi/55.03) \quad (7)$$

لازم به ذکر است در معادلات (۴) تا (۷)، خصوصیات ترموفیزیکی سیال پایه آب که با زیرنویس bf نمایش داده شده، تابع دما در نظر گرفته شده که در معادلات (۸) تا (۱۱) ارائه شده‌اند. این روابط از برازش خم بر داده‌های موجود [۲۵] به دست آمده است:

$$\rho_{\text{bf}}(T) = -0.000302T^2 - 0.14433T + 1002.58 \quad (8)$$

$$C_{p,\text{bf}}(T) = -4.6325 \times 10^{-5}T^2 + 0.0173T^2 - 1.069T + 4196/72 \quad (9)$$

$$\mu_{\text{bf}}(T) = 0.00002414 \times 10^{[227.8/(T+133)]} \quad (10)$$

$$k_{\text{bf}}(T) = 7.843 \times 10^{-6}T^2 + 0.01912T + 0.5677 \quad (11)$$

از طرفی در روابط (۴) و (۵) خصوصیات ترموفیزیکی نانوذرات اکسید آلومینیوم که با زیرنویس np مشخص شده، ثابت و برابر  $\rho_{\text{bf}} = 3920 \text{ kg/m}^3$  و  $C_{p,\text{np}} = 880 \text{ J/kg K}$  فرض شده‌اند.

### ۳- روش حل عددی

پس از شبکه‌بندی حوزه حل، معادلات حاکم بر روی حجم کنترل‌های مربوطه انتگرال گرفته و به منظور محاسبه مشتقات از دستگاه مختصات عمومی استفاده شده است. روش حل عددی معادلات منفصل شده به روش ADI، این گونه است که ابتدا از حل معادلات اندازه حرکت با استفاده از میدان فشار قبلی (یا حدس اولیه در ابتدای حل)، یک میدان سرعت میانی،  $\vec{V}'$ ، مطابق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$\rho \frac{(\vec{V}' - \vec{V}^n)}{\Delta t} = -\bar{p}^n + \mu \nabla^2 \vec{V}' - \rho \vec{V}' \cdot \nabla \vec{V}' \quad (12)$$

اما به دلیل اینکه در معادله از میدان فشار زمان قبل استفاده شده است، این میدان سرعت میانی الزاماً بقای جرم را ارضا نمی‌کند و بنابراین نیاز به یک جمله تصحیح سرعت،  $\vec{V}_c$ ، وجود دارد. در این صورت میدان سرعت در زمان جدید (n+1) برابر است با:

$$\vec{V}^{n+1} = \vec{V}_c + \vec{V}' \quad (13)$$

خصوصیات ترموفیزیکی مؤثر برای نانوسیال در معادلات حاکم منظور می‌شود. آن چنان که گفته شد، در نظر گرفتن خصوصیات تابع دما باعث پیشگویی بهتر میدان سرعت و دما می‌شود. معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت برای این مسأله روابط (۱) تا (۳) هستند:

معادله پیوستگی:

$$\int_V \rho_{\text{eff}} \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (1)$$

معادله اندازه حرکت:

$$\int_V \rho_{\text{eff}} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} dV + \iint_V \vec{V} \rho_{\text{eff}} \vec{V} \cdot d\vec{A} = - \iint_V p \vec{n} \cdot d\vec{A} + \iint_V \mu_{\text{eff}} \nabla^2 \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (2)$$

معادله انرژی:

$$\int_V (\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} dV + \iint_V (\rho C_p)_{\text{eff}} T \vec{V} \cdot d\vec{A} = + \iint_V k_{\text{eff}} \nabla^2 T \cdot d\vec{A} \quad (3)$$

در این روابط  $\vec{V}$  سرعت، T دما، p فشار،  $\rho_{\text{eff}}$  چگالی مؤثر نانوسیال،  $\mu_{\text{eff}}$  لزجت دینامیکی مؤثر نانوسیال،  $k_{\text{eff}}$  ضریب هدایت مؤثر نانوسیال،  $C_{p,\text{eff}}$  ظرفیت حرارتی مؤثر نانوسیال، t زمان،  $\vec{n}$  بردار عمود بر سطح A و  $V$  حجم المان هستند.

برای چگالی و ظرفیت حرارتی ویژه مؤثر نانوسیال مورد بررسی، روابط (۴) و (۵) و برای لزجت و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم/ آب در دماهای مختلف روابط (۶) و (۷) بر مبنای برازش‌های خم ارائه شده توسط را و همکاران [۲۴] بر روی داده‌های تجربی انتخاب شده است. آنها همچنین به اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت این نانوسیال در یک لوله مستقیم دارای قطر  $D_{\text{pipe}} = 4/5 \text{ mm}$  و طول  $L_{\text{pipe}} = 1/0.1 \text{ m}$  با شرایط شار حرارتی دیواره یکنواخت پرداخته‌اند؛ که در مقاله حاضر، از این داده‌ها برای ارزیابی نتایج حل عددی انتقال حرارت نانوسیال استفاده خواهد شد:

$$\rho_{\text{eff}}(\varphi, T) = (1 - \varphi)\rho_{\text{bf}}(T) + \varphi\rho_{\text{np}} \quad (4)$$

$$C_{p,\text{eff}}(\varphi, T) = \frac{(1 - \varphi)(\rho(T)C_p(T))_{\text{bf}} + \varphi(\rho C_p)_{\text{np}}}{\rho_{\text{eff}}(\varphi, T)} \quad (5)$$

$$\mu_{\text{eff}}(\varphi, T) = \mu_{\text{bf}}(T) \exp\left[\frac{4/91\varphi}{(0/2092 - \varphi)}\right] \quad (6)$$

روش‌های عددی در مهندسی، سال ۳۶، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۶

این میدان سرعت جدید معادله پیوستگی را ارضا می‌کند:

$$\iint \bar{V}^{n+1} \cdot d\bar{A} = \iint (\bar{V}_c + \bar{V}') \cdot d\bar{A} = 0 \quad (14)$$

آن چنان که گفته شد نقص در میدان سرعت  $\bar{V}'$ ، ناشی از نقص در میدان فشار است، در نتیجه کمیت تصحیح سرعت  $\bar{V}_c$  را می‌توان تنها تابعی از میدان فشار در نظر گرفت. از آنجایی که فشار در حوزه سرعت ایجاد چرخش نمی‌کند بنابراین کمیت تصحیح سرعت مربوطه را می‌توان به یک تابع پتانسیل به نام پتانسیل سرعت،  $\Phi_p$ ، مطابق رابطه (۱۵) ربط داد:

$$\bar{V}_c = \nabla \Phi_p \quad (15)$$

از جایگزینی رابطه (۱۵) در معادله پیوستگی (۱۴)، یک معادله پواسون برای تصحیح سرعت مطابق رابطه (۱۵) حاصل می‌شود:

$$\iint \nabla \Phi_p \cdot d\bar{A} = -\iint \bar{V}' \cdot d\bar{A} \quad (16)$$

معادله (۱۶) با استفاده از روش GMRES حل می‌شود. شرایط مرزی این معادله به این صورت است که، برای نیم‌رخ سرعت معلوم در ورودی جریان، در روی دیواره‌های کانال و ورودی آن، گرادیان  $\Phi_p$  برابر صفر و در خروجی  $\Phi_p = 0$  در نظر گرفته می‌شود. روش GMRES نرخ همگرایی حل معادله پواسون را برای جریان‌های داخلی، در مقایسه با سایر روش‌های حل تکرار متوالی فوق تخفیف مرسوم، افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌دهد. با به‌دست آمدن تابع پتانسیل  $\Phi_p$ ، تصحیح سرعت  $\bar{V}_c$  نیز به‌دست می‌آید. حال باید میدان فشار را تصحیح کرد. تصحیح فشار  $\alpha$  به‌صورت رابطه (۱۷) در نظر گرفته می‌شود:

$$p^{n+1} = p^n + \alpha \quad (17)$$

ارتباط بین تصحیح فشار و تصحیح سرعت با استفاده از معادله اندازه حرکت در رابطه (۱۸) ارائه شده است:

$$\rho \frac{\bar{V}_c}{\Delta t} = -\nabla \alpha \quad (18)$$

در نتیجه با محاسبه تابع  $\Phi_p$  از معادله (۱۲) و قرار دادن آن در روابط (۱۱) و (۱۸)، کمیت‌های تصحیح سرعت و تصحیح فشار به‌دست می‌آیند و به‌دنبال آن میدان سرعت جدید از رابطه (۱۳) و میدان فشار جدید از رابطه (۱۷) حاصل می‌شوند.

