

# آنالیز تولید آنتروپی با نانو ذرات درون فضای حلقوی هم مرکز با سیلندر خارجی دوار

سعید عمادالدین<sup>۱</sup>، احد عابدینی اسفهلانی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

\* سمنان، صندوق پستی ۱۷۹-۳۵۱۴۵، a.abedini@semnaniau.ac.ir

## چکیده

در این مقاله به تاثیر افزودن نانو ذرات مس به سیال پایه بر تولید آنتروپی درون فضای حلقوی هم مرکز افقی تحت شرایط دما ثابت پرداخته می‌شود. جریان سیال درون سیلندر آرام و سیلندر خارجی دوران می‌کند. دمای سیلندر خارجی از سیلندر داخلی بیشتر و اختلاف دمای دو سیلندر همواره ثابت است. افزودن نانو ذرات به سیال پایه در شرایط مرزی ثابت تاثیر بسیار کمی بر توزیع دما دارد. با افزایش عدد برینکمن میزان تولید آنتروپی افزایش و با اضافه نمودن نانو ذرات میزان تولید آنتروپی کاهش می‌یابد. تاثیر ترم اصطکاک و انتقال حرارت بر تولید آنتروپی کل بررسی شد و مشخص شد که در این مسئله ترم اتلاف لزجت در تولید آنتروپی تاثیر بیشتری دارد. نتایج نشان داد که با افزایش عدد رینولدز میزان تولید آنتروپی افزایش می‌یابد و افزودن نانو ذرات موجب افزایش عدد ناسلت تا ۳۰٪ می‌شود.

کلمات کلیدی: تولید آنتروپی، فضای حلقوی هم مرکز، نانو ذرات، نانو سیال، عدد ناسلت

## Entropy generation of nano-fluid inside concentric annuli with rotating outer cylinder

Saied Emadodin<sup>1</sup>, Ahad Abedini Esfahalani<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

\* P.O.B. 179-35145 Semnan, Iran, a.abedini@semnaniau.ac.ir

## Abstract

In this study entropy generation inside horizontal concentric annulus for Cu Nano-fluid (water) under the constant-temperature conditions has been investigated. The fluid flow inside the cylinder is laminar and the outer cylinder is rotating. The temperature of the outer cylinder is higher and the temperature difference of the two cylinders is always constant. (Result show) Adding nanoparticles to the base fluid at constant boundary conditions has very little effect on the temperature distribution. As the Brinkman number increases, the entropy generation increases where using nanoparticles in the base fluid decreases entropy generation. Friction and heat transfer effects on the total entropy has been studied. It has been shown viscous dissipation is more effective in entropy generation. Extracted results shows that as the Reynolds number increases, the amount of entropy generation increases, and adding nanoparticles lead to the increase Nusselt number up to 30 percent.

## Keywords

Entropy generation; concentric annulus; Nanoparticles; Nano-fluid; Nusselt number

هو اضا ... استفاده می‌شوند [۷]. انتقال حرارت درون دو سیلندر هم مرکز در وسایل صنعتی زیادی مانند مخلوط کن‌ها، سیستم‌های ذخیره گرمایی، خنک کاری تجهیزات الکتریکی، مبدل‌های حرارتی دو لوله ای برای فرآیندهای شیمیایی و صنایع غذایی به کار می‌روند [۸]. به دلیل کاربرد زیاد فضاهای حلقوی لازم است تا علاوه بر انتقال حرارت تولید آنتروپی درون آنها نیز بررسی شود. کمینه کردن میزان تولید آنتروپی یکی از راههای افزایش کارایی سیستم‌های گرمایی است. روش کمینه کردن تولید آنتروپی که یک دیدگاه ترمو دینامیکی دارد توسط بیژن مطرح شد [۹].

در سالهای اخیر مقالات زیادی در زمینه تولید آنتروپی در هندسه های مختلف به چاپ رسیده است، که از جمله آنها می‌توان به مقالات زیر اشاره کرد. آقای حداد [۱۰] تولید آنتروپی در ناحیه ورودی فضای حلقوی هم مرکز را در شرایط جریان آرام اجباری برای شرایط مرزی متفاوت به صورت عددی بررسی کرد، نتایج او نشان داد که با افزایش عدد اکرت تولید آنتروپی زیاد می‌شود. همچنین افزایش عدد رینولدز موجب کاهش تولید آنتروپی می‌شود. آنالیز تولید آنتروپی در فضای حلقوی با شرایط مختلف مرزی دما ثابت و شار ثابت توسط محمود و فراسر [۱۱] انجام پذیرفت. نتایج آنها نشان داد که تولید آنتروپی نزدیک دیواره با دمای بالاتر به دلیل زیادتر بودن گرادیان دما

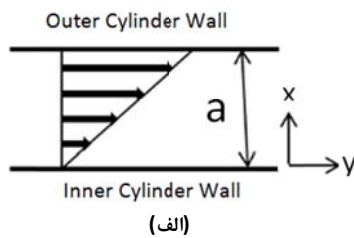
## ۱- مقدمه

بهبود انتقال حرارت در سیستم‌های گرمایی و مهندسی و کوچک سازی وسایل صنعتی یکی از موضوعات همواره مهم طراحان سیستم های گرمایی بوده است. روش‌های مختلفی برای افزایش انتقال حرارت جابجایی وجود دارد، مانند تغییر در هندسه جریان، شرایط مرزی و یا افزایش رسانایی گرمایی سیال [۱]. با توجه به محدودیت فضا در بسیاری از تجهیزات مانند سیستم های الکترونیکی امکان افزایش مساحت انتقال حرارت وجود ندارد، در بسیاری از موارد تغییر در شرایط مرزی نیز امکان پذیر نمی‌باشد، به همین دلیل بهبود کارایی گرمایی سیالات مورد استفاده مهم ترین راه باقیمانده برای افزایش میزان انتقال حرارت از سیستم‌های گرمایی می‌باشد. افزودن نانو ذرات به سیال پایه و تولید سیال با خواص انتقال حرارت بهتر یکی از راههای پیش روی مهندسیین می‌باشد. واژه نانو سیال اولین بار توسط چوی [۲] در سال ۱۹۹۵ مطرح شد. محققین بسیاری روش‌های مختلف آزمایشگاهی و عددی را برای به دست آوردن خواص ترموفیزیکی نانو سیالات انجام دادند [۳-۶]. نانو سیالات در موارد زیادی مانند خنک کاری موتور، خنک کردن سیستم های الکترونیکی، سیستم‌های خنک کن هسته ای، آب گرمکن‌های خورشیدی، روغن کاری، سیستم‌های ذخیره گرمایی، تبرید (یخچال‌های خانگی و چیلرها)،

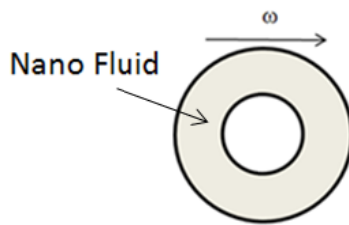
مرزی دما ثابت حل می‌شوند، نانو ذرات درون فضای بین دو سیلندر با سیال پایه در حال تعادل گرمایی هستند و لغزشی بین آنها صورت نمی‌گیرد.

