مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دوره 15، شماره 9، ص‌ص 87-94

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی آنتروپی تولیدی جریان نانوسیال در کانال سینوسی عمودی تحت میدان مغناطیسی

حبیب امین‌فر[1]، محمد نصیری[2*]، مرضیه خضرلو[3]

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز
2- مربی، مهندس مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرد، بروجرد
3- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز
* بروجرد، صندوق پستی 6915136111، m.nasiri@iaub.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 09 خرداد 1394
پذیرش: 21 تیر 1394
ارائه در سایت: 07 مرداد 1394

کلید واژگان:
نانوسیال
جابجایی ترکیبی
کانال سینوسی
میدان مغناطیسی
تولید آنتروپی

چکیده

در این مطالعه آنتروپی تولیدی ناشی از جابجایی ترکیبی نانوسیال آب- Al_2O_3 در یک کانال عمودی با دیواره‌های سینوسی تحت میدان مغناطیسی ثابت و یکنواخت به صورت عددی بررسی شده است. در این کار تأثیر پارامترهایی نظیر،کسر حجمی نانوذرات، دامنه‌ی موج سینوسی، عدد بی‌بعد رینولدز، عدد بی‌بعد گراشف و عدد بی‌بعد هارتمن مورد مطالعه قرار گرفت. این مطالعه با فرض جریان آرام، پایا و غیرقابل تراکم و خواص ترموفیزیکی ثابت برای نانوسیال انجام گرفته است. برای محاسبه تغییرات چگالی ناشی از نیروی شناوری از تقریب بوزینسک و برای شبیه سازی جریان از روش حجم محدود و مدل مخلوط دو فازی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزودن نانوذره به سیال پایه، موجب افزایش آنتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت و آنتروپی جریانی می‌شود. آنتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز، کاهش و با افزایش عدد گراشف، افزایش می‌یابد، در حالیکه عکس این روند برای آنتروپی تولیدی ناشی از لزجت مشاهده می‌شود. بررسی اثرات شدت میدان مغناطیسی اعمال شده نشان داد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، آنتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. آنتروپی جریانی نیز با اعمال میدان مغناطیسی کاهش پیدا می‌کند. همچنین نتایج نشان داد که برای تمامی شدت میدان‌های مغناطیسی بررسی شده، موج‌دار کردن کانال، آنتروپی تولید شده را کاهش می‌دهد.

Numerical investigation of entropy generation of nano-fluid in vertical sinusoidal channel with magnetic field

Habib Aminfar[1], Mohammad Nasiri[2*], Marzieh Khezerloo[1]

1- Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2- Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Borujerd Branch, Borujerd, Iran.
* P.O.B. 6915136111, Borujerd, Iran, m.nasiri@iaub.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 30 May 2015
Accepted 12 July 2015
Available Online 29 July 2015

Keywords:
Nanofluid
Mixed Convection
Sinusoidal Channel
Magnetic Field
Entropy Generation

ABSTRACT

In this study, generated entropy of mixed convection of Al_2O_3–water nano fluids in a vertical channel with sinusoidal walls under a constant and uniform magnetic field was numerically investigated. The effects of various parameters such as volume fraction of nanoparticles, amplitude of sine wave, Reynolds, Grashof and Hartman numbers were studied. This study was carried out by assuming the laminar, steady state and incompressible flow. Also, the thermo physical properties of nanoparticles were assumed constant. The Boussinesq approximation was used to calculate the variations of the density caused by buoyancy force and the finite volume method and two phase mixture model were used to simulate the flow. The results showed that the entropy generation due to heat transfer and viscous effects increased by adding nanoparticles to the base fluid. Also, the results showed that the entropy generation due to heat transfer increases by increasing the Grashof number and decreasing the Reynolds number, while a reverse trend is observed for entropy generation due to viscous effects. By increasing the Hartman number, the entropy generation due to heat transfer increases at first and then decreases and entropy generation due to viscous effects reduces. For all studied intensities of magnetic fields, the entropy generation decreases using corrugated channels.

1- مقدمه

در بیشتر کاربردهای مهندسی، به ویژه در مبدل‌های حرارتی، بهبود انتقال حرارت یک موضوع بسیار مهم است. از طرفی در اکثر صنایع مانند صنایع غذایی، صنایع دارویی و شیمیایی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای بیشتر مورد اهمیت هستند. یکی از روش‌هایی که می‌توان نرخ انتقال حرارت را بهبود بخشید، موج‌دار کردن دیواره‌های کانال است. ساخت کانال‌های موج‌دار در مقایسه با روش‌های دیگر بهبود انتقال حرارت، مانند تعبیه منفذ و تولید گردابه آسان‌تر است. دیواره‌های موج‌دار با افزایش اختلاط جریان توده‌ای و یا

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

H. Aminfar, M. Nasiri, M. Khezerloo, Numerical investigation of entropy generation of nano-fluid in vertical sinusoidal channel with magnetic field, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 9, pp. 87-94, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.49.1]

کاهش ضخامت لایه‌مرزی حرارتی، انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. مسأله انتقال حرارت و جریان سیال در کانال با دیواره‌های موجدار توسط محققان زیادی به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است [2،1].

پایین بودن ضریب رسانایی حرارتی سیال‌هایی نظیر آب، روغن و هوا باعث شد که پژوهشگران با افزودن ذرات فلزی در ابعاد نانومتر به سیال پایه، ضریب رسانایی حرارتی را افزایش دهند. استفاده از نانوسیال به منظور افزایش کارایی انتقال حرارت زمینه مطالعات زیادی به صورت عددی و تجربی در زمینه جریان نانوسیال در کانال ایجاد کرده است [4،3].

تعامل بین حرکت سیال و میدان مغناطیسی، تنوع غنی از پدیده‌های مرتبط با تبدیل انرژی مکانیکی از قبیل فرایندهای مربوط به فلزات، گرمایش و کنترل جریان و یا تولید نیرو از مخلوط دوفازی را فراهم می‌کند. همچنین در بسیاری از صنایع حرارتی، در ایجاد حرکت در پمپ‌ها برای ایجاد جریان-های چرخشی و شناوری از میدان مغناطیسی استفاده می‌شود. میدان مغناطیسی باعث جهت گیری منظم ذرات نانوسیال می‌شود و این موجب ارتباط بیشتر بین ذرات نانو می‌گردد. در نتیجه در جریان نانوسیال، اعمال میدان مغناطیسی مطلوب می‌تواند انتقال حرارت را به طور چشمگیری افزایش دهد. [5، 6]

