

مطالعه عددی تولید آنتروپی در جریان همرفت اجباری نانوسیال غیرنیوتنی در یک مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای پیچ خورده

امین شهسوار*، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران، a.shahsavar@kut.ac.ir

چکیده

هدف از این مطالعه، بررسی عددی جنبه‌های مختلف موثر بر تولید انواع آنتروپی در یک مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای پیچ‌خورده است. در لوله داخلی، ترکیبی از نانوذرات اکسید مس (CuO) درون سیال پایه (ترکیب ۰/۵ درصد وزنی کربوکسی متیل سلولز و آب) به عنوان نانوسیال غیرنیوتنی مورد استفاده قرار گرفت. در فضای بین دو لوله، آب در جهت مخالف و با عدد رینولدز 1000 (Re) جاری شد. تاثیر غلظت نانوذرات (ϕ)، عدد رینولدز نانوسیال و گام پیچش بر روی نتایج بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش Re از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ برای نانوسیال، آنتروپی گرمایی و اصطکاکی را افزایش می‌دهد. همچنین، افزایش غلظت نانوذرات از ۰ تا ۳٪ موجب کاهش هردو نوع آنتروپی گردید. در $Re=2000$ ، افزایش ϕ از ۰ تا ۳٪ موجب کاهش ۹/۲٪، ۱۵/۳٪ و ۱۱/۸٪ به ترتیب برای آنتروپی‌های گرمایی، اصطکاکی و کل شد. علاوه بر این، افزایش گام پیچش موجب افزایش آن‌ها بخصوص برای آنتروپی گرمایی بود. همچنین، دیده شد که برای تمامی مقادیر ϕ ، عدد بجان هم‌زمان با افزایش Re افزایش می‌یابد و در Re ثابت، افزایش ϕ نیز موجب افزایش اندک آن می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تولید آنتروپی، مبادله‌کن گرمایی دو لوله‌ای، نانوسیال، قانون دوم ترمودینامیک، عدد بجان.

Numerical investigation of the entropy generation of forced convection flow of a non-Newtonian nanofluid inside a twisted double-pipe heat exchanger

A. Shahsavar

Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

Abstract

The aim of this study is to numerically investigate various aspects influencing the entropy production in a twisted double-pipe heat exchanger. In the inner tube, a combination of copper oxide (CuO) nanoparticles in the base fluid (solution of 0.5 wt% Carboxymethyl Cellulose in water) was used as the non-Newtonian nanofluid. In the space between the two pipes, water flowed in the opposite direction with the Reynolds number (Re) of 1000. The effect of nanoparticle concentration (ϕ), Re and twist pitch on the results were investigated. The results show that increasing Re from 500 to 2000 increases the thermal and frictional entropies. Also, increasing ϕ from 0 to 3% reduced both types of entropy. At $Re=2000$, increasing ϕ from 0 to 3% caused a decrease of 9.2%, 15.3% and 11.8% for thermal, frictional and total entropies, respectively. In addition, increasing the twist pitch increased them especially for thermal entropy. Also, it was observed that for all the considered values of ϕ , the Bejan number increases with increasing Re, and at a constant Re, increasing ϕ causes it to increase slightly.

Keywords: Entropy production, Double-pipe heat exchanger, Nanofluid, Second-law of thermodynamic, Bejan number

محققان برای بهبود عملکرد مبادله‌کن‌های گرمایی عبارتند از استفاده از پره [۱]، توربولاتور [۲]، سطوح موج‌دار [۳]، میدان مغناطیسی [۴]، ارتعاش [۵] و لوله‌های پیچ خورده [۶]. این لوله‌ها به دلیل هندسه خاص خود، منجر به چرخش سیال می‌شوند که بهبود اختلاط سیال و در نتیجه، افزایش انتقال گرما از جداره به سیال را در پی دارد [۶]. مشخصات هیدروگرمایی جریان سیال در لوله‌های پیچ خورده توسط برخی از محققان مورد بررسی گرفته است. دیوبنکو و همکاران [۷] تاثیر چرخش سیال ناشی از لوله پیچ خورده بر روی انتقال گرمای همرفت و افت فشار جریان سیال بر روی یک دسته لوله پیچ خورده را بررسی کردند. دیده شد که جایگزین کردن لوله معمولی با لوله پیچ خورده منجر به بهبود ۱/۵ الی ۳/۵ برابری انتقال گرما می‌شود. زانگ و همکاران [۸] انتقال گرمای جریان همرفت اجباری آب داخل مبادله‌کن گرمایی دو لوله‌ای پیچ خورده را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نتایج را با داده‌های مربوط به مبادله‌کن پرده‌دار مقایسه کردند. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، رابطه‌ای برای ضریب انتقال گرما و افت فشار توسعه دادند. نتایج نشان داد که عملکرد انتقال گرمای سمت پوسته و

۱- مقدمه

مبادله‌کن گرمایی دستگاهی است که امکان انتقال انرژی گرمایی بین دو یا چند سیال (مایع/گاز) در دماهای مختلف را فراهم می‌کند. در واقع، مبادله‌کن‌های گرمایی در هر دو فرآیند سرمایش و گرمایش به کار گرفته می‌شوند. این تجهیزات تقریباً پرکاربردترین عضو در فرآیندهای شیمیایی هستند و می‌توان آن‌ها را در بیش‌تر واحدهای صنعتی به‌وفور مشاهده کرد. برخی از کاربردهای مبادله‌کن‌های گرمایی عبارتند از: نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها، صنایع پتروشیمی، صنایع ساخت و تولید، صنایع فرآیندی، صنایع غذایی و دارویی، صنایع ذوب فلز، گرمایش، تهویه مطبوع، سیستم‌های تبرید و کاربردهای فضایی. علاوه بر این، مبادله‌کن‌های گرمایی در دستگاه‌های مختلف نظیر دیگ بخار، مولد بخار، کندانسور، اواپراتور، تبخیرکننده، برج خنک‌کن، پیش-گرم‌کن فن کویل، خنک‌کن و گرم‌کن روغن، رادیاتورها و کوره‌ها کاربرد فراوان دارند. با توجه به کاربرد گسترده مبادله‌کن‌های گرمایی، بهبود عملکرد آن‌ها حائز اهمیت است. برخی از ایده‌های مطرح شده توسط

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a.shahsavar@kut.ac.ir

لوله برای لوله پیچ خورده بهتر از لوله معمولی است. کینگ و همکاران [۹] عملکرد لوله پیچ خورده در تبخیرکن را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که ضریب انتقال گرمای همرفت در لوله پیچ خورده ۱/۲۹ الی ۱/۵۱ برابر لوله معمولی است. یو و همکاران [۱۰] انتقال گرمای همرفت اجباری آب داخل پنج لوله پیچ خورده با سطح مقطع بیضوی با گام‌های مختلف را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد که انتقال گرمای لوله‌های پیچ خورده بیضوی بسیار بیش‌تر از لوله معمولی است و میزان بهبود با افزایش گام لوله کاهش می‌یابد. عدد ناسلت لوله پیچ خورده ۱/۰۵ الی ۱/۴ برابر لوله معمولی و افت فشار لوله پیچ خورده ۱/۱ الی ۱/۴ لوله معمولی بود. سامرواسین و همکاران [۱۱] تاثیر استفاده هم‌زمان از لوله پیچ خورده و نوار پیچ خورده بر روی انتقال گرما و افت فشار جریان همرفت اجباری آب را به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. نتایج نشان داد که در یک عدد رینولدز مشخص، عدد ناسلت و افت فشار لوله پیچ خورده مجهز به نوار پیچ خورده بیش‌تر از مقادیر مربوط به لوله پیچ خورده بدون نوار پیچ خورده و نیز لوله معمولی است.

