

بررسی تغییرات هیدرودینامیکی - حرارتی یک نانوسیال در یک لوله مجهز به نوار پیچشی

قنبرعلی شیخزاده^۱، محمد نظیفی فرد^۲، رضا مداحیان^۳، خدیجه کاظمی^۴*

^۱ دانشیار گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

sheikhz@kashanu.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

nazifi@kashanu.ac.ir

^۳ استادیار گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

maddahian@modares.ac.ir

^۴ دانشجوی دکتری گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

kh.kazemi@gmail.com

چکیده: انرژی حرارتی یکی از موارد مهم در اکثر صنایع است؛ زیرا تبدیل انرژی سوخت‌های فسیلی به انرژی حرارتی، تقریباً در تمام صنایع مرسوم رخ می‌دهد. از این رو و با توجه به کمبود منابع فسیلی و آلودگی روزافزون محیط‌زیست انسان، توجه به استفاده صحیح از انرژی حرارتی باید مورد توجه محققان قرار گیرد. در سال‌های اخیر، توجه به استفاده از فناوری‌های جدید در افزایش بازده سیستم‌های حرارتی از جمله مبدل‌های حرارتی، گسترش یافته است. از جمله این فناوری‌ها که مورد توجه مقاله حاضر است، استفاده همزمان از نانوسیالات و نیز نوارهای پیچشی جای گرفته درون لوله مبدل حرارتی است. در مطالعه عددی حاضر برای اولین بار از یک شبیه‌سازی عددی دوفازی اویلری- لاگرانژی در این هندسه، به منظور رفع کاستی‌های مطالعات تک‌فاز پیشین استفاده شده است. اثرات متغیرهای مستقلی چون کسر حجمی نانوذرات و عدد رینولدز و متغیرهای ساختاری نوار پیچشی همچون لقی و نسبت پیچش بر انتقال حرارت و ضریب اصطکاک بررسی شده‌اند. نتایج نشان داد جز رینولدز، سایر متغیرها اثرات کیفی یکسانی بر انتقال حرارت و ضریب اصطکاک دارند.

واژه‌های کلیدی: لوله با نوار پیچشی، نانوسیال، جریان آشفته، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری، خوردگی مکانیکی.

بررسی عددی، مطالعه آزمایشگاهی نیز انجام شد. در مطالعه آزمایشگاهی و عددی آنان کسر حجمی نانوذرات حداکثر ۰/۲ درصد و عدد رینولدز در بازه ۵۴۰۰ تا ۱۵۲۰۰ تغییر می‌کرد. از مدل آشفتگی RNG k-ε بدون مقایسه سایر مدل‌ها استفاده شد. از بسط‌های کوئیک^۲ و مرکزی برای گسسته‌سازی جملات جابه‌جایی^۳ و پخش^۴ و الگوریتم سیمپل^۵ برای ارتباط میدان‌های فشار و سرعت در روش حجم محدود استفاده کردند. خواص نانوسیال با استفاده از مدل تک‌فاز محاسبه می‌شد. نویسندگان دلیل افزایش بازده حرارتی با استفاده از نوار پیچشی در لوله نسبت به یک لوله ساده در شبیه‌سازی عددی خود را جریان‌های چرخشی و گردابه‌های طولی چندگانه دانستند. افزایش تعداد نوارها در لوله منجر به افزایش ضریب عملکرد می‌شود که نویسندگان دلیل آن را افزایش سطح تماس، زمان اقامت، شدت چرخش و اختلاط جریان به دلیل گردابه‌های طولی چندگانه برشمردند. همچنین، این منجر به افزایش ضریب اصطکاک نیز می‌شد. قرارگیری نوارهای پیچشی به صورتی که چرخش هم‌جهتی را ایجاد نکنند، باعث ایجاد انتقال حرارت بالا و ضریب اصطکاک قابل قبول می‌شد.

آیمسا و همکاران افزایش انتقال حرارت در لوله مبدل حرارتی مجهز به نوارهای پیچشی دوگانه با نانوسیال آب و ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم را به صورت عددی بررسی کردند [۹]. عدد رینولدز بین ۵۴۰۰ تا ۱۵۲۰۰ و حداکثر کسر حجمی نانوذرات ۰/۲ درصد بود. از روش حجم محدود و بسط‌های QUICK و مرکزی برای جداسازی جملات جابه‌جایی و پخش استفاده شد. معیار همگرایی رسیدن باقی‌مانده‌های نرمال شده به 10^{-6} بود. همچنین خواص ترموفیزیکی نانوسیال به صورت تک‌فاز مستقل از تغییرات دما فرض شد. مدل آشفتگی RNG k-ε استفاده شد. نتایج نشان داد اختلاف کمتر بین نسبت پیچشی دو نوار منجر به شدت یافتن چرخش، انرژی آشفتگی بالاتر و اختلاط سیال می‌شد. قرار دادن دو نوار که یکی نسبت پیچشی ۱/۵ برابر دیگری داشت، موجب افزایش ۸۹ درصدی انتقال حرارت و ۵/۴۳ برابری ضریب اصطکاک نسبت به لوله ساده می‌شد. با افزایش کسر حجمی نانوذرات، به دلیل افزایش سطح تماس و افزایش ضریب انتقال حرارت هدایت، انتقال حرارت افزایش می‌یافت. استفاده همزمان از هر دو راهکار نوار پیچشی و نانوذرات می‌توانست حدود ۱۱ درصد انتقال حرارت را نسبت به لوله با نوار پیچشی در آن افزایش دهد.

مرور ادبیات موضوع فوق نشان می‌دهد که نتایج عددی، داده‌های

انرژی حرارتی در تمام جنبه‌های مهندسی می‌تواند مهم باشد. صنایع مختلف از جمله تجهیزات فرآوری غذا، تجهیزات فرایندی شیمیایی، نیروگاه‌های حرارتی، تجهیزات سرمایشی و تهویه مطبوع، صنایع پتروشیمی و... با مسائلی از استفاده مؤثر، تبدیل و احیای انرژی حرارتی روبه‌رو هستند. تولید مبدل‌های حرارتی به عنوان اصلی‌ترین سیستم انتقال حرارتی، نیازمند هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملکردی بزرگ است. از این دیدگاه، طراحی مبدل‌های حرارتی کارا، کم‌مصرف و کم‌هزینه مهم است. فناوری‌های مختلفی به عنوان افزاینده‌های انتقال حرارت برای رسیدن به این اهداف به کار گرفته شده است. از جمله این فناوری‌های انفعالی افزاینده انتقال حرارت، ابزارهایی است که به افزایش طی مسیر در سیستم‌های حرارتی منجر خواهند شد. نوار پیچشی قرارگرفته درون لوله از جمله این فناوری‌هاست. همچنین، استفاده از سیالات حاوی ذرات نانو به منظور افزایش ضریب انتقال حرارت، یکی دیگر از راهکارهای افزایش انتقال می‌باشد که در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده واقع شده است.

بررسی‌های آزمایشگاهی در زمینه استفاده همزمان نوارهای پیچشی^۱ و نانوسیالات در سیستم‌های حرارتی پرتکرار هستند [۶-۱]. با این حال، توجه کمتری به شبیه‌سازی عددی در این زمینه صورت گرفته است. تمامی شبیه‌سازی‌ها تاکنون به صورت تک‌فاز هستند. در ادامه به بررسی‌های عددی در این زمینه پرداخته می‌شود.

آزمی و همکاران مطالعه تجربی خود درباره اثر نوارهای پیچشی در لوله‌های ساده با نانوسیال آب و دی‌اکسیدسیلیسیم در جریان آشفتگی [۳] را با استفاده از روش عددی نیز تکرار کردند [۷]. آزمایش‌های آنان با کسر حجمی حداکثر ۴ درصد صورت گرفت. حداکثر افزایش انتقال حرارت نسبت به سیال پایه آب در یک لوله ساده، حدود ۹۴ درصد برای عدد رینولدز ۱۹۰۰۰، نسبت پیچشی ۵ و کسر حجمی ۳ درصد به دست آمد که البته افزایش ۱۶۰ درصدی ضریب اصطکاک را نیز در پی داشت. همخوانی خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده شد. آزمی و همکاران مطالعه خود را اولین بررسی عددی در این زمینه دانستند [۷]. آنان در بررسی تجربی برای یافتن خواص نانوسیال از اندازه‌گیری و در مطالعه عددی از روابط تک‌فاز استفاده کردند.

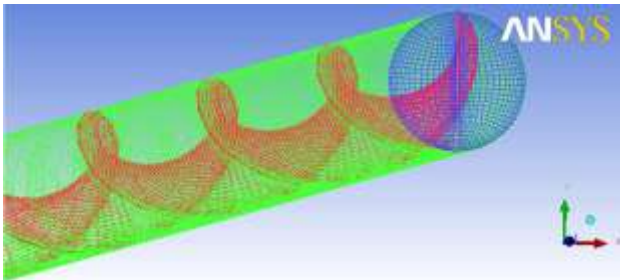
آیمسا و کیاتکیپیانگ افزایش انتقال حرارت با قرار دادن نوارهای پیچشی به صورت چندگانه در جریان نانوسیال آب و ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم با کسرهای حجمی مختلف را با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی کردند [۸]. لوله‌ها از مس ساخته شده بودند. در کنار

2. Quick
3. Convection
4. Diffusion
5. Simple

1. Twisted Tape

انتخاب شده است). همچنین ضخامت نوار برابر ۱ mm است. متغیرهای بی‌بعد هندسی که در مطالعه حاضر مطرح می‌شوند، عبارت‌اند از:

نسبت پیچش که عبارت است از نسبت گام پیشروی به‌ازای پیچش ۳۶۰ درجه نوار به قطر لوله (H/D)،
نسبت لقی (C) که عبارت است از نسبت فاصله بین نوار چرخان و لوله به قطر داخلی لوله (Δ/D).



