



تحلیل عددی کمینه کردن تولید انتروپی و مطالعه انتقال حرارت در جریان داخل کانال پیرامون یک مانع

مهدی بقراتی^{*۱}

۱- استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه بزرگمهر قائنات، قاین، ایران

چکیده

با توجه به اهمیت فرایند خنک کردن و گرم کردن یک جسم جامد، تولید انتروپی در جریان محدود در اطراف یک مانع مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، شبیه سازی عددی جریان لایه‌ای آرام و انتقال حرارت نانو سیال‌ها با نانو ذرات Al_2O_3 یا نانو لوله های کربن (CNTs) با شکل های مختلف در نظر گرفته شده است. معادله های ناویر-استوکس و انرژی به صورت عددی در یک سیستم مختصات متناسب با هندسه جسم، با استفاده از روش حجم کنترل حل شده اند. الگوهای جریان و میدان های دما برای مقادیر مختلف غلظت ذرات به طور دقیق بررسی شده اند. علاوه بر این، اثرات شکل و غلظت نانو ذرات بر انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، تاثیر نانو سیال ها بر افت فشار و توان پمپ مطالعه شد. از سوی دیگر، کمینه کردن تولید انتروپی به عنوان معیار بهینه سازی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می دهد که در بیشتر موارد، نانو سیال ها انتقال حرارت و همچنین افت فشار را افزایش می دهند. همچنین، شکل نانو ذرات مکانیزم انتقال حرارت در نانو سیال ها مهم است. نانو سیال ها با نانو ذرات استوانه ای CNT نسبت به نانو سیال های که دارای نانو ذرات Al_2O_3 با شکل کروی هستند، انتقال حرارت را بیشتر افزایش می دهند. برای نانو سیال حاوی CNT با غلظت ۵٪، انتقال حرارت خیلی بیشتر از توان پمپاژ افزایش یافته است که این نانو سیال را یک انتخاب اقتصادی می سازد.

کلمات کلیدی

انتقال حرارت، تولید انتروپی، کانال با مانع، نانو ذرات، Al_2O_3 ، CNT.

Entropy generation minimization of confined nanofluids laminar flow around a block

Mehdi Boghrati^{*1}

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Iran.

Abstract

Entropy generation confined flow around a block is studied according to the importance of a solid object's cooling and heating process. In the current study, numerical simulation of laminar flow and heat transfer of nanofluids with nanoparticles of different shapes is considered—the nanofluids are water mixtures with either Al_2O_3 nanospheres or carbon nanotubes (CNTs). The incompressible Navier-Stokes and energy equations are solved numerically in a body-fitted coordinate system using a control volume technique. The flow patterns and temperature fields for different values of the particle concentrations are examined in detail. Furthermore, the effects of nanoparticle shape and concentration on heat transfer are studied. Furthermore, the influences of nanofluids on pressure drop and pump power are examined. On the other hand, the entropy generation minimization is considered as the optimization criterion. The results indicate that, in most cases, the nanofluids enhance the heat transfer and pressure drop. Interestingly, nanoparticles' shape is critical in determining the fundamental mechanism of heat transport in nanofluids. Nanofluids with cylindrical nanoparticles exhibit a more significant heat transfer increase than nanofluids with spherical shape nanoparticles.

Keywords

Cement industry, Waste heat recovery, Organic rankine cycle, Climate change, Thermal oil loop.

۱- مقدمه

در کانال با دیوارهای موجدار در حضور پنج مانع به صورت عددی مطالعه کردند.

در یک تحلیل CFD، انتقال حرارت افزودن ذرات Al_2O_3 ، TiO_2 ، ZnO و SiO_2 در یک کانال در حضور یک میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت [۱۳]. علاوه بر این، قطر نانو ذرات Al_2O_3 در آب، نرخ تولید انترپوی را افزایش داد. حسین و همکاران [۱۴] مفاهیم تولید انترپوی نانو سیال آب/ Al_2O_3 در یک کانال با رسانای مس را بیان کردند. نتایج نشان داد که افزایش Ri (عدد ریچاردسون) میزان انترپوی گرمایی را کاهش می‌دهد و انترپوی هیدرو دینامیکی را افزایش می‌دهد. قاسمی [۱۵] یک کانال با شکل هندسی I و یک مانع مثلثی، دایره ای و مربعی را در نظر گرفت. Al_2O_3 و شن برای افزایش عدد ناسلت استفاده شد. همچنین، نتایج نشان داد، شن دارای نرخ بالاتری از تولید انترپوی بود.