گروهی از محققان معتقدند که دلیل اصلی پایین بودن راندمان مبادله‌کن‌های گرمایی، پایین بودن رسانایی گرمایی سیال‌هایی است که به طور متداول در صنعت برای خنک‌کاری به کار گرفته می‌شوند. راه-کار پیشنهادی محققان برای حل این مشکل عبارت است از افزودن ذرات ریز فلزی و اکسید فلزی با رسانایی گرمایی بالا به مایعات متداول در انتقال گرما. محدودیت‌های موجود در زمینه تهیه ذرات با ابعاد کوچک باعث شد که در ابتدا، ذرات تهیه شده در ابعاد میلی‌متر و یا حداکثر میکرومتر باشند که این مساله منجر به بروز مشکلاتی از قبیل ته‌نشینی و کلوخه شدن ذرات، انسداد مسیرهای جریان و افزایش افت فشار در سیستم‌های انتقال گرما شد. در سال ۱۹۹۳، محققان موفق به ساخت نانوذرات شدند و دو سال بعد، چوی [۱۲] موفق به سنتز سوسپانسیون پایدار نانوذرات در مایعات شد. وی این سوسپانسیون را نانوسیال نامید و خواص ترموفیزیکی آن‌ها را اندازه‌گیری و ارائه کرد [۱۲]. اندازه بسیار کوچک ذرات استفاده شده و کسر حجمی پایین ذرات نانو مسائلی نظیر ته‌نشینی و کلوخه شدن را از بین برده و هزینه‌های لازم برای نگهداری و انتقال این سیال‌ها را کم می‌کند و به علت اندازه بسیار کوچک، مشکلات سائیدگی و آسیب رساندن به سیستم‌ها در مورد این ذرات وجود ندارد. همچنین، سطح نسبی بزرگ این ذرات تاثیرهای غیرتعادلی بین سیال و جامد را کاهش داده و باعث پایداری سوسپانسیون می‌شود. عملکرد خنک‌کاری نانوسیال‌ها در کاربردهای مختلف توسط محققان بررسی شده و عمدتاً گزارش شده است که نانوسیال دارای عملکرد گرمایی بهتری از خنک‌کن‌های متداول است [۱۳].

استفاده از ترکیبی از لوله‌های پیچ خورده و نانوسیال برای بهبود عملکرد مبادله‌کن‌های گرمایی توسط برخی از محققان بررسی شده است. خوشوقت علی آبادی و همکاران [۱۴] تاثیر نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم بر روی عملکرد مینی کانال‌های پیچ خورده را به صورت عددی بررسی کردند. تاثیر سطح مقطع (بیضوی، نیم دایره‌ای، مربعی، مستطیلی و مثلثی)، نسبت گام پیچش به طول کانال، غلظت نانوذرات و عدد رینولدز بر روی نتایج بررسی شد. نتایج نشان داد که کلیه کانال‌های پیچ خورده بررسی شده دارای عملکرد گرمایی بهتری از لوله صاف

هستند. همچنین، مشاهده شد که عملکرد هیدروگرمایی نانوسیال فقط در غلظت ۱٪ بهتر از سیال پایه است. فیض آبادی و همکاران [۱۵] عملکرد خنک‌کاری نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم جاری در یک لوله پیچ خورده مارپیچ را به صورت عددی بررسی کردند. تاثیر گام مارپیچ، گام پیچش و غلظت نانوذرات بر روی نتایج بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش غلظت نانوذرات منجر به افزایش عدد ناسلت می‌شود ولی تاثیر زیادی بر روی ضریب اصطکاک ندارد. امیدوی و همکاران [۱۶] جریان آشفته نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم داخل لوله پیچ خورده سه گوش مجهز به توربولاتور Y شکل را با استفاده از مدل دو فاز مخلوط به صورت عددی بررسی کردند. تاثیر غلظت نانوذرات و عدد رینولدز بر روی نتایج بررسی شد. نتایج نشان داد که نسبت عدد ناسلت لوله پیچ خورده به لوله صاف با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مشاهده شد که افزایش غلظت نانوذرات منجر به افزایش عدد ناسلت می‌شود ولی تاثیری بر روی نسبت عدد ناسلت لوله پیچ خورده به لوله صاف ندارد. ماهاتو و همکاران [۱۷] انتقال گرما و جریان نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم داخل کانال مربعی پیچ خورده را به صورت عددی بررسی کردند. تاثیر عدد رینولدز و غلظت نانوذرات بر روی نتایج بررسی شد. مشاهده شد که عدد ناسلت با کاهش گام پیچش و افزایش عدد پرانتل افزایش می‌یابد.

قانون اول ترمودینامیک در مبادله‌کن‌های گرمایی به طور عملکردی میزان گرمای منتقل شده بین سیال‌ها و محیط اطراف را تشریح می‌کند و به توازن کمی و روابط بین آنها می‌پردازد [۱۸]. اما موضوعات اساسی مانند راندمان سیستم، اتلاف انرژی، تولید آنتروپی و کار تلف شده مرتبط با قانون دوم ترمودینامیک است. در حقیقت، برای دستیابی به بازده‌های دقیق و عملی سیستم‌های ترمودینامیکی واقعی، قانون دوم یک اصل بسیار کاربردی است و چگونگی دستیابی به انرژی‌های گرمایی، مکانیکی و ارتباط بین آن‌ها را امکان‌پذیر می‌کند [۱۹، ۲۰]. در مبادله‌کن‌های گرمایی عمدتاً چندین مکانیسم برای اتلاف انرژی وجود دارد: تبادل گرما در اختلاف دمای محدود، نقص تنظیم یا نصب تجهیزات مورد استفاده، افت‌های اصطکاکی سیال‌ها و افت حرارتی به دلیل تماس با محیط اطراف مبادله‌کن گرمایی [۲۱]. همه موارد فوق قابل توجه است به جز چهارمین مورد که معمولاً با عایق کاری کامل سیستم، مقدار آن به صفر نزدیک می‌شود. موارد اول و سوم (اتلاف به دلیل اختلاف دمای محدود و اصطکاک سیال) غالباً برگشت‌ناپذیر نامیده می‌شوند. از آنجا که بیش‌تر مبادله‌کن‌های گرمایی معمولاً بین دو یا چند سیال با اختلاف دمای زیاد کار می‌کنند، منطقی است که برگشت‌ناپذیری در سیستم و در نتیجه، افزایش قابل توجهی در آنتروپی تولیدی وجود داشته باشد. در اینجا، قانون دوم ترمودینامیک عمدتاً به این واقعیت می‌پردازد که اصلاحات مختلف در ساختار مبادله‌کن‌های گرمایی می‌تواند باعث افزایش کارایی ترمودینامیکی آن‌ها و کاهش تولید آنتروپی کل گردد [۲۲].