شکل (۲): شبکه‌بندی میدان محاسباتی مورد مطالعه

شکل (۲) شبکه محاسباتی برای شبیه‌سازی عددی را نمایش می‌دهد. المان‌های شش‌وجهی با سازمان با استفاده از نرم‌افزار تجاری آی‌سی‌ای ام^۴ ایجاد شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شبکه ایجاد شده در نواحی نزدیک به دیواره لوله و نوار چرخان ریزتر شده تا بتوان لایه مرزی را با دقت مناسبی در این نواحی مدل کرد. شبکه‌بندی ایجاد شده به‌گونه‌ای است که مقدار Y^+ اولین نقطه مجاور دیواره کمتر از واحد برای اعداد رینولدز مورد بررسی باشد. برای مدل‌های آشفتگی متوسط‌گیری شده رینولدز^۵، این مقدار کاملاً مناسب است. برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار تجاری انسیس فلونت^۶ نسخه ۱۴ استفاده شده است.

۳. شرایط مرزی و روش عددی

توزیع شار حرارتی روی جداره خارجی لوله یکنواخت در نظر گرفته شده است. سایر شرایط مرزی عبارت‌اند از:

- در ورودی لوله، شرط مرزی سرعت و دمای یکنواخت برای هر دو فاز پیوسته و نانوذرات انتخاب شده است.
در خروجی، فشار نسبی صفر در نظر گرفته شده است. برای ذرات شرط خروج^۷ در نظر گرفته شده است.

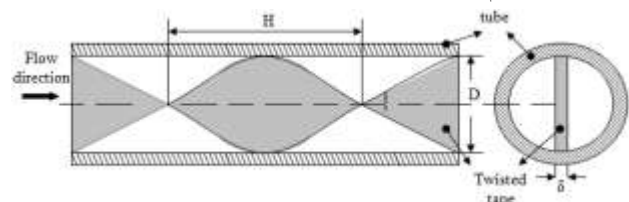
سطح لوله و نوار چرخان برای معادله مومنتوم دارای شرط عدم لغزش با انعکاس^۸ برخورد ذرات است. برای معادله انرژی در این

آزمایشگاهی در زمینه استفاده از نوارهای پیچشی را تأیید می‌کنند. اولین بررسی عددی در زمینه استفاده همزمان نوارهای پیچشی و نانوسیالات در یک مبدل حرارتی در سال ۲۰۱۴ میلادی انجام شده است. از آن زمان تاکنون، بررسی‌های بسیار اندکی در این زمینه صورت گرفته است. در تمام این مطالعات عددی، از مدل‌های تک‌فاز برای خواص نانوسیال استفاده شده است؛ حال آنکه چنین مدل‌هایی به‌علت نادیده گرفتن برخی نیروهای مهم وارد شده بر ذرات، دقت کافی ندارند و می‌توانند عامل خطای زیادی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی باشند. این مدل‌ها به پیش‌بینی خلاف واقع در جریان‌های مایع-جامد مخصوصاً در نواحی در حال توسعه و برای کسرهای حجمی بیشتر از ۱ درصد منجر می‌شوند [۱۰-۱۲]. مدل‌های تک‌فاز هیچ اطلاعاتی از نحوه حرکت و سرعت ذرات فاز جامد (که در مورد برخی پیش‌بینی‌ها مانند خوردگی مکانیکی مهم هستند) ارائه نمی‌کنند. از این‌رو، در مطالعه حاضر سعی خواهد شد با استفاده از یک شبیه‌سازی دوفازی به بررسی اثر برخی متغیرهای حاکم بر مسئله، از جمله کسر حجمی نانوذرات و عدد رینولدز و نیز متغیرهای ساختاری نوار پیچشی از جمله نسبت پیچش و نسبت لقی^۱ بر عدد ناسلت متوسط، ضریب اصطکاک متوسط، بازده حرارتی-هیدرودینامیکی، نسبت عدد ناسلت متوسط و نسبت ضریب اصطکاک متوسط پرداخته شود. همچنین، تغییرات فشار، سرعت مماسی و انرژی جنبشی آشفتگی به‌صورت کانتور^۲ نمایش داده شده است.

در مطالعه حاضر، از مدل دوفازی اویلری-لاگرانژی^۳ استفاده شده است که نسبت به سایر مدل‌های دوفازی دقت بیشتری داشته و امکان رهگیری ذرات در پیش‌بینی‌های مورد نیاز نظیر خوردگی مکانیکی را دارد.

۲. هندسه مورد مطالعه

در شکل (۱) طرح‌واره هندسه لوله با نوار چرخان داخل آن نمایش داده شده است. D قطر داخلی لوله و L طول آن می‌باشد. ضخامت نوار چرخان δ و گام نوار تابیده شده برابر H نشان داده شده است.



شکل (۱): طرح‌واره هندسه مورد مطالعه

به‌طور پیش‌فرض، $L=1.5m$ و $D=0.018m$ هستند (مقادیر

هندسی انتخاب شده بر اساس مطالعه مورد استفاده در تأیید اعتبار

4. ICEM
5. Reynolds-Averaged Turbulence Modeling
6. Ansys-Fluent
7. Escape
8. Reflect

1. Clearance Ratio
2. Contour
3. Euler-Lagrange Approach

مجازی^۵، نیروی برآی سافمن^۶، نیروی ترموفورتیک^۷ و نیروی براونی^۸ است.

$$F = F_G + F_D + F_V + F_L + F_T + F_B \quad (6)$$

که در آن F_G نیروی گرانش است و می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$F_G = \frac{(\rho_{np} - \rho_f)g}{\rho_{np}}, \quad (7)$$

در رابطه بالا g شتاب گرانش زمین است. نیروی پسا، یعنی F_D می‌تواند از طریق روابط مختلف به دست آید. برای ذرات کوچکتر از میکرون، نوعی از قانون درگ استوکس^۹ می‌تواند استفاده شود [۱۶].

در این صورت، F_D به صورت ذیل تعریف می‌شود،

$$F_D = \frac{18\mu_f}{d_{np}^2 \rho_{np} C_c} (v_f - v_{np}) \quad (8)$$

که C_c ضریب تصحیح کانینگهام^{۱۰} به قانون درگ استوکس است که می‌تواند به صورت زیر توسعه داده شود:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_{np}} (1.257 + 0.4 \exp(-1.1 \frac{d_{np}}{2\lambda})) \quad (9)$$

که در آن λ متوسط مسیر آزاد مولکولی است. نیروی جرم مجازی عملکردی شبیه نیروی پسا دارد. در واقع، نیرویی است که به دلیل شتاب گرفتن ذره به سیال وارد می‌شود و سیال نیز متعاقباً آن را به ذره وارد می‌کند که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_V = \frac{1}{2} \frac{\rho_f}{\rho_{np}} \frac{d}{dt} (v_f - v_{np}) \quad (10)$$

در واقع، نیروی جرم مجازی نیرویی است که برای شتاب گرفتن سیال اطراف ذره نیاز است. این نیرو هنگامی که نسبت چگالی سیال به ذره بزرگتر از ۰/۱ باشد باید در نظر گرفته شود. از این رو، در مطالعه حاضر مدنظر است.

نیروی برآی سافمن (F_L) که ناشی از توزیع فشار روی ذره به دلیل چرخش ناشی از توزیع سرعت است، چنین به دست می‌آید [۱۷]:

$$F_L = \frac{2K_S v^2 \rho_f d_{ij}}{\rho_{np} d_{np} (d_{ij} d_{ij})^{\frac{1}{4}}} (v_f - v_{np}) \quad (11)$$

که در آن $K_S = 2/594$ و d_{ij} تانسور تغییر شکل است. این شکل از نیروی برآی برای اعداد رینولدز کوچک ذرات توصیه می‌شود.

نیروی ترموفورتیک (F_T) از گرادیان دما ناشی می‌شود و از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۸].

نواحی، شرط جفت‌شدگی^۱ در نظر گرفته شده است.

سیال غیرقابل تراکم و پایا در نظر گرفته شده است. سیال عامل پایه مورد استفاده در این مطالعه آب، ذرات نانوسیال محلول در آن آلومینا و جنس لوله و نوار آلومینیوم می‌باشند.

تمام جملات جابه‌جایی در معادلات بالا توسط طرح بالادست مرتبه دوم^۲ گسسته می‌شوند که دارای دقت مرتبه دو است و از روش‌های مرتبه اول و نمایی دقیق‌تر می‌باشد [۱۳]. برای اصلاح ترم فشار از الگوریتم سیمپل [۱۴] در روش حجم محدود^۳ استفاده شده است. معیار همگرایی برای تمام معادلات (10^{-6}) در نظر گرفته شده است.

۴. معادلات حاکم

سه معادله حاکم که توصیف‌کننده قوانین بقای فیزیک هستند، عبارت‌اند از: معادلات پیوستگی، بقای مومنتوم و انرژی. در فرایند حل عددی، سیال یک محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود، بدین معنی که تمام محیط اشغال شده را پر می‌کند. هنگامی که سیال در سلول‌های شبکه محاسباتی حرکت می‌کند، معادلات بقا باید در شکل دیفرانسیلی ارضا شوند.

برای سیال لزج و غیرقابل تراکم در مسئله حاضر در غیاب نیروهای خارجی معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی به ترتیب بدین صورت هستند:

$$\nabla \cdot (\rho_f v_f) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho_f v_f v_f) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_f \nabla v_f) + S_{np,m} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho_f c_{p,f} v_f T_f) = \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) + S_{np,e} \quad (3)$$

که در آن P فشار، v سرعت، ρ چگالی، k هدایت حرارت و c_p حرارت ویژه است. پانویس f نیز به معنای سیال است. $S_{p,m}$ و $S_{p,e}$ به ترتیب نشان‌دهنده چشمه‌های انتقال مومنتوم و انتقال انرژی بین سیال و ذرات هستند. این چشمه‌ها به صورت زیر تعیین می‌شوند [۱۵]:

$$S_{p,m} = \sum n_{np} \frac{m_{np}}{\delta V} F \quad (4)$$

$$S_{p,e} = \sum n_{np} \frac{m_{np}}{\delta V} c_{np} \frac{dT_{np}}{dt} \quad (5)$$

که در آن پانویس np اشاره به ذرات، m_{np} و F به ترتیب نشان‌دهنده جرم ذره و کل نیروی عمل‌کننده بر ذره بر واحد جرم آن، δV نمایانگر حجم سلول محاسباتی و n_{np} تعداد ذره جامد در یک سلول است.