علاوه بر این، در روش عددی حاضر به‌منظور افزایش سرعت

همگرایی عددی میدان جریان، یک تصحیح فشار به‌منظور برقراری معادله پیوستگی در هر مقطع لوله انجام می‌گیرد. به این‌صورت که انحراف سرعت متوسط در هر سطح مقطع از سرعت متوسط ورودی توسط رابطه (۱۹) تعریف می‌شود:

$$\Delta U' = \frac{\iint \bar{V} \cdot d\bar{A}}{A_c} - \bar{V} \quad (19)$$

که در آن  $\bar{V}$  سرعت متوسط ورودی،  $A_c$  سطح مقطع محلی لوله و جمله اول سمت راست معادله (۱۹) معرف سرعت متوسط محوری در هر مقطع است.  $\Delta U'$ ، نقصان مقطعی سرعت را می‌توان به یک تصحیح فشار مقطعی از طریق معادله شبه اویلری (۲۰) ربط داد:

$$\rho \frac{\Delta U'}{\Delta t} = -\bar{V} p' \quad (20)$$

$p'$ ، تصحیح فشار بر مبنای نقصان محلی سرعت مقطعی است که برای کلیه نقاط واقع در مقطع یکسان است. این تصحیح فشار به مقدار فشار به‌دست آمده بر مبنای معادله پیوستگی که برای کلیه نقاط حوزه حل محاسبه می‌شود، اضافه شده و در محاسبه حوزه سرعت به‌کار می‌رود. این تصحیح فشار جدید، باعث افزایش قابل ملاحظه سرعت همگرایی می‌شود.

لازم به‌ذکر است که علی‌رغم حل معادلات روش عددی حاضر، تمام نتایج عددی پس از رسیدن حل معادلات ناپایا در به شرایط جریان پایا ارائه خواهند شد.

#### ۴- ارزیابی حل عددی

از برنامه نوشته شده توسط نویسندگان به زبان فرترن برای حل عددی معادلات حاکم به‌روش حجم کنترل استفاده شده است. برای بررسی اثرات اندازه شبکه و شرط مرزی بر نتایج حل، مطالعات وسیعی بر روی لوله‌های خمیده  $90^\circ$  و  $180^\circ$  صورت گرفت. برای پرهیز از اثرات احتمالی شرایط مرزی خروجی و ورودی جریان، به ورودی و خروجی خم، لوله‌های مستقیم به نمونه‌ای از آن در جدول ۱ آمده است)، شبکه‌بندی‌های  $101 \times 42 \times 41$  برای لوله مستقیم،  $133 \times 42 \times 41$  برای لوله خمیده  $90^\circ$  و  $211 \times 42 \times 41$  برای لوله خمیده  $180^\circ$  انتخاب شد که

جدول ۱- بررسی استقلال حل عددی از شبکه تولید شده

هندسه	گره‌بندی	$\Delta p$ (Pa)	$\Delta T$ (°C)	$\bar{h}$ (W/m <sup>2</sup> K)
لوله مستقیم	۷۱×۳۰×۴۱	۲۳۲/۶۵	۱۰/۵۲	۸۳۷/۷۳
	۱۰۱×۴۲×۴۱	۲۳۳/۰۶	۱۰/۳۷	۸۵۳/۴۵
	۱۵۱×۵۰×۴۱	۲۳۳/۰۷	۱۰/۲۶	۸۷۳/۵۲
لوله خمیده ۹۰°	۱۳۳×۳۰×۳۱	۳۱۲/۲۹	۱۰/۲۵	۱۴۵۹/۸۳
	۱۳۳×۴۲×۴۱	۳۱۵/۱۲	۱۰/۴۲	۱۴۴۴/۶۹
	۱۳۳×۵۰×۴۱	۳۱۷/۴۷	۱۰/۱۱	۱۴۸۷/۲۰
	۲۱۱×۴۲×۴۱	۳۱۶/۳۵	۱۰/۲۵	۱۴۴۶/۵۶
	۲۵۱×۴۲×۴۱	۳۱۶/۰۵	۱۰/۱۷	۱۴۴۹/۴۲
لوله خمیده ۱۸۰°	۱۳۳×۴۲×۴۱	۳۴۶/۳۲	۱۰/۴۰	۱۶۳۲/۴۹
	۲۱۱×۳۰×۳۱	۳۴۲/۸۳	۱۰/۴۰	۱۶۲۳/۹۶
	۲۱۱×۴۲×۴۱	۳۴۷/۳۳	۱۰/۴۲	۱۶۳۴/۲۷
	۲۱۱×۵۰×۴۱	۳۴۸/۱۸	۱۰/۴۴	۱۶۳۴/۵۶
	۲۵۱×۴۲×۴۱	۳۴۷/۶۹	۱۰/۴۲	۱۶۴۶/۱۹

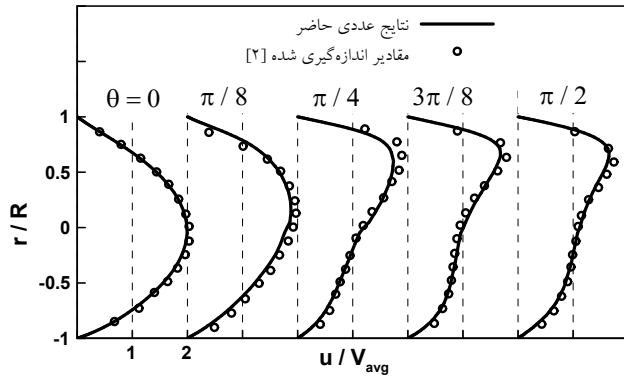
آگراوال و همکاران [۴] برای یک لوله خمیده ۱۸۰° با نسبت انحنای  $\alpha = \frac{1}{V}$  (قطر  $D_{\text{pipe}} = 38.1 \text{ mm}$ )، و سرعت ورودی  $U_{\text{in}} = 0.181 \text{ m/s}$  (عدد رینولدز ۲۴۲ و عدد دین ۹۱)، مقایسه شده است. سرعت جریان در ورودی این لوله دارای پروفیل تخت است. نتایج این مقایسه در شکل (۳)، برای سرعت محوری بی‌بعد (نسبت به سرعت ورودی) روی خطوط مشخص شده در شکل (۴)، در مقاطع مختلف خم، ارائه شده است که تطابق مطلوبی بین نتایج مشاهده می‌شود.

همان‌طور که قبلاً ذکر شد روابط (۶) و (۷) برای نانوسیال اکسید آلومینیوم/ آب توسط رأ و همکاران [۲۴] ارائه شده است. آنها همچنین انتقال حرارت جابه‌جایی آرام و اجباری این نانوسیال داخل یک لوله مستقیم را بررسی کرده‌اند. به‌منظور ارزیابی صحت مدل‌سازی جریان و انتقال حرارت توسط معادلات حاکم (۱) تا (۳)، به‌همراه روابط (۴) تا (۷) مربوط به خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال اکسید آلومینیوم/ آب، ضریب انتقال حرارت محلی در طول لوله مستقیم با نتایج آزمایشگاهی موجود در شکل (۵) مقایسه و تطابق مناسبی حاصل شده است. در این شکل، علاوه بر عدد رینولدز، با توجه به داده‌های مرجع [۲۴]، دبی حجمی برحسب گالن بر دقیقه نیز ارائه شده است.

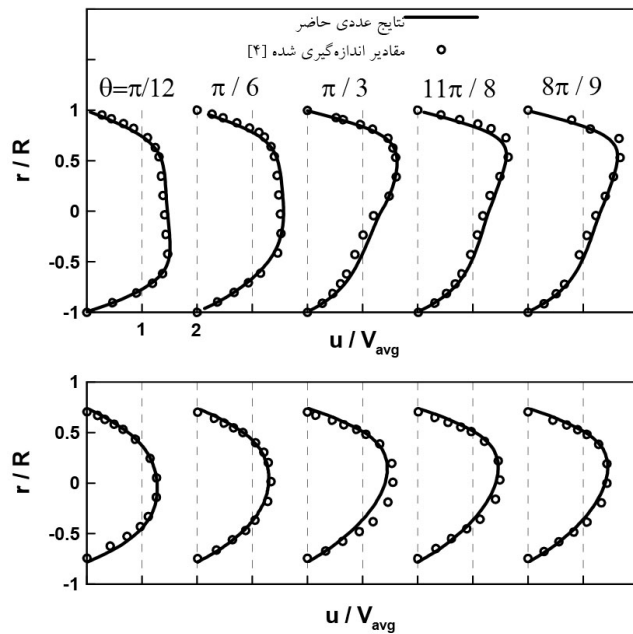
به‌ترتیب معرف تعداد گره در سه راستای شعاعی، محیطی و محوری است. همچنین، در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و نظری موجود، نسبت انقباض در راستای شعاعی ۱/۱۱ برای لوله‌های خمیده و ۱/۱۵ برای لوله مستقیم در نظر گرفته شد. همچنین گره‌بندی انتخاب شده به‌گونه‌ای بوده است که در لوله‌های مستقیم اضافه شده به ورودی و خروجی خم، حداقل سه گره در راستای محوری وجود داشته باشد.