اندازه‌گیری میزان برگشت ناپذیری در طول یک فرایند، نرخ تولید آنتروپی نامیده می‌شود. تجزیه و تحلیل تولید آنتروپی یک ابزار قدرتمند برای تعیین کارآمد بودن و قابل اجرا بودن فرایندهاست. بنابراین قبل از ساخت هر نوع سیستمی، تجزیه و تحلیل قانون دوم ترمودینامیک (تولید آنتروپی) برای داشتن طراحی بهتر سیستم، امری ضروری است. اکثر مطالعات انجام گرفته در زمینه نانو سیال مربوط به قانون اول ترمودینامیک و از نقطه نظر انتقال حرارت است. تولید آنتروپی اغلب در سیستم‌هایی با سیالات معمول (مانند آب، اتیلن گلکول و ...) مطالعه شده است. اما مطالعه روی سیستم‌هایی با نانو سیال به عنوان سیال کاری بسیار محدود است. به منظور بهینه سازی سیستم‌های حرارتی، به حداقل رساندن تولید آنتروپی یک امر ضروری است [7-9]. ییل‌باس و همکاران [10] کارایی جابجائی طبیعی و تولید آنتروپی در یک حفره مربعی با دماهای متفاوت برای دیوارهای بالایی و پائینی را بررسی کردند. ایلس و همکاران [11] به بررسی تأثیر نسبت ابعادی حفره روی تولید آنتروپی پرداختند. بررسی برای حفره‌ای با دمای پائین در دیواره سمت راست و دمای بالا در دیواره سمت چپ انجام شد. تولید آنتروپی جریان آب و نانوسیال آب-Cu از داخل میکرووکانال سه بعدی توسط لی و کلینسترور [12] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها یافتند که آنتروپی ناشی از انتقال حرارت برای میکروسیستم‌های حرارتی مهم است در حالیکه با افزایش سرعت ورودی، آنتروپی اصطکاکی نیز مهم می‌شود. محمود و همکاران [13، 14] انتقال حرارت جابجایی آزاد و تولید آنتروپی را داخل محفظه‌ای با دیواره‌های موجدار که دیواره‌های سمت راست و چپ دماهای متفاوتی داشتند بررسی کردند. شاهی و همکاران [15] تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت همرفت طبیعی در حفره مربعی محتوی نانو سیال که با منبع حرارتی بیرون زده شده گرم می‌شد را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش کسر حجمی نانو ذره، عدد ناسلت افزایش و تولید آنتروپی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که با قرار دادن منبع حرارتی در دیواره پائینی محفظه، می‌توان کارایی انتقال حرارت را بیشینه و تولید آنتروپی را کمینه کرد. بیژن [8] تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت و لزجت سیال را به عنوان تابع هدف برای بهینه سازی هندسه لوله‌ها و یافتن پارامترهای بهینه برای مبدل‌های حرارتی، مطالعه کرد. لئونگ و اونگ [16] تولید آنتروپی نانوسیال را داخل انواع کانال‌ها با سطح مقطع‌های مختلف مطالعه کردند. نتایج نشان داد که کانالی با سطح مقطع دایره‌ای از لحاظ تولید آنتروپی بسیار مناسب‌تر از کانال‌هایی با مقاطع مستطیلی و مثلثی است. همچنین آن‌ها گزارش کردند که آنتروپی ناشی از انتقال حرارت 99 درصد کل آنتروپی تولید شده است. کو و چنگ [17] روشی عددی برای بررسی مساله همرفت اجباری در کانال موجدار و تولید آنتروپی به کار بردند. نتایج نشان داد که تولید آنتروپی در درجه اول با نسبت ابعاد کانال و عدد رینولدز جریان تعیین می-شود. همداح و ورتز [18] مساله همرفت ترکیبی در کانال‌های عمودی با دیواره‌های گرم نامتقارن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که اثر شناوری در جریان توده‌ای باعث برگشت جریان در نزدیک دیوار سرد و افزایش عملکرد انتقال حرارت در نزدیکی دیوار گرم می‌شود. اخیرا مطالعاتی در زمینه‌ی تحلیل قانون دوم ترمودینامیک برای جریان‌هایی در حضور میدان مغناطیسی صورت گرفته است. ماهیان و همکاران [19] یک مطالعه تحلیلی از قانون دوم ترمودینامیک برای جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب-TiO_2 داخل حلقه‌ی عمودی با دیواره‌های با شار حرارتی ثابت و تحت تأثیر میدان مغناطیسی ارائه دادند. نتایج نشان داد که استفاده از نانوسیال آب-TiO_2 تولید آنتروپی را کاهش می‌دهد، در حالیکه با افزایش عدد هارتمن تولید آنتروپی افزایش می-یابد. آقایی و همکاران [20] انتقال حرارت و تولید آنتروپی در جابجایی ترکیبی نانو سیال آب–مس در یک محفظه ذوزنقه‌ای با دیواره‌ی بالایی متحرک را که تحت میدان مغناطیسی بود به صورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها یافتند که برای تمامی حالت‌های بررسی شده آنتروپی تولیدی ناشی از اصطکاک بسیار ناچیز است. مهرز و همکاران [21] انتقال حرارت و تولید آنتروپی در جابجایی اجباری نانوسیال آب-Cu داخل محفظه باز و در حضور میدان مغناطیسی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که برای تمامی موراد بررسی شده، آنتروپی تولیدی با افزایش کسر حجمی نانو یسال افزایش می-یابد.

با اینکه جریان داخل کانالی با دیواره‌های موجدار کاربردهای زیادی در صنایع و مبدل‌های حرارتی دارد ولی از نقطه نظر تحلیل قانون دوم ترمودینامیکی مطالعات اندکی روی آن صورت گرفته است. بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که تحلیل قانون دوم ترمودینامیک برای نانوسیالات در چنین هندسه‌هایی و به ویژه در حضور میدان مغناطیسی، زمینه‌ی بسیار مهمی است که زیاد به آن پرداخته نشده است. در این مطالعه سعی شده است تولید آنتروپی جریان نانوسیال آب-Al_2O_3 در یک کانال عمودی با دامنه‌های سینوسی مختلف، تحت شار حرارتی یکنواخت مطالعه شود و میزان تأثیر کسر حجمی نانو ذرات، عدد رینولدز و عدد گراشف بر تولید آنتروپی حرارتی و جریانی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین تأثیر عدد هارتمن بر آنتروپی تولیدی برای کسر حجمی ثابت نانو ذرات، در اعداد رینولدز و گراشف مختلف مطالعه شد. به منظور مطالعه اثرات میدان مغناطیسی ثابت، سابروتین‌هایی به نرم افزار اضافه شده است.

2- معادلات حاکم

در بسیاری از کاربردهای عملی جریان چندفازی، مدل مخلوط یک تقریب مناسب و بسیار دقیق است [22]. در این مطالعه، جریان آرام، پایا و غیرقابل تراکم با خواص ترموفیزیکی ثابت در نظر گرفته شده و از اتلافات، کار فشاری و کار نیروهای حجمی صرف نظر شده است. همچنین برای محاسبه تغییرات چگالی ناشی از نیروی شناوری از تقریب بوزینسک استفاده شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.49.1]

معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، مومنتم، انرژی و کسر حجمی به ترتیب به صورت (1) تا (4) تعریف می‌شوند [23-25].

$$\nabla(\rho_{\mathrm{eff}} V_m) = 0 \tag{1}$$

$$\nabla(\rho_{\mathrm{eff}} V_m V_m) = -\nabla P + \nabla(\mu_{\mathrm{eff}} \nabla V_m) + \rho_{\mathrm{eff}} \beta_{\mathrm{eff}} g (T - T_C) + \nabla\left(\sum_{k=1}^{n} \varphi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k}\right) + \vec{J} \times \vec{B} \tag{2}$$

$$\nabla\left[\sum_{k=1}^{n} (\rho C_p)_k \varphi_k V_k T\right] = \nabla(k_{\mathrm{eff}} \nabla T) + \frac{1}{\sigma_{\mathrm{eff}}} (\vec{J}.\vec{J}) \tag{3}$$

$$\nabla(\varphi_{\mathrm{p}} \rho_{\mathrm{p}} V_m) = -\nabla(\varphi_{\mathrm{p}} \rho_{\mathrm{p}} V_{dr,\mathrm{p}}) \tag{4}$$

که ρ_{eff}، V_m و V_{dr} به ترتیب چگالی موثر، سرعت متوسط و سرعت دریفت است که به صورت روابط (5) تا (7) تعریف می‌شود.

$$\rho_{\mathrm{eff}} = \sum_{k=1}^{n} \varphi_k \rho_k \tag{5}$$

$$V_m = \frac{\sum_{k=1}^{n} \varphi_k \rho_k V_k}{\rho_{\mathrm{eff}}} \tag{6}$$

$$V_{dr,k} = V_k - V_m \tag{7}$$

سرعت لغزشی به عنوان سرعت نسبی فاز دوم به سرعت فاز اول تعریف می‌شود (8):

$$V_{pf} = V_{\mathrm{p}} - V_{\mathrm{bf}} \tag{8}$$

سرعت دریفت طبق رابطه (9) با سرعت لغزش در ارتباط است.

$$V_{dr,p} = V_{pf} - \sum_{k=1}^{n} \frac{\varphi_k \rho_k}{\rho_{\mathrm{eff}}} V_{fk} \tag{9}$$

سرعت لغزشی به شکل رابطه (10) که توسط مانینن و همکاران [26] به دست آمده است، محاسبه می‌گردد.

$$V_{pf} = \frac{\rho_{\mathrm{p}} d_{\mathrm{p}}^2}{18 \mu_{\mathrm{bf}} f_{\mathrm{drag}}} \frac{(\rho_{\mathrm{p}} - \rho_{\mathrm{eff}})}{\rho_{\mathrm{p}}} a \tag{10}$$

در رابطه (10) f_{drag} ضریب پسا است که می‌تواند به صورت (11) تعریف گردد.

$$f_{\mathrm{drag}} = \begin{cases} 1 + 0.15 \mathrm{Re}_{\mathrm{p}}^{0.687} , & Re_{\mathrm{p}} \le 1000 \\ 0.0183 Re_{\mathrm{p}} , & Re_p > 1000 \end{cases} \tag{11}$$

که $\mathrm{Re}_{\mathrm{p}} = V_m d_{\mathrm{p}} / \nu_{\mathrm{eff}}$ عدد رینولدز ذره است و شتاب با رابطه (12) محاسبه می‌شود.

$$\vec{r} = g - (V_m \nabla) V_m \tag{12}$$

در معادله (2) جمله $\vec{J} \times \vec{B}$ مربوط به نیروی لورنتس است که در جهت جریان به کانال اعمال می‌شود. در این معادله:

$$J = \sigma_{\mathrm{eff}} (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \tag{13}$$

در رابطه (13) $\vec{E}$ میدان الکتریکی اعمالی، $\vec{B}$ میدان القا مغناطیسی و $\vec{V}$ میدان سرعت هستند. میدان مغناطیسی اعمال شده یکنواخت در نظر گرفته می‌شود بنابراین از اثرات ایجاد میدان الکتریکی ناشی از تغییر میدان مغناطیسی صرف نظر می‌شود. همچنین به دلیل عدم وجود میدان الکتریکی خارجی، $\vec{E}$ صفر می‌باشد.