در رابطه (۴) مقدار F مجموع نیروهای حجمی و نیروهای هیدرودینامیکی، مختلف و شامل گرانش، نیروی دراگ^۴، نیروی جرم

5. Virtual Mass Force
6. Saffman's Lift Force
7. Thermophoretic Force
8. Brownian Force
9. Stokes' Drag Law
10. Cunningham Correction Factor

1. Couple
2. Second-Order Upwind Scheme(SOU)
3. Finite Volume Method
4. Drag Force

$\omega - k$ Standard، $\varepsilon - k$ RNG و $\omega - k$ SST مقایسه شده است. مدل‌های مورد استفاده در این مقاله با توجه به مقالات پیشین در هندسه‌های مشابه (لوله با نوار پیچشی) انتخاب شده است. در واقع این مدل‌ها، مدل‌های موفق در زمینه شبیه‌سازی جریان‌های آشفته با چرخش و جریان‌های ثانویه هستند که در جریان حاضر نیز وجود دارند. به‌منظور رعایت اختصار از ذکر معادلات مدل‌های مورد مقایسه خودداری می‌شود. در مراجع [۲۰-۲۱] این مدل‌ها به تفصیل بیان شده‌اند.

۵. استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی

برای بررسی مستقل بودن حل عددی از تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی، مقدار عدد ناسلت و ضریب اصطکاک متوسط برای شبکه‌های مختلف محاسبه شده است. استقلال حل برای حالت $\frac{H}{D} = 10$ و لقی صفر در جدول (۱) ارائه شده است. سیال عامل ترکیبی از آب و نانوذرات آلومینا با کسر حجمی ۰/۱ درصد است. همچنین عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ می‌باشد. همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی مقدار اختلاف کاهش می‌یابد.

جدول (۱): بررسی استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی

ردیف	تعداد سلول‌های شبکه	ضریب اصطکاک (f)	عدد ناسلت (Nu)	$\frac{ Nu_{i+1} - Nu_i }{Nu_i} \times 100$	$\frac{ f_{i+1} - f_i }{f_i} \times 100$
۱	۱۶۲۴۸۱	۰/۰۳۸۲	۱۷۳/۳۲	-	-
۲	۲۶۳۵۸۷	۰/۰۳۷۸	۱۷۱/۱۲	۱/۲۶	۱/۰۴
۳	۳۰۹۲۱۸	۰/۰۳۷۵	۱۷۰/۶۱	۰/۲۹	۰/۸۰
۴	۵۷۰۵۵۱	۰/۳۷۴	۱۷۰/۵۰	۰/۰۶	۰/۲۷

با در نظر داشتن دقت محاسباتی و زمان محاسباتی، شبکه با تعداد سلول‌های ۳۰۹۲۱۸ برای این شبیه‌سازی مناسب است.

۶. نتایج و بحث

پیشنهاد مدل آشفتگی مناسب با مقایسه نتایج عددی حاضر با داده‌های تجربی مرجع [۲۲] انجام گرفت. مدل‌های مورد استفاده برای مقایسه، با توجه به بررسی‌های پیشین تک‌فاز در این زمینه انتخاب شده‌اند. لوله مورد بررسی دارای نوار چرخان با لقی صفر و $\frac{H}{D} = 10$ است. شار حرارتی بر دیواره $1000 W/m^2$ است. قطر نانوذرات ۴۷ نانومتر است. مقایسه نتایج عددی و تجربی بررسی حاضر برای انتخاب مدل آشفتگی مناسب در دو بخش انجام شد. بخش اول، مقایسه عدد ناسلت متوسط و بخش دوم ضریب اصطکاک متوسط. چنان‌که در مقدمه بیان شد، تاکنون بررسی عددی در زمینه نانوسیال دوفاز در هندسه مورد مطالعه انجام

$$F_T = -6\pi\mu_f^2 d_{np} C_s \frac{2K_s v^{\frac{1}{2}} \rho_f d_{ij}}{\rho_f (1 + 3C_m Kn)} \frac{k_f/k_{np} + C_t Kn}{1 + 2k_f/k_{np} + 2C_t Kn} \frac{\nabla T}{m_{np} T} \quad (12)$$

که در آن $C_s = 1.17$ ، $C_m = 1.14$ ، و $C_t = 2.18$. برای ذرات کوچک‌تر از میکرون، اثرات حرکت براونی می‌تواند در یک جمله به‌صورت یک نیرو اضافه شود:

$$F_B = \xi_i \left(\frac{\pi S_0}{\Delta t} \right)^{1/2} \quad (13)$$

که در آن، ξ_i عدد گاوسی تصادفی با متوسط صفر است. مقدار S_0 به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_0 = \frac{216\theta k_B T}{\pi^2 \rho_f d_{np}^2 \left(\frac{\rho_{np}}{\rho_f} \right)^2 C_c} \quad (14)$$

که در آن θ نشانگر لزجت سینماتیک^۲ است.

معادله انرژی برای ذره به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$m_p c_{p,np} \frac{dT_{np}}{dt} = Nu_{np} \pi d_{np} k_f (T_f - T_{np}) \quad (15)$$

که در آن عدد ناسلت ذره، Nu_{np} ، با استفاده از رابطه رانز و مارشال [۱۹] محاسبه می‌شود:

$$Nu_{np} = 2 + 0.6 Re_{np}^{0.5} Pr^{0.3} \quad (16)$$

که Re عدد رینولدز و Pr عدد پرانتل ذره هستند. عدد رینولدز برای ذره به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re_{np} = \frac{\rho d_a |\vec{v}_{np} - \vec{v}_f|}{\mu} \quad (17)$$

۱.۴. معادله حرکت ذرات

نرم‌افزار فلونت مسیر حرکت ذرات را در روش حل لاگرانژی با انتگرال‌گیری از تعادل نیروهای وارد بر ذرات به‌دست می‌آورد. این تعادل نیرو بین اینرسی ذره با نیروهای وارد بر ذره که در بالا ذکر شد برقرار می‌شود. این معادله می‌تواند به‌شکل زیر نوشته شود:

$$\frac{d\vec{v}_{np}}{dt} = F_D (\vec{v} - \vec{v}_{np}) + \frac{\vec{g}(\rho_{np} - \rho)}{\rho_{np}} + \vec{F} \quad (18)$$

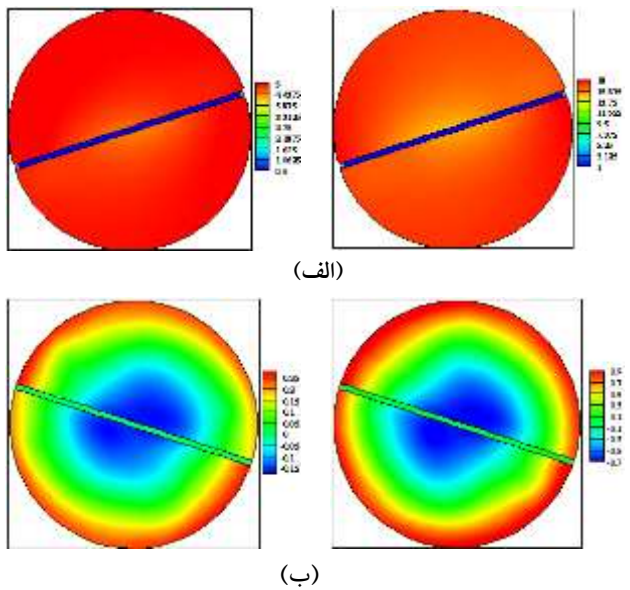
که در آن F_D نیروی پسا و F سایر نیروهاست.

۲.۴. معادلات جریان آشفته

در مطالعه دوفازی حاضر مدل‌های مختلف آشفتگی مورد استفاده در مطالعات پیشین، مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت و مدل مناسب انتخاب خواهد شد. نتایج چهار مدل $k - \varepsilon$ Realizable،