برای ارزیابی روش حل عددی برای خم ۹۰°، نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط وندیوس و همکاران [۲] برای یک لوله خمیده ۹۰° به قطر  $D_{\text{pipe}} = 8 \text{ mm}$  و شعاع انحنای  $R_c = 24 \text{ mm}$ ،  $\alpha = \frac{1}{6}$ ، در عدد رینولدز ۳۰۰ و عدد دین ۱۲۲،  $(De = Re\sqrt{\alpha})$  دارای پروفیل ورودی توسعه یافته، مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در شکل (۲)، برای سرعت محوری بی‌بعد (نسبت به سرعت متوسط ورودی) ارائه شده که تطابق مطلوبی بین نتایج مشاهده می‌شود. روی محور عمودی این شکل، عدد ۱- معرف موقعیت دیواره داخلی و ۱ بیانگر دیواره خارجی خم است.

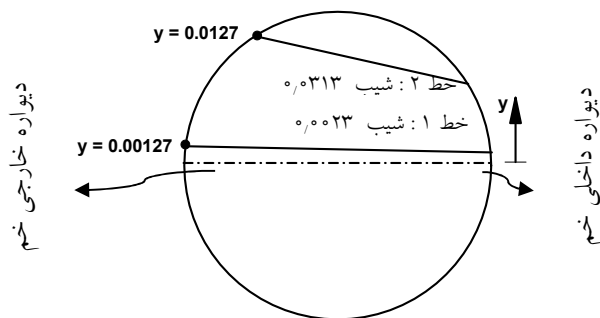
از طرف دیگر برای ارزیابی روش حل عددی برای خم ۱۸۰°، نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط



شکل ۲- سرعت بی بعد محوری در مقاطع مختلف خم  $90^\circ$  در صفحه تقارن لوله در مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده موجود [۲] در عدد رینولدز  $300$

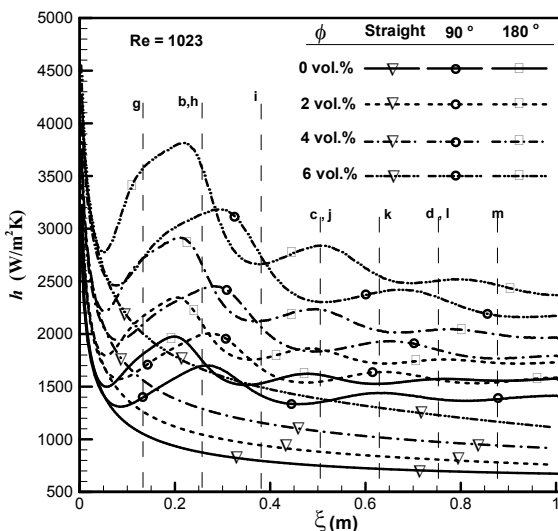


شکل ۳- سرعت بی بعد محوری در مقاطع مختلف خم  $18^\circ$  در مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده موجود در عدد رینولدز  $242$   
 الف) روی خط ۱ و ب) روی خط ۲ (مشخص شده در شکل ۴)

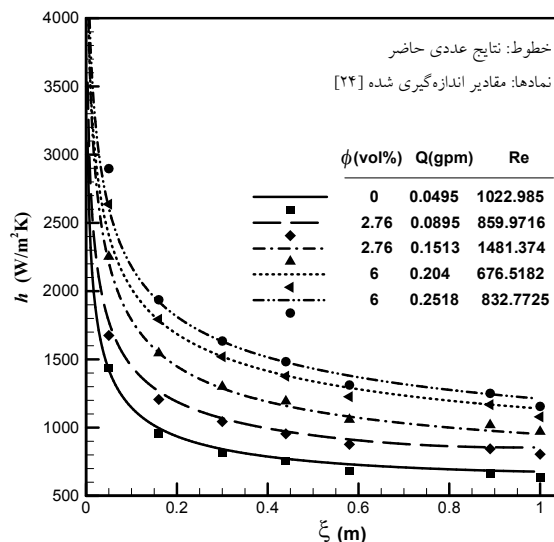


شکل ۴- موقعیت خطوط ۱ و ۲ (مشخص شده در شکل ۳) در یک مقطع اختیاری از لوله خمیده  $18^\circ$





شکل ۶- تغییرات ضریب انتقال حرارت محلی در طول لوله‌های مختلف و در کسرهای حجمی متفاوت از نانوسیال اکسید آلومینیوم/ آب



شکل ۵- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی نانوسیال در طول لوله در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی [۲۴] در اعداد رینولدز و کسرهای حجمی مختلف

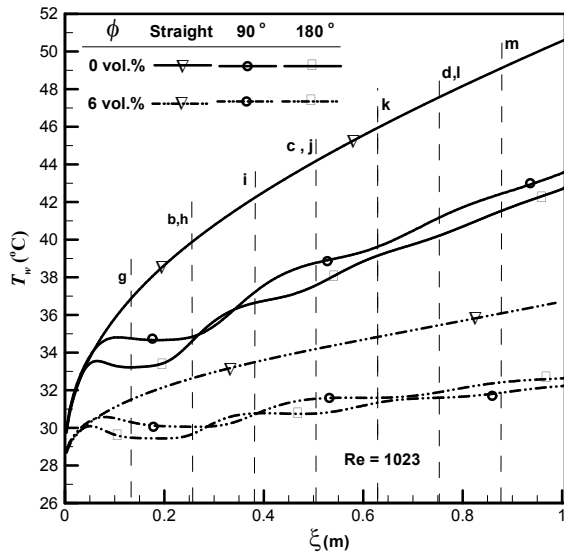
(۶)، وجود خم، ضریب انتقال حرارت را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. همچنین به‌طور کلی، این افزایش در خم  $180^\circ$  نسبت به خم  $90^\circ$  بیشتر است، زیرا جریان ثانویه ایجاد شده در اثر نیروی گریز از مرکز باعث اختلاط بیشتر جریان می‌شود که دمای یکنواخت‌تر در هر مقطع را نتیجه می‌دهد و به کاهش دمای دیواره منجر می‌شود.

از طرف دیگر، در یک کسر حجمی ثابت از نانوذرات، با توجه به شرایط شار حرارتی دیواره ثابت، دمای میانگین سیال،  $T_m$ ، برای همه لوله‌ها، آن‌چنان که در شکل (۷) نشان داده شده، یکسان است، و به این ترتیب اختلاف بین دمای میانگین سیال و دمای دیواره، در لوله‌های خمیده نسبت به لوله مستقیم کاهش می‌یابد؛ این امر باعث افزایش ضریب انتقال حرارت در لوله‌های خمیده می‌شود. برای مثال این اختلاف دما در مورد نانوسیال با کسر حجمی صفر (سیال پایه) در مقطع  $\xi = 0.132\text{m}$ ، برای لوله‌های مستقیم، خمیده  $90^\circ$  و خمیده  $180^\circ$  به ترتیب برابر حدود ۹،  $6/5$  و  $3/5$  درجه سلسیوس است که منجر به افزایش حدود  $30\%$  و  $70\%$  در ضریب انتقال

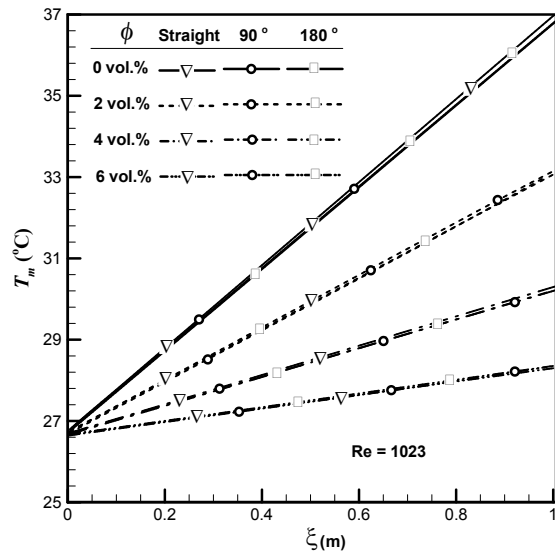
همچنین در شکل (۵) متغیر  $\xi$  برحسب متر بیانگر راستای محوری لوله‌ها است. این تطابق بین نتایج عددی و آزمایشگاهی، نشان‌دهنده صحت مدل‌سازی تک فاز به‌کار رفته و مناسب بودن خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال مورد بررسی در پیش‌گویی انتقال حرارت جابه‌جایی آن است. در ادامه از این مدل‌سازی و خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال مورد بررسی برای شبیه‌سازی جریان در لوله‌های خمیده استفاده شده است.