کیخواه و همکاران [۱۶] انتقال حرارت و جریان سیال درون یک لوله حاوی محیط متخلخل و استفاده از نانوسیال آب-نقره را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با کاهش عدد دارسی، مقدار عدد ناسلت و ضریب اصطکاک افزایش داشته است علت افزایش عدد ناسلت را می‌توان کاهش دما و افزایش ضریب اصطکاک را می‌توان مربوط به افزایش سرعت، فشار و عدد رینولدز در طول لوله دانست. در پژوهشی دیگر محمدی و همکاران [۱۷] رفتار نانوسیال آب-مس در یک لوله افقی همراه با محیط متخلخل تحت میدان مغناطیسی خارجی و عمود را بررسی نمودند. این تحقیق نشان می‌دهد با افزایش کسر حجمی نانوذرات از ۰ به ۰/۰۴ عدد ناسلت افزایش و پروفیل سرعت کاهش می‌یابد. با افزایش کسر حجمی، هدایت حرارتی نانوسیال و چگالی افزایش می‌یابد.

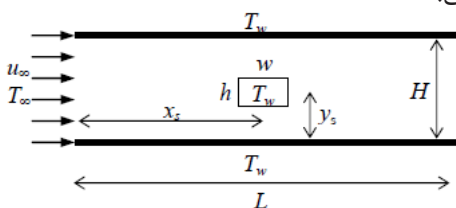
تینگ و همکاران [۱۸] نشان دادند که عدد رینولدز بهینه بر اساس تحلیل تولید انترپوی برای یک نانو سیال آب/ Al_2O_3 معادل ۲۲ است. انتقال حرارت با افزایش رقیق

نانو سیال‌ها ویژگی‌های انتقال حرارت جریان سیال را در فرایندهای خنک کاری یا گرمایش بهبود می‌بخشند. در بسیاری از کاربردهای عملی، مانند ترانسفورماتور جریان، خشک‌کن و تجهیزات الکترونیکی مانع یا مسدودکننده‌ای در مسیر جریان سیال برای تبادل حرارت قرار دارد [۲۱]. ضریب هدایت حرارتی بالاتر نانو ذرات موجب افزایش انتقال حرارت شده و منجر به افزایش سطح می‌شود. در این راستا، قانون دوم ترمودینامیک برای تعیین طراحی کارآمدتری در فرایند انتقال حرارت با میزان انترپوی تولیدی کمتر به کار گرفته شده است [۳-۶]. بسیاری از محققان نوع نانو ذرات و شرایط مرزی جریان سیال را برای مدل‌سازی انتقال حرارت هم رفتی و قانون دوم ترمودینامیک مورد بررسی قرار داده‌اند [۷].

ویجاییابو [۸] نانو سیال اکسید مس-آب را در یک حفره ایزو ترمال به کار برد تا انترپوی و انتقال حرارت را در اطراف یک جسم دایره‌ای بررسی کند. مقادیر مختلف کسر حجمی نانو سیال و اعداد رایلی در نظر گرفته شدند. خالدوزمان و همکاران [۹] به این نتیجه رسیدند که افزودن TiO_2 به آب برای خنک کاری تجهیزات الکترونیکی باعث افزایش انترپوی حرارتی و کاهش نرخ تولید انترپوی اصطکاک می‌شود. علاوه بر این، آنها دریافتند که استفاده از نانو سیال باعث افزایش آگزرژی و بازده آگزرژی می‌شود. در یک تحقیق دیگر، نانو سیال هیبریدی گرافن-پلاتین در میکرو کانال باعث افزایش انتقال حرارت شد [۱۰].

