

بررسی کاهش مصرف انرژی در فرآیند انتقال حرارت نانوسیال با کاربرد تحلیل انتروپی

قنبرعلی شیخزاده^۱، علیرضا آقایی^۲، حمیدرضا احترام^۳، مجتبی سپهرنیا^۴

^۱دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، Sheikhz@kashanu.ac.ir

^۲دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، AlirezaAghaei21@gmail.com

^۳کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، Hamidreza.ehteram@yahoo.com

^۴دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، msepehr_91@yahoo.com

چکیده

رشد روز افزون صنعت، نیاز به روش‌های نوین را برای بهبود پارامترهای انتقال حرارت که منجر به افزایش بازده و کاهش مصرف انرژی شوند، ضروری می‌سازد. کاربرد نانوسیال‌ها به‌عنوان محیط جدید انتقال حرارت، نسبت به سیال‌های معمولی در فرآیندهای انتقال حرارت، بازده بیشتر و در نتیجه هدر رفت کمتر انرژی را به‌همراه دارد. تحلیل انتروپی کمی‌سازی انرژی به‌عنوان پارامتری کیفی است. از آنجایی که تولید انتروپی معیاری از نابودی قابلیت کاردهی دستگاه‌ها است، تعیین انتروپی تولیدی، به‌منظور نگهداشت انرژی دستگاه‌ها ضروری است. در این تحقیق تولید انتروپی در جابه‌جایی توام نانوسیال آب - مس با خواص متغیر در محفظه‌ای دوزنقه‌ای با دیواره‌ی بالایی سرد متحرک و دیواره‌ی پایینی گرم و دیواره‌های جانبی عایق بررسی می‌شود. مطالعه در عدد گراش ثابت 10^4 ، برای اعداد رینولدز ۳۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ و کسر حجمی ۰، ۰/۰۲ و ۰/۰۴ نانوذرات و زاویه‌ی ساق ۴۵ درجه انجام شده است. با کاربرد نانوسیال مقدار عدد ناسلت متوسط به‌عنوان معیاری از انتقال حرارت، تا ۴۳/۱۸ درصد افزایش می‌یابد. در همه‌ی اعداد رینولدز بررسی شده، با افزایش کسر حجمی نانوذرات، انتروپی تولیدی کل افزایش می‌یابد. در همه‌ی حالت‌ها انتروپی تولیدی ناشی از اصطکاک کم بوده و سهم عمده‌ی تولید انتروپی متعلق به انتروپی تولیدی ناشی از حرارت است.

واژه‌های کلیدی: نانوسیال، تولید انتروپی، نگهداشت انرژی، جابه‌جایی توام، خواص متغیر

مقدمه

رشد روز افزون صنعت نیاز به روش‌هایی برای بهبود پارامترهای انتقال حرارت را به منظور خنک‌کاری بهتر و بیشتر ضروری می‌سازد. امروزه صنعت توانایی تولید دستگاه‌هایی با تراکم بالا از تراشه‌های کامپیوتری را دارد. این دستگاه‌ها اغلب به دلیل تولید گرمای زیاد در سطحی کوچک، نیازمند روش‌های نوینی برای خنک‌کاری می‌باشند.

در سال‌های اخیر نانوسیال‌ها که دارای ضریب رسانایی حرارتی بیشتری نسبت به سیال‌های معمولی هستند، بیشتر مورد توجه بوده‌اند. نانوسیال‌ها مخلوطی از نانوذرات با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر و سیالی پایه مانند آب، روغن، اتیلن گلیکول، پروپیلن گلیکول و موارد مشابه می‌باشند. بیشتر بودن ضریب رسانایی حرارتی نانوذرات، که اغلب فلزی و یا در مواردی غیرفلزی مثل نانولوله‌های کربنی هستند، نسبت به سیال پایه، باعث بیشتر شدن ضریب رسانایی حرارتی نانوسیال‌ها می‌شود [۱].