## ۲- شرح مسئله:

شکل ۱ نشان دهنده شماتیک مسئله می‌باشد. مطابق شکل سیلندر خارجی در جهت ساعتگرد با سرعت زاویه ای ثابت دوران می‌کند. در فاصله میان دو سیلندر نانو سیال قرار دارد. نانوسیال موجود در فضای دو سیلندر را نیوتنی و غیر قابل تراکم در نظر می‌گیریم و مسئله در حالت دائم در نظر گرفته می‌شود. نانو ذرات با سیال در حالت تعادل گرمایی قرار دارند و نسبت به هم حرکت نسبی ندارند، به همین دلیل کل دامنه مسئله به صورت پیوسته بررسی می‌شود. خواص ترمو فیزیکی نانو ذرات ثابت بوده و نسبت به دما تغییر نمی‌کند. شرایط مرزی بر روی دو سیلندر دما ثابت بوده و جریان درون فضای حلقوی آرام بوده و توزیع سرعت خطی در نظر گرفته شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱ شماتیک مسئله. (الف) مدل صفحه تخت. (ب) فضای حلقوی

## ۳- معادلات حاکم:

سیال درون سیلندر را نیوتنی، غیر قابل تراکم و پایدار فرض شده است و سیلندر خارجی با سرعت زاویه ای ثابت در حال دوران می‌باشد، جریان در حالت یک بعدی در نظر گرفته شده است و تغییرات همگی در راستای شعاعی می‌باشد و از مولفه‌های سرعت در راستای محوری و مماسی صرف نظر شده است. سرعت زاویه ای سیلندر خارجی ثابت است، توزیع سرعت درون سیلندر را خطی در نظر می‌گیریم.

$$\frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۱)$$

$$\mu_{nf} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0 \quad (۲)$$

$$K_{nf} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \mu_{nf} \phi = 0 \quad (۳)$$

بیشتر است. همچنین برای شرط مرزی دما ثابت عدد بیژن نزدیک سیلندر داخلی به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. آقای بکیر سامی [۱۲] تولید آنتروپی درون دو استوانه هم مرکز در حالت دما ثابت در شرایطی که سیلندر خارجی دوران می‌کند بررسی کرد و فرض کرد که جریان سیال بین دو سیلندر آرام است و توزیع پروفیل سرعت آن خطی است و فقط تولید آنتروپی به علت انتقال حرارت را بررسی کرد، نتایج او نشان داد که برای اعداد پایین برینکمن ترم اتلاف لزجت چندان موثر نیست، نتایج او نشان داد که با افزایش عدد برینکمن ترم اتلاف لزجت تاثیر گذارتر می‌شود، علاوه بر آن افزایش اختلاف دمای بین دو سیلندر موجب افزایش گرادیان دما و در نتیجه افزایش تولید آنتروپی می‌شود. ماهیان و همکاران [۱۳] تولید آنتروپی بین دو سیلندر هم مرکز در شرایط مرزی شار ثابت در حضور نانو سیال را بررسی کردند، مشاهدات آنها نشان داد که افزایش درصد حجمی نانو ذرات در زمانی که انتقال حرارت در تولید آنتروپی غالب است موجب کاهش تولید آنتروپی می‌شود. نتایج آنها نشان داد که نانو سیال آب اکسید تیتانیوم نسبت به نانو سیال اکسید آلومینوم اتیلن گلیکول کارآمد تر است. آنها تولید آنتروپی درون فضای حلقوی افقی با سیلندر داخلی دوار در حضور میدان مغناطیسی را نیز بررسی کردند [۱۴]. نتایج آنها نشان داد که با افزایش عدد هارتمن تولید آنتروپی نزدیک سیلندر داخلی کاهش یافته و مقدار تولید آنتروپی در قسمت‌های دیگر افزایش می‌یابد، همچنین تولید آنتروپی متوسط با افزایش عدد هارتمن افزایش می‌یابد. آنها در مقاله دیگر [۱۵] به بررسی تولید آنتروپی درون دو سیلندر هم مرکز عمودی در حضور نانوسیال آب اکسید تیتانیوم تحت تاثیر میدان مغناطیسی پرداختند نتایج آنها نشان داد که استفاده از نانو ذرات موجب کاهش تولید آنتروپی می‌شود در حالیکه افزایش عدد هارتمن موجب افزایش تولید آنتروپی می‌شود. از مقالات مروری در زمینه نانو ذرات می‌توان به مقاله آقای وانگ و همکارش اشاره کرد [۱]. نویسندگان مقاله اطلاعات جامعی در مورد تهیه نانو سیالات، خواص آنها و چگونگی اندازه گیری رسانایی گرمایی نانو سیالات و ویسکوزیته آنها به خواننده ارائه می‌دهند، علاوه بر این آنها پژوهش‌های انجام شده در زمینه نانو ذرات را به دو قسمت مقالات آزمایشگاهی و کارهای عددی تقسیم کردند. سایر مقالات مروری برای اطلاعات بیشتر را می‌توان در مراجع [۱۶-۲۲] یافت. از مقاله‌های مروری در زمینه تولید آنتروپی در حضور نانو ذرات می‌توان به مقاله آقای ماهیان و همکاران اشاره کرد [۲۳]. آنها در مقاله خود هندسه‌های مختلف را دسته بندی کردند و مقالات مطرح شده در مورد هر هندسه را در فصل‌های جداگانه بررسی کردند. همچنین هاگان و همکارش [۲۴] تولید آنتروپی به سبب جابجایی طبیعی و ترکیبی را مورد بررسی قرار دادند.