میدان القا مغناطیسی ($\vec{B}$) را می‌توان با استفاده از شدت میدان مغناطیسی (H) محاسبه کرد:

$$\vec{B} = \mu_0 . H \tag{14}$$

3- هندسه و شرایط مرزی

شماتیک کانال دو بعدی مورد بررسی در شکل 1 نشان داده شده است. کانال به صورت دو صفحه سینوسی موازی بوده که طول کانال (L) 340mm و عرض ناحیه ورودی (w) 10mm می‌باشد. طول ناحیه سینوسی 220mm با تعداد 10 موج است که شکل آن از رابطه (15) پیروی می‌کند. کانال عمودی در جهت محور y و مرکز مختصات در وسط ورودی قرار دارد. جهت توسعه‌یافتگی هیدرودینامیکی جریان، 60mm ابتدایی کانال (L_S) صاف و آدیاباتیک در نظر گرفته شده است. برای رسم و شبکه بندی هندسه از نرم افزار گمبیت استفاده شده است.

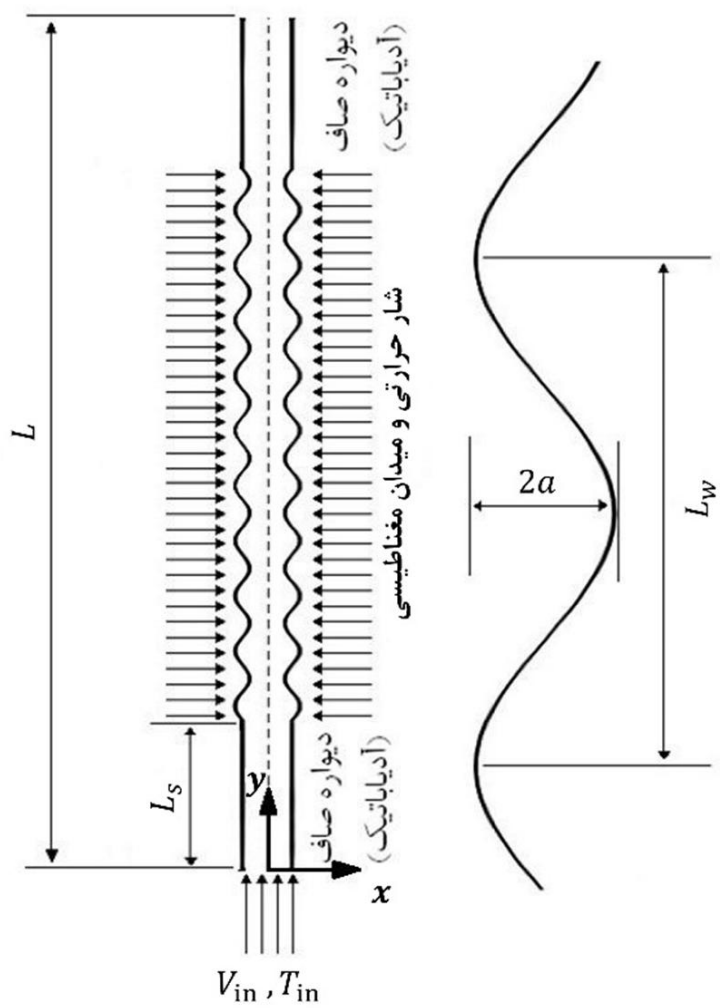
$$S(y) = \pm \frac{w}{2} \pm a \sin\left[\frac{2\pi(x - L_s)}{L_w}\right], \quad L_s \le x \le L_e \tag{15}$$

در رابطه (15) w عرض کانال در قسمت آدیاباتیک کانال و a دامنه موج می‌باشد که به صورت بی‌بعد برابر $A = 2a/w$ می‌باشد. به دلیل تقارن کانال و به منظور کاهش زمان محاسبات، از شرط تقارن در مرکز استفاده شده است و نصف کانال مورد بررسی قرار گرفته است. نانوسیال با پروفیل دما و سرعت یکنواخت از ورودی وارد کانال شده و در قسمت سینوسی کانال تحت میدان و شارحرارتی ثابت و یکنواخت قرار می‌گیرد. نیروی گرانش خلاف جهت محور عمودی به نانوسیال اعمال می‌شود و شتاب گرانش زمین برابر 9/81 m/s² در نظر گرفته شده است.

معادلات حاکم با اعمال شرایط مرزی عدم نفوذ و عدم لغزش در همه‌ی دیواره‌ها، شار حرارتی و میدان مغناطیسی ثابت و یکنواخت در دیواره سینوسی، پروفیل سرعت و پروفیل دمای یکنواخت در ورودی و فشار اتمسفر در خروجی حل می‌شوند.

4- خواص نانوسیال

خواص ترموفیزیکی آب و نانو ذرات اکسید آلومینیوم در جدول 1 آمده است. قطر نانوذرات 35nm فرض شده‌اند. مخلوط نانوذرات Al_2O_3 و آب کاملا یکنواخت و همگن می‌باشد.



شکل 1 شماتیک کانال مورد بررسی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.49.1]

جدول 1 خواص سیال پایه و نانو ذره [26]

	آب	Al_2O_3
چگالی [kg/m³]	997/1	3890
ظرفیت گرمای ویژه [J/kgK]	4240	880
ضریب هدایت گرمایی [W/mK]	0/608	35
لزجت [kg/ms]	0/001003	-
ضریب انبساط حرارتی [1/K]	0/00021	$5/4\times10^{-6}$

هر یک از خواص را می‌توان برای نانوسیال آب-Al_2O_3 از طریق روابط زیر محاسبه کرد:

چگالی نانوسیال:

$$\rho_{\mathrm{eff}} = (1-\varphi)\rho_{\mathrm{bf}} + \varphi\rho_{\mathrm{p}} \tag{16}$$

ظرفیت گرمایی نانوسیال:

$$\left(\rho_{\mathrm{eff}}C_{p_{\mathrm{eff}}}\right) = (1-\varphi)\left(\rho C_p\right)_{\mathrm{bf}} + \varphi\left(\rho C_p\right)_{\mathrm{p}} \tag{17}$$

ضریب رسانش الکتریکی نانو سیال:

$$\sigma_{\mathrm{eff}} = (1-\varphi)\sigma_{\mathrm{bf}} + \varphi\sigma_{\mathrm{p}} \tag{18}$$

لزجت دینامیکی مخلوط نانو سیال با در نظر گرفتن شکل کروی برای ذرات [27]:

$$\mu_{\mathrm{eff}} = \mu_{\mathrm{bf}}(1 + 2.5\varphi + 4.375\varphi^2) \tag{19}$$

همچنین می‌توان با استفاده از مدل چون و همکاران [28] برای نانو ذرات آلومینا، رسانش دمایی نانوسیال را به دست آورد. این معادله در گستره‌ی قطر ذرات 11-150 نانومتر و کسر حجمی های 1 تا 4 درصد با در نظر گرفتن حرکت براونی مناسب است.

$$\frac{k_{\mathrm{eff}}}{k_{\mathrm{bf}}} = 1 + 64.7\varphi^{0.746}\left(\frac{d_{\mathrm{bf}}}{d_{\mathrm{p}}}\right)^{0.369}\left(\frac{k_{\mathrm{p}}}{d_{\mathrm{bf}}}\right)^{0.7476}\mathrm{Pr}_{\mathrm{bf}}^{0.9955}\mathrm{Re}_{\mathrm{bf}}^{1.2321} \tag{20}$$

در رابطه (20) Pr و Re به ترتیب اعداد پرانتل (21) و رینولدز (22) می‌باشند:

$$\mathrm{Pr}_{\mathrm{bf}} = \frac{\eta}{\rho_{\mathrm{bf}}\alpha_{\mathrm{bf}}} \tag{21}$$

$$\mathrm{Re}_{\mathrm{bf}} = \frac{\rho k_{\mathrm{B}} T}{3\pi\eta^2\lambda_{\mathrm{bf}}} \tag{22}$$