بررسی ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که مشخصات تولید آنتروپی برای جریان همرفت اجباری نانوسیال در یک مبادله‌کن گرمایی دو لوله‌ای پیچ خورده تا کنون بررسی نشده است. در تحقیق حاضر، یک مبادله‌کن گرمایی دو لوله‌ای پیچ خورده مورد بررسی قرار گرفته است که نانوسیال غیر نیوتنی در لوله داخلی آن و آب در فضای بین دو لوله پیچ خورده در جریان است. هدف از این شبیه‌سازی، بررسی تولید

کربوکسی متیل سلولز) حاصل شده است. کربوکسی متیل سلولز یا صمغ گلوکز یکی از مشتقات سلولز است که کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف دارد. از آنجایی که این ماده از سلولز طبیعی حاصل می‌شود، می‌تواند به صورت بیولوژیکی تجزیه شود و با محیط زیست بسیار سازگار است، بنابراین، بدون نگرانی می‌توان بطور گسترده از آن استفاده کرد. این ترکیب یک پلیمر محلول در آب آنیونی است که دارای خواص جذب و ابقاء آب عالی است و در طیف گسترده‌ای از کاربردها از جمله مواد افزودنی غذایی و خوراکی، مواد آرایشی، مواد ضخیم کننده و اتصال دهنده مورد استفاده قرار می‌گیرد. کربوکسی متیل سلولز در رنگ‌های روغنی و پولیش‌ها نیز استفاده می‌شود و به عنوان یک قوام دهنده عمل می‌کند و رنگدانه را در مایعات معلق نگه می‌دارد. نانوذرات CuO یک دسته جالب از مواد با خواص چند منظوره با کاربردهای متعددی در زمینه کاتالیزورها، باتری‌ها، محیط‌های ذخیره مغناطیسی، انرژی خورشیدی و ابررساناها است. این نانوذرات به دلیل مساحت سطح زیاد، مزایای زیادی نسبت به مواد معمولی دارند. علاوه بر این، نانوذرات CuO دارای رسانایی گرمایی قابل توجهی هستند و به همین دلیل، در نانوسیال‌ها به کار گرفته می‌شوند. با توزیع مقادیر مطلوب نانوذرات در سیال پایه، نانوسیال غیرنیوتنی با درصدهای مختلف ϕ بدست آمد. لازم به ذکر است که دو سیال در جهت مخالف هم عبور می‌کنند.

۳- شبیه‌سازی عددی

۳-۱- معادلات حاکم

به دلیل اندازه بسیار ریز نانوذرات و توزیع یکنواخت آن‌ها در سیال پایه قبل از استفاده، فرض بر این است که نانوسیال غیر نیوتنی به عنوان یک ترکیب یک فازی عمل می‌کند. برای تعیین میدان‌های سرعت، فشار و دما برای جریان آرام، دائم و تراکم‌ناپذیر نانوسیال و آب باید معادلات پایستگی جرم، مومنتوم و انرژی که به ترتیب در ادامه ارائه شده‌اند، حل شوند [۲۴]:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v}) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v}) \quad (3)$$

که در معادلات فوق، نمادهای ρ ، \vec{v} ، p ، μ ، T ، k و c_p به ترتیب به موارد زیر اشاره می‌کنند: چگالی، بردار سرعت، فشار، لزجت، دما، رسانایی گرمایی و گرمای ویژه. خواص ترموفیزیکی نانوسیال غیرنیوتنی با استفاده از معادلات بعدی تعیین می‌گردد [۲۴]:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (4)$$

$$c_{p,nf} = \frac{(1 - \phi)\rho_{bf}c_{p,bf} + \phi\rho_p c_{p,p}}{\rho_{nf}} \quad (5)$$

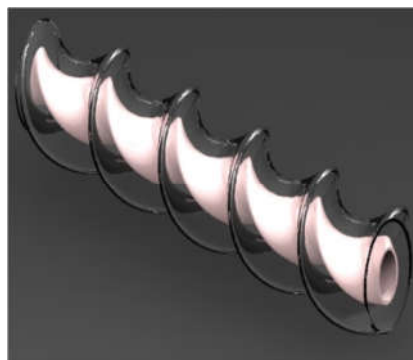
$$\mu_{nf} = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad (6)$$

در معادلات فوق از اختصاراتی مانند ρ_{bf} ، n_f و p استفاده شده است که به ترتیب به سیال پایه، نانوسیال و نانوذرات اشاره می‌کنند. لازم به ذکر

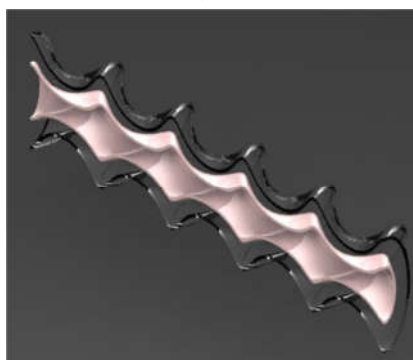
آنتروپی‌های اصطکاکی، گرمایی و کل و تغییر عدد بجان تحت تاثیر تغییر عوامل مختلف مانند تغییر عدد رینولدز و غلظت نانوذرات است. با توجه به مطالعات گسترده نویسندگان، تاکنون چنین پژوهشی در مورد مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای (DPHE) انجام نشده است. مطمئناً نتایج این تحقیق می‌تواند راه را برای محققان علاقمند به این زمینه هموار سازد.

۲- طراحی مبادله‌کن گرمایی و انواع سیال‌های مورد استفاده

ساختار انتخاب شده یک DPHE است که از دو لوله پیچ خورده با مقطع بیضی تشکیل شده است. به منظور دست‌یابی به توزیع دقیق جریان‌های سرعت و حرارت نانوسیال، از بسته FLUENT (CFD) در این کار استفاده شده است. علاوه بر این، همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، با استفاده از نرم افزار Solidworks 2014، یک نمای کلی از مبادله‌کن گرمایی و مقطع طولی و عرضی آن ترسیم شده است تا ساختار مبادله‌کن بهتر مجسم گردد.



(الف)



(ب)

شکل ۱- طرحواره (الف) DPHE و (ب) برش طولی آن.

ویژگی‌های مبادله‌کن گرمایی عبارتند از: ۵۰۰ میلی متر طول، قطرهای کوچک و بزرگ برای لوله خارجی ۵/۶ و ۱۱/۲ میلی‌متر و برای لوله داخلی ۲/۸ و ۵/۶ میلی‌متر. سیالی که از فضای بین دو لوله عبور می‌کند، آب است ($Re=1000$) و سیال عبوری از درون لوله داخلی ($2000 < Re < 500$) یک نانوسیال غیرنیوتنی (CuO/CMC-water) است [۲۴] که به ترکیب نانوذرات CuO با سیال پایه (آب)-

است که چگالی و گرمای ویژه نانوذرات CuO، به ترتیب، برابر با ۳۹۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۷۶۵ ژول بر کیلوگرم-کلوین و چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه سیال پایه نیز، به ترتیب، برابر با ۹۹۷/۱ کیلوگرم بر متر مکعب و ۴۱۷۹ ژول بر کیلوگرم-کلوین می‌باشند. همچنین، نانوذرات کروی بوده و قطر آنها ۳۰ الی ۵۰ نانومتر است. همانطور که در معادله مربوط به لزجت نانوسیال دیده می‌شود، از قانون توانی پیروی کرده و دو پارامتر ثابت برای آن تعریف می‌شود که γ به نرخ برشی اشاره دارد. با توجه به مقادیر مختلف ϕ ، ثابت معادله (۶) به طور دقیق در جدول ۱ تعیین و نمایش داده شده‌اند. علاوه بر این، مقادیر رسانایی گرمایی که به تغییرات غلظت نانوذرات وابسته است، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- ثوابت و مقادیر غلظت نانوذرات مربوط به تعیین لزجت

نانوسیال.		
ϕ (%)	m	n
۰	۰/۱۴۵	۰/۵۴۲
۰/۵	۰/۱۴۴	۰/۵۴۱
۱	۰/۱۴۲	۰/۵۳۷
۱/۵	۰/۱۳۰	۰/۵۴۶
۳	۰/۱۱۴	۰/۵۷۱

جدول ۲- مقادیر رسانایی گرمایی نانوسیال در مقادیر مختلف ϕ .