## ۵- نتایج و بحث

نتایج حل عددی پس از رسیدن شرایط جریان و دما به حالت پایا ارائه شده‌اند. در شکل (۶) ضریب انتقال حرارت محلی نانوسیال اکسید آلومینیوم/ آب در کسرهای حجمی مختلف و برای جریان در هندسه‌های مختلف با عدد رینولدز  $Re = \frac{\rho_{eff} U_{in} D_{pipe}}{\mu_{eff}} = 1023$  و دمای سیال ورودی  $26/51^\circ\text{C}$  (برگرفته از یکی از شرایط جریان در شکل (۵)) ارائه شده است. همچنین در این شکل به‌منظور درک بهتر از جریان، مقاطع معرفی شده در شکل (۱)، مشخص شده‌اند. با توجه به شکل



شکل ۸- تغییرات دمای دیواره در طول لوله‌های مختلف و در کسرهای حجمی متفاوت از نانوسیال اکسید آلومینیوم/ آب



شکل ۷- تغییرات دمای میانگین مقطع در طول لوله‌های مختلف و در کسرهای حجمی متفاوت از نانوسیال اکسید آلومینیوم/ آب

جدول ۲- نسبت خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال‌ها نسبت به سیال پایه در  $T_{in} = 26/51^\circ C$

$\frac{k_{eff}}{k_{bf}}$	$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{bf}}$	$\frac{C_{p,eff}}{C_{p,bf}}$	$\frac{\rho_{eff}}{\rho_{bf}}$	$\phi$ (vol.%)
۱/۰۹	۱/۶۸	۰/۹۴	۱/۰۶	۲
۱/۱۸	۳/۱۹	۰/۸۹	۱/۱۲	۴
۱/۲۷	۷/۲۰	۰/۸۴	۱/۱۸	۶

از آنجایی که این افزایش لزجت بسیار بیشتر از افزایش چگالی نانوسیال است (با توجه به جدول ۲)، در نتیجه برای ثابت نگه داشتن عدد رینولدز، سرعت ورودی افزایش داده شده است. این یعنی افزایش دبی جرمی ورودی که (علی‌رغم کاهش ظرفیت حرارتی نانوسیال با افزودن نانوذرات) منجر به کاهش دمای میانگین سیال در شرایط شار حرارتی دیواره ثابت و دمای سیال ورودی ثابت می‌شود.

نکته دیگری که از شکل (۷) می‌توان دید این است که دمای میانگین سیال در هر مقطع، در یک کسر حجمی مشخص، مستقل از نوع هندسه است. زیرا شار حرارتی اعمالی به هر سه لوله، طول و قطر آنها یکسان است.

در شکل (۸)، دمای میانگین دیواره در هر مقطع از لوله، در

حرارت محلی مربوط به لوله‌های خمیده به ترتیب  $90^\circ$  و  $180^\circ$  نسبت به لوله مستقیم می‌شود.

همچنین با توجه به شکل (۶)، در هر هندسه جریان، افزایش کسر حجمی نانوذرات، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. شکل‌های (۷) و (۸) بیانگر این نکته هستند که دمای میانگین سیال و دمای میانگین دیواره در هر مقطع، هر دو با ازدیاد غلظت نانوذرات کاهش می‌یابند، اما میزان کاهش دمای میانگین سیال چشم‌گیرتر است، که باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود.

دلیل کاهش دمای میانگین سیال در هر مقطع با افزایش غلظت نانوذرات در یک عدد رینولدز ثابت این است که افزودن نانوذرات به سیال افزایش لزجت نانوسیال را به همراه دارد؛ و

جدول ۳- ضریب انتقال حرارت میانگین، اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی، و افت فشار جریان نانوسیال در هندسه‌های مختلف و  $Re = 1023$

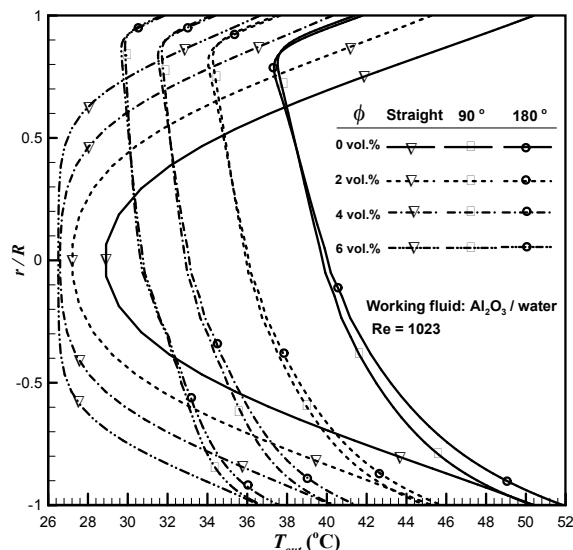
هندسه	$\phi$ (vol.%)	$\bar{h}$ (W/m <sup>2</sup> K)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta p$ (Pa)	$\eta$
لوله مستقیم	۰	۸۵۳	۱۰/۱۲	۲۳۳	۱
	۲	۱۰۰۷	۶/۵۱	۶۵۲	۰/۴۲
	۴	۱۲۲۷	۳/۶۵	۲۳۳۶	۰/۱۴
	۶	۱۵۵۵	۱/۸۲	۱۱۷۴۴	۰/۰۳۶
لوله خمیده ۹۰°	۰	۱۴۵۱	۱۰/۳۱	۳۱۵	۱
	۲	۱۶۷۸	۶/۵۵	۸۷۱	۰/۴۲
	۴	۲۰۰۶	۳/۷۳	۳۰۷۰	۰/۱۴
	۶	۲۵۴۳	۱/۸۲	۱۵۲۱۳	۰/۰۳۶
لوله خمیده ۱۸۰°	۰	۱۶۲۷	۱۰/۱۵	۳۴۹	۱
	۲	۱۸۷۱	۶/۴۷	۹۶۱	۰/۴۲
	۴	۲۲۴۵	۳/۶۴	۳۳۹۰	۰/۱۴
	۶	۲۸۳۹	۱/۷۷	۱۶۷۷۴	۰/۰۳۶

این افزایش در لوله خمیده ۱۸۰° به دلیل انحنای شدیدتر (عدد دین بزرگتر) و در نتیجه جریان ثانویه قوی‌تر، بیشتر است و زودتر اتفاق می‌افتد. بیشترین افزایش ضریب انتقال حرارت داخل خم، در حدود یک چهارم اولیه لوله خمیده (مقطع b برای لوله ۹۰° و مقطع h برای لوله ۱۸۰°) اتفاق می‌افتد که نشان‌دهنده جریان ثانویه قوی در این مقاطع است. در ادامه با رشد لایه مرزی حرارتی و نزدیکی به رفتار جریان توسعه یافته، اثرات جریان ثانویه کاهش می‌یابد و ضریب انتقال حرارت تمایل به کاهش پیدا می‌کند، هر چند با تقویت محلی جریان ثانویه در سایر مقاطع خم، ضریب انتقال حرارت به‌طور محلی افزایش می‌یابد. با توجه به داده‌های جدول ۳، میزان افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین در اثر جریان‌های ثانویه برای سیال پایه (مستقل از اثر نانوذرات) در مورد لوله خمیده ۹۰° و ۱۸۰° نسبت به لوله مستقیم، به ترتیب ۷۰٪ و ۹۰٪ است.

در مورد بررسی اثر نانوذرات به‌صورت مستقل از جریان ثانویه در لوله خمیده نیز می‌توان در شکل (۶)، به مقایسه سیال پایه و نانوسیال با کسر حجمی نانوذرات ۶٪ در یک هندسه ثابت پرداخت، زیرا در این شرایط به دلیل ثابت بودن عدد دین، جریان ثانویه در کسرهای حجمی مختلف نانوذرات، الگوی

طول لوله برای هندسه‌های مختلف رسم شده که برای وضوح بیشتر تنها کسر حجمی صفر و ۶٪ از نانوذرات ارائه شده است. با توجه به شکل، دمای دیواره لوله‌های خمیده نسبت به لوله مستقیم بسیار کمتر است که با افزایش زاویه خم، این دما کاهش بیشتری می‌یابد. تنها به‌صورت مقطعی، در قسمت کمی از لوله‌ها (بعد از مقطع b) دمای دیواره در خم ۹۰° نسبت به خم ۱۸۰° کاهش بیشتری می‌یابد که در همین نقاط با توجه به شکل (۶) ضریب انتقال حرارت محلی در خم ۹۰° بیشتر از خم ۱۸۰° می‌شود.