در رابطه (22) λ_{bf} طول پویش آزاد متوسط آب (17 nm)، k_{B} ثابت بولتزمن ($1/3807\times10^{-23}$ J/k) و η نیز با استفاده از رابطه (23) محاسبه می‌شود:

$$\eta = \mathrm{N}\times 10^{\frac{\mathrm{B}}{T-\mathrm{C}}}, \quad \mathrm{N} = 2.414\times10^{-5},\ \mathrm{B} = 247, \mathrm{C} = 140 \tag{23}$$

ضریب انبساط حرارتی نانوسیال:

$$\beta_{\mathrm{eff}} = \left[\frac{1}{1+\frac{(1-\varphi)\rho_{\mathrm{bf}}}{\varphi\rho_{\mathrm{p}}}}\frac{\beta_{\mathrm{p}}}{\beta_{\mathrm{bf}}} + \frac{1}{1+\frac{\varphi\rho_{\mathrm{p}}}{(1-\varphi)\rho_{\mathrm{bf}}}}\right]\beta_{\mathrm{bf}} \tag{24}$$

5-روش حل عددی

در این مطالعه روابط حاکم به صورت عددی و با استفاده از نرم افزار انسیس/فلوئنت 14 که بر مبنای روش حجم محدود است، حل شده‌اند. ازمعادلات مرتبه دو پیشرو برای گسسته‌سازی صریح معادلات سرعت و انرژی استفاده شده است، معادلات مرتبه اول پیشرو برای گسسته سازی معادلات فاز نانو ذره در مختصات کارتزین بکار گرفته شده و از الگوریتم SIMPLEC نیز برای برقراری ارتباط بین سرعت و فشار استفاده شده است. همچنین معیار همگرایی جواب‌ها براساس $|((\Phi^{n+1}-\Phi^{n})/\Phi^{n+1})| \le 10^{-8}$ می‌باشد.

6-بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی

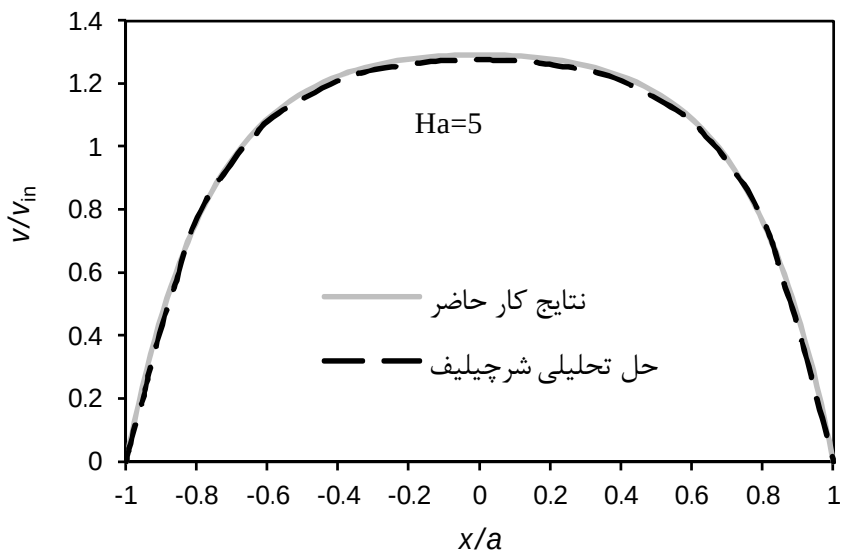
برای بررسی میزان وابستگی نتایج به شبکه‌بندی، آزمون استقلال شبکه برای تعداد نقاط مختلف در راستاهای طولی و عرضی با تراکم یکنواخت مطالعه شده است. برای این منظور از چندین شبکه مختلف برای شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت آب خالص با عدد رینولدز 500 و دمای دیواره‌ی 340 کلوین استفاده شد و نتایج برای ضریب انتقال حرارت و سرعت بی بعد در مرکز کانال در جدول 2 ارائه شد. در نهایت به منظور کاهش زمان محاسبات، شبکه‌بندی با تعداد 44 نقطه در جهت عرضی و 442 نقطه در جهت طولی انتخاب شد.

7-اعتبارسنجی روش حل عددی

به منظور اعتبار سنجی روش عددی به کار گرفته شده در این مطالعه، سرعت بی بعد برای جریان کاملا توسعه یافته در یک کانال دو بعدی ساده در حضور میدان مغناطیسی با حل تحلیلی شرکلیف [29] مقایسه شده است. همان طور که در شکل 2 مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین حل عددی حاضر و حل تحلیلی برای Ha=5 وجود دارد. همچنین آنتروپی کل تولید شده برای جریان در یک کانال دو بعدی ساده و بدون حضور میدان مغناطیسی با نتایج عددی بالاجی و همکاران [30] مقایسه شده است. همان طور که در جدول 3 نشان داده شده است تطابق خوبی بین نتایج حل حاضر و نتایج بالاجی و همکاران [30] مشاهده می‌شود. علاوه بر این به منظور اعتبارسنجی روش شبیه سازی جریان نانوسیال، مقایسه‌ای با نتایج احمد و همکاران [31] انجام شد و همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود، تطابق نتایج قابل قبول است.

جدول 2 استقلال نتایج از شبکه‌بندی

	شبکه	$\frac{\partial\bar{T}}{\partial x}$	$V_{\max}/V_{\mathrm{in}}$
1	412×22	1592/76	1/8802
2	412×28	1608/90	1/8801
3	412×35	1621/63	1/8802
4	412×44	1628/35	1/8803
5	442×44	1631/64	1/88
6	484×44	1633/51	1/8799

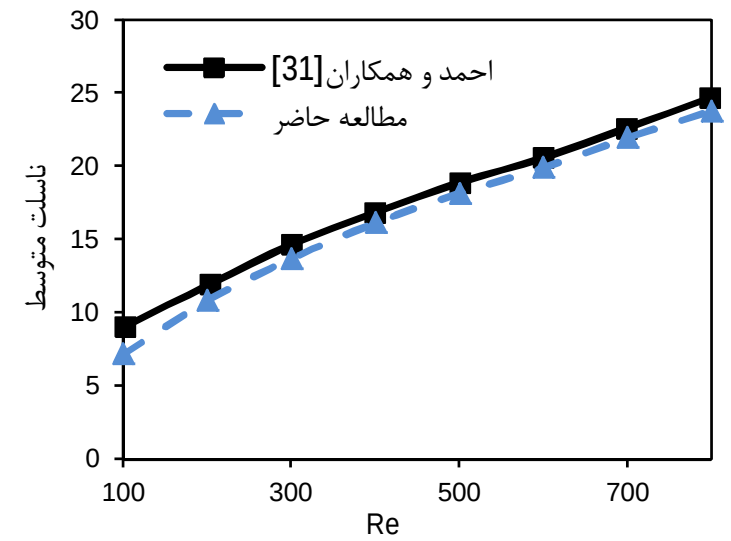


شکل 2 مقایسه نتایج سرعت بی بعد حاصل با نتایج تحلیلی شرچیلیف [29]

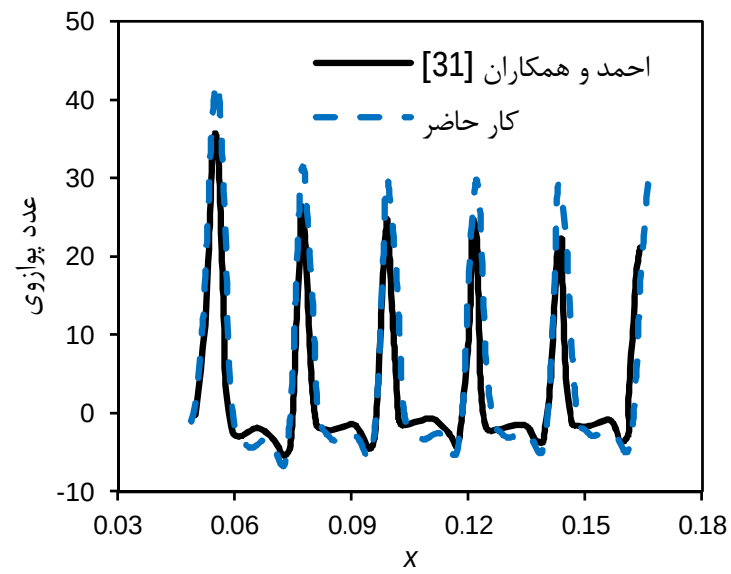
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.49.1]

جدول 3 مقایسه نتایج آنتروپی کل تولیدی حاصل با نتایج عددی بالاجی و همکاران [30]

سرعت ورودی (متر بر ثانیه)	نتایج کار حاضر	بالاجی و همکاران [30]
2	0/0412	0/0395
4	0/0324	0/0295
6	0/0242	0/0223



(الف)



(ب)

شکل 3 مقایسه نتایج حل حاضر با نتایج احمد و همکاران [31]، الف) ناسلت متوسط، ب) عددپوازی

8- نتایج و بحث

نتایج حاضر برای سیال آب و نانوذرات Al_2O_3 با قطر 35 nm و کسر حجمی‌های مختلف بدست آمده و تأثیر پارامترهای مختلف روی تولید آنتروپی حرارتی و اصطکاکی بررسی شده است.