ϕ (%)	k_{nf} (W/m.K)
۰	۰/۶۱۳
۰/۵	۰/۶۰۲
۱	۰/۶۱۶
۱/۵	۰/۶۲۲
۳	۰/۷۶۴

رابطه مورد استفاده برای یافتن ضریب اصطکاک نانوسیال با استفاده از ویژگی‌های جریان و لوله، از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۴]:

$$f = (2\Delta P D_h / L \rho u^2) \quad (7)$$

که در آن پارامترهای مربوطه ΔP ، D_h ، u ، L و ρ برای قطر هیدرولیکی لوله، افت فشار، سرعت سیال، طول لوله و چگالی سیال بکار می‌روند. از رابطه زیر می‌توان برای Re سیال‌های شبه پلاستیک استفاده کرد (با توجه به این که u سرعت ورودی سیال است) [۲۴]:

$$Re = \frac{\rho D_h^n u_{in}^{2-n}}{m} \quad (8)$$

۲-۳- شرایط مرزی

سیستم مورد مطالعه، ضخامت بسیار کمی را برای دیواره لوله‌ها فرض می‌کند و از آنجا که دیواره لوله بیرونی عایق‌بندی شده است، اتلاف گرما از طریق هوای اطراف به صفر می‌رسد. در ورودی لوله‌ها فرض بر این است که سرعت و دمای ورودی یکنواخت است و در خروجی لوله‌ها، فشار نسبی برابر با صفر در نظر گرفته شده است. دمای ورودی برای جریان آب و سیال غیر نیوتنی به ترتیب ۳۰۸ و ۲۹۸ کلوین است.

۳-۳- تولید آنتروپی

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، به طور کلی سه نوع تولید آنتروپی در مبادله‌کن‌های گرمایی وجود دارد: به دلیل تبادل گرما در اختلاف دمای محدود، اصطکاک سیال و تبادل گرما با محیط. مورد سوم معمولاً به دلیل عایق‌بندی مناسب در سیستم نادیده گرفته شده و دو مورد اول به عنوان مهم‌ترین منابع تولید آنتروپی در این بخش در نظر گرفته شده‌اند. نرخ تولید آنتروپی‌های گرمایی ($\dot{S}_{g,h}'''$) و اصطکاک ($\dot{S}_{g,f}'''$) به ترتیب در روابط زیر بیان می‌شوند [۲۴]:

$$\dot{S}_{g,h}''' = \frac{k}{T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$\dot{S}_{g,f}''' = \frac{\mu}{T} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

همچنین از مجموع دو معادله فوق، آنتروپی کل بدست می‌آید:

$$\dot{S}_{g,t}''' = \dot{S}_{g,h}''' + \dot{S}_{g,f}''' \quad (11)$$

به عبارت دیگر، هر یک از معادلات فوق از طریق انتگرال‌گیری از آنتروپی موضعی در محدوده مورد نظر حاصل می‌شوند [۲۴]:

$$\dot{S}_{g,f} = \int \dot{S}_{g,f}''' dV, \quad \dot{S}_{g,t} = \int \dot{S}_{g,t}''' dV, \quad (12)$$

$$\dot{S}_{g,h} = \int \dot{S}_{g,h}''' dV$$

با توجه به آنتروپی‌های تولید شده، عدد بجان (Be) عددی بدون بعد است که به صورت نسبت آنتروپی گرمایی به آنتروپی کل تعریف می‌شود. این پارامتر مقادیر بین صفر تا یک را داراست و می‌تواند در مواردی از قبیل اختلاف دمای لگاریتمی کم، جریان‌هایی با رینولدز پایین و یا اعداد پراتل بالا نزدیک به صفر باشد و در عکس موارد مذکور نزدیک به یک است [۲۴]:

$$Be = \frac{\dot{S}_{g,h}'''}{\dot{S}_{g,t}'''} \quad (13)$$

۴- روش عددی

معادلات حاکم و شرایط مرزی ارائه شده مرتبط با آن‌ها در بخش قبل، به روش حجم محدود و با استفاده از بسته CFD (FLUENT)

۵- بحث و نتایج

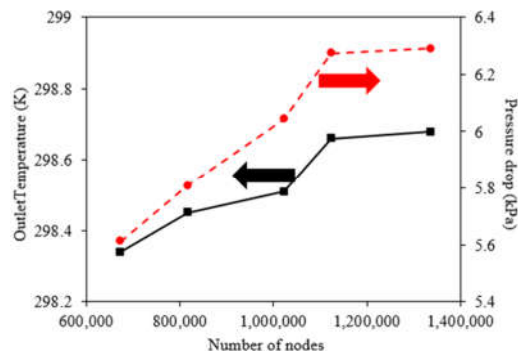
آنالیزهای مختلف با دقت انجام شد تا مشخص شود که متغیرهای مستقل چگونه بر پاسخ‌ها تاثیر می‌گذارند. این متغیرها شامل عدد رینولدز نانوسیال (۲۰۰۰-۵۰۰)، غلظت نانوذرات (۳٪-۰) و گام پیچش (۲-۶ میلی‌متر) بودند. به منظور بررسی بهتر اثرات انحنای دیواره بر توزیع دمای نانوسیال، کانتورهای دما و بردارهای گردابه در مقاطع مختلف لوله داخلی در شکل ۴ ترسیم شده‌اند. مقاطع در نظر گرفته شده شامل سه مقطع عرضی در فواصل ۰/۱۲۵، ۰/۲۵۰ و ۰/۳۷۵ متری از ورودی لوله و یک مقطع طولی در فواصل ۰/۲ الی ۰/۳ متری از ورودی لوله می‌باشند. مقادیر ثابت شامل $Re=2000$ و $\phi=3\%$ است. همانطور که در شکل (۴) مشخص است؛ در تمامی مقاطع، جریان‌های ثانویه که از ابتدای لوله تشکیل شده در طول آن همچنان وجود دارند. جریان ثانویه در لوله مدور معمولی مستقیم ایجاد نمی‌شود، اما در لوله پیچ خورده نیرویی که به دلیل خمیدگی دیواره بر خطوط جریان وارد می‌شود، سبب ایجاد اختلال در آن‌ها شده و باعث تشکیل گرداب‌ها و جریان ثانویه در سیال می‌شود. بدیهی است که گردابها و قدرت جریان ثانویه در قسمت‌های ورودی لوله قوی‌تر است، و با عبور جریان نانوسیال در طول لوله، موقعیت گرداب‌ها در نزدیکی محورها تحت حرکت چرخشی تغییر یافته و مقداری جابجا شده است. قطعا اولین تاثیر ایجاد گرداب و جریان ثانویه بر روی نانوسیال، اختلاط بهتر و توزیع مناسب دما از طرف دیوار است که گرما را به مرکز جریان سیال هدایت می‌کند. همانطور که کانتورهای دما این اثر را به خوبی نشان می‌دهند، در انتهای محورهای لوله، که در آنجا تشکیل گرداب‌ها قوی‌تر است، جریان گرما توزیع بهتری دارد و در مقطع ۰/۴ متر، توزیع یکنواخت‌تری از دما مشاهده می‌شود.

شکل ۵ توزیع آنتروپی گرمایی در مقاطع مختلف در امتداد لوله داخلی را برای حالت $Re=2000$ و $\phi=3\%$ نشان می‌دهد. با مشاهده این تصاویر به خوبی دیده می‌شود که با عبور نانوسیال در طول لوله، تولید آنتروپی گرمایی کاهش می‌یابد. این امر به دلیل اختلاف دمای زیاد بین نانوسیال و آب در ابتدای ورود آن به مبادله‌کن گرمایی است که تولید آنتروپی گرمایی را به حداکثر می‌رساند. با اختلاط بهتر نانوسیال، یکنواختی دما افزایش می‌یابد و تلفات انرژی به حداقل می‌رسد. این تاثیر همچنین در مقطع افقی به خوبی مشاهده می‌شود که محدوده تولید آنتروپی گرمایی نزدیک به دیوار در ابتدای ورود نانوسیال گسترده‌تر است، اما با دور شدن نانوسیال از ورودی لوله، محدوده تولید آنتروپی باریک‌تر و شدت آن نیز کم‌تر می‌شود.