جابه‌جایی توام به دلیل اینکه ترکیبی از اثرات حرکت درپوش محافظه و جابه‌جایی طبیعی می‌باشد، کاربردهای زیادی در الکترونیک، صنایع غذایی، راکتورهای هسته‌ای، روغن کاری صنعتی، استخرهای خورشیدی، کلکتورهای خورشیدی، مبدل‌های حرارتی، صنایع ذوب فلزات، شیشه‌سازی و دیگر موارد دارد [۲].

تولید انرژی نشان دهنده‌ی مقدار بازگشت‌ناپذیری در طی یک فرآیند می‌باشد و ضمناً می‌تواند معیاری برای عملکرد دستگاه‌های مهندسی باشد [۳]. کمینه کردن تولید انرژی یا همان بهینه‌سازی ترمودینامیکی روشی قدیمی نبوده و بخشی از تحلیل انرژی است [۴]. در واقع تحلیل انرژی کمی‌سازی انرژی به‌عنوان کمی‌تی کیفی می‌باشد [۵]. از آنجایی‌که تولید انرژی معیاری از نابودی قابلیت کاردهی دستگاه‌ها است تعیین انرژی تولیدی، به منظور افزایش دادن بازده دستگاه‌ها ضروری است [۶].

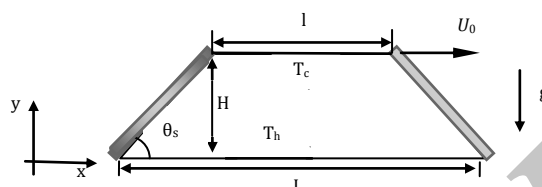
پیشکار و قاسمی (۲۰۱۲) انتقال حرارت و جریان سیال جابه‌جایی توام را در یک کانال افقی به همراه پره برای نانوسیال آب-مس به‌صورت عددی بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها با افزایش کسر حجمی و عدد رینولدز، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. این افزایش در یک کسر حجمی ثابت برای اعداد رینولدز بالاتر بیشتر می‌باشد [۷]. چمخا و ابونادا (۲۰۱۲) انتقال حرارت و جریان سیال جابه‌جایی توام، در یک محافظه مربعی با دیواره‌های جانبی عایق، دیواره بالایی گرم و دیواره پایینی سرد را در دو حالت بررسی کردند. در حالت اول فقط دیواره افقی بالایی متحرک و در حالت دوم، دیواره‌های افقی بالایی و پایینی در خلاف جهت هم حرکت دارند. بر اساس نتایج آن‌ها با افزایش کسر حجمی و کاهش عدد ریچاردسون عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد [۸].

خراسانی‌زاده و همکاران (۲۰۱۳) تولید انرژی را در جریان جابه‌جایی توام نانوسیال در یک محافظه مربعی به‌صورت عددی بررسی کردند. دیواره‌های جانبی محافظه سرد و گرم و دیواره‌های پایینی و بالایی آن عایق بودند. براساس نتایج آنان کمترین مقدار انرژی تولیدی در کمترین مقادیر عدد رایلی و رینولدز روی می‌دهد [۹]. چو و همکاران (۲۰۱۳) تولید انرژی نانوسیال‌های آب - مس، آب - اکسید آلومینیم و آب - اکسید تیتانیوم را برای انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در یک محافظه با دیواره‌های موجی شکل به‌صورت عددی بررسی کردند. در این محافظه دیواره‌های افقی بالایی و پایینی عایق بوده و دیواره‌ی موجی شکل سمت راست سرد می‌باشد. بر دیواره‌ی موجی شکل سمت چپ شار گرمایی ثابت اعمال می‌شود. بر اساس نتایج آن‌ها نانوسیال آب - مس دارای بیشترین نرخ انتقال حرارت و کمترین مقدار تولید انرژی در بین نانوسیال‌های مورد بررسی می‌باشد [۱۰].