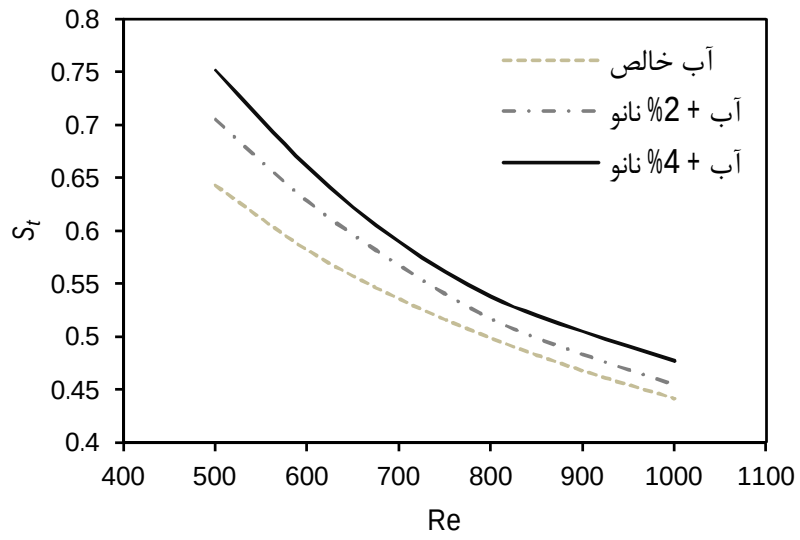
آنتروپی تولیدی ناشی از بازگشت ناپذیری حرارتی برابر است با [8]:

$$S_t = \frac{k_{\text{eff}}}{\bar{T}^2}\left[\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial y}\right)^2\right] \tag{25}$$

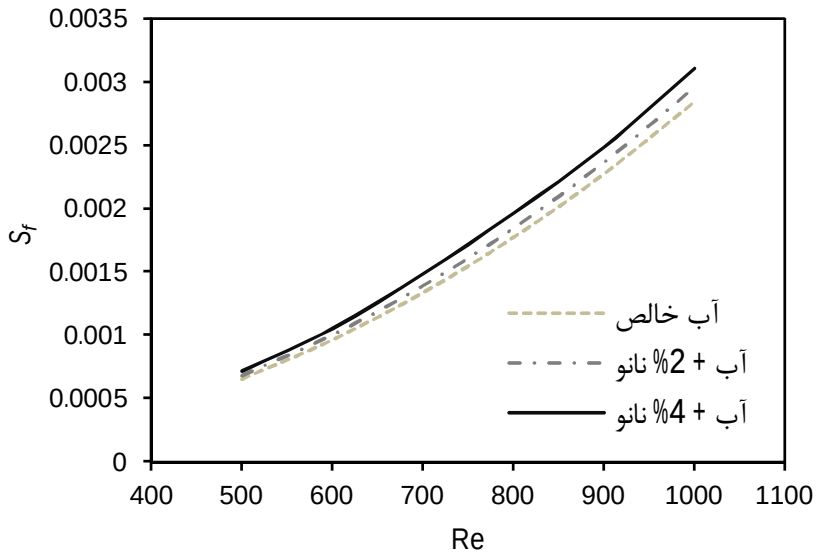
همچنین آنتروپی تولیدی ناشی از جریان برابر است با:

$$S_f = \frac{\mu_{\text{eff}}}{\bar{T}}\{2\left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right)^2\right] + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\right)^2\} \tag{26}$$

شکل 4 تولید آنتروپی را برای آب خالص و کسرهای حجمی مختلف نانو ذره برای عدد گراشف 5×10^4 در مقابل عدد رینولدز نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که آنتروپی تولید شده در اثر انتقال حرارت برای یک سیال معین، با افزایش عدد رینولدز، به واسطه بهبود انتقال حرارت و کم شدن گرادیان دمایی در دیواره کاهش می‌یابد. افزایش آنتروپی تولیدی ناشی از اصطکاک، در شکل 4- ب برای تمامی سیالات بررسی شده مشاهده می‌شود چون افت



(الف)



(ب)

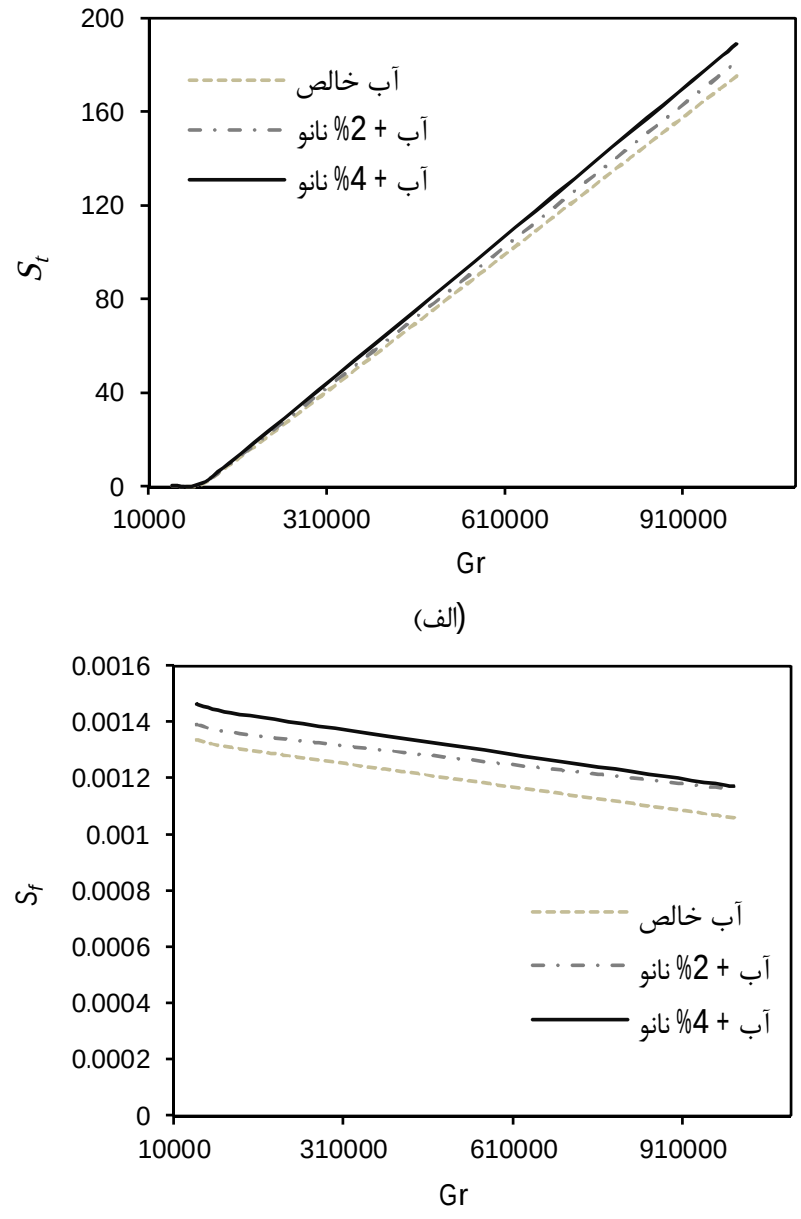
شکل 4 تغییرات آنتروپی تولیدی الف) ناشی از بازگشت ناپذیری حرارتی، ب) ناشی از بازگشت ناپذیری اصطکاکی در مقابل عدد رینولدز، کسر حجمی‌های مختلف و $Gr=5\times10^4$

اصطکاکی برای یک سیال معین با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. افزودن نانو ذره به سیال پایه از طرفی باعث بهبود انتقال حرارت می‌شود که در نتیجه‌ی آن پروفیل دمایی هموارتر شده، و از طرفی باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شود. با توجه به رابطه (25) در نتیجه آنتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت افزایش می‌یابد (شکل 4).

شکل 5 تولید آنتروپی را برای آب خالص و کسرهای حجمی مختلف نانو ذره در عدد رینولدز 700 در مقابل عدد گراشف نشان می‌دهد. با افزایش عدد گراشف و ثابت ماندن عدد رینولدز اثرات نیروی شناوری بر جریان بیشتر می‌گردد که باعث از بین رفت گردابه‌ها در نزدیکی دیواره و افزایش گرادیان دمایی و در ادامه آن افزایش تولید آنتروپی حرارتی می‌شود. همچنین افزایش عدد گراشف باعث کاهش تولید آنتروپی اصطکاکی در نتیجه اثرات لزجی می‌شود. از مقایسه شکل‌های 5(الف) و 5(ب) می‌توان نتیجه گرفت که سهم آنتروپی حرارتی در کل آنتروپی تولیدشده بسیار بیشتر است و تولید آنتروپی کل تابع آنتروپی ناشی از برگشت ناپذیری حرارتی می‌باشد.