تولید آنتروپی اصطکاکی در نانوسیال جاری در لوله داخلی و تغییرات آن برای $Re=2000$ و $\phi=3\%$ در شکل (۶) نشان داده شده است. کانتورها به وضوح نشان می‌دهند که در تماس با دیواره لوله، به خصوص در دو انتهای محور بزرگ، تولید آنتروپی اصطکاکی حداکثر است، جایی که نانوسیال بیش‌ترین تنش را با سطح دارد. اما با پیشروی جریان در امتداد لوله، اصطکاک کاهش می‌یابد. جریان‌های ثانویه و گردابه‌ها منجر به کاهش نرخ برش و بنابراین، افزایش لزجت نانوسیال غیرنیوتنی می‌شوند. طبق رابطه (۱۰)، کاهش نرخ برش و افزایش لزجت، به ترتیب، منجر به کاهش و افزایش تولید آنتروپی اصطکاکی می‌شوند. همچنین، جریان ثانویه منجر به افزایش انتقال گرما از طرف

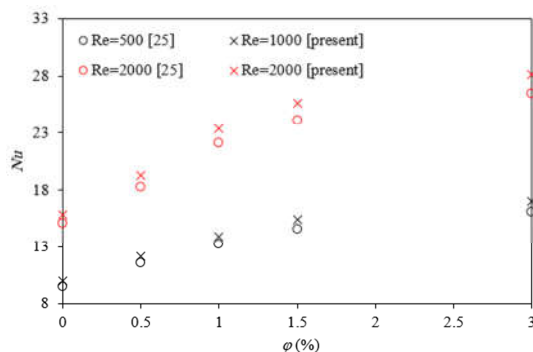
(18.1) حل شده‌اند. الگوریتم SIMPLE برای ارتباط فشار-سرعت استفاده شده است، در حالی که روابط هم‌رفتی به روش مرتبه دوم گسسته شده‌اند. همچنین، معیار همگرایی برای کلیه پارامترها برابر 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

اولین گام برای انجام آنالیز، بررسی استقلال شبکه با در نظر گرفتن تعداد گره‌های ۶۷۳۳۴۳، ۸۱۷۵۵۴، ۱۰۲۳۶۱۲، ۱۱۲۳۷۰۲ و ۱۳۳۶۶۳۰ بود که نتایج آن در شکل (۲) نشان داده شده است. در نتیجه، شبکه با تعداد ۱۱۲۳۷۰۲ گره برای محاسبات بیش‌تر انتخاب شد.

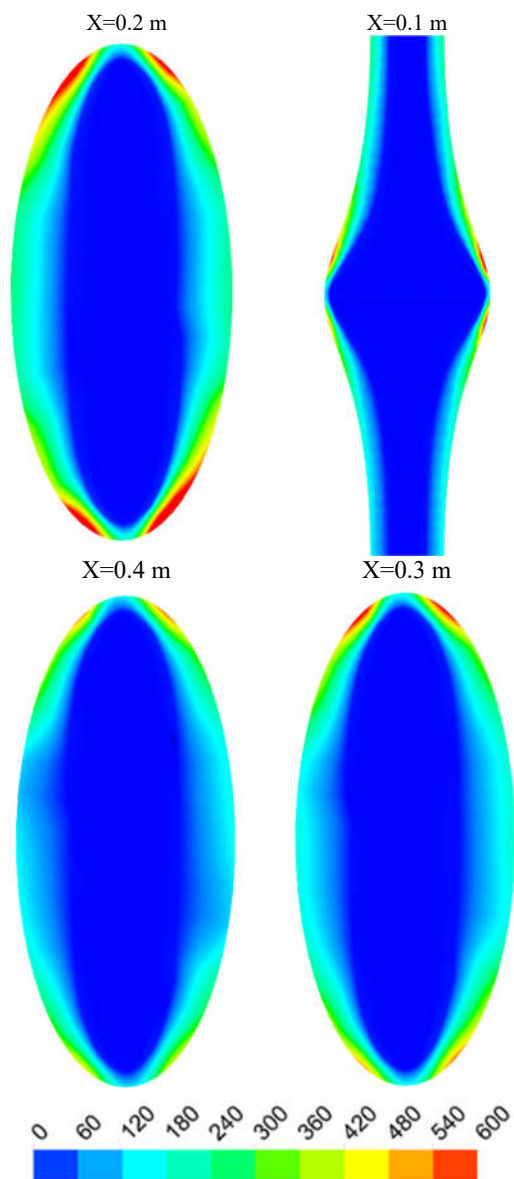


شکل ۲- نتایج آنالیز استقلال شبکه ($Re=2000$ و $\phi=3\%$).

به منظور اطمینان از صحت مدل عددی حاضر، یک مطالعه اعتبارسنجی در رابطه با پژوهش انجام شده توسط نیک‌نژادی و همکاران [۲۵] انجام شده است. آن‌ها جریان نانوسیال آب-اکسید آهن داخل یک لوله پیچ خورده مسی به طول ۵۰۰ میلی‌متر و به ضخامت ۱/۶ میلی‌متر را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. سطح مقطع لوله مربعی با طول ضلع ۴/۸ سانتی‌متر بود. اعداد ناسلت متوسط بدست آمده در کار حاضر و موارد ارائه شده توسط نیک‌نژادی و همکاران [۲۵] در اعداد رینولدز و غلظت‌های مختلف برای گام پیچش ۱۰ میلی‌متر در شکل (۳) ارائه شده‌اند. با در نظر گرفتن نتایج ارائه شده در شکل (۳)، بیش‌ترین اختلاف در مطالعه کنونی ۶/۳۴ درصد است که اعتبار بالای مدل بکار گرفته شده را اثبات می‌کند.



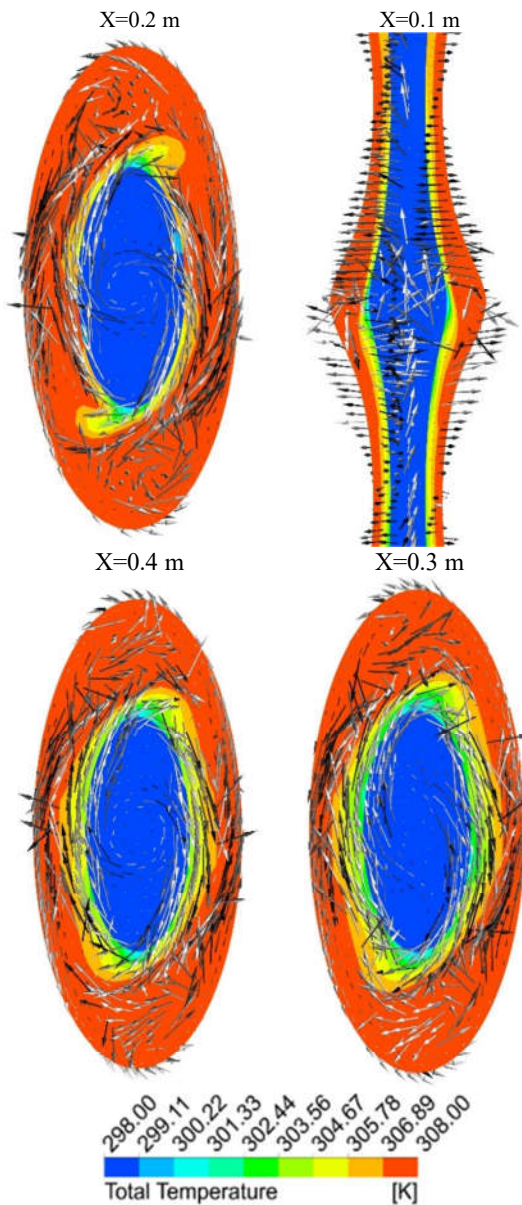
شکل ۳- نتایج اعتبارسنجی.