در ادامه برای بررسی بهتر اثر نانوسیال‌ها بر انتقال حرارت داخل هندسه‌های خمیده، با توجه به شکل (۶)، اثر نانوسیال در کسر حجمی ۶٪ بر ضریب انتقال حرارت محلی در طول لوله و مقاطع مختلف لوله با جزئیات بیشتر توضیح داده می‌شود. با توجه به شکل (۶) حضور جریان ثانویه در هندسه خمیده باعث افزایش قابل ملاحظه ضریب انتقال حرارت نسبت به لوله مستقیم می‌شود. در مقاطع ابتدایی خم (قبل از مقطع g)، ضریب انتقال حرارت در لوله‌های خمیده مشابه لوله مستقیم در حال کاهش است، اما با شکل‌گیری و تقویت جریان‌های ثانویه در خم، ضریب انتقال حرارت به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد.



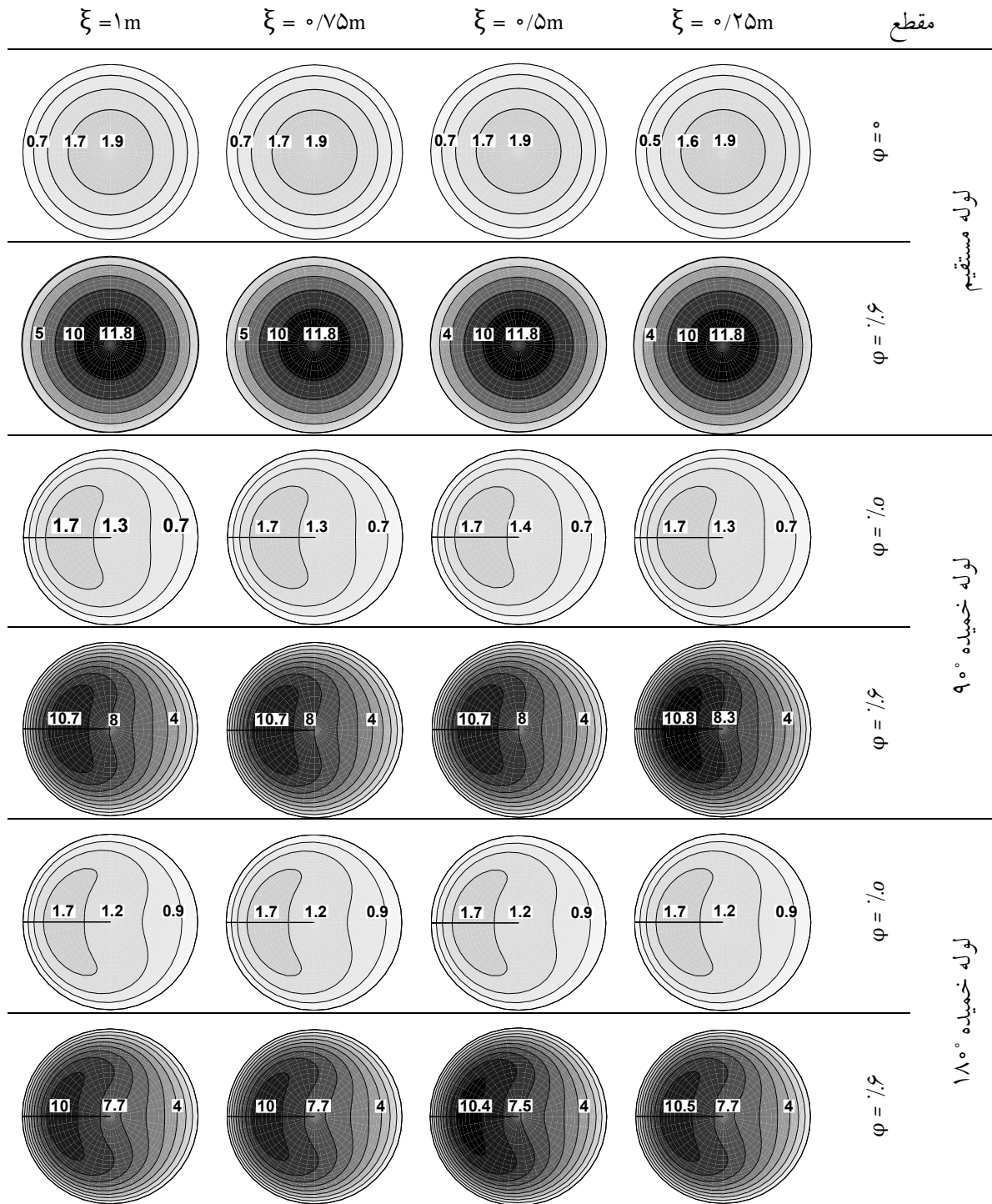
شکل ۹- پروفیل دمای سیال در مقطع خروجی از لوله‌ها، در کسرهای حجمی مختلف از نانوسیال اکسید آلومینیوم / آب

به‌منظور درک بهتر از الگوی جریان و انتقال حرارت در هندسه‌های مورد بررسی، کانتور سرعت بی‌بعد و کانتور دمای نانوسیال در چند مقطع یکسان از سه هندسه، در کسر حجمی صفر و ۶٪ به‌ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) رسم شده‌اند. لازم به‌ذکر است جهت مقایسه بهتر، کانتور سرعت در شکل (۱۰) نسبت به سرعت متوسط ورودی در شرایط مبنای  $Re=1023$  و کسر حجمی صفر، بی‌بعد شده است. با توجه به این شکل‌ها، در هندسه‌های خمیده، نقطه حداکثر سرعت جریان محوری (شکل (۱۱))، به‌دلیل نیروی گریز از مرکز به سمت دیواره خارجی خم متمایل می‌شود. افزایش سرعت در کناره دیواره خارجی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و به‌دنبال آن کاهش دما در این ناحیه نسبت به دیواره داخلی خم می‌شود. تشابه نسبی کانتورهای سرعت در مقاطع مختلف نشان‌دهنده رسیدن جریان به حالت توسعه یافته در هندسه‌های خمیده است؛ که این پدیده به‌دلیل نسبت انحنای بسیار کوچک خم‌های مورد بررسی اتفاق افتاده است. نکته قابل ذکر دیگر در شکل (۱۲) این است که، وجود جریان ثانویه در خم باعث اختلاط بهتر جریان و یکنواختی بیشتر دمایی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که با تقویت بیشتر جریان ثانویه