هدف از بررسی قانون دوم ترمودینامیک، ارائه شرایطی به منظور کاهش آنتروپی تولیدی برای سیستم مورد بررسی است. از شکل‌های 4 و 5 می‌توان نتیجه گرفت که سهم انتقال حرارت در تولید آنتروپی کل غالب است و آنتروپی کل با افزایش عدد رینولدز و کاهش عدد گراشف کاهش می‌یابد. پس می‌توان گفت جریانی با عدد رینولدز بالا و عدد گراشف پائین، کمترین تولید آنتروپی را خواهد داشت.

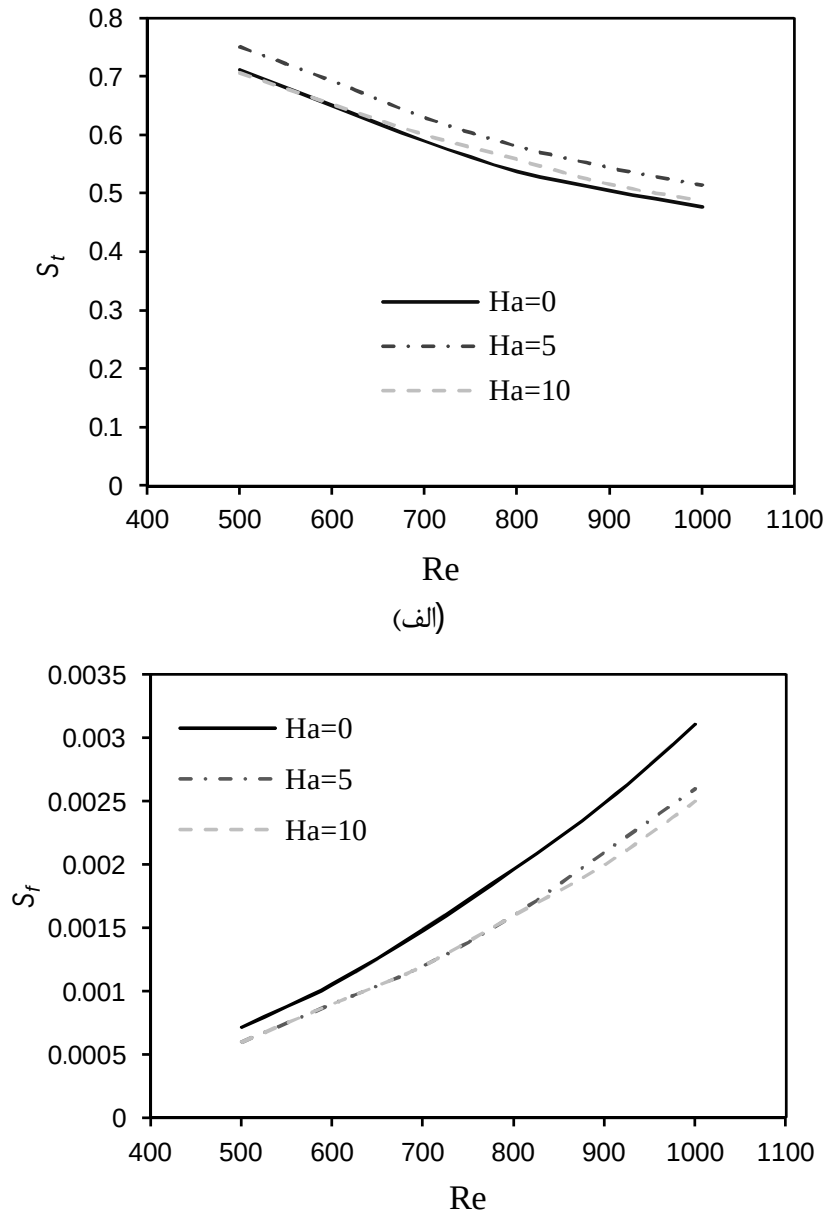
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.49.1]



شکل 5 تغییرات آنتروپی تولیدی الف) ناشی از بازگشت ناپذیری حرارتی، ب) ناشی از بازگشت ناپذیری اصطکاکی در مقابل عدد گراشف، کسر حجمی‌های مختلف و Re=700

تغییرات آنتروپی تولیدی در مقابل عدد رینولدز برای 4% کسر حجمی نانوذرات در شکل 6 نشان داده شده است. شکل 6- الف تأثیرات شدت میدان‌های مغناطیسی مختلف بر آنتروپی تولیدی ناشی از بازگشت‌ناپذیری انتقال حرارت را نشان می‌دهد. با اعمال میدان مغناطیسی جریان به سمت دیواره متمایل می‌گردد که باعث ضعیف‌تر شدن گردابه‌های روی سطح می‌شود تا جایی که گردابه‌های روی دیواره از بین می‌روند. به بیان دیگر موجب افزایش گرادیان دمایی روی دیواره می‌گردد که آنتروپی تولیدی حرارتی را افزایش می‌دهد. با افزایش شدت میدان مغناطیسی (Ha=10) جریان بیشتر به دیواره نزدیک می‌شود و ضخامت لایه مرزی کمتر شده و با بهبود انتقال حرارت، آنتروپی تولیدی حرارتی نسبت به میدان‌های مغناطیسی ضعیف‌تر، کاهش می‌یابد. در عین حال، مقدار آنتروپی تولیدی ناشی از بازگشت‌ناپذیری انتقال حرارت برای جریان بدون میدان مغناطیسی، به دلیل تأثیر گردابه‌ها روی دیواره، کمتر از جریان تحت میدان‌های مغناطیسی (Ha=5 و Ha=10) است. تغییرات آنتروپی تولیدی ناشی از اصطکاک به ازای شدت میدان‌های مغناطیسی مختلف در مقابل عدد رینولدز در شکل 6- ب نشان داده شده است. با اعمال میدان مغناطیسی به جریان، به دلیل تمایل جریان به سمت دیواره، گرادیان سرعت معکوس که باعث ایجاد گردابه شده کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش تولید آنتروپی جریانی می‌شود.

تغییرات آنتروپی تولیدی در مقابل عدد گراشف، تحت تأثیر اثرات میدان مغناطیسی در شکل 7 نشان داده شده است. همان‌گونه که بیان گردید، در یک عدد رینولدز ثابت با افزایش عدد گراشف، گردابه‌های مجاور دیواره از بین

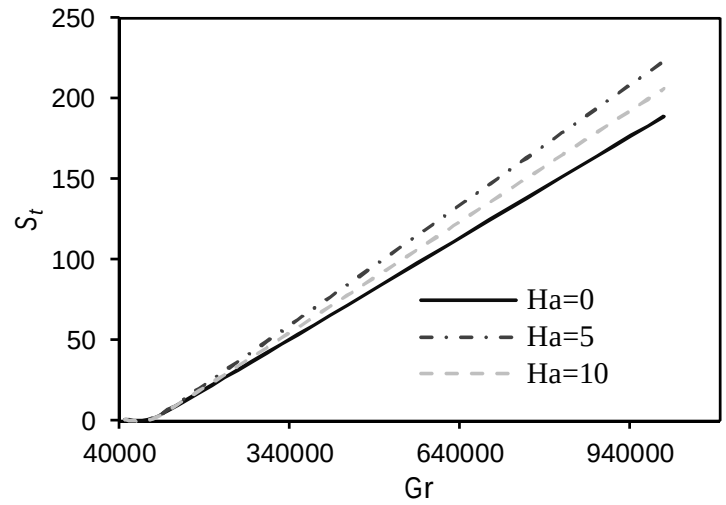


شکل 6 تغییرات آنتروپی تولیدی (الف) ناشی از بازگشت ناپذیری حرارتی، (ب) ناشی از بازگشت ناپذیری اصطکاکی در مقابل عدد رینولدز، اعداد هارتمن مختلف، $Gr=5\times10^4$، A=0/2 و φ=%4