در مقاله های چاپ شده در زمینه تولید آنتروپی در سیلندرهایی هم مرکز تا کنون مقاله ای منتشر نشده که تولید آنتروپی درون فضای هم مرکز در حضور نانو ذرات با شرایط مرزی دما ثابت را به صورت تحلیلی بررسی کرده باشد. در این مقاله به بررسی تولید آنتروپی درون دو سیلندر هم مرکز در حضور نانو ذرات مس-آب می‌پردازیم و تاثیر انتقال حرارت و اصطکاک سیال را در تولید آنتروپی بررسی می‌کنیم. علاوه بر آن به بررسی تاثیر اختلاف دمای بین دو سیلندر و عدد برینکمن در تولید آنتروپی می‌پردازیم و در انتها تاثیر افزودن نانو ذرات را بر عدد ناسلت به دست می‌آوریم. معادلات حاکم بر میدان جریان ساده سازی شده و با فرض جریان آرام درون محفظه حل می‌شوند و عدد رینولدز کمتر از ۳۰۰ استفاده شده است. معادلات برای شرایط

در معادله بالا رسانایی گرمایی نانو ذرات و رسانایی گرمایی سیال پایه است، همچنین  $n$  ضریب شکل نانو ذرات است که برای نانو ذره با شکل کروی برابر با ۳ می‌باشد. لازم به ذکر است که نویسنده مقاله برای استفاده از رابطه ۱۱ پیشنهاد داد تا نسبت باید بزرگتر از ۱۰۰ باشد.

برای به دست آوردن تولید آنتروپی به صورت بی بعد می‌توان با تقسیم آنتروپی تولیدی بر تولید آنتروپی مشخصه مقادیر بی بعد آن را بدست آورد.

$$\dot{S}_{gen,c} = \left[ \frac{K(\Delta T)^2}{b^2 T_c^2} \right] \quad (15)$$

که در نتیجه مقدار تولید آنتروپی بی بعد از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\left( \frac{\partial \theta}{\partial X} \right)^2 + \frac{Br}{\Omega} \left( \frac{\partial V}{\partial X} \right)^2 = N_h + N_f \quad (16)$$

در معادله ۱۴،  $\theta$  دمای بی بعد است  $Br$  معرف عدد بی بعد برینکمن و  $\Omega$  اختلاف دمای بی بعد است که برابر است با  $\frac{\Delta T}{T_0}$ .

در جدول ۱ خواص ترموفیزیکی نانو ذرات مس و آب نشان داده شده است، مطابق جدول رسانایی گرمایی نانو ذرات بسیار بیشتر آب است.

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی

ماده	ویسکوزیته $\left( \frac{N.s}{m^2} \right)$	رسانایی گرمایی $\left( \frac{W}{m.k} \right)$
آب	۰/۰۰۱	۰/۶۱۳
مس	-	۴۰۰

$$\psi = \frac{N_f}{N_h} \quad (17)$$

$$Be = \frac{N_h}{N_h + N_f} \quad (18)$$

در روابط فوق  $\psi > 1$  نشان دهنده این موضوع است که در تولید آنتروپی اصطکاک سیال غالب است و مقادیر  $0 < \psi < 1$  معرف آن است که تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت غالب است. عدد دوم، عدد بیژن می‌باشد که به منظور تعیین بهتر توزیع آنتروپی درون هندسه مسئله از آن استفاده می‌شود، این عدد که نشان دهنده نسبت تولید آنتروپی در اثر انتقال حرارت به کل آنتروپی تولیدی است اولین بار توسط پائولتی [۲۶] مطرح شد و از طریق رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود، در این پژوهش از عدد بی بعد بیژن برای نمایش سهم تولید آنتروپی استفاده می‌شود. بازه تغییرات عدد بیژن  $1 < Be < 10$  است، مقدار ۰ نشان دهنده این است که تنها اصطکاک سیال در تولید آنتروپی نقش دارد، همچنین مقدار ۱ نشان دهنده این است که تنها انتقال حرارت در تولید آنتروپی نقش دارد.  $Be = 0.5$  نشان دهنده یکسان بودن سهم انتقال حرارت و اصطکاک در تولید آنتروپی است.

عدد ناسلت بر روی دیواره‌های داخلی و خارجی به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$Nu = \frac{hb}{k} \quad (19)$$

که در رابطه فوق  $h$  ضریب انتقال حرارت موضعی و از طریق معادله ۱۸ محاسبه می‌گردد.

$$\phi = \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \quad (4)$$

معادله ۱ تا معادله ۴ به ترتیب پیوستگی، مومنوم در راستای  $y$  معادله گرما و ترم اتلاف لزجت می‌باشند.

شرایط مرزی:

$$x=0 \longrightarrow v=0, T=T_c \quad (5)$$

$$x=a \longrightarrow v=V_0, T=T_h \quad (6)$$

پس از ساده سازی معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی، پروفیل دما و سرعت به شکل زیر تبدیل می‌شوند.

$$v = \frac{V_0}{a} x \quad \text{or} \quad V = \frac{v}{V_0} = \frac{x}{a} \quad (7)$$

$$\frac{T - T_c}{T_h - T_c} = \frac{x}{a} + \frac{\mu v^2}{2k(T_h - T_c)} \left[ \frac{x}{a} - \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right] \quad (8)$$

$$Br = \frac{\mu v^2}{k(T_h - T_c)} \quad (9)$$

که در رابطه فوق  $Br$  عدد بی بعد برینکمن است، عدد برینکمن نشان دهنده انتقال گرما از طریق رسانش به سیال اطراف با ویسکوزیته معلوم است. زیاد شدن عدد برینکمن به معنی افزایش تولید گرما بر اثر اتلاف لزجت و خارج نشدن این گرما از طریق رسانش و در نتیجه افزایش دمای سیستم می‌باشد.