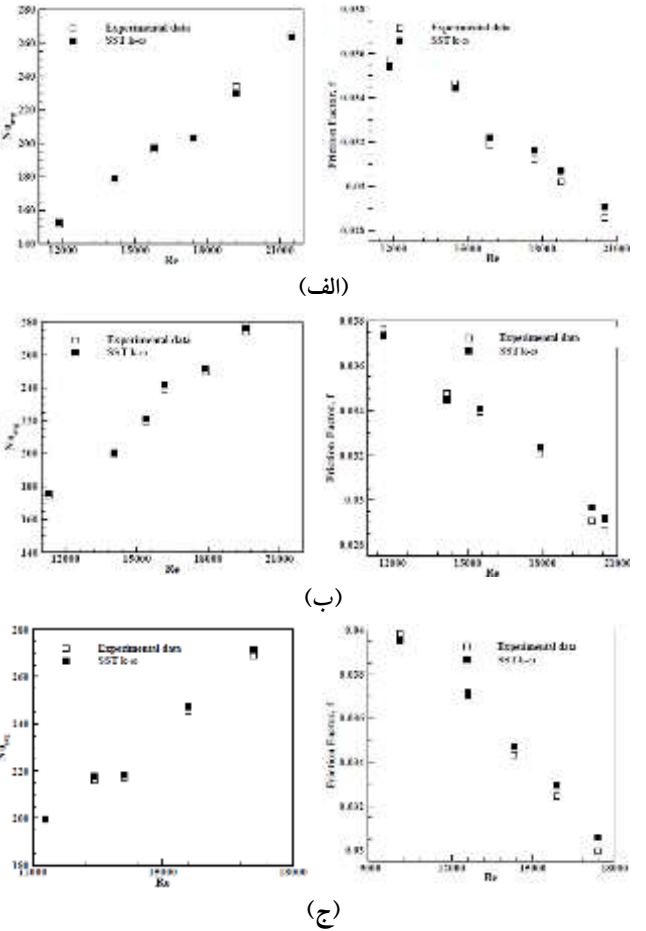
1. Gaussian
2. Kinematic Viscosity

در ادامه، نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی حاضر بررسی می شود. متغیرهای مستقل در این بررسی عدد رینولدز، و کسر حجمی و متغیرهای ساختاری نوار پیچشی شامل نسبت پیچش و لقی خواهد بود. شکل های (۴) و (۵) توزیع فشار درون لوله با نوار پیچشی در اعداد رینولدز ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ و مقاطع طولی مختلف برای دو حالت لقی صفر و ۰/۴ را نشان می دهند. کانتورهای نشان داده شده در این قسمت و پس از آن برای کسر حجمی نانوذرات ۱ درصد و قطر ذرات ۴۷ نانومتر هستند. وجود نوار پیچشی موجب ایجاد تغییرات فشار شعاعی می شود که چنین تغییراتی در لوله ساده وجود ندارد [۲۴]. این تغییرات با حرکت به سمت پایین دست شدت می یابند. مقدار این تغییرات فشار با افزایش لقی کاهش می یابد که این خود نشان می دهد وجود نوار پیچشی موجب ایجاد چنین تغییرات فشاری می باشد. این تغییرات فشار منجر به ایجاد نیروی گریز از مرکز و شکل گیری جریان ثانویه خواهد شد. در نیمه لوله مقدار حداکثر فشار حدود ۱۰ برابر ورودی لوله است. با حرکت به سمت پایین دست نواحی با فشار مختلف کاهش چشمگیری در سطح مقطع لوله برای تمام حالات مورد دارد و فشار یکنواخت تر می شود. این کاهش برای عدد رینولدز کوچک تر، بیشتر دیده می شود.

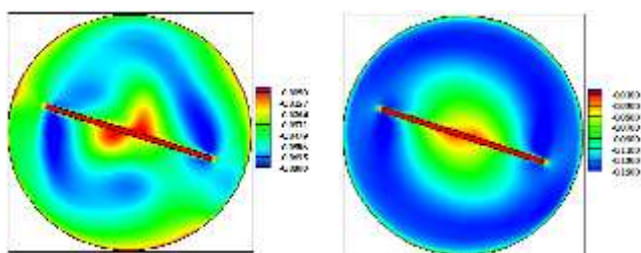


شکل (۴): توزیع فشار (Pa) برای حالت لقی صفر و عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ (سمت چپ) و ۲۰۰۰۰ (سمت راست): الف. $x/L = 0.01$ ، ب. $x/L = 0.99$

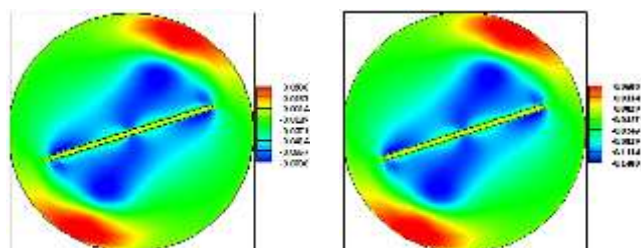
نشده است. از این رو، مدل های مختلف آشفتگی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج آن ها با یکدیگر مقایسه شد تا بهترین مدل برای شبیه سازی عددی هندسه حاضر پیشنهاد شود. مدل های مورد استفاده در این بخش با توجه به پیشینه تحقیقات در هندسه های مشابه با سیال تک فاز انتخاب شد. این مقایسه در سه کسر حجمی ۰/۰۲، ۰/۱ و ۰/۵ درصد و در بازه اعداد رینولدز ۱۱۰۰۰ تا ۲۱۰۰۰ صورت گرفت و در نهایت مدل $SST k - \omega$ با درصد خطای کمتر انتخاب و برای استفاده سایر محققان پیشنهاد شد. جزئیات بیشتر مقایسه این مدل ها در بررسی قبلی نویسندگان موجود است [۲۳]. برای رعایت اختصار نتایج این مقایسه ارائه نشده است. نتایج مقایسه روش عددی با استفاده از مدل $SST k - \omega$ با نتایج تجربی [۲۲] در شکل (۳) برای حالت لقی صفر و قطر نانوذرات ۴۷ نانومتر ارائه شده است. حداکثر خطا با توجه به مقایسه حاضر برای انتقال حرارت و هیدرودینامیک به ترتیب برابر ۲ و ۳ درصد است. از این رو روش عددی حاضر با استفاده از مدل آشفتگی $SST k - \omega$ برای شبیه سازی مسئله مورد نظر مناسب است.



شکل (۳): مقایسه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک متوسط بین نتایج عددی حاضر و نتایج تجربی مرجع [۲۲]: الف. کسر حجمی ۰/۵ درصد، ب. کسر حجمی ۱ درصد، ج. کسر حجمی ۰/۲ درصد

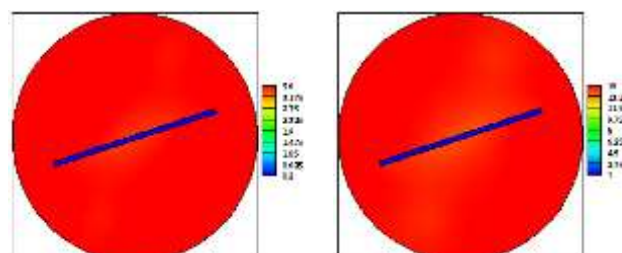


(الف)

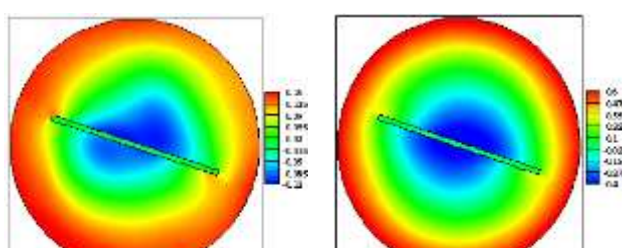


(ب)

شکل (۷): توزیع سرعت مماسی (m/s) برای حالت لقی 0.4 و عدد رینولدز 10000 (سمت چپ) و 20000 (سمت راست):
الف. $x/L = 0.01$ ب. $x/L = 0.99$



(الف)



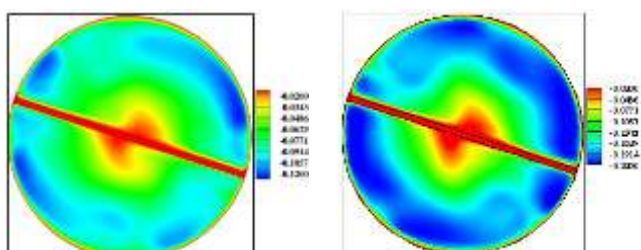
(ب)

شکل (۵): توزیع فشار (Pa) برای حالت لقی 0.4 و عدد رینولدز 10000 (سمت چپ) و 20000 (سمت راست): الف. $x/L = 0.01$ ب. $x/L = 0.99$

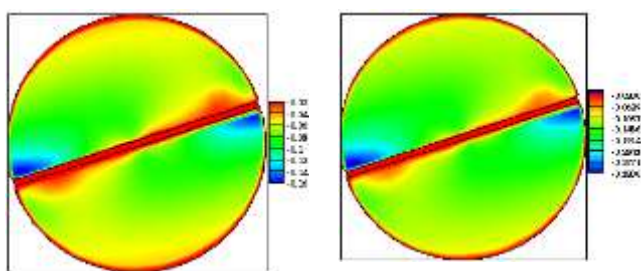
با حرکت به سمت پایین دست، مقدار سرعت مماسی حداکثر به خصوص در حالت لقی صفر افزایش می یابد. با این حال در نواحی دورتر از ورودی توزیع سرعت مماسی بیشتر شامل مناطق کم سرعت است. افزایش مقدار سرعت مماسی جریان پایه، موجب افزایش شدت برخورد ذرات به دیواره می شود [۲۵]. همچنین، با حرکت به سمت دیواره ها مقدار سرعت مماسی افزایش می یابد و البته در نزدیکی دیواره مجدداً سرعت کاهش می یابد. در عدد رینولدز بالاتر، مناطق بیشتری از سطح مقطع دارای سرعت مماسی بالاتری هستند. با افزایش لقی سرعت مماسی حدود ۵۰ درصد کاهش می یابد. این نشان می دهد که نوار پیچشی نقش مؤثری در ایجاد یک سرعت مماسی بالا دارد.

شکل های (۸) و (۹) تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی را در سطوح مختلف لوله با نوار پیچشی نشان می دهند. افزایش عدد رینولدز موجب افزایش انرژی جنبشی آشفتگی می شود. مقادیر این انرژی در پایین دست بیشتر می شود. وجود نوار پیچشی با لقی کمتر موجب افزایش انرژی جنبشی آشفتگی به دلیل ایجاد جریان های ثانویه و چرخش بیشتر سیال می شود. از این رو، مسلماً قرارگیری نوار پیچشی در یک لوله ساده موجب افزایش انرژی جنبشی آشفتگی خواهد شد. این انرژی می تواند معیاری برای افزایش قدرت جریان آشفته باشد که خود تغییر دهنده رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی جریان است. این انرژی می تواند معیاری برای افزایش قدرت جریان آشفته باشد که خود تغییر دهنده رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی جریان است؛ زیرا می تواند منجر به افزایش اختلاط و در نتیجه افزایش انتقال حرارت شود. بر خلاف سرعت، انرژی جنبشی

تغییرات سرعت مماسی برای حالات مختلف مورد بررسی در شکل های (۶) و (۷) نمایش داده شده است.