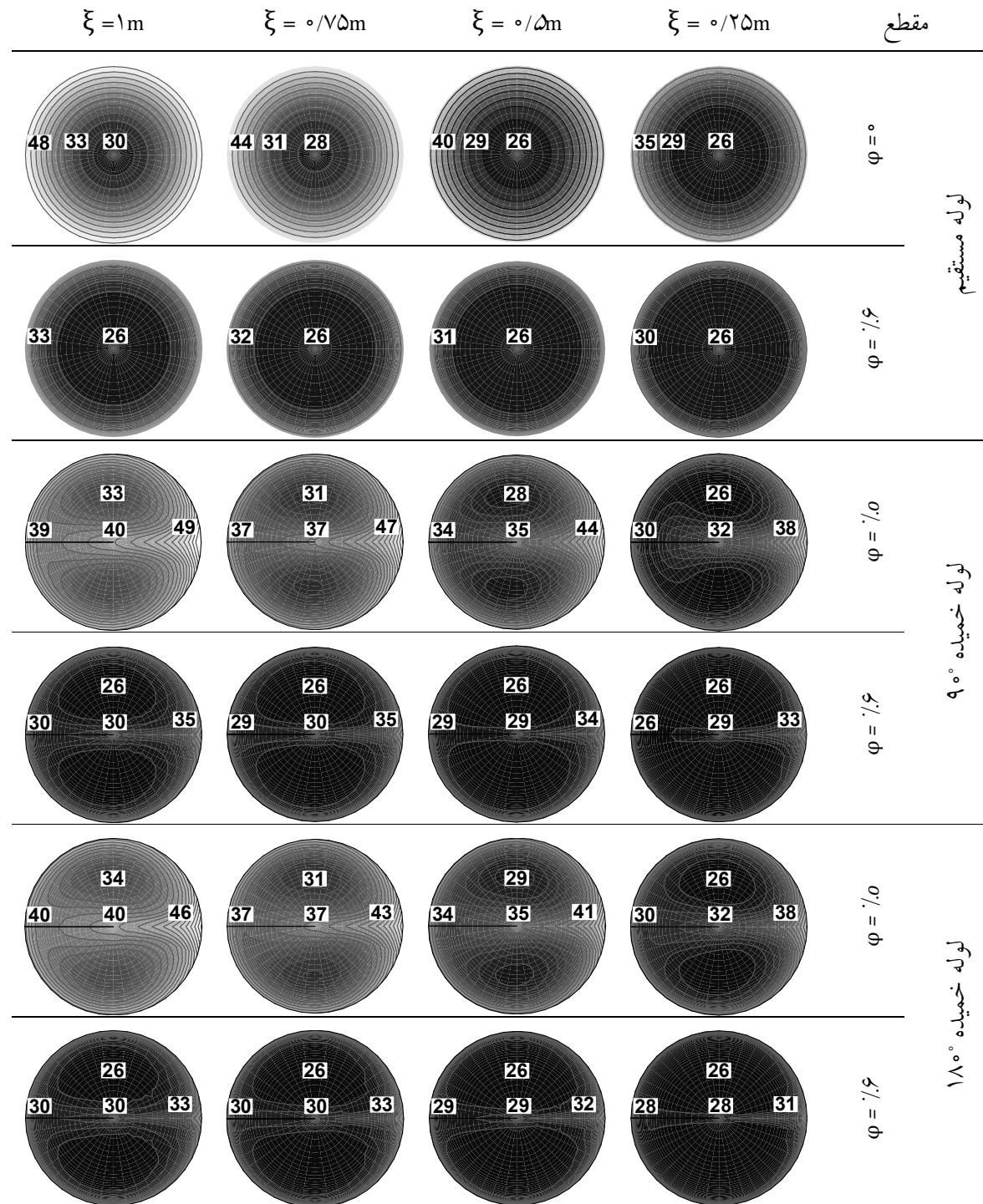
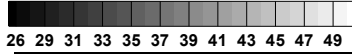
یکسانی خواهد داشت. در هندسه خمیده  $180^\circ$ ، افزودن ذرات بر رفتار ضریب انتقال حرارت داخل خم تأثیری چندانی نمی‌گذارد، اما میزان ضریب انتقال حرارت را بسیار افزایش می‌دهد. با توجه به جدول ۳، میزان افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین برای نانوسیال با کسر حجمی ۶٪ نسبت به سیال پایه برای هر دو لوله خمیده  $90^\circ$  و  $180^\circ$  حدود ۷۵٪ است.

آن چنان که قبلاً اشاره شد به‌دلیل اختلاط مناسب در اثر جریان ثانویه، جریان سیال در داخل خم از یکنواختی دمایی بیشتری نسبت به لوله مستقیم در هر مقطع برخوردار است. این پدیده در شکل (۹) مشاهده می‌شود که در آن پروفیل دمای مقطع خروجی لوله، در صفحه تقارن لوله، برای هندسه‌های مختلف و کسرهای حجمی مختلف نانوذرات ارائه شده است.

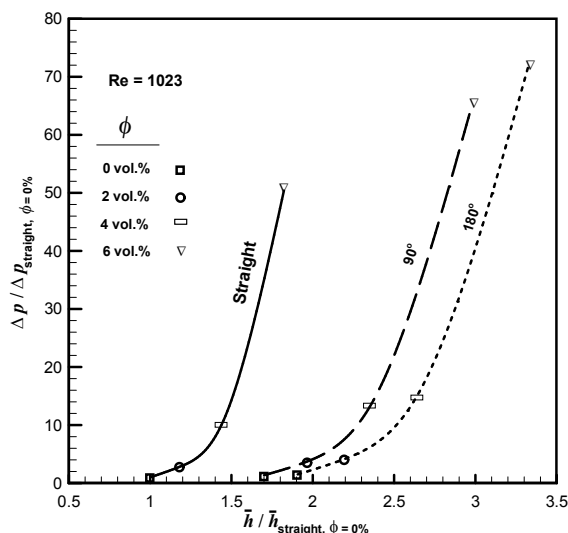
علاوه بر اثر خم بر یکنواختی دمایی جریان، افزودن نانوذرات نیز باعث یکنواختی دمایی بیشتر می‌شود؛ به‌گونه‌ای که برای لوله مستقیم حداکثر اختلاف دمای سیال در مقطع خروجی در کسر حجمی صفر برابر  $21^\circ C$  و در کسر حجمی ۶٪ برابر  $14.5^\circ C$  است.



شکل ۱۰- کانتور سرعت بی‌بعد نسبت به شرایط مینا، در مقاطع یکسان از سه هندسه، در کسرهای حجمی مختلف نانوذرات،  $Re = 1023$



شکل ۱۱- کانتور دما، در مقاطع یکسان از سه هندسه، در کسرهای حجمی مختلف نانوذرات،  $Re = 1023$



شکل ۱۲- میزان افزایش افت فشار و افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین نسبت به حالت مینا، در کسرهای حجمی مختلف ذرات و در سه هندسه متفاوت،  $Re = 1023$

پایه، نسبت به میزان افزایش افت فشار نانوسیال به سیال پایه است [۲۶]:

$$\eta = \frac{(\bar{h}_{nf} / \bar{h}_{bf})}{(\Delta p_{nf} / \Delta p_{bf})} \quad (21)$$

اگرچه افزایش بیشتر افت فشار نسبت به افزایش ضریب انتقال حرارت، به دلیل افزایش بیشتر لزجت سیال نسبت به ضریب هدایت حرارتی سیال در اثر افزودن نانوذرات به آن است که در جدول (۲) مشهود است. این امر کاربرد نانوسیال را با محدودیت روبه‌رو می‌کند؛ اما نکته مهم این است که افزودن نانوذرات به سیال پایه، مقادیر ضریب انتقال حرارت میانگین بالایی را نتیجه می‌دهد که برای کاربردهای انتقال حرارتی دارای اهمیت است. از طرف دیگر، کاهش چشم‌گیر اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی با افزودن نانوذرات در یک عدد رینولدز ثابت (که همراه با افزایش دبی سیال است)، بسیار مطلوب است؛ برای مثال در یک سیکل بسته انتقال حرارتی، که سیال خروجی باید به دمای ورودی برگردد، باعث کاهش تلفات حرارتی و کاهش هزینه‌های مربوطه می‌شود.

بررسی اثرات هندسه در جدول (۳) بیانگر این نکته است که هندسه‌های خمیده افت فشار بالایی نسبت به لوله مستقیم ایجاد

در خم  $180^\circ$  نسبت به خم  $90^\circ$ ، یکنواختی دمایی در خم  $180^\circ$  قابل ملاحظه‌تر است. همچنین افزایش غلظت نانوذرات که منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود، یکنواختی دمایی بیشتر مقطع را در پی دارد.

یکی از مشکلات کاربرد لوله‌های خمیده، علی‌رغم بهبود نرخ انتقال حرارت، افت فشار شدید جریان در این نوع هندسه‌ها است که در ادامه به بررسی اثر آن بر کاربرد جریان نانوسیال‌ها در این هندسه‌ها پرداخته می‌شود. در جدول ۳ افت فشار جریان نانوسیال مورد بررسی در هندسه‌ها و کسرهای حجمی مختلف نانوذرات ارائه شده است. همچنین به منظور بررسی رفتار انتقال حرارتی نانوسیال، اختلاف دمای ورودی و خروجی، به همراه ضریب انتقال حرارت میانگین کلی در این جدول گزارش شده است. در یک هندسه مشخص، افزایش قابل ملاحظه‌ای در میزان افت فشار نانوسیال‌ها نسبت به سیال پایه وجود دارد؛ اگرچه افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین کلی نانوسیال نسبت به سیال پایه در این جدول مشهود است، اما این افزایش در مقابل افزایش افت فشار، آن چنان که پارامتر  $\eta$  نشان می‌دهد، ناچیز می‌نماید. پارامتر  $\eta$  در رابطه (۲۱) بیانگر میزان افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین نانوسیال به سیال

جدول ۴- درصد افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین و افت فشار جریان نانوسیال در هندسه‌های خمیده نسبت به لوله مستقیم در هر کسر حجمی،  $Re = 1023$

هندسه	$\phi$ (vol.%)	$\bar{h}$ Diff. (%)	$\Delta p$ Diff. (%)
لوله خمیده ۹۰°	۰	۷۰	۳۵
	۲	۶۶	۳۳
	۴	۶۳	۳۱
لوله خمیده ۱۸۰°	۶	۶۳	۲۹
	۰	۹۰	۵۰
	۲	۸۶	۴۷
	۴	۸۳	۴۵
	۶	۸۲	۴۳

جریان داخل لوله مستقیم و کسر حجمی ذرات برابر صفر (سیال پایه) در عدد رینولدز  $1023$  در نظر گرفته شده است. میزان افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین و میزان افزایش افت فشار در هندسه‌ها و کسرهای حجمی مختلف نسبت به این حالت مبنا در شکل (۱۲) ارائه شده است. برای مثال، در صورت نیاز به افزایش ۲ برابری ضریب انتقال حرارت میانگین نسبت به حالت مبنا، می‌توان سه حالت مختلف انتخاب کرد: (۱) استفاده از لوله مستقیم با جریان نانوسیال حاوی بیش از ۶٪ نانوذره که بیش از ۷۰٪ برابر افت فشار بیشتری نسبت به حالت مبنا ایجاد می‌کند؛ (۲) استفاده از لوله خمیده ۹۰° با جریان نانوسیال حاوی حدود ۲٪ نانوذره که حدود ۴ برابر افت فشار بیشتری ایجاد می‌کند؛ و (۳) استفاده از لوله خمیده ۱۸۰° با جریان نانوسیال حاوی حدود ۱٪ نانوذره که حدود ۲ برابر افت فشار بیشتری ایجاد می‌کند.