پس از جایگذاری معادله ۹ در رابطه ۸ تابع دما را از طریق رابطه زیر محاسبه می‌کنیم.

$$\frac{T - T_c}{T_h - T_c} = \frac{x}{a} + \frac{1}{2} Br \left[ \frac{x}{a} - \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right] \quad (10)$$

که در نهایت دمای بی بعد به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\theta = \frac{x}{a} + \frac{1}{2} Br \left[ \frac{x}{a} - \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right] \quad (11)$$

#### ۴- آنالیز قانون دوم ترمودینامیک و تولید آنتروپی

$$\dot{S}_{gen}^m = \frac{K_{nf}}{T_c^2} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{\mu_{nf}}{T_c} (\phi) \quad (12)$$

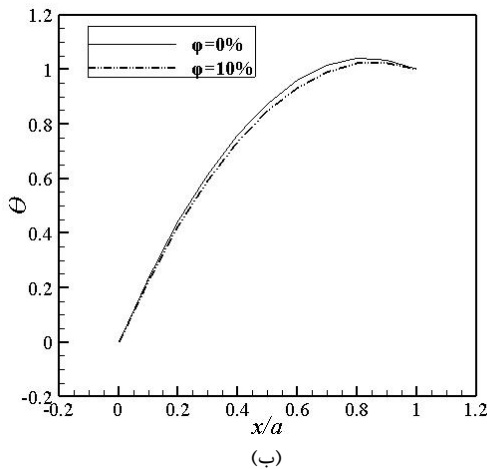
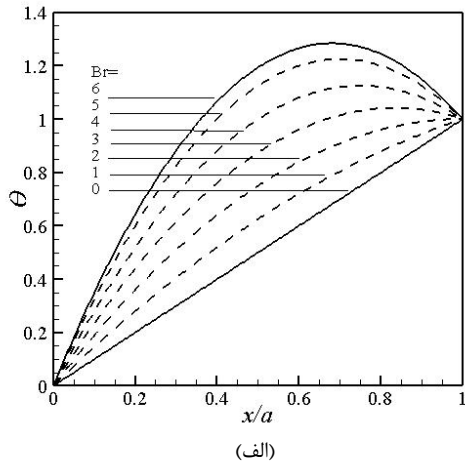
معادله فوق نشان دهنده تولید آنتروپی می‌باشد. در این معادله عبارت اول معرف ترم تولید آنتروپی به دلیل انتقال حرارت و عبارت دوم نشان دهنده تولید آنتروپی به دلیل اتلاف لزجت سیال است.

همچنین  $\mu_{nf}$  و  $K_{nf}$  به ترتیب رسانایی گرمایی و ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال می‌باشد که برای محاسبه آنها از روابط به دست آمده توسط همپلتن و همکارش [۲۵] استفاده شده است.

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

در رابطه فوق  $\phi$  درصد حجمی نانو ذرات است.

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{K_s + (n - 1)K_f - (n - 1)K_f - (n - 1)(K_f - K_s)\phi}{K_s + (n - 1)K_f + (K_f - K_s)\phi} \quad (14)$$



شکل ۲ (الف) توزیع دمای بی بعد بر حسب عدد برینکمن (ب) توزیع دمای بی بعد برای  $Br=3$  با درصد حجمی مختلف نانو ذرات

#### ۶- بررسی تولید آنتروپی:

شکل ۳ نشان دهنده تولید آنتروپی صرفاً به دلیل انتقال حرارت در شرایط مختلف درون فضای حلقوی است. با توجه به شکل (الف) در می‌یابیم که با افزایش عدد برینکمن میزان تولید آنتروپی به دلیل انتقال حرارت درون فضای حلقوی زیاد می‌شود. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که میزان تولید آنتروپی در نزدیک سیلندر داخلی بیشتر است این اختلاف به دلیل زیاد بودن گرادیان دما در نزدیک سیلندر داخلی است که در شکل ۲-الف نیز کاملاً مشهود است، مطابق این شکل برای حالت  $Br=0$  مقدار تولید آنتروپی به دلیل انتقال حرارت در همه حالت‌ها برابر ۱ است که با توجه به تعریف عدد برینکمن و معادله ۸ و ۱۴ مشخص می‌شود که در این حالت هیچگونه حرکت نسبی بین سیلندر داخلی و خارجی نیست و لذا تولید آنتروپی صرفاً به دلیل انتقال حرارت است و به دلیل خطی بودن توزیع دما در این حالت با افزایش فاصله از سیلندر داخلی تغییری در میزان تولید آنتروپی ایجاد نمی‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در فاصله حدودی  $x=0.7$  از سیلندر داخلی مقدار تولید آنتروپی برای  $Br>2$  برابر صفر است که این به دلیل تغییر جهت انتقال حرارت در سیلندر و صفر شدن گرادیان دما در این نقطه است. شکل ۳-ب تولید آنتروپی در حالت  $Br=6$  را نشان می‌دهد مطابق این شکل با

$$h = - \frac{K_{nf} \frac{\partial T}{\partial x} |_{x=0}}{T_h - T_c} \quad (20)$$

و با جایگذاری  $h$  در معادله ۱۷ عدد ناسلت موضعی بر حسب پارامترهای بی بعد به صورت زیر به دست می‌آید.

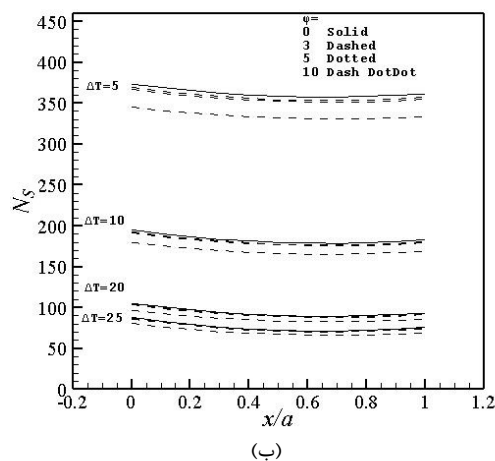
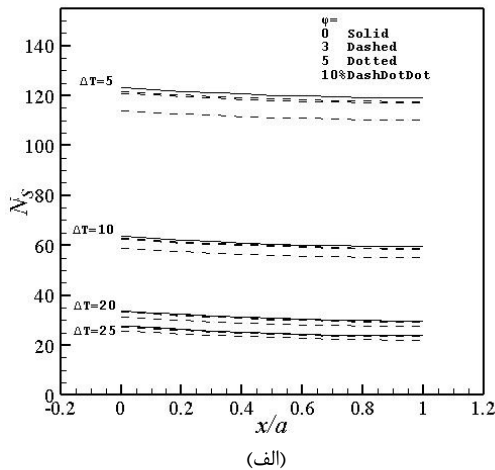
$$Nu = - \left( \frac{K_{nf}}{K} \right) \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (21)$$

#### ۵- نتایج و بحث‌ها:

در مطالعه حاضر به بررسی تحلیلی تولید آنتروپی درون یک فضای حلقوی با شرایط مرزی دما ثابت تحت تاثیر اضافه کردن نانو ذرات مس به سیال پایه می‌پردازیم، پارامترهای متغیر در این تحقیق اختلاف دما، درصد حجمی نانو ذرات و عدد برینکمن می‌باشد.