نوری و همکاران [۱۱] مطالعه ای را انجام دادند که نشان داد تولید انترپوی تحت تاثیر رقیق سازی نانوذره، قطر نانو ذرات، نسبت انسداد و دمای منبع گرما قرار داشت. آنها از نانو اکسید مس و آب در یک کانال با یک مانع کرووی استفاده کردند. مایلی و همکاران [۱۲] اثرات رقیق سازی نانو ذرات اکسید آلومینیوم و شدت میدان مغناطیسی را بر تنش برشی، عدد ناسلت و تولید انترپوی

افقی با یک مانع به شکل مکعب مستطیلی تشکیل شده است. هندسه و شرایط مرزی معین مساله در شکل ۱ مشخص شده‌اند. پروفیل‌های دما و سرعت ورودی یکنواخت فرض شده‌اند. دو دیواره صلب کانال در معرض دمای ثابت قرار دارند. نسبت انسداد β ، که به صورت نسبت عرض سیلندر به فاصله عمودی بین دیواره‌های بالایی و پایینی (h/H) تعریف می‌شود، ثابت است و برابر با $0/16$ می‌باشد. نسبت h/w نیز ثابت بوده و در این مطالعه و بر پایه مطالعات پیشین، برابر با $0/18$ می‌باشد. برای تمامی حالت‌ها، سرعت ورودی کانال برابر با 3.73×10^{-4} متر بر ثانیه می‌باشد.



شکل ۱- هندسه میدان جریان

۳- مدل سازی عددی

فرض شده است که فاز سیال و نانو ذرات در تعادل گرمایی با سرعت نسبی صفر هستند. معادله‌های حاکم معادله‌های ناویر - استوکس تراکم‌ناپذیر و انرژی به شکل انتگرالی زیر هستند [۲۱]:

$$\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) \quad (2)$$

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2})$$

$$\rho(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}) = k(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) \quad (3)$$

که ρ ، k و μ به ترتیب چگالی، رسانایی گرمایی و ویسکوزیته نانو سیال هستند که اندیس e خواص موثر نانو ذرات را نشان می‌دهد که به این صورت تعریف می‌شوند:

سازی نانو ذرات افزایش یافت. نانو سیال‌های گرافن/آب و Al_2O_3 در آب برای ترکیب ظرفیت‌های سرمایش استفاده شدند [۱۹]. تولید انترپوی برای گرافن/آب نسبت به نانو سیال آلومینا کاهش بیشتری داشت. در یک مطالعه سرمایشی دیگر بهیرایی و هاشمیان [۲۰] گزارش تولید انترپوی گرمایی و اثر مرزی را برای جلوگیری از تشکیل نقطه گرم ارائه دادند. غلظت‌ها و عددهای رینولدز مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. آنها از نانو سیال‌های بیولوژیکی استفاده کردند. سیاوشی و جمالی [۲۱] اثر افزودن ذرات نانو تیتانیوم را در یک لوله با شار ثابت بررسی نمودند. همچنین تحلیل تولید انترپوی نیز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی بالا نشان می‌دهد که نیاز به مطالعات بیشتری برای شناسایی ویژگی‌های اساسی مرتبط با رفتار انتقال نانو سیال‌ها وجود دارد. همچنین اطلاعات کمی در مورد الگوی جریان و انتقال حرارت نانو سیال‌ها در جریان محدود در اطراف مانع‌ها در دسترس است. در این تحقیق، دو تکنیک فعال افزایش انتقال حرارت که استفاده از مانع و نانو سیال‌ها هستند، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. جریان آرام و انتقال حرارت نانو سیال‌ها با ذرات نانو کروی Al_2O_3 و نانو لوله کربن (CNT) در جریان محدود اطراف مانع مورد بررسی قرار گرفته است. با در نظر گرفتن رویکرد یک مرحله‌ای، معادله‌های ناویر استوکس و انرژی برای سیال نیوتونی در یک سیستم محوری سازگار با استفاده از روش حجم کنترل حل عددی شده است. اثر ذرات در سیال با انتخاب ویژگی‌های ترموفیزیکی موثر لحاظ شده است. چگالی و ظرفیت گرمایی مخلوط بر اساس مدل‌های کلاسیک دو فازی محاسبه می‌شود. ویسکوزیته دینامیکی و هدایت حرارتی نانو سیال‌ها از داده‌های تجربی موجود در منابع استخراج می‌شود.