حال اگر در کاربرد مورد نظر، محدودیت افت فشاری مثلاً ۲۰٪ برابری نسبت به حالت مبنا وجود داشته باشد، سه گزینه قابل انتخاب در ادامه آمده است: (۱) استفاده از لوله مستقیم با جریان نانوسیال حاوی حدود ۵٪ نانوذره با افزایش حدود ۱٫۶ برابری در ضریب انتقال حرارت میانگین نسبت به حالت مبنا؛ (۲) استفاده از لوله خمیده ۹۰° با جریان نانوسیال حاوی حدود ۴٫۵٪ نانوذره با افزایش حدود ۲٫۵ برابری در ضریب

می‌کنند. همچنین ضریب انتقال حرارت میانگین در این هندسه‌ها افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد. اما برای یک کسر حجمی ثابت، اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی، همچنین مقدار پارامتر  $\eta$  در هندسه‌های مختلف تغییر چندانی ندارد، که این با ثابت در نظر گرفتن شار حرارتی دیواره و عدد رینولدز برای همه هندسه‌ها، قابل توضیح است.

در جدول ۴ از دیدگاه دیگری به میزان افزایش افت فشار در مقایسه با بهبود مشخصه‌های انتقال حرارتی نانوسیال‌ها در هندسه‌های خمیده پرداخته شده است. در این جدول، درصد افزایش افت فشار در هر کسر حجمی برای لوله‌های خمیده ۹۰° و ۱۸۰° نسبت به مقدار این کمیت در لوله مستقیم در کسر حجمی مربوطه گزارش شده است.

با توجه به جدول ۴، در یک کسر حجمی ثابت، درصد افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین در هندسه‌های خمیده نسبت به لوله مستقیم، در مقایسه با درصد افزایش افت فشار چشم‌گیرتر است. در نتیجه در یک کسر حجمی ثابت، عملکرد کلی لوله‌های خمیده مورد بررسی نسبت به لوله مستقیم بهتر بوده است.

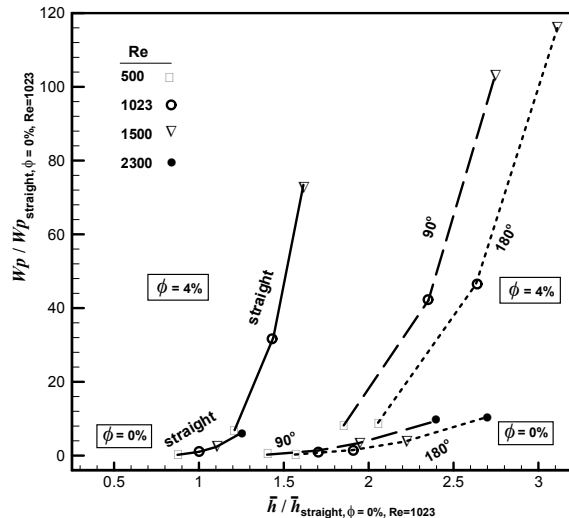
در ادامه مقاله، روشی برای انتخاب نانوسیال و هندسه مناسب برای کاربردهای خاص ارائه می‌شود. به این منظور یک نقطه عملکرد به‌عنوان حالت مبنا تعیین می‌شود و تغییرات در سایر حالات نسبت به این نقطه سنجیده می‌شود. این نقطه مبنا،



به حالت مبنای این مقاله (جریان سیال پایه در لوله مستقیم با  $Re=1023$ ) رسم شده است. بررسی افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین به میزان دو برابر نشان می‌دهد که برای لوله مستقیم، با در نظر گرفتن سیال پایه، امکان این مقدار افزایش در رژیم آرام (حتی تا رینولدز  $2300$ )، امکان‌پذیر نیست و نیاز به استفاده از نانوسیال و یا کاربرد لوله خمیده، با وجود اتلاف فشار چشم‌گیر وجود دارد.

نکته مهم دیگر اینکه شکل‌های (۱۲) و (۱۳) می‌توانند برای بررسی شرایط افت فشار و کار پمپ ثابت به‌جای شرایط عدد رینولدز ثابت برای جریان نانوسیال در لوله خمیده در نظر گرفته شوند. کاربردهای فراوانی وجود دارد که اهمیت افزایش نرخ انتقال حرارت به مراتب بیشتر از مشکلات پیش آمده در اثر افزایش توان پمپاژ است. شکل (۱۳) نشان می‌دهد که در یک لوله مستقیم حداکثر امکان افزایش توان پمپاژ (با حفظ جریان آرام) حدود  $2/7$  برابر است که تنها افزایش ضریب انتقال حرارت تا  $25\%$  را به همراه خواهد داشت و برای بهبود بیشتر انتقال حرارت، ناگزیر از استفاده از سایر روش‌ها مانند لوله خمیده و نانوسیال (حتی با وجود افزایش هزینه پمپاژ) است.

در انتها باید اشاره کرده که علاوه بر افت فشار، هزینه بالای نانوذرات و بحث پایداری نانوسیال‌ها از دیگر عوامل محدود کننده کاربرد نانوسیال‌ها هستند. محققین حوزه کاربرد نانو، امید دارند با بهبود روش‌های تولید نانوذرات در حجم انبوه و تجاری‌سازی هرچه بیشتر این نانوذرات، قیمت آن به‌شدت کاهش یابد؛ کما اینکه در طول سال‌های گذشته، این کاهش چشم‌گیر بوده است. از طرف دیگر، محققین نشان داده‌اند که با کسر حجمی بسیار اندک نانوذرات در نانوسیال، می‌توان نتایج انتقال حرارتی مطلوبی گرفت که این امر هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین با بهبود روش‌های تولید نانوسیال‌ها، پایداری مطلوب نانوسیال‌ها را می‌توان انتظار داشت. در کنار این موارد، ساخت نانوسیال‌ها با لزجت کم (حتی کمتر از سیال پایه [۲۷])، به رفع مشکل افزایش افت فشار و توان پمپاژ نانوسیال‌ها کمک شایان توجهی خواهد کرد.



شکل ۱۳- میزان افزایش افت فشار و افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین نسبت به حالت مینا، در کسرهای حجمی مختلف نانوذرات، در سه هندسه مورد بررسی و اعداد رینولدز متفاوت

انتقال حرارت میانگین نسبت به حالت مینا؛ و (۳) استفاده از لوله خمیده  $180^\circ$  با جریان نانوسیال حاوی حدود  $45\%$  نانوذره با افزایش حدود  $2/75$  برابری در ضریب انتقال حرارت میانگین نسبت به حالت مینا. با توجه به شکل (۱۲)، به کمک نانوسیال و هندسه‌های مورد بررسی در این قسمت در  $Re=1023$  می‌توان تا حداکثر حدود  $3/3$  برابر ضریب انتقال حرارت میانگین را نسبت به حالت مینا افزایش داد.

با توجه به توضیحات قبل، افت فشار و در نتیجه توان پمپاژ قابل ملاحظه در اثر کاربرد نانوسیال‌ها و لوله خمیده، قابلیت افزایش انتقال حرارت از این دو روش را با محدودیت روبه‌رو می‌کند. نکته‌ای که ممکن است به ذهن متبادر شود این است که به‌جای استفاده از این روش‌ها (خصوصاً افزودن نانوذرات)، شاید به‌توان با افزایش کار پمپ (افزایش عدد رینولدز) در جریان سیال پایه در لوله مستقیم این مقاله، همان میزان افزایش انتقال حرارت را نتیجه گرفت.