در مطالعه حاضر جریان سیال، انتقال حرارت و تولید انرژی در جابه‌جایی توام نانوسیال آب-مس در محافظه‌ی دوزنقه‌ای با دیواره‌های جانبی عایق و دیواره‌های پایینی و بالایی به‌ترتیب گرم و سرد، در اعداد رینولدز مختلف و برای کسر حجمی‌های ۰ تا ۰/۰۴ از نانوذرات بررسی می‌شود.

معادلات حاکم و شرایط مرزی

طرحواره هندسه‌ی مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. دیواره‌های جانبی محفظه‌ی دوزنقه‌ای عایق، دیواره بالایی سرد (در دمای T_c) و متحرک در جهت راست ($+U_0$)، دیواره پایینی گرم (در دمای T_h)، و نانوسیال به کار رفته آب-مس است. خواص ترموفیزیکی آب به عنوان سیال پایه، و نانوذرات مس، در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: طرحواره هندسه‌ی مورد بررسی و شرایط مرزی

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی سیال پایه (در دمای ۳۰۰ K) و نانوذرات [۱۱]

آب (سیال پایه)	مس	خواص فیزیکی
۴۱۷۹	۳۸۵	c_p ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
۹۹۷/۱	۸۹۳۳	ρ (kgm^{-3})
۰/۶۱۳	۴۰۱	k ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
۲۱×10^{-5}	$۱/۶۷ \times 10^{-5}$	β (K^{-1})
۰/۰۰۱۰۰۳	-	μ (pa.s)

کمیت‌های مورد استفاده برای بی‌بعد سازی در جابه‌جایی توام که در رابطه (۱) معرفی می‌شوند، عبارتند از:

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, V = \frac{v}{U_0}, U = \frac{u}{U_0}, \theta = \frac{T - T_c}{\Delta T}, P = \frac{p}{\rho_f U_0^2}, T_0 = \frac{T_h + T_c}{2}, \Delta T = T_h - T_c \quad (1)$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \text{Gr} = \frac{g \beta_f H^3 (T_h - T_c)}{\nu_f^2}, \text{Re} = \frac{U_0 H}{\nu_f}, \text{Ri} = \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2}, \chi = \frac{(\mu_f \text{Re}^2 \nu_f^2 T_0)}{\Delta T^2 k_f H^2}$$

با کمک کمیت‌های بی‌بعد معرفی شده معادلات بی‌بعد بقای جرم، بقای تکانه و بقای انرژی و تولید انتروپی [۶] از روابط (۲) تا (۶) به دست می‌آیند.

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial U}{\partial Y} = 0 \quad (2)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\rho_{nf} \nu_f \text{Re}} \left[\frac{\partial}{\partial X} (\mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y} (\mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial Y}) \right] \quad (3)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\rho_{nf} \nu_f \text{Re}} \left[\frac{\partial}{\partial X} (\mu_{nf} \frac{\partial V}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y} (\mu_{nf} \frac{\partial V}{\partial Y}) \right] + \frac{(\rho \beta)_{nf} \text{Ri} \theta}{\rho_{nf} \beta_f} \quad (4)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re Pr} \alpha_f (\rho c_p)_{nf}} \left[\frac{\partial}{\partial X} (k_{nf} \frac{\partial \theta}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y} (k_{nf} \frac{\partial \theta}{\partial Y}) \right] \quad (5)$$

$$S_{gen}^m = \frac{k_{nf}}{k_f} \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)^2 \right] + \chi \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right)^2 \right] \quad (6)$$

تابع جریان از رابطه (۷) به دست می آید.

$$\psi(x, y) = \int u dy + \psi_0 \quad (7)$$

با توجه به هندسه مسئله، شرایط مرزی بی بعد عبارتند از:

$$\begin{aligned} U=V=0, \theta=1 & \text{ روی دیواره‌ی پایینی محفظه} \\ U=1, V=0, \theta=0 & \text{ روی دیواره‌ی بالایی محفظه} \\ U=V=0, \frac{\partial \theta}{\partial n}=0 & \text{ روی دیواره‌های جانبی محفظه} \end{aligned} \quad (8)$$

خواص نانوسیال شامل چگالی، ظرفیت گرمایی، ضریب انبساط حجمی، ضریب پخش، لزجت [۱۲] و ضریب هدایت حرارتی [۱۳] به ترتیب از روابط (۹) تا (۱۴) به دست می آیند.