۲- پیکربندی هندسی

این سیستم از یک کانال به صورت دو صفحه موازی

قرار گرفت. مدل سازی به صورت دو بعدی می باشد. دامنه فیزیکی با شبکه های غیر یکنواخت ۱۲۳۶۱، ۲۴۷۲۳ و ۴۹۴۴۶ گره های مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۱ خطای محاسبات عدد ناسلت مربوط به هر شبکه را نشان می دهد. با دو برابر کردن تعداد گره های شبکه ی ۲، خطا ۰/۸ درصد کاهش می یابد که در مقایسه با افزایش زمان و منابع محاسباتی قابل صرف نظر می باشد (شکل ۲).

$$\rho_e = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (4)$$

ظرفیت گرمایی:

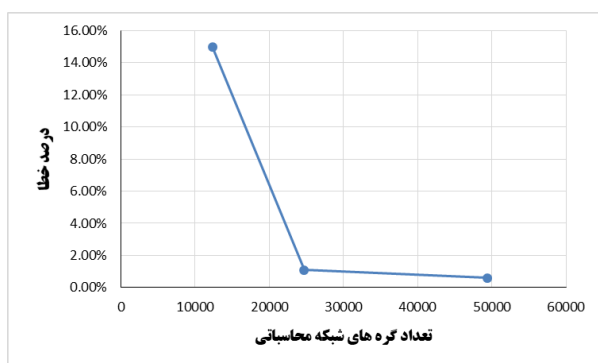
$$Cp_e = \frac{(1 - \phi)(\rho Cp)_f + \phi(\rho Cp)_p}{(1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p} \quad (5)$$

تولید انترویی :

$$S'' = \frac{k_e}{T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] + 2 \frac{\mu}{T} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی مواد

ماده	$\rho(kg / m^3)$	$Cp(J.kg^{-1}.K^{-1})$	$\mu(Pa.s)$	$k \text{ or } k_e(W.m^{-1}.K^{-1})$	Pr
Al ₂ O ₃	۳۹۷۰	۷۶۵	-	۳۶	-
CNT ^۱	۲۶۰۰	۴۲۵	-	۳۰۰۰	-
آب	۱۰۰۰	۴۱۸۳	0.85×10^{-3}	۰/۶	۵/۹۳
آب $\phi = 1\%$	۱۰۲۹/۷	۴۰۵۱	0.92×10^{-3}	۰/۶۲	۶/۰۷
Al ₂ O ₃ $\phi = 4\%$	۱۱۱۹	۳۶۹۸	1.26×10^{-3}	۰/۶۷	۷
آب $\phi = 0.08\%$	۱۰۰۱	۴۱۷۵	0.85×10^{-3}	۰/۷۲	۴/۹۳
CNT $\phi = 5\%$	۱۰۰۸	۴۱۳۴	0.87×10^{-3}	۳/۷	۰/۹۷
$\phi = 1\%$	۱۰۱۶	۴۰۸۷	1.1×10^{-3}	۷/۵۴	۰/۶۱



شکل ۲: درصد خطای شبکه محاسباتی

عبارت اول در سمت راست معادله بالا تولید انترویی گرمایی^۱ و عبارت دوم، تولید انترویی ویسکوز^۲ می باشند. جدول ۱، ویسکوزیته دینامیکی و رسانایی گرمایی و سایر خواص نانو سیال ها را نشان می دهد.

۴- روش عددی

معادله های حاکم با به کارگیری روش حجم محدود حل شدند و الگوریتم سیمپل^۳ مورد استفاده قرار گرفت.