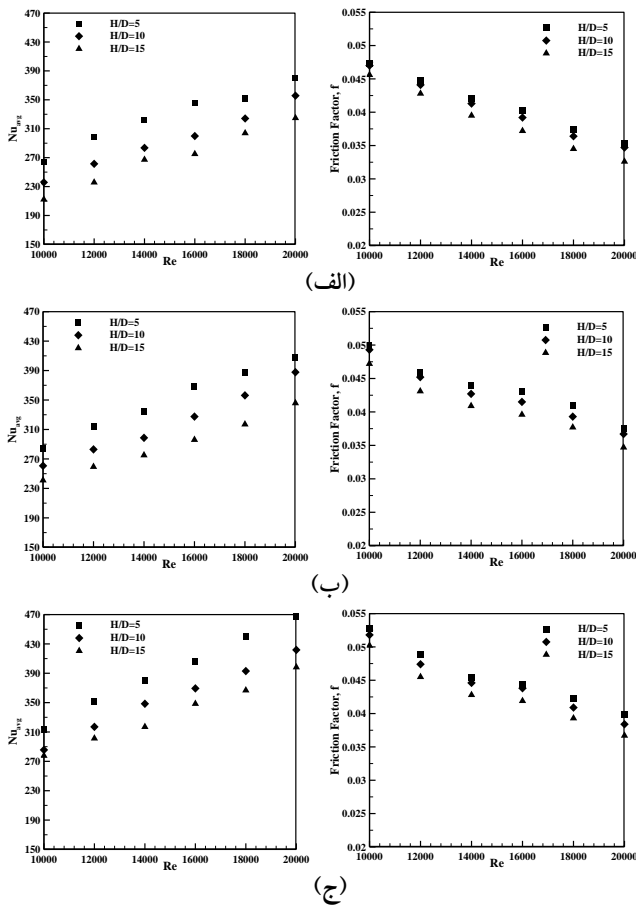
(الف)



(ب)

شکل (۶): توزیع سرعت مماسی (m/s) برای حالت لقی صفر و عدد رینولدز 10000 (سمت چپ) و 20000 (سمت راست):
الف. $x/L = 0.01$ ب. $x/L = 0.99$

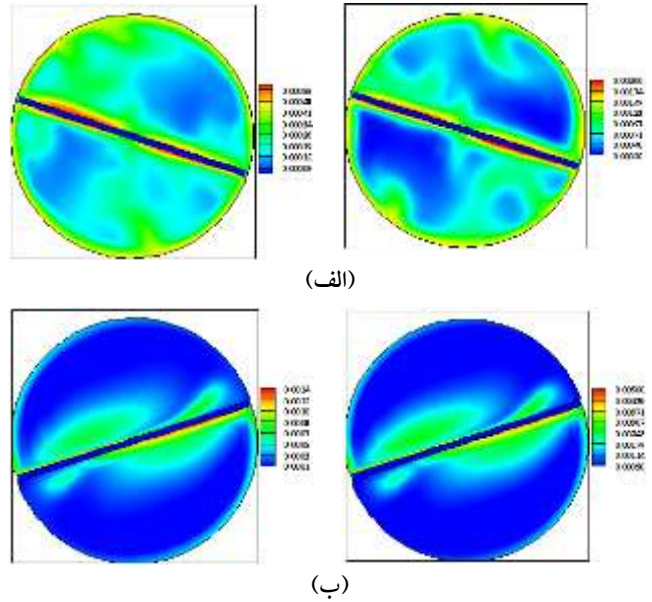
شکل (۱۰) نشان‌دهنده تغییرات انتقال حرارت و ضریب اصطکاک درون لوله برای نانوذرات آلومینا با قطر ۴۷ نانومتر است.



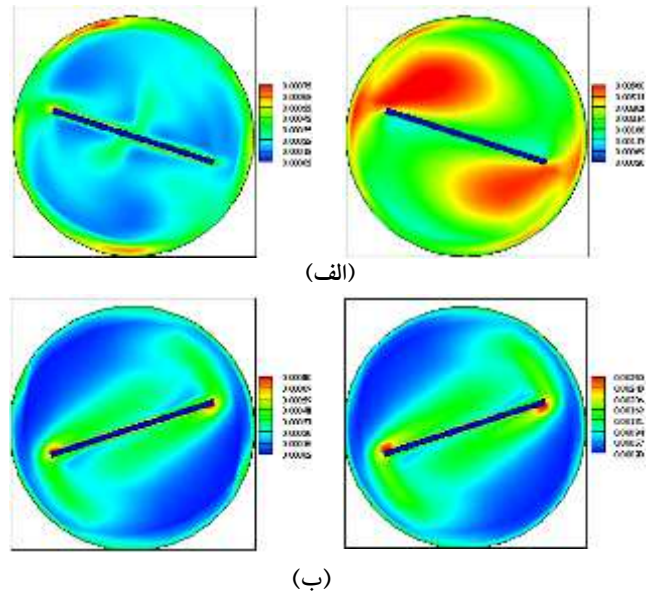
شکل (۱۰): تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک متوسط برای حالت لقی صفر: الف. کسر حجمی ۵/۰ درصد، ب. کسر حجمی ۱ درصد، ج. کسر حجمی ۲ درصد

با افزایش عدد رینولدز مقدار انتقال حرارت افزایش می‌یابد. با افزایش کسر حجمی و کاهش نسبت پیچش مقدار این افزایش بیشتر می‌شود. با افزایش عدد رینولدز مقدار عدد ناسلت به دلیل شدت آشفتگی بیشتر و اختلاط بهتر سیال افزایش می‌یابد. همچنین، در اعداد رینولدز بزرگ‌تر لایه مرزی هیدرودینامیکی کوچک‌تر می‌شود که این به معنای قدرت گرفتن مکانیزم قوی‌تر انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به مکانیزم ضعیف‌تر هدایت است. این افزایش با بیشتر شدن نسبت پیچش بیشتر می‌شود. چنان‌که با افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰۰۰ به ۲۰۰۰۰ مقدار ناسلت در حدود ۴۳، ۵۰ و ۵۳ درصد به ترتیب برای نسبت پیچش ۵، ۱۰ و ۱۵ و کسر حجمی ۵/۰ درصد افزایش می‌یابد. این مقادیر با افزایش کسر حجمی نانوذرات کاهش اندکی دارند. در این حالت افزایش انتقال حرارت تقریباً به صورت خطی با افزایش عدد رینولدز انجام می‌شود. این نشان می‌دهد برای پیش‌بینی انتقال حرارت با تغییرات

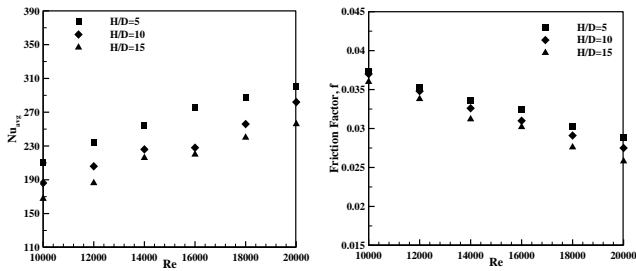
آشفتگی در کنار دیواره‌ها مقدار بیشتری دارد. کاهش لقی موجب افزایش در این انرژی به طور متوسط حدود ۲ برابری در عدد رینولدز بیشتر و ۵ برابری در عدد رینولدز کمتر می‌شود. افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰۰۰ به ۲۰۰۰۰ موجب افزایش حدود ۴ برابری مقدار این انرژی می‌شود.



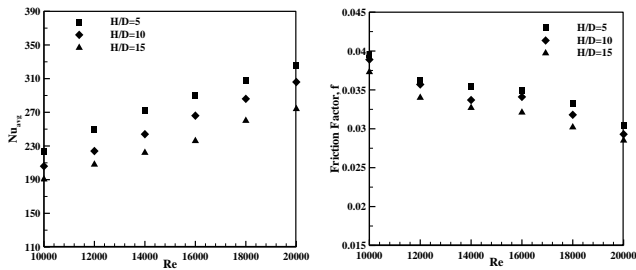
شکل (۸): توزیع انرژی جنبشی آشفتگی (m^2/s^2) برای حالت لقی صفر و عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ (سمت چپ) و ۲۰۰۰۰ (سمت راست): الف. $x/L = 0.01$ ، ب. $x/L = 0.99$



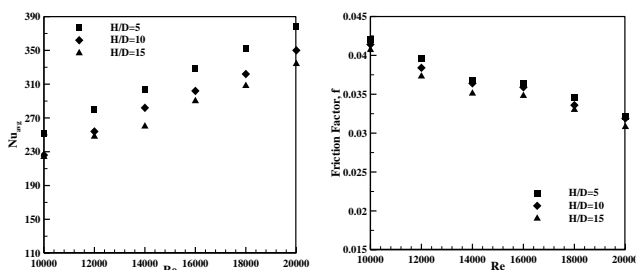
شکل (۹): توزیع انرژی جنبشی آشفتگی (m^2/s^2) برای حالت لقی ۰/۴ و عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ (سمت چپ) و ۲۰۰۰۰ (سمت راست): الف. $x/L = 0.01$ ، ب. $x/L = 0.99$



(الف)



(ب)



(ج)

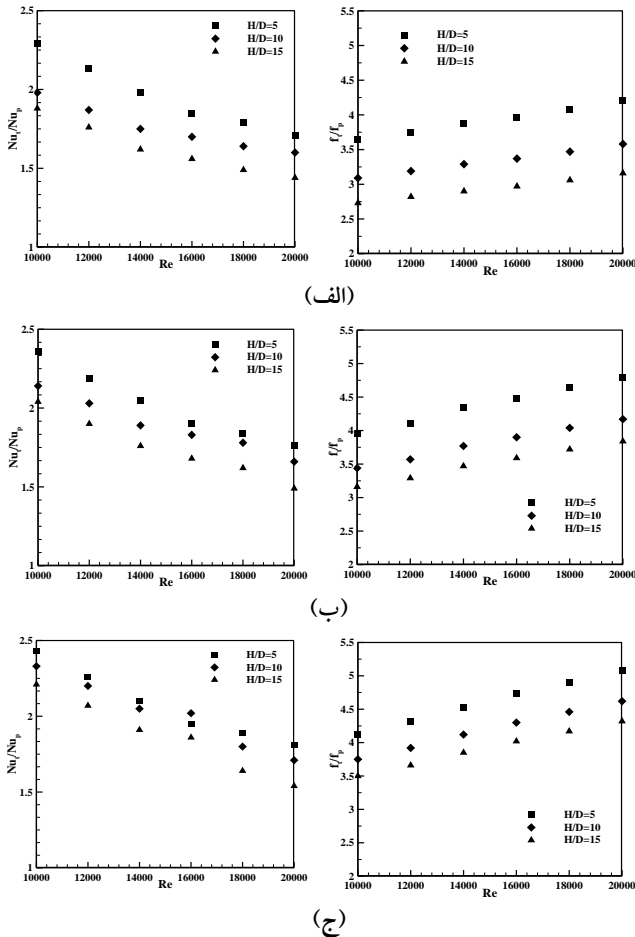
شکل (۱۱): تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک متوسط برای حالت لقی ۰/۴: الف. کسر حجمی ۰/۵ درصد، ب. کسر حجمی ۱ درصد، ج. کسر حجمی ۲ درصد