در این پژوهش تاثیر تغییر تولید آنتروپی بر اثر افزودن نانو ذرات به سیال پایه بررسی می‌شود. درصد حجمی نانو ذرات استفاده شده در این مقاله  $10\% < \phi < 0$  می‌باشد. شکل ۲-الف نشان دهنده تغییرات دمای بی بعد بر حسب طول بی بعد به ازای اعداد برینکمن مختلف می‌باشد. با توجه به شکل ۲-الف مشخص می‌شود که افزایش عدد برینکمن موجب می‌شود تا توزیع دمای بی بعد تغییر کند و از حالت خطی در  $Br=0$  به حالت سهموی در حالت  $Br>0$  تبدیل شود، این تغییر در نوع پروفیل دما به دلیل ترم اتلاف لزجت است که با افزایش عدد برینکمن انحراف از حالت خطی افزایش می‌یابد و برای  $Br>2$  در بعضی نقاط دمای درون سیلندر بیشتر از دمای مرزهای سیستم می‌شود و جهت انتقال حرارت از سیال به سمت مرزهای سیستم تغییر پیدا کند، باید توجه داشت که تغییر در اختلاف دمای بین دو سیلندر تغییری در توزیع دمای بی بعد ایجاد نمی‌کند زیرا با توجه به رابطه ۹ دمای بی بعد تابعی از اختلاف دما بین دو سیلندر و دمای سیلندر داخلی نیست. شکل ۲-ب نشان دهنده توزیع دما در حالت  $Br=3$  و در درصد حجمی‌های مختلف نانو ذره در مقایسه با سیال پایه می‌باشد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزایش درصد حجمی نانو ذرات مقادیر دما نسبت به سیال پایه کاهش پیدا می‌کند، علت این امر تغییر در خواص سیال می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش درصد حجمی نانو ذرات از صفر به ده درصد مقدار این کاهش نیز بیشتر می‌شود.

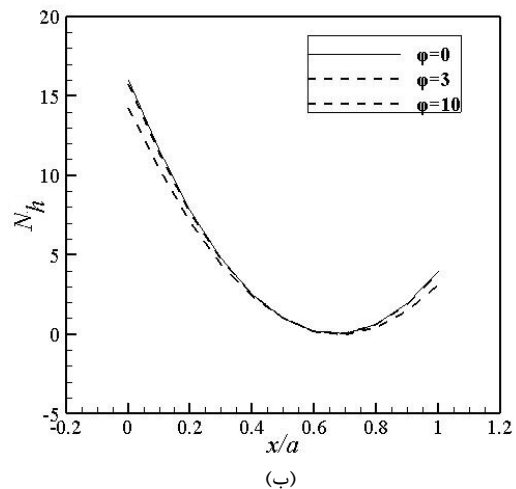
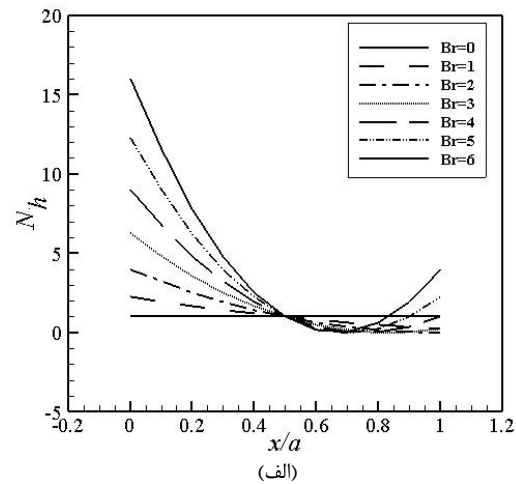
الف و شکل ۳-ب می‌توان دریافت که با افزایش عدد برینکمن میزان تولید آنتروپی کلی افزایش می‌یابد و با افزایش درصد حجمی نانو ذرات میزان تولید آنتروپی کلی کاهش می‌یابد، علت آن تغییر در خواص سیال پایه می‌باشد، باید توجه داشت که تولید آنتروپی کلی برای  $Br=6$  در طول فاصله بین دو سیلندر ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد البته این کاهش و افزایش در طول چندان زیاد نیست.



شکل ۴ الف) تولید آنتروپی کلی در حالت  $Br=2$ . ب) تولید آنتروپی کلی در حالت  $Br=6$

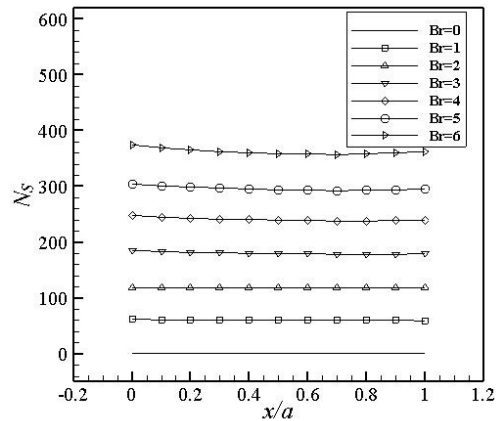
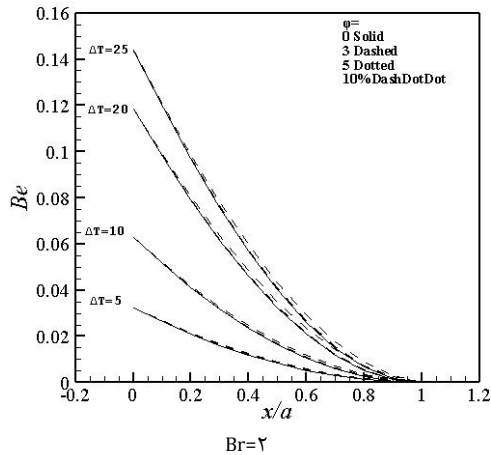
مطابق شکل با افزایش عدد برینکمن میزان تولید آنتروپی کلی افزایش می‌یابد، مشاهده می‌شود که در این حالت تولید آنتروپی با افزایش فاصله از سیلندر داخلی تغییر چندانی نمی‌کند.

افزودن نانو ذرات میزان تولید آنتروپی کاهش می‌یابد و با افزایش درصد حجمی نانو ذرات این کاهش تولید آنتروپی بیشتر می‌شود که علت آن تغییر در خواص سیال پایه است.