۵- نتایج و بحث

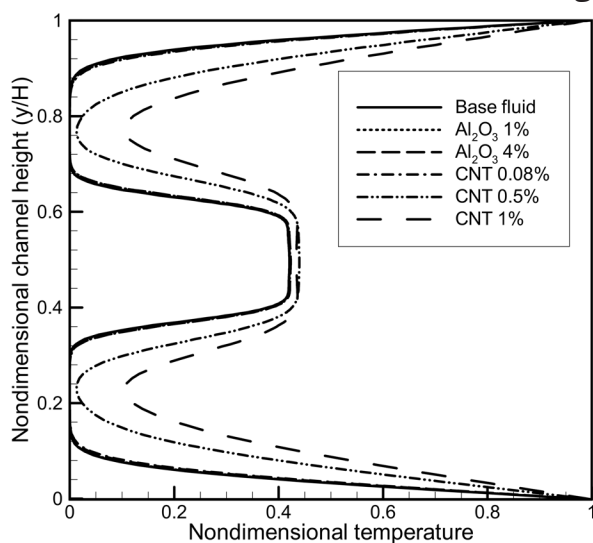
اعداد رینولدز تمامی حالت ها کمتر از مقدار بحرانی معیار همگرایی، باقی مانده های معادله های انرژی و ممنتوم بود تا کمتر از ۰/۰۰۱ شود. به منظور اعتبارسنجی نتایج، عدد ناسلت برای جریان کانال (بدون سیلندر مستطیلی) با ۲۳۰۰ هستند، بنابراین رژیم جریان همیشه آرام است. شار حرارتی ثابت محاسبه و با مقدار ۸/۲۳۵ مورد سنجش معادله های حاکم به صورت عددی برای حالت های مختلف

۱ TEG
۲ VEG
۳ Simple

سیال‌ها مختلف و همچنین سیال پایه در سرعت ورودی ثابت را نشان می‌دهد. واضح است که اختلاف قابل توجهی بین نانو سیال حاوی ذرات کروی Al_2O_3 و سیال پایه وجود ندارد.

برای سرعت ورودی ثابت، ضرایب انتقال حرارت رسانایی بزرگ‌تر نانو سیال‌ها حاوی CNT، انتقال حرارت کل از دیواره‌های کانال و مانع به سیال را بهبود می‌بخشند و دمای سیال را افزایش می‌دهند.

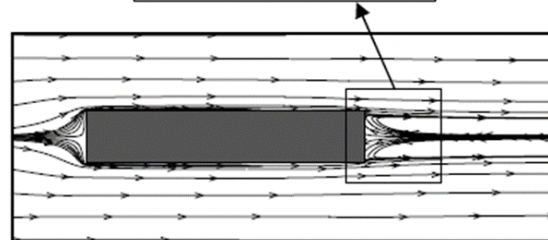
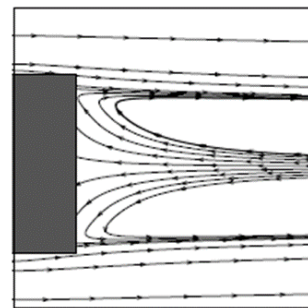
بنابراین در کاربردهایی که هدف دستیابی به دماهای خروجی بالاتر سیال می‌باشد، نانو ذرات استوانه‌ای CNT نسبت به نانو ذرات کروی Al_2O_3 کارآمدتر هستند. در شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد که حضور مانع با دمای بالا در مسیر جریان، افزایش چشم‌گیری در دمای سیال در ارتفاع میانی کانال ایجاد کرده است. در این ناحیه، اثر کسر حجمی نانو ذرات روی دمای نانو سیال قابل ملاحظه نمی‌باشد.