همان طور که شکل (۱۱) نشان می‌دهد، کمترین مقادیر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در مورد لقی ۰/۴ مشاهده می‌شود. در واقع با افزایش لقی، نوار پیچشی سطح کمتری از لوله را پر خواهد کرد و اثر کمتری بر جریان از جمله ایجاد جریان‌های ثانویه و چرخش سیال در کل سطح مقطع خواهد داشت. از این رو، موجب تغییرات کمتری در متغیرهای حرارتی و هیدرودینامیکی نسبت به یک لوله با نوار پیچشی دارای لقی صفر خواهد شد. بیشتر بودن انرژی جنبشی آشفتگی در حالت لقی کوچک‌تر نیز مؤید این مطلب است. در نسبت لقی اندک، فاصله بین نوار تابیده شده و لوله کاهش می‌یابد که این عاملی در افزایش انتقال حرارت خواهد بود. عدد ناسلت با افزایش لقی از صفر به ۰/۴ در حدود ۱۸ تا ۲۱ درصد کاهش می‌یابد که عدد کوچک‌تر برای کسر حجمی و عدد رینولدز بیشینه و عدد بزرگ‌تر برای مقادیر کمینه مذکور است. درباره ضریب اصطکاک نیز درصد تغییرات تقریباً به همین صورت است. روند غیرخطی تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک با تغییر عدد رینولدز یا نسبت پیچش در این حالت تشدید

رینولدز می‌توان از یک تقریب خطی استفاده کرد و فرایندهای غیرخطی اغتشاشی چندان بر این روند اثرگذار نیستند.

افزایش انرژی جنبشی آشفتگی با افزایش عدد رینولدز که در شکل‌های (۸) و (۹) مشاهده شد، نیز یکی دیگر از عوامل افزایش عدد ناسلت است. با افزایش کسر حجمی، مقدار انتقال حرارت افزایش می‌یابد که این افزایش برای اعداد رینولدز بیشتر بالاتر است (۹ درصد) با افزایش کسر حجمی از ۰/۵ به ۲ درصد برای عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ و ۲۳ درصد برای عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ (برای نسبت پیچش ۵). با افزایش نسبت پیچش، از حرکات پیچشی ذرات در یک دور کامل ۳۶۰ درجه کاسته شده و مقدار انتقال حرارت کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت پیچش از ۵ به ۱۵، مقدار عدد ناسلت حدود ۲۴ و ۱۷ درصد به ترتیب برای اعداد رینولدز ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ کاهش می‌یابد. اختلاف بین مقادیر مختلف عدد ناسلت با افزایش نسبت پیچش در کسرهای حجمی متفاوت تغییر محسوسی نمی‌کند. کاهش نسبت پیچش منجر به تشدید ناحیه چرخشی درون لوله با نوار چرخشی شده که خود عامل افزایش انتقال حرارت است. نسبت پیچش کوچک‌تر، عدد رینولدز و کسر حجمی بالاتر موجب افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی خواهد بود. شکل حاضر همچنین مقادیر ضریب اصطکاک برای متغیرهای حاکم مختلف را نشان می‌دهد. نوار پیچشی به دلیل افزایش سطوح تماس موجب افزایش ضریب اصطکاک خواهد شد. افزایش عدد رینولدز موجب کاهش ضریب اصطکاک می‌شود که به دلیل افزایش نیروهای اینرسی در ثبوت نیروی فشاری است. با افزایش کسر حجمی مقدار ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد؛ زیرا تماس ذرات با سطوح بیشتر خواهد بود. چنان‌که با افزایش کسر حجمی از ۰/۵ به ۲ درصد برای نسبت پیچش ۵ این افزایش برای عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ حدود ۱۰ درصد است. افزایش مذکور با تغییر نسبت پیچش تغییر چندانی نمی‌کند. با افزایش نسبت پیچش مقدار ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. برای نسبت پیچش برابر ۵ این کاهش برای عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ به ترتیب به طور نسبی حدود ۴ و ۸ درصد است. این اعداد نشان می‌دهند که با افزایش عدد رینولدز مقدار کاهش مذکور با افزایش نسبت پیچش بیشتر می‌شود. کاهش مذکور برای کسرهای حجمی بالاتر به طور جزئی بیشتر است. تغییرات مشاهده شده با افزایش رینولدز در این حالت نیز تقریباً خطی است که نشان‌دهنده عدم اثر عدد رینولدز بر ضریب اصطکاک به صورت یک متغیر غیرخطی است.

مقدار نسبت ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. این افزایش برای نسبت پیچش ۵ و ۱۵ حدود ۱۵ و ۳۰ درصد است که نشان‌دهنده افزایش مقادیر با افزایش نسبت پیچش است. نسبت عدد ناسلت نیز با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد، اما این افزایش روند قابل پیش‌بینی ندارد.



شکل (۱۲): تغییرات نسبت عدد ناسلت و ضریب اصطکاک متوسط برای لوله با نوار پیچشی نسبت به لوله ساده در حالت لقی صفر: الف. کسر حجمی ۰/۵ درصد، ب. کسر حجمی ۱ درصد، ج. کسر حجمی ۲ درصد

افزایش لقی منجر به تغییراتی در نسبت عدد ناسلت و ضریب اصطکاک متوسط می‌شود. کاهش مقادیر از مقایسه شکل‌های (۱۲) و (۱۳) کاملاً مشخص است. در نسبت ناسلت در حدود ۲۴ تا ۲۶ درصد کاهش مذکور با افزایش لقی از صفر به ۰/۴ مشاهده می‌شود. درباره نسبت ضریب اصطکاک نیز این کاهش مشاهده می‌شود؛ چنان‌که در حدود ۱۰ تا ۴۰ درصد کاهش در این مقادیر وجود دارد. کاهش مقادیر نسبت ناسلت و ضریب اصطکاک و نزدیک شدن آن‌ها به واحد با افزایش لقی به معنی نزدیک شدن شرایط لوله با نوار پیچشی به شرایط یک لوله ساده است. تغییرات ضریب ناسلت در این حالت به شدت غیرخطی می‌باشد که به معنای شدت گرفتن مکانیزم‌های غیرخطی آشفتگی است.

می‌شود، چراکه اثر جریان آشفته به دلیل کاهش لایه‌های مرزی هیدرودینامیکی نوار در این حالت بیش از قبل است.

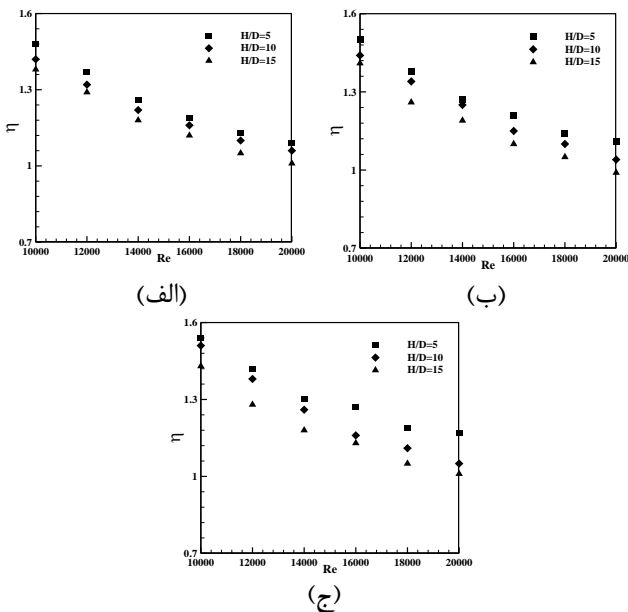
در کسر حجمی ۰/۵ درصد، با افزایش نسبت پیچش از ۵ به ۱۵ عدد ناسلت حدود ۲۴ و ۱۷ درصد در اعداد رینولدز ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ کاهش می‌یابد. این مقادیر برای کسر حجمی ۲ درصد در حدود ۱۷ و ۱۳ درصد است، لذا این کاهش برای کسر حجمی بزرگ‌تر، کوچک‌تر است. افزایش عدد رینولدز افزایشی در حدود ۴۳ تا ۵۳ درصد برای انتقال حرارت در بر دارد که مشابه مقادیر مذکور برای حالت لقی صفر است.

افزایش نسبت پیچش برای ضریب اصطکاک متوسط موجب کاهش می‌شود؛ این کاهش با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. این کاهش برای کسر حجمی ۰/۵ درصد از ۳ تا ۱۱ است. مقادیر مذکور برای کسر حجمی ۲ درصد از ۳ تا ۵ خواهد بود. کاهش ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز از ۲۲ تا ۲۸ درصد می‌باشد که بیش از مقادیر متناظر برای لقی صفر است.