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (9)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_s \quad (10)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho \beta)_f + \phi(\rho \beta)_s \quad (11)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (12)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1-\phi)^{-2.5} \quad (13)$$

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + \frac{k_p A_p}{k_f A_f} + C k_p Pe \frac{A_p}{k_f A_f} \quad (14)$$

در رابطه $C=36000$ ، $\frac{A_p}{A_f} = \frac{d_f \phi}{d_p (1-\phi)}$ و $Pe = \frac{U_p d_p}{\alpha_f}$ ، می باشد. مقدار سرعت (U_p) از رابطه (۱۵) به دست می آید:

$$U_p = \frac{2k_B T}{\pi \mu_f d_p^2} \quad (15)$$

d_p و d_f به ترتیب قطر مولکول‌های آب و نانوذرات مس بوده و برابر 2×10^{-10} و 100×10^{-9} می باشند. این مدل مخصوص نانوسیال‌ها با ذرات کروی است. کسر حجمی نانوذرات باید بین ۱٪ تا ۸٪ بوده و سیال پایه می تواند آب یا اتیلن گلیکول باشد. ضریب انتقال حرارت جابه جایی، عبارت است از:

$$h_{nf} = \frac{q}{T_h - T_c} \quad (16)$$

عدد ناسلت که طول مشخصه‌ی آن بر اساس اندازه‌ی ضلع محفظه سنجیده می شود عبارت است از:

$$Nu = \frac{h_{nf} H}{k_f} \quad (17)$$

شار حرارتی دیواره‌ها بر واحد سطح عبارت است از:

$$q = -k_{nf} \frac{T_h - T_c}{H} \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{wall} \quad (18)$$

با قرار دادن رابطه‌های (۱۶) و (۱۸) در رابطه‌ی (۱۷) عدد ناسلت به صورت رابطه‌ی (۱۹) به دست می‌آید.

$$Nu = - \left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{wall} \quad (19)$$

عدد ناسلت متوسط روی دیواره‌ی گرم عبارت است از:

$$Nu_{Avg} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dX \quad (20)$$

شبیه سازی عددی

معادلات حاکم به کمک روش حجم محدود و الگوریتم سیمپلر به صورت عددی حل می‌شوند. ابتدا شبکه‌ای یکنواخت و مناسب بر میدان حل منطبق می‌شود و سپس حول هر گره، حجم کنترلی ایجاد می‌شود و از معادلات حاکم روی هر حجم کنترل انتگرال گیری شده و معادلات منفصل شده و دستگاهی از معادلات جبری به دست می‌آید. برای انفصال جملات پخش و جابه‌جایی از طرح پیوندی (هیبرید) استفاده می‌شود. در این روش برای اعداد پکلت با قدر مطلق کوچکتر از ۰.۲، از طرح تفاضل مرکزی و در اعداد پکلت با قدر مطلق بزرگتر از ۲ از طرح جریان بالادست استفاده می‌شود. جهت دستیابی به همگرایی از ضرایب زیرتخفیف که برای مولفه‌های سرعت ۰/۵ و برای دما ۰/۷ می‌باشد استفاده شده است.

استقلال نتایج از شبکه

به منظور یافتن شبکه مناسبی که منجر به استقلال نتایج از شبکه شود، عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال آب-مس برای شبکه با تعداد نقاط مختلف به دست آمده و در جدول ۲ مقایسه شده‌اند. با توجه به مقادیر ناسلت متوسط مشاهده می‌شود که شبکه با تعداد نقاط ۳۹۶۲۱ مناسب است.