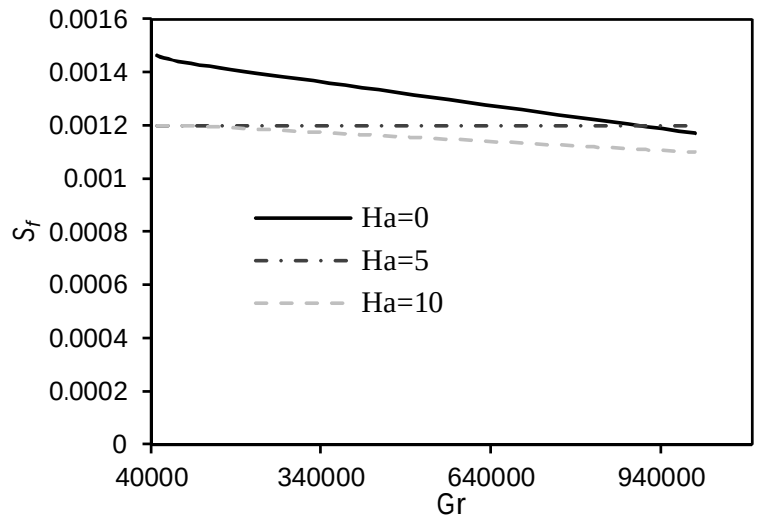
رفته و خطوط جریان در نزدیکی دیواره منظم می‌گردد. اعمال میدان مغناطیسی به جریان نیز علاوه بر متمایل کردن جریان به سمت دیواره باعث افزایش گرادیان دمایی در جریان می‌شود. هر چقدر که گرادیان دمایی جریان بیشتر باشد، مقدار آنتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت نیز بیشتر می‌گردد (شکل 7- الف). همچنین متمایل شدن جریان به سمت دیواره باعث کاهش قدر مطلق گرادیان سرعت معکوس روی دیواره می‌شود، به همین دلیل با افزایش شدت میدان مغناطیسی آنتروپی جریانی تولید شده کاهش می‌یابد (شکل 7- ب).

تغییرات آنتروپی تولیدی در مقابل طول موج سینوسی بی‌بعد دیواره برای شدت میدان‌های مغناطیسی مختلف در شکل 8 نشان داده شده است. در حالت دیواره صاف(A=0) با افزایش عدد هارتمن، گرادیان دمایی مجاور دیواره بزرگ‌تر شده و باعث افزایش آنتروپی حرارتی می‌شود. یک روند افزایشی-کاهشی برای آنتروپی حرارتی در مقابل عدد بی‌بعد دامنه مشاهده می‌شود که ماکزیمم مقدار آنتروپی حرارتی مربوط به A=0/1 است. در غیاب میدان مغناطیسی(Ha=0) با افزایش دامنه موج بی‌بعد به دلیل ایجاد گردابه‌ها و بهبود انتقال حرارت، گرادیان دمایی مجاور دیواره و در نتیجه آنتروپی حرارتی کاهش می‌یابد. این روند برای اعداد هارتمن غیر صفر نیز مشاهده می‌شود و علت آن تأثیر گردابه‌ها روی کاهش گرادیان دمایی و کاستن اثر میدان مغناطیسی است. همچنین در غیاب میدان مغناطیسی(Ha=0) با افزایشA، به دلیل تشکیل و تقویت گردابه‌ها افت اصطکاکی و در نتیجه‌ی آن آنتروپی‌جریانی افزایش می‌یابد و روند مشابهی نیز در حضور میدان‌مغناطیسی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.49.1]

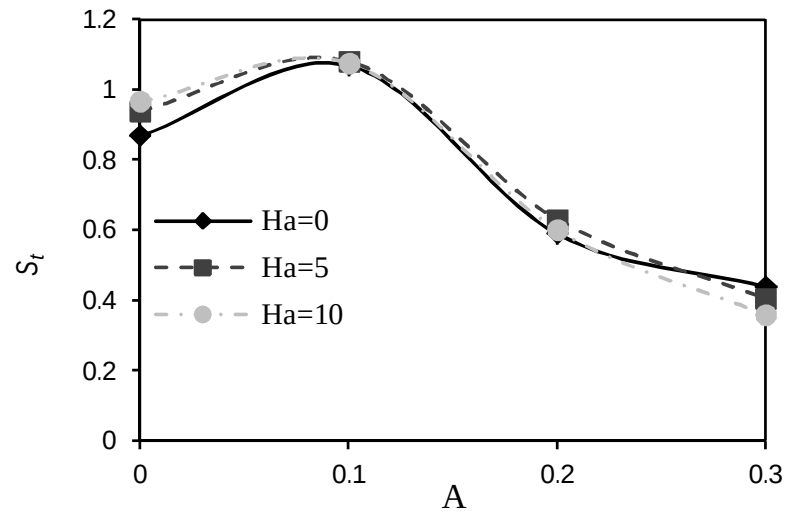


(الف)

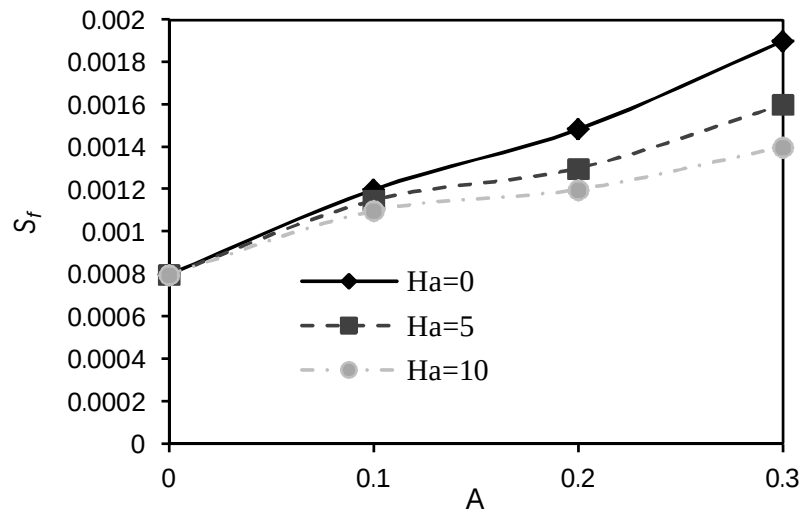


(ب)

شکل 7 تغییرات آنتروپی تولیدی الف) ناشی از بازگشت ناپذیری حرارتی، ب) ناشی از بازگشت ناپذیری اصطکاکی در مقابل عدد گراشف، اعداد هارتمن مختلف، Re=700، A=0/2 و φ=%4



(الف)



(ب)

شکل 8 تغییرات آنتروپی تولیدی الف) ناشی از بازگشت‌ناپذیری حرارتی ب) ناشی از بازگشت ناپذیری اصطکاکی، در مقابل دامنه موج سینوسی بی‌بعد به ازای اعداد هارتمن مختلف، Re= 700، Gr=5×10^4 و φ=%4

مشاهده می‌شود. همان‌طور که گفته شد با افزایش عدد هارتمن، جریان به سمت دیواره متمایل شده و گردابه‌ها ضعیف می‌شود و گرادیان سرعت معکوس روی دیواره و درنتیجه آنتروپی جریانی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که میزان آنتروپی تولیدی اصطکاکی در مقابل آنتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت ناچیز است، در نتیجه تأثیر آنتروپی تولیدی حرارتی غالب است و می‌توان گفت موج‌دار کردن کانال، آنتروپی تولید شده را کاهش می‌دهد.

9- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تولید آنتروپی جریان نانوسیال در داخل کانالی با دیواره‌های سینوسی، در حضور و بدون حضور میدان مغناطیسی به روش عددی بررسی شد. تأثیر کسر حجمی نانو سیال، عدد رینولدز، عدد گراشف، عدد هارتمن و دامنه‌ی موج سینوسی روی آنتروپی تولید شده مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مربوط به جریان بدون اعمال میدان مغناطیسی نشان داد که با افزایش کسر حجمی نانوسیال تولید آنتروپی حرارتی و جریانی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که تولید آنتروپی کل با افزایش عدد رینولدز و کاهش عدد گراشف، کاهش می‌یابد. به بیان دیگر سیستمی با عدد رینولدز بالا و عدد گراشف پائین از لحاظ تولید آنتروپی مناسب است. اعمال میدان مغناطیسی به جریان نانوسیال نشان داد که گردابه‌های روی سطح ضعیف‌تر می‌شوند تا جایی که گردابه‌های روی دیواره از بین می‌روند. این تأثیرات باعث افزایش آنتروپی تولیدی حرارتی و کاهش آنتروپی جریانی به ازای یک عدد گراشف ثابت می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که برای تمامی شدت میدان‌های مغناطیسی بررسی شده، موج‌دار کردن کانال، آنتروپی تولید شده را کاهش می‌دهد.