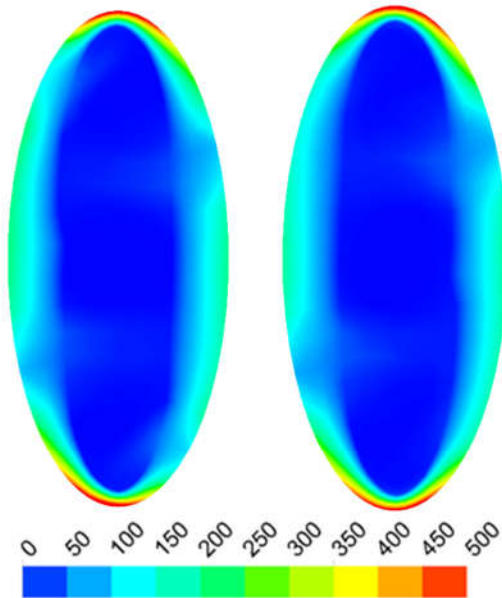
شکل ۵- کانتورهای آنتروپی گرمایی ($W/m^3.K$) در مقاطع مختلف لوله داخلی ($Re=2000$ و $\phi=3\%$).

تغییر در نرخ تولید آنتروپی گرمایی، اصطکاک و کل به عنوان تابعی از Re و ϕ در شکل ۷ نشان داده شده است. اولین نکته قابل توجه این است که با افزایش Re در یک ϕ ثابت، نرخ تولید هر دو نوع آنتروپی گرمایی و اصطکاک بیشتر می‌شود. افزایش Re باعث افزایش سرعت نانوسیال و بنابراین، کاهش دمای متوسط آن می‌شود که با توجه به روابط ارائه شده در معادلات (۹) و (۱۰)، افزایش هر دو نوع آنتروپی را در پی دارد. از طرف دیگر، افزایش عدد رینولدز منجر به کاهش ضخامت لایه‌های مرزی سرعت و گرمایی و بنابراین، افزایش گرادیان‌های سرعت و دما می‌شود که افزایش تولید آنتروپی‌های اصطکاک و گرمایی را در پی دارد. در شکل ۷- الف مشاهده می‌شود که برای همه مقادیر Re ، در ابتدا آنتروپی گرمایی با افزایش غلظت نانوذرات به 0.5% افزایش می‌یابد، سپس افزایش ϕ از 0.5% تا 3% موجب

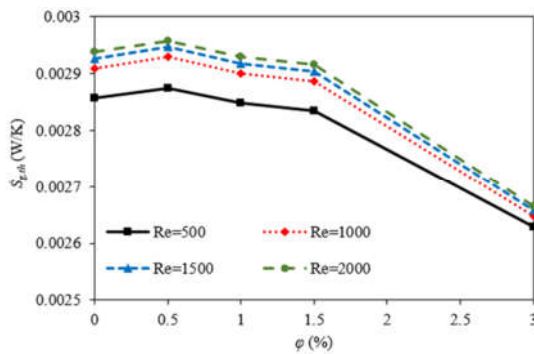
جداره به نانوسیال و بنابراین، افزایش دمای نانوسیال می‌شود که کاهش آنتروپی اصطکاک را در پی دارد. شکل ۶ نشان می‌دهد که تاثیر افزایش دما و کاهش نرخ برش بر روی نرخ تولید آنتروپی اصطکاک بیشتر از تاثیر افزایش لزجت است و در نتیجه، نرخ تولید آنتروپی اصطکاک در نواحی جریان ثانویه کم است.



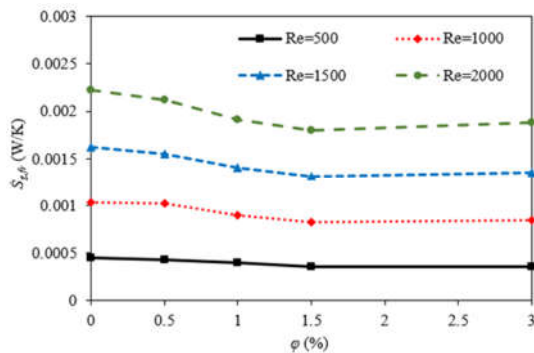
شکل ۴- کانتورهای دما (K) و بردارهای گردابه ($1/s$) در مقاطع مختلف لوله داخلی ($Re=2000$ و $\phi=3\%$).



شکل ۶- کانتورهای آنتروپی اصطکاکی در مقاطع مختلف لوله داخلی ($Re=2000$ و $\varphi=3\%$).

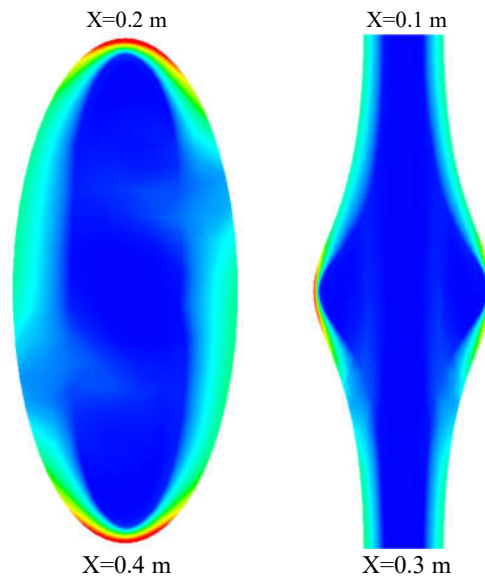


(الف)

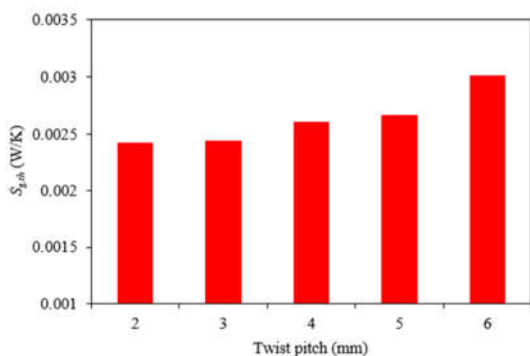


(ب)

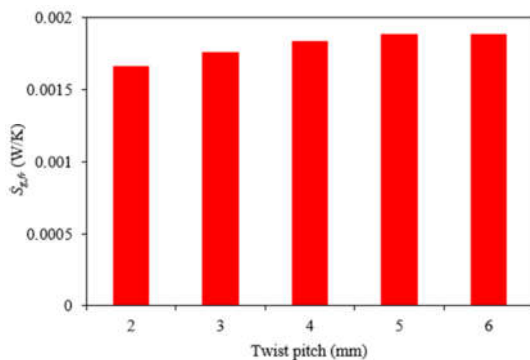
کاهش آنتروپی گرمایی می‌شود. همانطوری که در معادله (۹) دیده می‌شود، تولید آنتروپی گرمایی تابعی از هدایت گرمایی، دمای متوسط نانوسیال و گرادیان دما می‌باشد. طبق اطلاعات جدول ۲، افزایش غلظت نانوذرات از صفر به ۰/۵٪ باعث کاهش رسانایی گرمایی نانوسیال غیرنیوتنی می‌شود. این امر منجر به کاهش دمای متوسط نانوسیال و افزایش گرادیان دما و بنابراین، افزایش آنتروپی گرمایی می‌شود. اما با افزودن بیش‌تر نانوذرات از ۰/۵٪ تا ۳٪، رسانایی گرمایی نانوسیال افزایش می‌یابد که افزایش دمای متوسط نانوسیال و کاهش گرادیان دما را در پی دارد که نهایتاً باعث کاهش آنتروپی گرمایی می‌شود. در شکل ۷- ب مشخص است که برای همه مقادیر Re ، میزان آنتروپی اصطکاکی با افزایش غلظت نانوذرات کاهش می‌یابد. روند مشاهده شده به دلیل تغییر در لزجت نانوسیال با تغییر در مقادیر φ است. طبق جدول ۱، لزجت نانوسیال با افزایش مقادیر φ ، کاهش می‌یابد. با توجه به معادله (۱۰)، آنتروپی اصطکاکی به طور مستقیم به لزجت نانوسیال وابسته است، بنابراین مقدار آن کاهش می‌یابد، که بهترین دلیل برای برتری قابل توجه نانوسیال غیرنیوتنی مورد استفاده در این کار نسبت به سایر نانوسیال‌ها است. در نتیجه، منطقی به نظر می‌رسد که روند نزولی آنتروپی‌های گرمایی و اصطکاکی همراه با افزایش غلظت نانوذرات، باعث کاهش آنتروپی کل شود که در شکل ۷- ج نشان داده شده است.