جدول ۲- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای نانوسیال آب-مس در

حالت، $Re=100$ و $\phi=0.04$ برای شبکه‌های مختلف

Nu_{Avg}	تعداد نقاط
۵/۳۷	۲۴۵۳۱
۵/۴۸	۲۹۱۶۱
۵/۵۷	۳۴۱۹۱
۵/۶۳	۳۹۶۲۱
۵/۶۶	۴۵۴۵۱

اعتبارسنجی برنامه

برای اعتبارسنجی نتایج برنامه کامپیوتری، هندسه کار قاسمی و همکاران [۱۴] با برنامه کامپیوتری حاضر، شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن با نتایج آن‌ها در جدول ۳ مقایسه شده‌اند. چنان‌چه مشاهده می‌شود تفاوت نسبی مقادیر عدد ناسلت متوسط ناچیز می‌باشند و لذا از صحت نتایج مدل‌سازی‌ها اطمینان حاصل می‌شود.

جدول ۳- مقایسه عدد ناسلت متوسط برای تحقیق حاضر
و مرجع [۱۴] در اعداد رایلی مختلف برای $\phi=0.06$

Ra	کار حاضر	قاسمی [۱۴]	درصد اختلاف
10^3	۱/۱۸۲	۱/۱۸۴	۰/۱۶
10^4	۱/۲۹۰	۱/۲۹۱	۰/۰۷
10^5	۳/۱۰۷	۳/۱۰۸	۰/۰۳