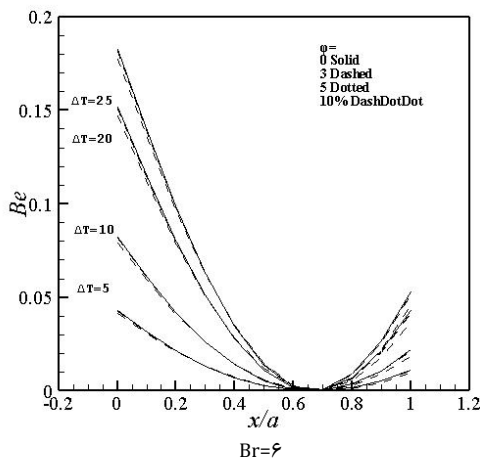


شکل ۳ الف) تولید آنتروپی بی بعد در اعداد مختلف برینکمن. ب) تولید آنتروپی بی بعد برای  $Br=6$  با نانو ذرات

شکل ۴ نشان دهنده تولید آنتروپی کلی بی بعد در فضای حلقوی در شرایط مختلف است، شکل ۴-الف نشان دهنده تولید آنتروپی در شرایط  $Br=2$  و اختلاف دماهای متفاوت و درصد حجمی‌های مختلف نانو ذرات است. مطابق این شکل با افزایش مقدار اختلاف دما تولید آنتروپی کلی کاهش می‌یابد و با افزایش فاصله از سیلندر داخلی مقدار تولید آنتروپی کلی در همه حالت‌ها کاهش می‌یابد، علت این اتفاق کاهش میزان گرادیان دما و تغییر در خواص سیال پایه است مطابق این شکل با افزایش اختلاف دمای بین دو سیلندر مقدار تولید آنتروپی کاهش می‌یابد که با توجه به معادله ۱۴ و تعریف پارامتر  $\Omega$  می‌توان دریافت که با افزایش اختلاف دما میزان تولید آنتروپی به دلیل اصطکاک کاهش می‌یابد و با توجه به اینکه تولید آنتروپی به دلیل انتقال حرارت به اختلاف دما مربوط نیست آنتروپی تولیدی کلی کاهش می‌یابد که کاملاً مطابق معادله ۱۴ می‌باشد. شکل ۳-ب) تولید آنتروپی در حالت  $Br=6$  را نشان می‌دهد، مطابق این شکل با افزایش اختلاف دمای بین دو سیلندر مقدار تولید آنتروپی کاهش می‌یابد که علت آن شرح داده شد. با بررسی شکل ۳-



شکل ۵ تولید آنتروپی کلی برای اعداد برینکمن مختلف (  $\Delta T=5$  و  $\phi=0$  )

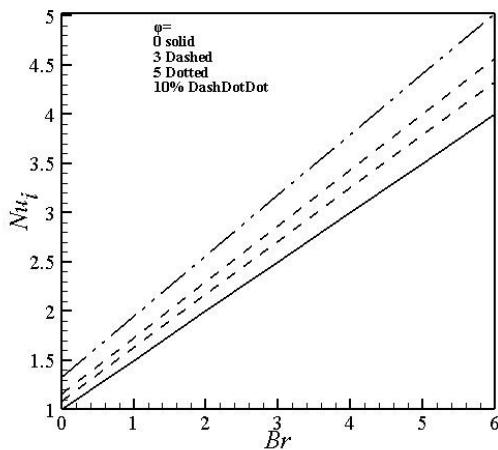


شکل ۶ (الف) و (ب) عدد بیژن بر حسب عدد برینکمن و درصد حجمی نانو ذرات با اختلاف دماهای مختلف

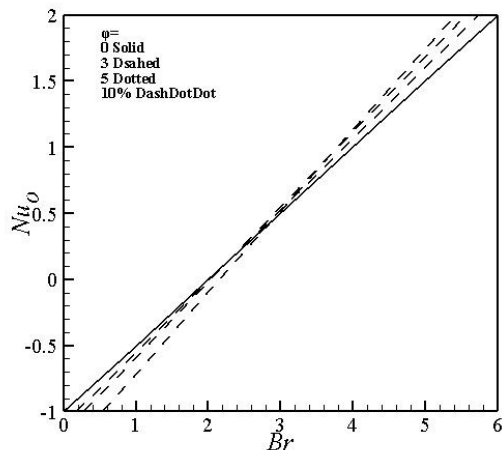
شکل ۷ نشان دهنده تغییرات آنتروپی تولیدی بر حسب عدد رینولدز و اختلاف دما است، مطابق این شکل با افزایش عدد رینولدز مقدار تولید آنتروپی برای همه حالتها افزایش می‌یابد، علت این افزایش بیشتر شدن سرعت زاویه‌ای سیلندر خارجی که در نهایت موجب افزایش تولید آنتروپی به دلیل اصطکاک سیال و افزایش تولید آنتروپی کلی می‌شود. مطابق شکل با افزایش اختلاف دما میزان تولید آنتروپی کاهش می‌یابد که علت آن را با بررسی رابطه ۱۴ به دست می‌آوریم، مطابق این معادله افزایش اختلاف دما در حالتی که دمای سیلندر داخلی همواره ثابت است موجب افزایش پارامتر  $\Omega$  می‌شود و با توجه به قرار گرفتن آن در مخرج مشخص می‌شود که تولید آنتروپی به دلیل اصطکاک سیال کاهش می‌یابد و با توجه به عبارت اول و توضیحات شکل ۲-الف مبنی بر این که افزایش اختلاف دما در یک عدد برینکمن ثابت تغییری در توزیع دمای بی بعد ایجاد نمی‌کند، لذا تولید آنتروپی کلی کاهش می‌یابد.

۷- تحلیل سهم تولید آنتروپی :

شکل ۶ توزیع نسبت تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت به آنتروپی کل که در واقع همان عدد بیژن می‌باشد را برای عدد برینکمن ۲ و ۶ نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶-الف افزایش اختلاف دما موجب افزایش عدد بیژن می‌شود و علت آن کاهش سهم تولید آنتروپی به دلیل اصطکاک سیال است که با بررسی رابطه ۱۴ کاملاً قابل درک است. مطابق این شکل با افزایش فاصله از سیلندر داخلی عدد بیژن کاهش می‌یابد و بر روی سیلندر خارجی برابر صفر می‌شود، که علت آن صفر شدن گرادیان دما و در نهایت صفر شدن تولید آنتروپی به دلیل انتقال حرارت است. همچنین مشاهده می‌شود که افزودن نانو ذرات موجب افزایش عدد بیژن به مقدار بسیار کمی می‌شود. شکل ۶-ب عدد بیژن برای حالت  $Br=6$  را نشان می‌دهد، مطابق این شکل افزایش اختلاف دما مانند حالت قبل موجب افزایش عدد بیژن می‌شود، با افزایش فاصله از سیلندر داخلی عدد بیژن برای همه حالتها کاهش می‌یابد و در فاصله حدودی  $x=0,7$  برابر صفر می‌شود که علت آن صفر شدن گرادیان دما است و با افزایش فاصله از این نقطه عدد بیژن دوباره افزایش پیدا می‌کند. با مشاهده این شکل مشخص می‌شود که افزودن نانو ذرات موجب کاهش اندک عدد بیژن می‌شود. با مقایسه شکل ۴ و ۵ می‌توان نتیجه گرفت که علت ثبات تقریبی تولید آنتروپی کلی در طول شکل ۴ کم بودن سهم تولید آنتروپی توسط انتقال حرارت است.