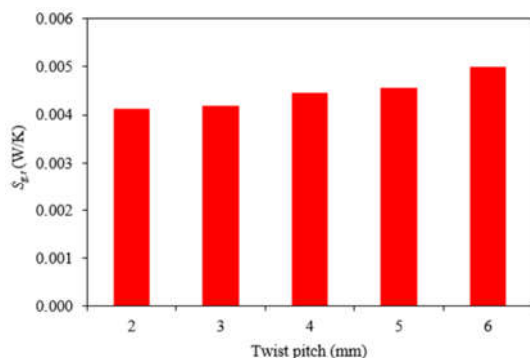
به کاهش گرادیان‌های سرعت و دما و بنابراین، کاهش آنتروپی‌های گرمایی و اصطکاکی می‌شود. شکل ۹ نشان می‌دهد که تاثیر افزایشی دما بر روی آنتروپی‌های گرمایی و اصطکاکی بیش‌تر از تاثیر کاهشی گرادیان سرعت/دما بر روی آنتروپی اصطکاکی/گرمایی است و در نتیجه، آنتروپی‌های گرمایی و اصطکاکی با افزایش گام پیچش لوله افزایش می‌یابند که نتیجه مطلوبی نیست.



(الف)



(ب)

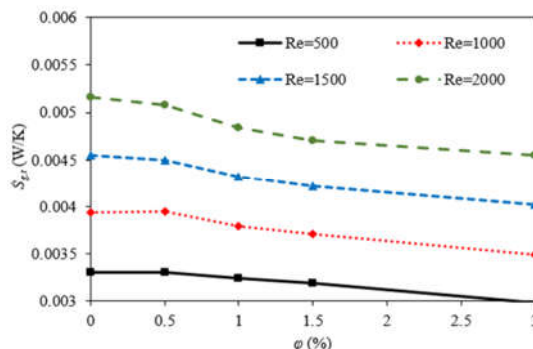


(ج)

شکل ۹- تاثیر گام پیچش بر تولید (الف) آنتروپی گرمایی، (ب) آنتروپی اصطکاکی و (ج) آنتروپی کل در $Re=2000$ و $\phi=3\%$.

۶- نتیجه‌گیری

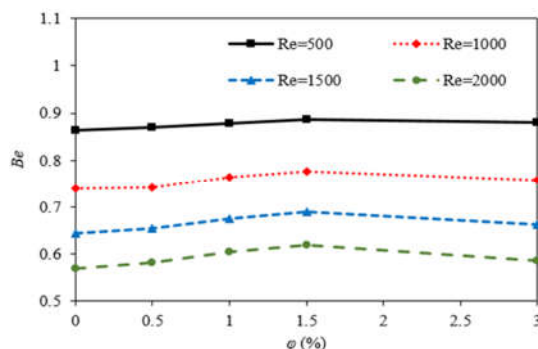
در پژوهش حاضر، هدف نهایی بررسی کارایی یک مبادله‌کن گرمایی دو لوله‌ای پیچ خورده از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک از طریق شبیه سازی بود. سیال عامل در نظر گرفته شده، نانوسیال غیر نیوتنی (CuO/CMC-water) بود که از لوله داخلی در دمای ۲۹۸



(ج)

شکل ۷- میزان تولید آنتروپی به عنوان تابعی از Re و ϕ ، (الف) آنتروپی گرمایی، (ب) آنتروپی اصطکاکی و (ج) آنتروپی کل.

تغییرات عدد بجان (Be) به عنوان تابعی از Re و ϕ در شکل (۸) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش Re ، هر دو نوع آنتروپی افزایش می‌یابد، اما نمودار شکل ۸ تایید می‌کند که با افزایش Re ، سهم آنتروپی اصطکاکی از آنتروپی کل افزایش می‌یابد و برعکس، با کاهش Re ، سهم آنتروپی گرمایی افزایش می‌یابد که در شکل کاملاً مشهود است. علاوه بر این، برای همه مقادیر Re ، با افزایش ϕ ، عدد بجان با یک شیب ملایم افزایش می‌یابد.



شکل ۸- تاثیر تغییرات ϕ و Re بر روی عدد بجان.

همانطوری که قبلاً نشان داده شد، حالت پیچ خورده دیواره لوله، یک جریان ثانویه و ورتکس‌هایی را در نانوسیال ایجاد می‌کند که باعث افزایش انتقال گرما و تغییرات آنتروپی می‌شود. بنابراین، یکی از موارد جالب توجه، بررسی چگونگی تاثیر افزایش گام پیچش بر میزان تولید آنتروپی است. نتایج این بررسی در شکل ۹ ارائه شده است. محدوده گام پیچش ۲-۶ میلی‌متر و سایر عوامل ثابت نگه داشته شده است. شکل ۹ نشان می‌دهد که افزایش گام پیچش منجر به افزایش آنتروپی-های گرمایی، اصطکاکی و کل را افزایش می‌دهد. طبق نتایج، نرخ تولید آنتروپی‌های گرمایی، اصطکاکی و کلی با افزایش گام پیچش از ۲ به ۶ میلی‌متر، به ترتیب، $24/18\%$ ، $13/04\%$ و $21/56\%$ افزایش می‌یابند. افزایش گام پیچش منجر به کاهش گردابه‌ها و در نتیجه، کاهش اختلاط نانوسیال می‌شود که کاهش انتقال گرما و نهایتاً، کاهش دمای نانوسیال را در پی دارد. آنتروپی‌های گرمایی و اصطکاکی با کاهش دمای نانوسیال افزایش می‌یابند. از طرف دیگر، کاهش شدت گردابه‌ها منجر

ρ	چگالی (kg/m^3)
ϕ	غلظت نانوذرات (%)
زیرنویسها	
bf	سیال پایه
in	ورودی
nf	نانوسیال