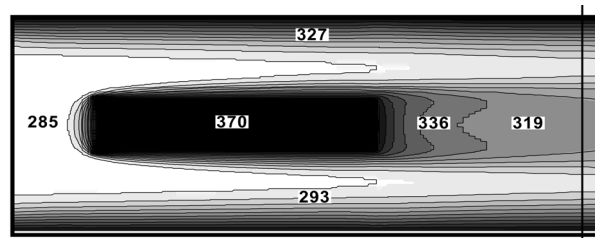
شکل ۵: پروفیل دمای بی‌بعد در سطح مقطع A-A برای سیال‌ها مختلف

جدول ۲ نشان می‌دهد که نانو سیال آب/CNT با غلظت ۱٪ بالاترین دمای خروجی را داراست. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، دمای خروجی نانو سیال آب/ Al_2O_3 برابر با دمای خروجی آب می‌باشد.

با استفاده از خواص مواد جدول ۱ حل شدند. شکل‌های ۳ و ۴ خطوط جریان و کانتورهای دما پیرامون مانع را برای نانو سیال آب/CNT با غلظت ۱٪ نشان می‌دهند. شکل ۳ همچنین نمای بزرگ شده ناحیه دنباله پشت مانع را نشان می‌دهد که در نتیجه‌ی جدایش جریان از گوشه مانع می‌باشد. در شکل ۴ نیز مشاهده می‌کنیم که حضور مانع، انتقال حرارت و انتشار در جریان را افزایش می‌دهد.

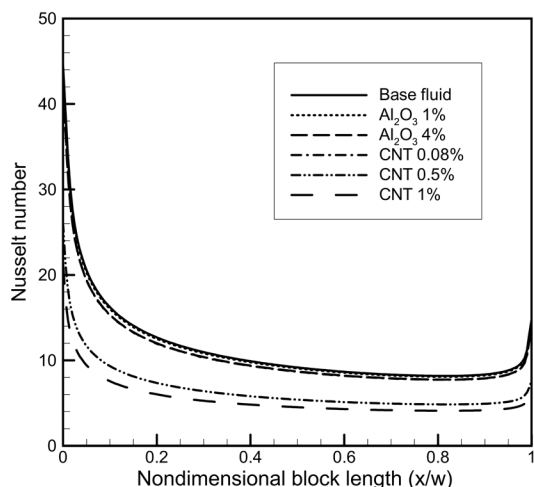


شکل ۳: خطوط جریان اطراف مانع



شکل ۴: کانتورهای دما اطراف مانع

دلیل این امر این است که مانع، مساحت سطح مقطع جریان را کاهش می‌دهد و در نتیجه سرعت جریان بین سطح مانع و دیواره کانال افزایش می‌یابد. در نتیجه، ضخامت لایه مرزی کاهش یافته و گرادیان دما در نزدیکی دیواره افزایش می‌یابد که با افزایش نرخ انتقال حرارت همراه است. علاوه بر این، دمای بالاتر مانع، افزایش دمای سیال را نیز آسان می‌کند. رشد لایه مرزی گرمایی روی دیواره کانال و سطح مانع در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۵ پروفیل دمای بی‌بعد در سطح مقطع A-A، مقطع عرضی وسط طول کانال، (شکل ۴) برای نانو



شکل ۶: عدد ناسلت در امتداد طول کانال برای سیال‌های مختلف

پس می‌توان نتیجه گرفت که صورت کسر فرمول عدد ناسلت (معادله ۷) کاهش می‌یابد. اگر چه کاهش اندکی نیز در مخرج کسر معادله ۷ صورت می‌گیرد، اما به بزرگی کاهش صورت کسر نیست و در نتیجه عدد ناسلت کاهش می‌یابد. همانطور که از شکل ۵ انتظار می‌رود، افزایش کسر حجمی نانو ذرات، عدد ناسلت را کاهش می‌دهد (شکل ۶).