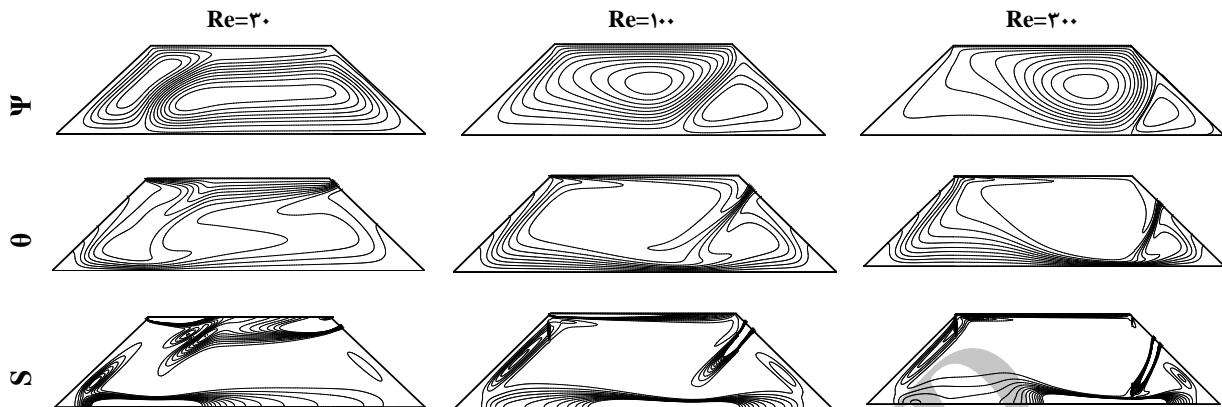
نتایج و بحث

در شکل ۲ خطوط جریان، دما ثابت و انرژی کل در $\phi=0.02$ ، $\theta_s=45^\circ$ ، در اعداد رینولدز ۳۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ نشان داده شده است. در تمامی اعداد رینولدز مورد بررسی دو گردابه تشکیل می‌شود و با افزایش عدد رینولدز گردابه طرف چپ محفظه قوی‌تر شده و به طرف راست متمایل می‌شود و گردابه دوم را در فضای سمت راست محدود می‌کند. در رینولدز ۱۰۰ رفتار خطوط جریان مانند رینولدز ۳۰ می‌باشد ولی به دلیل سرعت بیشتر درپوش، گردابه‌های مجزای بزرگ امکان شکل گرفتن پیدا نمی‌کنند. در اعداد رینولدز کم (مانند رینولدزهای ۳۰ و ۱۰۰) که جابه‌جایی طبیعی بیش از جابه‌جایی اجباری است گردابه‌ها متأثر از نیروی شناوری در محفظه حرکت کرده و گردابه‌هایی بزرگ ولی با قدرت کم شکل می‌گیرد. با افزایش عدد رینولدز که باعث غلبه‌ی جابه‌جایی اجباری بر جابه‌جایی طبیعی می‌شود شکل گردابه‌ها هر چه بیشتر تحت تاثیر سرعت درپوش قرار گرفته، گردابه‌ها کشیده‌تر، کوچک‌تر و قوی‌تر می‌شوند.

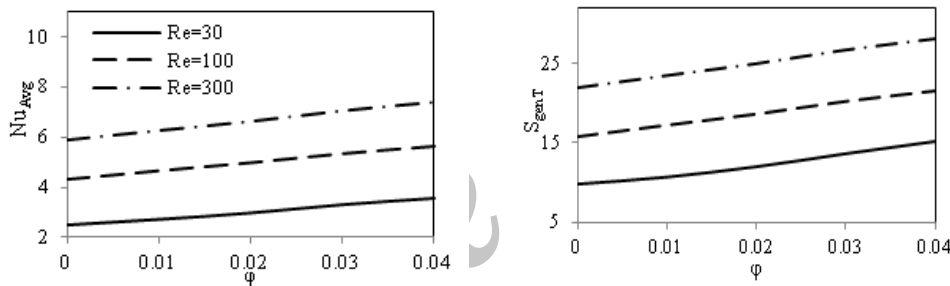
در رینولدزهای ۳۰ و ۱۰۰ خطوط دما ثابت در نزدیکی دیواره‌ی گرم پایینی و دیواره‌ی سرد بالایی تراکم بیشتری دارند. در این اعداد رینولدز، خطوط دما ثابت دارای انحنای بوده و تقریباً به صورت متقارن در همه‌ی محفظه قرار دارند. در رینولدز ۳۰۰ انحنای خطوط دما ثابت حفظ می‌شود. در رینولدز ۳۰۰ سرعت درپوش به اندازه‌ای زیاد است که نیروی ناشی از آن می‌تواند کاملاً تعیین کننده رفتار سیال باشد. در این اعداد رینولدز، تراکم خطوط دما ثابت در نزدیکی دیواره‌ی گرم بیش از دیگر ناحیه‌های محفظه می‌باشد.

خطوط انرژی کل در رینولدزهای ۳۰ و ۱۰۰، بیشتر در نزدیکی ضلع‌های بالایی و پایینی متراکم هستند. خطوط انرژی کل در ناحیه‌هایی که خطوط جریان و دما ثابت متراکم هستند، تراکم بیشتری دارند. در رینولدز ۳۰۰ تراکم خطوط انرژی کل در نزدیکی دیواره‌ی پایینی و سمت چپ محفظه بیشتر از دو ضلع دیگر آن می‌باشد. انحنای خطوط انرژی کل در رینولدز ۳۰۰ زیاد می‌شود. خطوط انرژی کل در همه رینولدزهای بررسی شده در نزدیکی دیواره‌ی سمت چپ و دیواره‌های بالایی و پایینی متراکم هستند. این رفتار به دلیل تراکم بیشتر خطوط دما ثابت و جریان در این ناحیه‌ها می‌باشد. به طور کلی رفتار خطوط انرژی کل بسیار متأثر از رفتار خطوط دما ثابت می‌باشد. بیشینه سهم انرژی تولیدی اصطکاکی در همه‌ی کسرهای حجمی و اعداد رینولدز برابر با ۰/۰۶۱۵ درصد بوده و در رینولدز ۳۰۰ برای کسر حجمی ۰/۰۴ روی می‌دهد.