شکل ۷ تاثیر عدد رینولدز بر تولید آنتروپی کلی در اختلاف دماهای متفاوت



شکل ۸ تاثیر عدد برینکمن و درصد حجمی نانو ذرات بر سیلندر داخلی و خارجی

#### ۸- بررسی تاثیر افزودن نانو ذرات بر انتقال حرارت:

شکل ۸-الف نشان دهنده عدد ناسلت بر روی سیلندر داخلی و شکل ۸-ب نشان دهنده عدد ناسلت بر روی سیلندر خارجی است. مطابق شکل ۸-الف با افزایش عدد برینکمن عدد ناسلت افزایش پیدا می کند زیرا مقدار گرادیان دما که به طور مستقیم بر عدد ناسلت تاثیر دارد افزایش می یابد. همچنین مشاهده می شود که با افزودن نانو ذرات میزان عدد ناسلت افزایش می یابد و افزایش درصد حجمی موجب افزایش بیشتر عدد ناسلت می شود، به طوری که برای مثال در حالت  $Br=4$  مقدار عدد ناسلت بیشتر از ۲۵٪ افزایش پیدا می کند و نکته قابل توجه این است که در همه حالتها افزایش میزان انتقال حرارت اتفاق می افتد، مطابق رابطه ۱۹ افزایش عدد ناسلت تابعی از گرادیان دمای بی بعد، نسبت ضریب رسانایی گرمایی سیالات و اختلاف دمای دو سیلندر است که با توجه به ثابت بودن میزان اختلاف دما و تغییر بسیار اندک گرادیان دما می توان نتیجه گیری کرد که افزایش عدد ناسلت به دلیل افزایش رسانایی گرمایی سیال پایه توسط نانو ذرات است. شکل ۸-ب نشان دهنده مقدار عدد ناسلت بر روی سیلندر خارجی است. این مقادیر دارای علامت مثبت و منفی هستند که در عدد  $Br=2$  تغییر جهت در عدد ناسلت اتفاق می افتد. زیرا به ازای  $Br < 2$  جهت انتقال حرارت از سیلندر خارجی به سمت سیال درون فضای حلقوی بوده در حالیکه برای  $Br > 2$  انتقال حرارت از سیال درون فضای حلقوی به سمت دیواره های آن است. دلیل این اتفاق ترم اتلاف لزجت می باشد که موجب می شود دمای درون فضای حلقوی در بعضی نقاط از مرزهای آن بیشتر شود. باید توجه داشت که برای همه اعداد برینکمن قدر مطلق عدد ناسلت با افزودن نانو ذرات افزایش می یابد و با افزایش درصد حجمی نانو ذرات تا  $\phi=10\%$  مقدار عدد ناسلت افزایش چشمگیری پیدا می کند.

#### ۹- نتیجه گیری:

در این تحقیق به بررسی تولید آنتروپی به سبب انتقال حرارت ناشی از اختلاف دما و اتلاف لزجت ناشی از حرکت سیلندر خارجی درون یک فضای حلقوی پرداختیم. پارامترهای متغییر در این مقاله عدد برینکمن، درصد حجمی نانو ذرات، اختلاف دمای بین دو سیلندر بوده، که مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج آن به شرح زیر ارائه می شود.

- توزیع دمای بی بعد برای حالت های مختلف  $Br=0$  تا  $Br=6$  رسم شد، با بررسی معادلات و شکل های مربوط به دمای بی بعد مشخص شد که اختلاف دمای بین دو سیلندر در نوع توزیع دما تاثیر گذار نیست و فقط عدد برینکمن تاثیر زیادی بر توزیع دما دارد، همچنین افزودن نانو ذرات موجب کاهش اندک مقادیر دما در فاصله بین دو سیلندر می شود.
- افزایش عدد برینکمن موجب تغییر در نوع توزیع دما از نوع خطی برای  $Br=0$  تا سهموی برای  $Br > 1$  می شود، که این تغییر به دلیل ترم اتلاف لزجت است.
- با توجه به معادله دما و توزیع دمای خطی در حالت  $Br=1$  تولید آنتروپی در این حالت ثابت است و اختلاف دما و درصد حجمی نانو ذرات در آن تاثیر ندارد.



S نانو ذرات.

۱-۰ مراجع:

[1] X.-Q. Wang, A. S. Mujumdar, Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, No. 1, pp. 1-19, 2007.

[2] S. Chol, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME-Publications-Fed*, Vol. 231, pp. 99-106, 1995.

[3] J. Kestin, W. A. Wakeham, A contribution to the theory of the transient hot-wire technique for thermal conductivity measurements, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 92, No. 1-2, pp. 102-116, 1978.

[4] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, Q. Wu, Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles, *Journal of Applied Physics*, Vol. 91, No. 7, pp. 4568-4572, 2002.

[5] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma, Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles, *Netsu Bussei*, Vol. 7, No. 4, pp. 227-233, 1993.

[6] J. Eastman, S. Choi, S. Li, W. Yu, L. Thompson, Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Applied Physics Letters*, Vol. 78, No. 6, pp. 718-720, 2001.

[7] R. Saidur, K. Y. Leong, H. A. Mohammad, A review on applications and challenges of nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 3, pp. 1646-1668, 2011.

[8] A. Bradaran Rahimi, Numerical Study of Three-Dimensional Mixed Convection in an Eccentric Annulus, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 1, 2013.

[9] A. Bejan, *Second-Law Analysis in Heat Transfer and Thermal Design*, in: P. H. James, F. I. Thomas, *Advances in Heat Transfer*, Eds., pp. 1-58: Elsevier, 1982.