برای بررسی این پیشنهاد، در شکل (۱۳) میزان افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین و میزان افزایش توان پمپ در اعداد رینولدز مختلف، همچنین کسر حجمی صفر و  $4\%$  نسبت

## ۶- نتیجه گیری

حل عددی جریان و انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری و آرام در سه هندسه مختلف به طول و قطر لوله یکسان شامل لوله مستقیم، لوله خمیده  $90^\circ$  و  $180^\circ$  تحت شرایط شار حرارتی دیواره یکنواخت انجام گرفت و الگوی جریان و انتقال حرارت نانوسیال اکسید آلومینیوم/ آب در این هندسه‌ها بررسی شد. جریان ثانویه ایجاد شده در اثر نیروی گریز از مرکز در هندسه‌های خمیده باعث اختلاط بیشتر جریان و افزایش یکنواختی دمای سیال و کاهش دمای میانگین سیال و دمای دیواره می‌شود. همچنین ضریب انتقال حرارت را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد که این افزایش در خم  $180^\circ$  نسبت به خم  $90^\circ$  مورد بررسی بیشتر است.

افزایش کسر حجمی نانوذرات نیز افزایش ضریب انتقال حرارت و یکنواختی دمایی بیشتر نانوسیال را در پی دارد. اما در یک هندسه مشخص، میزان افزایش افت فشار در جریان نانوسیال مورد بررسی نسبت به سیال پایه بسیار بیشتر از مقدار

افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین آن است. این رفتار به دلیل افزایش بیشتر لزجت نسبت به ضریب هدایت حرارتی سیال در اثر افزودن نانوذرات به آن است.

در یک کسر حجمی ثابت، درصد افزایش ضریب انتقال حرارت میانگین در هندسه‌های خمیده نسبت به لوله مستقیم، در مقایسه با درصد افزایش افت فشار چشم‌گیرتر است، که بیانگر عملکرد انتقال حرارتی مناسب هندسه‌های خمیده مورد بررسی است.

در این مقاله روشی برای انتخاب نانوسیال و هندسه مناسب جریان با توجه به کاربرد مورد نظر ارائه شد.

## سپاسگزاری

بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی از دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، بابت حمایت مالی از این پژوهش در قالب طرح پژوهشی به شماره قرارداد ۱۶۱۳ ابراز می‌شود.

## مراجع

1. Naphon, P., and Wongwises, S., "A Review of Flow and Heat Transfer Characteristics in Curved Tubes", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 10, pp. 463-490, 2006.
2. Van De Vosse, F. N., Van Steenhoven, A. A., Segal, A., and Janssen, J. D., "Finite Element Analysis of the Steady Laminar Entrance Flow in a  $90^\circ$  Curved Tube", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 9, pp. 275-287, 1989.
3. Kumar, V., Gupta, P., and Nigam, K. D. P., "Fluid Flow and Heat Transfer in Curved Tubes with Temperature-Dependent Properties", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 46, No. 10, pp. 3226-3236, 2007.
4. Agrawal, Y., Talbot, L., and Gong, K., "Laser Anemometer Study of Flow Development in Curved Circular Pipes", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 85, pp. 497-518, 1978.
5. Li, Q., and Xuan, Y., "Convective Heat Transfer and Flow Characteristics of Cu-Water Nanofluid", *Science in China, Series E: Technological Sciences*, Vol. 45, No. 4, pp. 408-416, 2002.
6. Wen, D., and Ding, Y., "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.
7. Yang, Y., Zhang, Z. G., Grulke, E. A., Anderson, W. B., and Wu, G., "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. حسینی‌پور، ا.، زینالی هریس، س. و شنبیدی، م.، "بررسی تجربی ضریب انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال نانولوله کربن-آب تحت بار حرارتی ثابت"، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، سال ۱۴، شماره ۱۳، ص ۱۹-۲۶، ۱۳۹۳.
9. Aminfar, H., and Motallebzadeh, R., "Numerical Investigation of the Effects of Nanoparticle Diameter on Velocity Field and Nanoparticle Distribution of Nanofluid using Lagrangian-Eulerian Approach", *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 32, No. 9, pp. 1311-1317, 2011.
10. Moraveji, M. K., Darabi, M., Haddad, S. M. H., and Davarnejad, R., "Modeling of Convective Heat Transfer of a Nanofluid in the Developing Region of Tube Flow with Computational Fluid Dynamics",

- International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 9, pp. 1291-1295, 2011.
11. Zeinali Heris, S., Noie, S. H., Talaii, E., and Sargolzaei, J., "Numerical Investigation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Water Nanofluid Laminar Convective Heat Transfer Through Triangular Ducts", *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, No. 1, pp. 179-189, 2011.
  12. Shariat, M., Akbarinia, A., Nezhad, A. H., Behzadmehr, A., and Laur, R., "Numerical Study of two Phase Laminar Mixed Convection Nanofluid in Elliptic Ducts", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 14-15, pp. 2348-2359, 2011.
  13. Akbarinia, A., and Behzadmehr, A., "Numerical Study of Laminar Mixed Convection of a Nanofluid in Horizontal Curved Tubes", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, No. 8-9, pp. 1327-1337, 2007.
  14. Akbarinia, A., "Impacts of Nanofluid Flow on Skin Friction Factor and Nusselt Number in Curved Tubes with Constant Mass Flow", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, No. 1, pp. 229-241, 2008.
  15. Akbarinia, A., and Laur, R., "Investigating the Diameter of Solid Particles Effects on a Laminar Nanofluid Flow in a Curved Tube using a two Phase Approach", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 30, No. 4, pp. 706-714, 2009.
  16. Sasmito, A. P., Kurnia, J. C., and Mujumdar, A. S., "Numerical Evaluation of Laminar Heat Transfer Enhancement in Nanofluid Flow in Coiled Square Tubes", *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, pp 1-14, 2011.
  17. Bahremand, H., Abbassi, A., and Saffar-Avval, M., "Experimental and Numerical Investigation of Turbulent Nanofluid Flow in Helically Coiled Tubes under Constant Wall Heat Flux using Eulerian-Lagrangian Approach", *Powder Technology*, Vol. 269, pp. 93-100, 2015.
  18. Azmi, W. H., Sharma, K. V., Sarma, P. K., Mamat, R., Anuar, S., and Syam Sundar, L., "Numerical Validation of Experimental Heat Transfer Coefficient with SiO<sub>2</sub> Nanofluid Flowing in a Tube with Twisted Tape Inserts", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 73, No. 1, pp. 296-306, 2014.
  19. Khoshvaght-Aliabadi, M., Hormozi, F., and Zamzamin, A., "Effects of Geometrical Parameters on Performance of Plate-Fin Heat Exchanger: Vortex-Generator as Core Surface and Nanofluid as Working Media", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 70, No. 1, pp. 565-579, 2014.
  20. Hussein, A. M., Sharma, K. V., Bakar, R. A., and Kadrigama, K., "A Review of Forced Convection Heat Transfer Enhancement and Hydrodynamic Characteristics of a Nanofluid", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, pp. 734-743, 2014.
  ۲۱. ابراهیم‌نیا بجستان، ا.، "بررسی نظری، آزمایشگاهی و عددی مشخصه‌های انتقال حرارتی و هیدرودینامیکی نانوسیالات در جریان های مختلف"، پایان‌نامه مقطع دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۱.
  ۲۲. ابراهیم‌نیا بجستان، ا. و نیازمند، ح.، "بررسی اثر نانوسیالات در لوله‌های خمیده جهت بهبود انتقال حرارت مبدل‌های حرارتی"، *مجله مهندسی مکانیک تبریز*، جلد ۴۰، شماره ۱، ص ۱-۱۸، ۱۳۸۹.
  23. Ebrahimnia-Bajestan, E., and Niazmand, H., "Convective Heat Transfer of Nanofluids Flows through an Isothermally Heated Curved Pipe", *Iranian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 81-97., 2011.
  24. Rea, U., McKrell, T., Hu, L. W., and Buongiorno, J., "Laminar Convective Heat Transfer and Viscous Pressure Loss of Alumina-Water and Zirconia-Water Nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 7-8, pp. 2042-2048, 2009.
  25. Incropera, F. P., and DeWitt D. P., *Introduction To Heat Transfer*, 4th ed., 2002.
  26. Hashemi, S. M., and Akhavan-Behabadi, M. A., "An Empirical Study on Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of CuO-Base Oil Nanofluid Flow in a Horizontal Helically Coiled Tube under Constant Heat Flux", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 1, pp. 144-151, 2012.
  27. Liu, J., Wang, F., Zhang, L., Fang, X., and Zhang, Z., "Thermodynamic Properties and Thermal Stability of Ionic Liquid-Based Nanofluids Containing Graphene as Advanced Heat Transfer Fluids for Medium-to-High-Temperature Applications", *Renewable Energy*, Vol. 63, pp. 519-523, 2014.