۸- مراجع

- [1] Tuncer, A.D., A. Sozen, A. Khanlari, E.Y. Gurubuz, H.I. Variyenli, *Upgrading the performance of a new shell and helically coiled heat exchanger by using longitudinal fins*. Applied Thermal Engineering, 2021. **191**: p. 116876.
- [2] Xiong, Q., M. Izadi, M. Shokri rad, S.A. Shehzad, H.A. Mohammed, *3D Numerical Study of Conical and Fusiform Turbulators for Heat Transfer Improvement in a Double-Pipe Heat Exchanger*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021. **170**: p. 120995.
- [3] Tran, N., J.S. Liaw, C.C. Wang, *Performance of thermo-fluid characteristics of recuperative wavy-plate heat exchangers*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021. **170**: p. 121027.
- [4] Zheng, D., J. Yang, J. Wang, S. Kabelac, B. Sundén, *Analyses of thermal performance and pressure drop in a plate heat exchanger filled with ferrofluids under a magnetic field*. Fuel, 2021. **293**: p. 120432.
- [5] Omari, S.A.B., A.M. Ghazal, E. Elnajjar, Z.A. Qureshi, *Vibration-enhanced direct contact heat exchange using gallium as a solid phase change material*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021. **120**: p. 104990.
- [6] Shahsavari, A., M.A. Bakhshizadeh, M. Arici, M. Afrand, S. Rostami, *Numerical study of the possibility of improving the hydrothermal performance of an elliptical double-pipe heat exchanger through the simultaneous use of twisted tubes and non-Newtonian nanofluid*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021. **143**: p. 2825-2840.
- [7] Dzyubenko, B.V., *Influence of flow twisting on convective heat transfer in banks of twisted tubes*, Heat Transfer Research, 2015. **36**: p. 449-459.
- [8] Zhang, X.X., G.H. Wei, Z.F. Sang, *Experimental research of heat transfer and flow friction properties in twisted tube heat exchanger*, Chemical Engineering, 2015. **35**: p. 17-20.
- [9] Qing, D.F., X.L. Duan, Y.H. Liu, *Experimental investigation on running characteristics of twisted tube in evaporator*, Chemical Engineering, 2015. **36**: p. 12-15.
- [10] Yu, Y., D.S. Zhu, L.D. Zeng, J. Zou, *Experimental investigation on heat transfer enhancement of twisted tube*, Chemical Engineering, 2015. **39**: p. 18-21.
- [11] Samruaisin, P., S. Kunlabud, K. Kunarak, V. Chuwattanakul, S. Eiamsa-Ard, *Intensification of convective heat transfer and heat exchanger performance by the combined influence of a twisted tube and twisted tape*, Case Studies in Thermal Engineering, 2019. **14**: p. 100489.
- [12] Choi, S.U.S., *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*, ASME FED, 1995. **231**: p. 99-105.
- [13] Rios, M.S.B.L., C.I. Rivera-Solorio, K.D.P. Nigam, *An overview of sustainability of heat exchangers and solar thermal applications with nanofluids: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. **142**: p. 110855.
- [14] Khoshvaght-Aliabadi, M., Z. Arani, F. Rahimpour, *Influence of $Al_2O_3-H_2O$ nanofluid on performance of twisted minichannels*, Advanced Powder Technology, 2016. **27**: p. 1514-1525.
- [15] Feizabadi, A., M. Khoshvaght-Aliabadi, A.B. Rahimi, *Numerical investigation on Al_2O_3 /water nanofluid flow*

کلون عبور می‌کرد. در فضای بین دو لوله، آب ($Re=1000$) در دمای 30.8 کلون و در جهت مخالف جریان می‌یافت. متغیرهای در نظر گرفته شده و محدوده تغییرات آن‌ها عبارت بود از: عدد Re ($500-2000$)، غلظت نانوذرات ($0.3 < \phi < 0$) و گام پیچش ($6-2$ میلی‌متر). مهم‌ترین نتایج اثرات تغییر متغیرها بر تولید آنتروپی گرمایی، اصطکاکی و عدد بجان به شرح زیر است:

- وجود پیچش در دیواره لوله باعث ایجاد جریان ثانویه و تشکیل گردابه‌ها در نزدیکی دیواره لوله داخلی می‌شود. نتایج نشان داد قدرت این نوع جریان در انتهای محورها به ویژه برای محور بزرگ‌تر، بیش‌تر است. این جریان ثانویه باعث اختلاط بیش‌تر نانوسیال در طول مسیر لوله شده و توزیع گرما را تسهیل می‌کند.
- یک نتیجه عالی استفاده از نانوسیال غیرنیوتنی مورد مطالعه در این سیستم، تاثیر افزایش غلظت نانوذرات بود. بالا بردن ϕ از 0.3 تا 0.4 ، آنتروپی گرمایی و اصطکاکی را به خوبی کاهش داد، که تاثیر آن بر میزان تولید آنتروپی اصطکاکی بسیار قابل توجه بود.
- Re متغیر مستقل دیگری بود که تاثیر تغییر آن بر روی هر دو نوع تولید آنتروپی در ϕ های مختلف بررسی شد. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش Re از 500 به 2000 برای نانوسیال، آنتروپی گرمایی و اصطکاکی افزایش یافت.
- تاثیر افزایش ϕ در رینولدز ماکزیمم (2000) برای تاثیرگذاری در بهبود عملکرد سیستم نشان داد که، افزایش ϕ از 0.3 به 0.4 باعث کاهش آنتروپی گرمایی، اصطکاکی و کل به ترتیب به میزان 9.2% ، 15.3% و 11.8% شد.
- تاثیر تغییرات گام پیچش ($6-2$ میلی‌متر) بر روی هر دو نوع تولید آنتروپی نیز نشان داد که گام پیچش بالاتر باعث تولید آنتروپی بیش‌تر و عمدتاً برای آنتروپی گرمایی (24.2%) می‌شود، در نتیجه گام پیچش کم‌تر برای کارایی بیش‌تر سیستم از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک پیشنهاد می‌شود.
- برای تمام مقادیر ϕ ، عدد بجان با افزایش Re کاهش و در Re ثابت، با افزایش ϕ تا حدی افزایش یافت.

۷- نمادها

علائم

Be	عدد بجان
c_p	گرمای ویژه (J/kg.K)
K	رسانایی گرمایی (W/m.K)
M	شاخص پیوستگی ($\text{kgs}^{-n-1}/\text{m}$)
N	شاخص قانون توانی
P	فشار (Pa)
ΔP	افت فشار (Pa)
Re	عدد رینولدز
T	دما (کلون)
\bar{v}	سرعت (m/s)

علائم یونانی

μ	لزجت (kg.m/s)
-------	--------------------------

- through twisted-serpentine tube with empirical validation, Applied Thermal Engineering, 2018. 137: p. 296-309.
- [16] Omid, M., A.A. Rabienataj Darzi, M. Farhadi, *Turbulent heat transfer and fluid flow of alumina nanofluid inside three-lobed twisted tube*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019. 137: p. 1451-1462.
- [17] Mahato, S.K., S.C. Rana, R.N. Barman, S. Goswami, *Numerical analysis of heat transfer and fluid flow through the twisted square duct (TSD): Nanofluid as working fluid*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019. 33: p. 5507-5514.
- [18] Zohuri, B. and P. McDaniel, *First Law of Thermodynamics*, in Thermodynamics In Nuclear Power Plant Systems. 2019, Springer. p. 99-148.
- [19] Erguvan, M. and D.W. MacPhee, *Second law optimization of heat exchangers in waste heat recovery*. International Journal of Energy Research, 2019. 43: p. 5714-5734.
- [20] Rashidi, S., P. Javadi, and J.A. Esfahani, *Second law of thermodynamics analysis for nanofluid turbulent flow inside a solar heater with the ribbed absorber plate*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019. 135: p. 551-563.
- [21] Vera, G., R. Dufo-Lopez, J.L. Bernal-Agustin, *Energy management in microgrids with renewable energy sources: A literature review*. Applied Sciences, 2019. 9: p. 3854.
- [22] Brogioli, D., F. La Mantia, and N.Y. Yip, *Energy efficiency analysis of distillation for thermally regenerative salinity gradient power technologies*. Renewable energy, 2019. 133: p. 1034-1045.
- [23] Zhao, N., C. Qi, T. Chen, J. Tang, X. Cui, *Experimental study on influences of cylindrical grooves on thermal efficiency, exergy efficiency and entropy generation of CPU cooled by nanofluids*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019. 135: p. 16-32.
- [24] Al-Rashed, A.A.A.A., A. Shahsavar, S. Entezari, M.A. Mohghimi, S.A. Adio, T.K. Nguyen, *Numerical investigation of non-Newtonian water-CMC/CuO nanofluid flow in an offset strip-fin microchannel heat sink: thermal performance and thermodynamic considerations*. Applied Thermal Engineering, 2019. 155: p. 247-258.
- [25] Niknejadi, M.R., M. Afrand, A. Karimipour, A. Shahsavar, A.H. Meghdadi Isfahani, *Experimental investigation of the hydrothermal aspects of water-Fe₃O₄ nanofluid inside a twisted tube*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021. 143: p. 801-810.