[10] O. M. Haddad, M. K. Alkam, M. T. Khasawneh, Entropy generation due to laminar forced convection in the entrance region of a concentric annulus, *Energy*, Vol. 29, No. 1, pp. 35-55, 2004.

[11] S. Mahmud, R. A. Fraser, Analysis of entropy generation inside concentric cylindrical annuli with relative rotation, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 42, No. 5, pp. 513-521, 2003.

[12] B. S. Yilbas, Entropy analysis of concentric annuli with rotating outer cylinder, *Exergy, An International Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 60-66, 2001.

[13] O. Mahian, S. Mahmud, S. Z. Heris, Analysis of entropy generation between co-rotating cylinders using nanofluids, *Energy*, Vol. 44, No. 1, pp. 438-446, 2012.

[14] O. Mahian, S. Mahmud, I. Pop, Analysis of first and second laws of thermodynamics between two isothermal cylinders with relative rotation in the presence of MHD flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 17-18, pp. 4808-4816, 2012.

[15] O. Mahian, I. Pop, A. Z. Sahin, H. F. Oztop, S. Wongwises, Irreversibility analysis of a vertical annulus using TiO<sub>2</sub>/water nanofluid with MHD flow effects, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 64, No. 0, pp. 671-679, 2013.

[16] J. M. Wu, J. Zhao, A review of nanofluid heat transfer and critical heat flux enhancement—Research gap to engineering application, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 66, No. 0, pp. 13-24, 2013.

[17] L. Syam Sundar, M. K. Singh, Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 20, No. 0, pp. 23-35, 2013.

[18] A. M. Hussein, K. V. Sharma, R. A. Bakar, K. Kadirgama, A review of forced convection heat transfer enhancement and hydrodynamic characteristics of a nanofluid, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, No. 0, pp. 734-743, 2014.

[19] V. Sridhara, L. Satapathy, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based nanofluids: a review, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-16, 2011/07/16, 2011. English

[20] W. Yu, D. M. France, E. V. Timofeeva, D. Singh, J. L. Routbort, Comparative review of turbulent heat transfer of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 21-22, pp. 5380-5396, 2012.

[21] I. Nkurikiyimfura, Y. Wang, Z. Pan, Heat transfer enhancement by magnetic nanofluids—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, No. 0, pp. 548-561, 2013.

[22] S. Kakaç, A. Pramuanjaroenkij, Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 13-14, pp. 3187-3196, 2009.

[23] O. Mahian, A. Kianifar, C. Kleinstreuer, M. d. A. Al-Nimr, I. Pop, A. Z. Sahin, S. Wongwises, A review of entropy generation in nanofluid flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 65, No. 0, pp. 514-532, 2013.

[24] H. F. Oztop, K. Al-Saleem, A review on entropy generation in natural and mixed convection heat transfer for energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 1, pp. 911-920, 2012.

[25] R. Hamilton, O. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 1, No. 3, pp. 187-191, 1962.

[26] S. Paoletti, F. Rispoli, E. Sciubba, Calculation of exergetic losses in compact heat exchanger passages, *ASME AES* 10, 21-29 Pascale S.,

• برای تمامی حالت‌های عدد برینکمن و اختلاف دما به غیر از  $Br=1$  افزودن نانو ذرات و افزایش درصد حجمی نانو ذرات موجب کاهش تولید آنتروپی می‌شود.

• نمودار تولید آنتروپی برای حالت  $Br>1$  در فاصله تقریبی  $x=0.7$  دارای نقطه مینیمم است علت این امر وجود نقطه مینیمم در توزیع دما است، زیرا در این نقطه گرادیان دما صفر است و به همین دلیل تولید آنتروپی به دلیل انتقال حرارت صفر می‌شود.

• برای حالت  $Br=0$  به دلیل اینکه تولید آنتروپی تنها به دلیل انتقال گرما است عدد بیژن برابر با یک است.

• برای عدد  $Br=1$  تا  $Br=6$  افزایش اختلاف دما موجب کاهش عدد بیژن می‌شود.

• افزایش عدد برینکمن موجب افزایش آنتروپی کلی در همه حالت‌های اختلاف دما و درصد حجمی نانو ذرات می‌شود.

• افزودن نانو ذرات موجب افزایش عدد ناسلت می‌شود که این افزایش با افزایش درصد حجمی نانو ذرات ادامه پیدا می‌کند و برای  $Br=0$  بیشترین افزایش انتقال حرارت که در حدود  $30\%$  است به وجود می‌آید.

• با افزایش عدد رینولدز میزان تولید آنتروپی افزایش می‌یابد و با افزایش اختلاف دمای دو سیلندر میزان تولید آنتروپی کاهش می‌یابد.

فهرست علائم:

a	فاصله بین دو سیلندر (m)
Be	عدد بی بعد بیژن
Br	عدد بی بعد برینکمن
h	ضریب انتقال حرارت، $(W.m^2.k^{-1})$
K	رسانایی گرمایی، $(W.m^{-1}.k^{-1})$
Nf	آنتروپی تولیدی بی بعد ناشی از اصطکاک
Nh	آنتروپی تولیدی ناشی از انتقال حرارت
Ns	آنتروپی تولیدی کلی
Nu	عدد ناسلت
$\dot{S}_{gen}'''$	تولید آنتروپی، $(W.m^{-3}.K^{-1})$
$\dot{S}_{gen}''' c$	آنتروپی مشخصه، $(W.m^{-3}.K^{-1})$
$T_c$	دمای سیلندر سرد (K)
$T_h$	دمای سیلندر گرم (K)
u	سرعت در جهت x، $(m.sec^{-1})$
v	سرعت در جهت y، $(m.sec^{-1})$
V	سرعت بی بعد
X	فاصله بی بعد
<b>علائم یونانی</b>	
$\theta$	دمای بی بعد.
$\mu$	ویسکوزیته دینامیکی.
$\phi$	ترم اتلاف لزجت.
$\varphi$	درصد حجمی نانو ذرات.
$\psi$	نسبت توزیع برگشت ناپذیری.
$\Omega$	اختلاف دمای بی بعد.
زیر نویس‌ها	
f	سیال پایه.
nf	نانو سیال.



Gregory JM, Ambaum M., Tailleux R., 2010: Climate entropy budget of the HadCM3 atmosphere-ocean general circulation model and of FAMOUS, its low-resolution version, *Climate Dynamics*, doi, Vol. 10, pp. 125-139, 1989.