در شکل ۳ تغییرات عدد ناسلت متوسط و انرژی تولیدی کل در اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. با افزایش کسر حجمی نانوذرات در تمامی اعداد رینولدز، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. با توجه به رفتار مشابه تغییرات انرژی تولیدی کل، با عدد ناسلت، با افزایش کسر حجمی نانوذرات در تمامی اعداد رینولدز انرژی تولیدی کل نیز افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش انتقال حرارت ناشی از افزایش کسر حجمی نانوذرات، انرژی تولیدی ناشی از انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد. این مطلب با توجه به اینکه سهم عمده در تولید انرژی کل را انرژی تولیدی حرارتی دارد، توجیه پذیر است.



شکل ۲- خطوط جریان، دما ثابت و انتروپی کل برای نانوسیال آب - مس در $\theta_s=45^\circ$, $\phi=0.02$



شکل ۳- تغییرات عدد ناسلت متوسط و انتروپی تولیدی کل بر حسب کسر حجمی در اعداد رینولدز مختلف

با کاربرد نانوسیال به جای سیال، در کسرهای حجمی مورد بررسی بیشترین افزایش در عدد ناسلت متوسط $43/18$ درصد بوده که در رینولدز 30 و با افزایش کسر حجمی از 0 به 0.04 روی می‌دهد. کمترین افزایش در عدد ناسلت متوسط $6/48$ درصد بوده که در رینولدز 300 و با افزایش کسر حجمی از 0 به 0.01 روی می‌دهد. همچنین در هندسه مورد بررسی بیشترین افزایش در انتروپی تولیدی کل برابر با $56/53$ درصد بوده که در رینولدز 30 و با افزایش کسر حجمی از 0 به 0.04 روی می‌دهد. کمترین افزایش در انتروپی تولیدی کل برابر با $7/26$ درصد بوده که در رینولدز 300 و با افزایش کسر حجمی از 0 به 0.01 روی می‌دهد. در جدول ۴ مقادیر بیشینه افزایش در عدد ناسلت متوسط و انتروپی تولیدی کل برای اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. در همه‌ی حالت‌های نشان داده شده در جدول، مقادیر بیشینه متعلق به افزایش کسر حجمی از 0 به 0.04 می‌باشد.

جدول ۴- مقدارهای بیشینه افزایش عدد ناسلت و انتروپی تولیدی کل در اعداد رینولدز مختلف

Re	درصد افزایش انتروپی کل	درصد افزایش عدد ناسلت
30	56/53	43/18
100	36/49	30/85
300	28/92	25/76

نتیجه گیری

در این تحقیق میدان جریان، انتقال حرارت و تولید انرژی جابه جایی توام نانوسیال آب - مس با خواص متغیر در محفظه‌ی دوزنقه‌ای بررسی شد. دیواره‌های جانبی محفظه عایق بوده، دیواره‌ی بالایی سرد و متحرک و دیواره‌ی پایینی گرم است. مطالعه در عدد گراش 10^4 ، برای اعداد رینولدز ۳۰، ۱۰۰ و ۳۰۰، زاویه‌ی 45° دیواره‌های جانبی با افق و کسرهای حجمی ۰ تا ۰/۰۴ نانوذرات انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که:

- (۱) در همه‌ی اعداد رینولدز با افزایش کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد.
- (۲) در همه‌ی حالت‌های مورد بررسی انرژی تولیدی ناشی از اصطکاک بسیار ناچیز می‌باشد و سهم عمده‌ی تولید انرژی متعلق به انرژی تولیدی ناشی از حرارت می‌باشد. با توجه به این مطلب تقریباً در همه‌ی حالت‌های بررسی شده تغییرات انرژی تولیدی کل مشابه تغییرات عدد ناسلت متوسط می‌باشد.
- (۳) در همه‌ی اعداد رینولدز با افزایش کسر حجمی نانوذرات، انرژی تولیدی کل افزایش می‌یابد.
- (۴) بیشترین افزایش در انرژی تولیدی کل $56/53\%$ درصد بوده که در رینولدز ۳۰ و با افزایش کسر حجمی از ۰ به ۰/۰۴ روی می‌دهد.
- (۵) با استفاده از نانوسیال بیشترین افزایش در عدد ناسلت متوسط $43/18\%$ بوده و در رینولدز ۳۰ و با افزایش کسر حجمی از ۰ به ۰/۰۴ روی می‌دهد.
- (۶) نتایج نشان می‌دهد که می‌توان با کاربرد نانوسیال به جای سیال نرخ انتقال حرارت را افزایش داد و نگهداشت انرژی بیشتری داشت. البته در این افزایش انتقال حرارت به مقدار انرژی تولیدی نیز باید توجه داشت و با توجه به رینولدز و کسر حجمی، مصالحه‌ای بین افزایش در نرخ انتقال حرارت و تولید انرژی برقرار نمود.

مراجع

- [1] . Mansour, M. A Mohamed, R.A. Abd-Elaziz, M.M. Ahmed, S.E. "Numerical simulation of mixed convection flows in a square lid-driven cavity partially heated from below using nanofluid", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 37. pp. 1504-1512, 2010.
- [2] Bhattacharya, M. Basak, T. Oztop, H.F. Varol, Y. "Mixed convection and role of multiple solutions in lid-driven trapezoidal enclosures", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 63. pp. 366-388, 2013.
- [3] Cengel, Y.A. Boles, M.A. Thermodynamics an Engineering Approach, fifth ed., McGraw-Hill, 2006.
- [4] Rosen, M.A. "Second-law analysis: approach and implications", International Journal Energy Research, Vol. 33. pp. 415-429, 1999.
- [5] Oztop, H.F. Al-Salem, K. "A review on entropy generation in natural and mixed convection heat transfer for energy systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16. pp. 911-920, 2012.
- [6] Bejan, A. "Second law analysis in heat transfer", Energy, Vol. 5. pp. 721-732, 1980.
- [7] Pishkar, I. Ghasemi, B. "Cooling enhancement of two fins in a horizontal channel by nanofluid mixed convection", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 59. pp. 141-151, 2012.
- [8] Chamkha, A.J. Abu-Nada, E. "Mixed convection flow in single- and double-lid driven square cavities filled with water- Al_2O_3 nanofluid: Effect of viscosity models", European Journal of Mechanics B/Fluids, Vol. 36. pp. 82-96, 2012.
- [9] Khorasanizadeh, H. Nikfar, M. Amani, J. "Entropy generation of Cu-water nanofluid mixed convection in a cavity", European Journal of Mechanics B/Fluids, Vol. 37. pp. 143-152, 2013.



- [10] Cho, C. Chen, C. Chen < K. “Natural convection heat transfer and entropy generation in wavy-wall enclosure containing water-based nanofluid”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 61, pp. 749–758, 2013.
- [11] Mahmoudi, A. Pop, I. Shahi, M. “Effect of magnetic field on natural convection in a triangular enclosure filled with nanofluid”, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 59. pp. 126–140, 2012.
- [12] Brinkman, H.C. “The viscosity of concentrated suspensions and solution”, The Journal of Chemical Physics, Vol. 20, pp. 571–581, 1952.
- [13] Patel, H.E. Sundararajan, T. Pradeep, T. Dasgupta, A. Dasgupta, N. Das, S.K. “A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluids”, Journal of Physics, Vol. 65, pp. 863–869, 2005.
- [14] Ghasemi, B. Aminossadati, S.M. Raisi, A. “Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid-filled square enclosure”, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 50, pp. 1748–1756, 2011.

Archive of SID