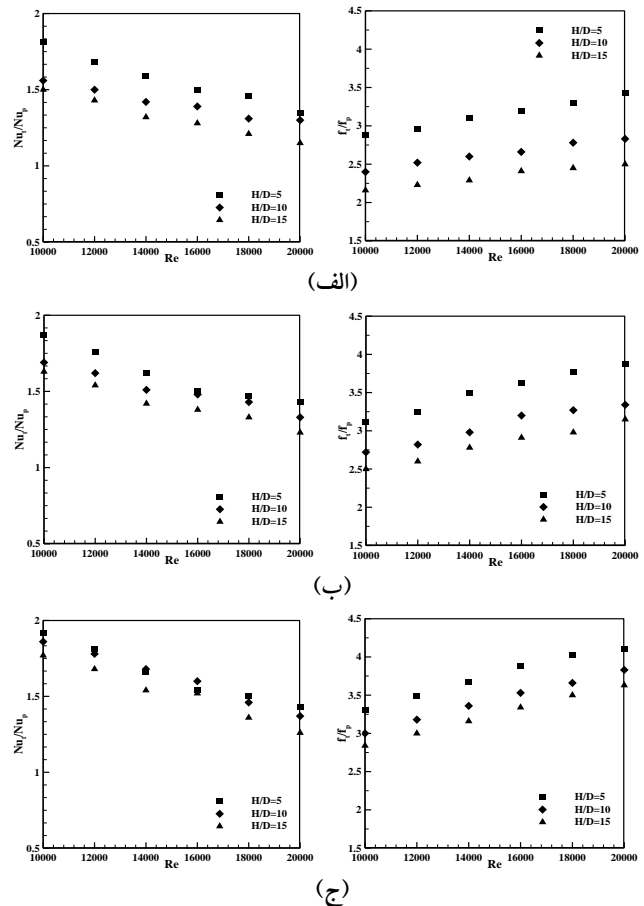
شکل (۱۲) نشان‌دهنده نسبت عدد ناسلت متوسط و ضریب اصطکاک برای لوله با نوار داخل آن با لقی صفر ساده هستند. این نسبت‌ها از بخش مقادیر مورد نظر در مورد لوله با نوار پیچشی بر لوله ساده به دست می‌آیند. با افزایش عدد رینولدز مقدار نسبت ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. در اعداد رینولدز کوچک‌تر، لایه مرزی حرارتی ضخیم‌تر است، بنابراین جریان چرخشی ناشی از نوار پیچشی اثر بیشتری بر روی برهم زدن لایه مرزی حرارتی دارد. تغییرات شکل (۱۲) نشان می‌دهد افزایش نسبی عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز در لوله با نوار پیچشی کمتر از آن در لوله ساده است. تغییرات این نسبت و نیز نسبت ضریب اصطکاک با تغییر عدد رینولدز تقریباً خطی است. با افزایش عدد رینولدز مقدار نسبت ناسلت متوسط در حدود ۱۸ تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد که مقادیر کمتر برای کسر حجمی بزرگ‌ترند. این مقادیر برای ضریب اصطکاک در حدود ۱۵ تا ۲۷ و به صورت افزایشی است. افزایش نسبت ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز، نشان‌دهنده پیشی گرفتن اثر نوار پیچشی بر اثرات جریان آشفته در لوله ساده برای ایجاد تماس بیشتر است، در حالی که در مورد انتقال حرارت، افزایش عدد رینولدز موجب پیشی گرفتن اثرات آشفتگی در لوله ساده بر تأثیرات نوار پیچشی است. با کاهش نسبت پیچش از ۱۵ به ۵ مقدار نسبت ناسلت حدود ۸ تا ۱۶ درصد افزایش می‌یابد و البته این افزایش نظم قابل‌گزارشی ندارد. این افزایش برای ضریب اصطکاک ۲۵، ۲۰ و ۱۵ درصد به ترتیب برای کسرهای حجمی ۰/۵، ۱ و ۲ درصدی است. با افزایش کسر حجمی

نسبت پیچش ۵، ۱۰ و ۱۵ در شش عدد رینولدز مختلف از ۱۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ نمایش داده شده است.

مقدار بازده با افزایش عدد رینولدز یا افزایش نسبت پیچش کاهش می‌یابد، اما با افزایش کسر حجمی نانوذرات بازده افزایش پیدا می‌کند. چنان‌که پیشتر مشاهده شد، افزایش عدد رینولدز منجر به کاهش نسبت ناسلت و افزایش نسبت ضریب اصطکاک متوسط می‌شود که هر دو منجر به کاهش بازده می‌شوند. افزایش عدد رینولدز موجب افزایش ۲۴ تا ۳۰ درصدی بازده می‌شود که این افزایش برای کسر حجمی کوچک‌تر کمتر است. افزایش نسبت پیچش از ۵ به ۱۵ موجب کاهش ۵ تا ۱۵ درصدی بازده خواهد شد. همچنین، افزایش کسر حجمی از ۰/۵ به ۲ از ۱ تا ۵ درصد افزایش در پی دارد. افزایش مقدار بازده به معنای قدرت گرفتن بیشتر مکانیزم‌های حرارتی در مقابل مکانیزم‌های هیدرودینامیکی فرساینده انرژی جنبشی است. افزایش عدد رینولدز به کاهش بازده به کمتر از واحد کمک می‌کند، به طوری که در کسر حجمی ۰/۵، نسبت پیچش ۱۵ و عدد رینولدز بیشتر از ۱۰۰۰۰ مقادیر بازده کمتر از واحد است. شکل‌های قبل نشان داد که با افزایش نسبت پیچش نسبت ناسلت و ضریب اصطکاک هر دو افزایش می‌یابند، اما نتایج بازده نشان می‌دهد که افزایش نسبت ناسلت بر افزایش نسبت اصطکاک پیشی می‌گیرد. مقادیر کوچک‌تر از یک برای بازده به معنای قدرت گرفتن مکانیزم‌های اصطکاکی نسبت به حرارتی است. مسلماً کاهش شدید انتقال حرارت برای حالات با کسر حجمی کوچک و نسبت پیچشی بزرگ دلیل مهم کم بودن و حتی کمتر از واحد بودن بازده است.



شکل (۱۴): بازده حرارتی-هیدرودینامیکی در حالت لقی صفر: الف. کسر حجمی ۰/۵ درصد، ب. کسر حجمی ۱ درصد، ج. کسر حجمی ۲ درصد



شکل (۱۳): تغییرات نسبت عدد ناسلت و ضریب اصطکاک متوسط برای لوله با نوار پیچشی نسبت به لوله ساده در حالت لقی ۰/۴. الف. کسر حجمی ۰/۵ درصد، ب. کسر حجمی ۱ درصد، ج. کسر حجمی ۲ درصد

با استفاده از بازده حرارتی-هیدرودینامیکی می‌توان به مقایسه مؤثری بین یک لوله ساده و یک لوله با نوار پیچشی درون آن دست یافت. این نسبت برای یک قدرت پمپاژ یکسان درون لوله که مربوط به هزینه عملکردی سیستم است، محاسبه می‌شود. برای یک قدرت پمپاژ ثابت، $(\dot{V}\Delta P)_p = (\dot{V}\Delta P)_t$ است که در آن \dot{V} دبی حجمی و ΔP کاهش فشار می‌باشد. همچنین، زیرنویس‌های p و t نشان‌دهنده لوله ساده و لوله با نوار پیچشی است. رابطه بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز نیز به صورت زیر است.

$$(fRe^3)_p = (fRe^3)_t$$

در نهایت، بازده حرارتی-هیدرودینامیکی که به صورت نسبت اعداد ناسلت به نسبت اعداد رینولدز مطرح می‌شود، بدین صورت خواهد بود [۲۶ و ۲۷].

$$\eta = \frac{\left(\frac{Nu_t}{Nu_p}\right) f_p^{1/3}}{\left(\frac{f_t}{f_p}\right)} \quad (19)$$

شکل (۱۴) مقادیر بازده را برای لوله با نوار پیچشی برای مقادیر

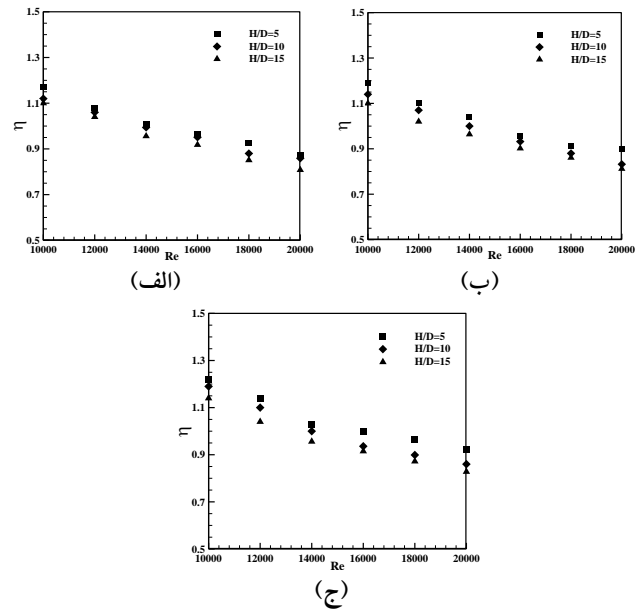
پیچش و لقی می‌باشند. اثرات این متغیرها بر عدد ناسلت متوسط، ضریب اصطکاک متوسط، نسبت آن‌ها و بازده بررسی شده است. در ذیل به سرخط نتایج به دست آمده اشاره شده است.

- مدل آشفتگی $SST k - \omega$ در شبیه‌سازی عددی دوفازی اوپلری-لاگرانژی لوله با نوار پیچشی پیشنهاد شد.
- افزایش عدد رینولدز و کاهش لقی منجر به افزایش سرعت مماسی و انرژی جنبشی آشفتگی می‌شود.
- افزایش کسر حجمی، کاهش لقی و کاهش نسبت پیچش موجب افزایش عدد ناسلت متوسط و ضریب اصطکاک متوسط می‌شوند.
- افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط و کاهش ضریب اصطکاک متوسط می‌شود.
- نسبت‌های عدد ناسلت و ضریب اصطکاک متوسط نیز همانند عدد ناسلت و ضریب اصطکاک متوسط با تغییرات متغیرهای مستقل تغییر می‌کنند، جز عدد رینولدز که افزایش آن منجر به افزایش نسبت ضریب اصطکاک و کاهش نسبت عدد ناسلت متوسط می‌شود.
- با افزایش کسر حجمی نانوذرات و کاهش عدد رینولدز، نسبت پیچش و کاهش لقی، مقدار بازده حرارتی-هیدرودینامیکی افزایش می‌یابد.