10- فهرست علایم

A	پارامتر بی‌بعد موج ($A = \frac{2a}{w}$)
a	بیشینه مقدار موج
$\vec{B}$	میدان القا مغناطیسی
C_p	گرمای ویژه (J/kgK)
D_h	قطر هیدرولیکی
$\vec{E}$	میدان الکتریکی
f_{drag}	ضریب پسا
g	شتاب گرانش (m/s^2)
Gr	عدد بی‌بعد گراشف ($Gr = \frac{g\beta_{eff}(T-T_b)L^3}{\nu_{eff}^2}$)
H	شدت میدان مغناطیسی
Ha	عدد بی‌بعد هارتمن ($Ha = \vec{B}w\sqrt{\frac{\sigma_{bf}}{\mu_{bf}}}$)
k	ضریب انتقال حرارت رسانش (W /mK)
k_B	ثابت بولتزمن (J/K)
L	طول کانال (m)
L_s	طول ناحیه آدیاباتیک (m)
L_w	طول ناحیه سینوسی (m)
Pr	عدد پرانتل
q''	شار حرارتی دیواره (W/m^2)
$\vec{r}$	شتاب (m/s^2)
Re	عدد رینولدز ($Re = \frac{VD_h}{\nu_{eff}}$)
S	پروفیل دیواره سینوسی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.49.1]

S_t	آنتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت (W/kgK)
S_f	آنتروپی تولیدی ناشی از جریان (W/kgK)
T	دما (K)
V	بردار سرعت (m/s)
V_{dr}	بردار سرعت دریفت
V_m	بردار سرعت متوسط
V_{pf}	بردار سرعت لغزشی بین فاز جامد و مایع
w	عرض کانال (m)
x, y	جهت محورهای مختصات

علایم یونانی

β	ضریب انبساط حرارتی حرارتی (1/K)
λ	طول پویش آزاد مولکولی
μ	لزجت دینامیکی (Ns/m^2)
ν	لزجت سینماتیکی (m2/s)
ρ	چگالی (kg/m^3)
σ	ضریب رسانش الکتریکی (µs/cm)
φ	کسر حجمی نانو ذرات

زیرنویس‌ها

b	بالک
bf	سیال پایه
eff	خواص موثر
p	نانو ذرات
wall	دیواره

11- مراجع

[1] A. M. Abed, K. Sopian, H. A. Mohammed, M. A. Alghoul, M. H. Ruslan, S. Mat, A. N. Al-Shamani, Enhance heat transfer in the channel with V-shaped wavy lower plate using liquid nanofluids, *Case Studies in Thermal Engineering,* Vol. 5, pp. 13-23, 2015.

[2] Y. Sui, C.J. Teo, P.S. Lee, Y.T. Chew, C. Shu, Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels, *Int. J. Heat Mass Transfer,* Vol. 53, pp. 2760–2772, 2010.

[3] S. Kakaç, A. Pramuanjaroenkij, Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer,* Vol. 52, pp. 3187–3196, 2009.

[4] L. Godson, B. Raja, D. Mohan Lal, S. Wongwises, Enhancement of heat transfer using nanofluids – an overview, *Renew. Sust. Energ. Rev.* Vol. 14, pp. 629–641, 2009.

[5] S. Sadeghi, B. Ghasemi, Mixed convection heat transfer of nanofluids in an inclined channel under magnetic field, *J. Modarres Mechanical Engineering,* Vol. 13, No. 7, pp. 18–31, 2013 (in Persian).

[6] A. E. Kabeel, E. M.S. El-Said, S. A. Dafea, A review of magnetic Field effects on flow and heat transfer in liquids: Present status and future potential for studies and applications, *Renew. Sust. Energ.,* Rev, Vol. 45, pp. 830-837, 2015.

[7] A. Bejan, A study of entropy generation in fundamental convective heat transfer, *J. of Heat Transfer – Transactions of the ASME,* Vol. 101, pp. 718–725, 1979.

[8] A. Bejan, Entropy Generation through heat and fluid flow, *Wiley,* New York, 1982.

[9] A. Bejan, Entropy generation minimization: The method of thermodynamic optimization of finite-size systems and finite-time processes, CRC Press, Boca Raton, 1996.

[10] B.S. Yilbas, S.Z. Shuja, S.A. Gbadebo, H.I. Abu Al-Hamayle, K. Boran, Natural convection and entropy generation in a square cavity, *Int. J. of Energy Research,* Vol. 22, pp. 1275–1290, 1998.

[11] G.G. Ilis, M. Mobedi, B. Sunden, Effect of aspect ratio on entropy generation in a rectangular cavity with differentially heated vertical walls, *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer,* Vol. 35, pp. 696–703, 2008.

[12] J. Li, C. Kleinstreuer, Entropy Generation Analysis for Nanofluid Flow in Microchannels, *Journal of Heat Transfer,* Vol. 132, pp. 122401-1, 2010.

[13] S. Mahmud, A.K.M.S. Islam, Laminar free convection and entropy generation inside an inclined wavy enclosure, *Int. J. of Thermal Sciences,* Vol. 42, pp. 1003–1012, 2003.

[14] S. Mahmud, R.A. Fraser, Free convection and entropy generation inside a vertical in phase wavy cavity, *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer,* Vol. 31, pp. 455–466, 2004.

[15] M. Shahi, A.H. Mahmoudi, A.H. Raouf, Entropy generation due to natural convection cooling of a nanofluid, *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer,* Vol. 38, pp. 972–983, 2011.

[16] K.Y. Leong, H. C. Ong, Entropy generation analysis of nanofluids flow in various shapes of cross section ducts, *International Communications in Heat and Mass Transfer,* Vol. 57, pp. 72–78, 2014.

[17] T.H. Ko, C.S. Cheng, Numerical investigation on developing laminar forced convection and entropy generation in a wavy channel, *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer,* Vol. 34, pp.924–933, 2007.

[18] T.T. Hamadah, R.A. Wirtz, Analysis of laminar fully-developed mixed convection in a vertical channel with opposing buoyancy, *ASME J. Heat Transfer,* Vol. 113, pp. 507–510, 1991.

[19] O. Mahian, I. Pop, A. Z. Sahin, H. F. Oztop, S. Wongwises, Irreversibility analysis of a vertical annulus using TiO2/water nanofluid with MHD flow effects. *Int. J. Heat Mass Transfer,* Vol. 64, pp. 671–679, 2013.

[20] A.Aghaei, H. Khorasanizadeh, G. A. Sheikhzadeh, Effects of magnetic field on mixed convection heat transfer and entropy generation of Cu-water nanofluid in a trapezoidal enclosure, *J. Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 9, pp. 183-194, 2014 (In Persian).

[21] Z. MEHREZ1, A. E. CAFS, A. B.GHITH, P. L. Quéré, MHD effects on heat transfer and entropy generation of nanofluid flow in an open cavity, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.08.010

[22] Yang, Y., Zhang, Z.G., Ggrulke, E.A., Anderson, W.B., Wu, G., Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions in laminar flow, *Int. J. Heat Mass Transfer,* Vol. 47, pp. 5181-5188, 2004.

[23] R. Nouri, M. Gorji, D. D. Ganji, Numerical investigation of magnetic field effect on forced convection heat transfer of nanofluid in sinusoidal channel, *J. Modarres Mechanical Engineering,* Vol. 13, No. 14, pp. 43-55 (In Persian).

[24] H. Aminfar, R. Maroofiazar, A numerical study of the hydro-thermal behavior of nanofluids in rectangular microchannels using a mixture model, *Proc. IMechE Part C: J. Mechanical Engineering Science,* Vol. 225, 2011.

[25] H. Aminfar a, M.Mohammadpourfard b,n, F.Mohseni, Numerical investigation of thermocapillary and buoyancy driven convection of nanofluids in a floating zone, *International Journal of Mechanical Sciences* Vol. 65, pp. 147–156, 2014.

[26] Manninen, M., Taivassalo, V., Kallio, S., On the mixture model for multiphase flow, *VTT Publications, Technical Research Center of Finland,* 1996.

[27] H.C. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solutions, *J.Chem. Phys.*, Vol. 20, pp. 571, 1952.

[28] C.H. Chon, K.D. Kihm, S.P. Lee, S.U.S. Choi, Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al2O3) thermal conductivity enhancement, *Appl. Phys. Lett.,* Vol. 87, pp. 1-3, 2005.

[29] J. A. SHERCLIF, Steady motion of conducting fluid in pipes under transverse magnetic fields, mathematical proceeding of Cambridge philosophical society, Vol. 49, pp. 136-144, 1953.

[30] C. Balaji, M. Hölling, H. Herwig, Entropy generation minimization in turbulent mixed convection flows, *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer,* Vol. 34, pp. 544–552, 2007.

[31] M.A. Ahmed, N.H. Shuaib, M.Z. Yusoff, 2012,"Numerical investigations on the heat transfer enhancement in a wavy channel using nanofluid", *Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 55,* pp. 5891–5898.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.49.1]