فهرست علائم

سطح انتقال حرارت (m^2)	A
لقی نوار پیچشی در لوله	$c = H/D$
ضریب انتقال حرارت ویژه سیال (J/kgK)	c_p
قطر داخلی لوله (m)	D
ضریب اصطکاک	$f = \Delta P / ((L/D) / \rho U^2)$
گام پیچش نوار (m)	H
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (W/m^2K)	h
ضریب انتقال حرارت هدایت (W/mK)	k
طول لوله (m)	L
دبی جرمی (kg/s)	\dot{m}
عدد ناسلت	$Nu = hD/k$
فشار سیال در لوله (Pa)	P
افت فشار (Pa)	ΔP
نرخ انتقال حرارت (W)	Q
عدد رینولدز	$Re = \rho U D / \mu$
دما (K)	T
سرعت در سه جهت استاندارد	U, V, W
نرخ حجمی جریان (m^3/s)	\dot{V}

شکل (۱۵) مقادیر بازده در لقی ۰/۴ را نشان می‌دهد. با افزایش لقی صرفه اقتصادی، استفاده از نوار پیچشی کاهش می‌یابد. مقادیر کمتر از واحد با افزایش نسبت پیچش و کاهش کسر حجمی مشاهده می‌شود. لذا برای وجود صرفه اقتصادی باید تغییر متغیرهای مستقل با احتیاط صورت گیرد. افزایش نسبت پیچش موجب کاهش ۵ تا ۱۰ درصدی بدون نظم خاصی می‌شود که مقادیر نسبت به حالت لقی صفر اندکی کاهش دارند. مشابه حالت لقی صفر، افزایش عدد رینولدز موجب کاهش حدود ۲۲ تا ۳۰ درصدی بازده می‌شود. افزایش لقی از صفر تا ۰/۴ موجب کاهش ۲۰ تا ۲۶ درصدی بازده می‌شود. اگرچه افزایش لقی موجب کاهش ضریب اصطکاک می‌شود، اما بازده حرارتی-هیدرودینامیکی نشان می‌دهد افزایش لقی موجب کاهش شدید صرفه اقتصادی می‌شود؛ چراکه بازده به معنای سودآوری نسبت به هزینه است.



شکل (۱۵): بازده حرارتی-هیدرودینامیکی در حالت لقی ۰/۴: الف. کسر حجمی ۰/۵ درصد، ب. کسر حجمی ۱ درصد، ج. کسر حجمی ۲ درصد

۷. نتیجه‌گیری

از جمله روش‌های انفعالی افزایش انتقال حرارت، استفاده از نوار پیچشی در مبدل‌های حرارتی است. این روش همراه استفاده از نانوسیالات می‌تواند افزایش انتقال حرارت را تشدید کند. استفاده از این روش‌ها منجر به تغییرات هیدرودینامیکی و حرارتی می‌شود که موضوع این بررسی است. در این تحقیق برای اولین بار از یک روش دوفازی اوپلری-لاگرانژی برای شبیه‌سازی دقیق‌تر استفاده شده است. همچنین، با مقایسه مدل‌های آشفتگی استفاده‌شده در بررسی‌های مشابه تک‌فاز، مدلی مناسب برای این هندسه در شبیه‌سازی دوفازی پیشنهاد شده است. متغیرهای مستقل مورد استفاده در این تحقیق شامل عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات و متغیرهای ساختاری شامل نسبت

علائم یونانی	زیرنویس‌ها		
ρ	f	چگالی سیال (kg/m^3)	سیال
δ	np	ضخامت نوار پیچشی (mm)	ذرات
μ	p	لزجت دینامیکی سیال (kg/ms)	لوله بدون نوار
η	t	بازده	لوله با نوار
ϕ		کسر حجمی نانوسیال (درصد حجمی)	

مراجع

- [1] Naik, M. T., Janardana, G. R., & Sundar, L. S., "Experimental Investigation of Heat Transfer and Friction Factor with Water-propylene glycol based CuO Nanofluid in a Tube with Twisted Tape inserts", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp.13-21, 2013.
- [2] Naik, M. T., Fahad, S. S., Sundar, L. S., & Singh, M. K., "Comparative Study on Thermal Performance of Twisted Tape and Wire Coil inserts in Turbulent Flow using CuO/water Nanofluid", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 57, pp. 65-76, 2014.
- [3] Azmi, W. H., Sharma, K. V., Mamat, R., & Anuar, S., "Turbulent Forced Convection Heat Transfer of Nanofluids with Twisted Tape insert in a Plain Tube", Energy procedia, Vol. 52, pp. 296-307, 2014.
- [4] Prasad, P. D., Gupta, A. V. S. S. K. S., & Deepak, K., "Investigation of Trapezoidal-Cut Twisted Tape Insert in a Double Pipe U-Tube Heat Exchanger using Al₂O₃/Water Nanofluid", Procedia Materials Science, Vol. 10, pp. 50-63, 2015.
- [5] Khoshvaght-Aliabadi, M., & Eskandari, M., "Influence of Twist Length Variations on Thermal-Hydraulic Specifications of Twisted-Tape inserts in Presence of Cu-water Nanofluid", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 61, pp. 230-240, 2015.
- [6] Khoshvaght-Aliabadi, M., Shabanpour, H., Alizadeh, A., & Sartipzadeh, O., "Experimental Assessment of Different Inserts inside Straight Tubes: Nanofluid as Working Media." Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 97, pp. 1-11, 2015.
- [7] Azmi, W. H., Sharma, K. V., Sarma, P. K., Mamat, R., Anuar, S., & Sundar, L. S., "Numerical Validation of Experimental Heat Transfer Coefficient with SiO₂ Nanofluid Flowing in a Tube with Twisted Tape Inserts", Applied Thermal Engineering, Vol. 73, No. 1, pp. 296-306, 2014.
- [8] Eiamsa-ard, S., & Kiatkittipong, K., "Heat Transfer Enhancement by Multiple Twisted Tape Inserts and TiO₂/Water Nanofluid", Applied Thermal Engineering, Vol. 70, No. 1, pp. 896-924, 2014.
- [9] Eiamsa-ard, S., Kiatkittipong, K., & Jedsadaratanachai, W., "Heat Transfer Enhancement of TiO₂/Water Nanofluid in a Heat Exchanger Tube Equipped with Overlapped Dual Twisted-Tapes", Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 18, No. 3, pp. 336-350, 2015.
- [10] Behzadmehr, A., Saffar-Avval, M., & Galanis, N., "Prediction of Turbulent Forced Convection of a Nanofluid in a Tube with Uniform Heat Flux using a Two Phase Approach", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, No. 2, pp. 211-219, 2007.
- [11] He, Y., Men, Y., Zhao, Y., Lu, H., & Ding, Y., "Numerical Investigation into the Convective Heat Transfer of TiO₂ Nanofluids Flowing through a Straight Tube under the Laminar Flow Conditions", Applied Thermal Engineering, Vol. 29, No. 10, pp. 1965-1972, 2009.
- [12] Fard, M. H., Esfahany, M. N., & Talaie, M. R., "Numerical Study of Convective Heat Transfer of Nanofluids in a Circular Tube Two-phase Model versus Single-phase Model." International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 37, No. 1, pp. 91-97, 2010.
- [13] Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", John Wiley and Sons, 1984.
- [14] Van Doormaal, J. P., & Raithby, G. D., "Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows", Numerical heat transfer, Vol. 7, No. 2, pp. 147-163, 1984.
- [15] Ounis, H., Ahmadi, G., & McLaughlin, J. B., "Brownian Diffusion of Submicrometer Particles in the Viscous Sublayer", Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 143, No.1, pp. 266-277, 1991.
- [16] Saffman, P. G. T., "The Lift on a Small Sphere in a Slow Shear Flow", Journal of fluid mechanics, Vol. 22, No.2, pp. 385-400, 1965.
- [17] Talbot, L., Cheng, R. K., Schefer, R. W., & Willis, D. R., "Thermophoresis of Particles in a Heated Boundary Layer", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 101, No. 04, pp. 737-758, 1980.
- [18] Ranz, W. E., "Evaporation from Drops: Part II", Chem. Engng. Prog. Vol. 48, pp. 173-180, 1952.
- [19] Bejan, A., "Convective Heat Transfer", Third ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [20] Ansys Team, "Fluent Ansys. 12.0 User's guide", User Inputs for Porous Media 6, 2009.
- [21] Nguyen, V. B., Nguyen, Q. B., Zhang, Y. W., Lim, C. Y. H., & Khoo, B. C., "Effect of Particle Size on Erosion Characteristics", Wear, Vol. 348, pp. 126-137, 2016.
- [22] Sundar, L. S., & Sharma, K. V., "Turbulent Heat Transfer

- and Friction Factor of Al₂O₃ Nanofluid in Circular Tube with Twisted Tape Inserts*", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, No. 7, pp. 1409-1416, 2010.
- [۲۳] کاظمی، خدیجه، شیخزاده، قنبرعلی، نظیفی فرد، محمد، مداحیان، رضا، شبیه سازی عددی دوفازی نانوسیال در یک لوله با نوار چرخان: انتخاب مدل آشفتگی مناسب، هفدهمین کنفرانس دینامیک شاره ها FD2017، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۵-۷ شهریور ۱۳۹۶.
- [24] Kumar, N. R., Bhamara, P., Addis, B. M., Sundar, L. S., Singh, M. K., & Sousa, A. C., "Experimental Heat Transfer, Friction Factor and Effectiveness Analysis of Fe₃O₄ Nanofluid Flow in a Horizontal Plain Tube with Return Bend and Wire Coil Inserts", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 109, pp. 440-453, 2017.
- [25] Kheradmand, S., Esmailian, M., & Fatahy, A., "Numerical Simulation of the Combination Effect of External Magnetic Field and Rotating Workpiece on Abrasive Flow Finishing", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 31, No. 4, pp. 1835-1841, 2017.
- [26] Promvong, P., "Thermal Augmentation in Circular Tube with Twisted Tape and Wire Coil Turbulators", Energy Conversion and Management, Vol. 49, No.11, pp. 2949-2955, 2008.
- [27] Wongcharee, K., & Eiamsa-Ard, S., "Enhancement of Heat Transfer using CuO/Water Nanofluid and Twisted Tape with Alternate Axis", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 38, No .6, pp. 742-748, 2011.