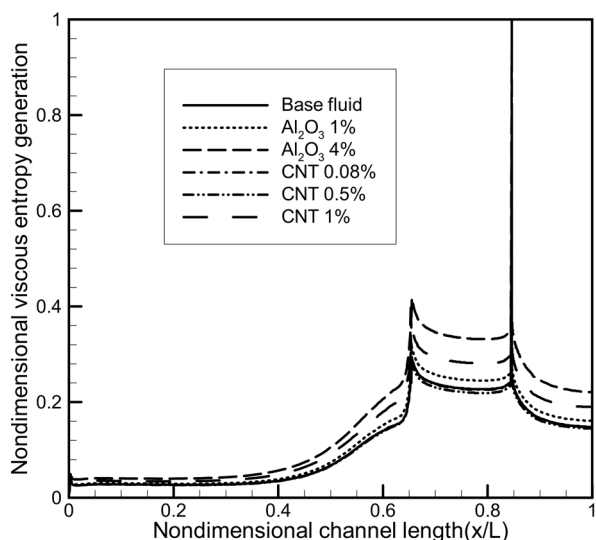
شکل ۷ تولید انترپوی گرمایی بی‌بعد در امتداد طول کانال برای سیال‌ها مختلف را نشان می‌دهد. در اینجا تولید انترپوی گرمایی با استفاده از مقدار ماکزیمم این کمیت در میان تمامی حالت‌ها، بی‌بعد شده است. در ابتدای کانال، جریان ورودی در تماس با دیواره‌های دما ثابت کانال قرار می‌گیرند و گرادیان دما و همچنین تولید انترپوی گرمایی بی‌بعد افزایش می‌یابند. هنگامی که جریان به مانع می‌رسد، یک تغییر ناگهانی دیگر در دما رخ می‌دهد و در نتیجه، پرش در منحنی تولید انترپوی گرمایی بی‌بعد شکل می‌گیرد. به‌طور کلی، هر تغییر ناگهانی در شرایط جریان، یک گرادیان بزرگ تولید انترپوی تولید می‌کند.

جدول ۲: دمای خروجی متوسط کانال

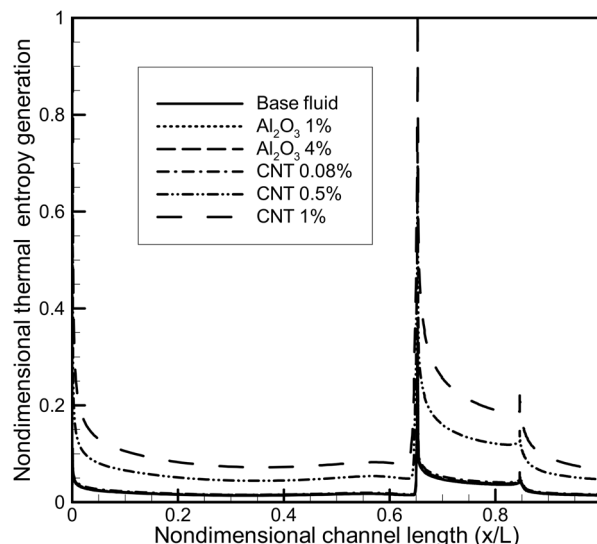
ماده		$T_{m,out}$
آب/ Al_2O_3	$\phi = 1\%$	۲۹۷
	$\phi = 4\%$	۲۹۸
	$\phi = 0.08\%$	۲۹۹
آب/CNT	$\phi = 5\%$	۳۰۸
	$\phi = 1\%$	۳۱۶

به منظور مطالعه اثر مانع روی مقدار انتقال حرارت به سیال‌ها، توزیع عدد ناسلت محلی روی سطح بالایی مانع در شکل ۶ نشان داده شده است. در ابتدا، جریان با سطح دما بالا مواجه می‌شود که یک گرادیان دمای شدید ایجاد می‌کند و عدد ناسلت به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. هرچه جریان در امتداد مانع حرکت می‌کند، لایه مرزی گرمایی شکل گرفته و گسترش می‌یابد. در نتیجه گرادیان دما و متعاقب آن عدد ناسلت کاهش می‌یابند. در انتهای مانع، عدد ناسلت افزایش می‌یابد چون جریان دنباله در پشت مانع تشکیل می‌شود.

عدد ناسلت پایین‌تر نانو سیال‌ها در مقایسه با سیال پایه ممکن است مطابق با نتایج شکل ۵ نباشد. در هر حال، باید بیان کرد که برای نانو سیال‌ها، انتقال حرارت از دیواره‌ها به جریان افزایش یافته و بنابراین اختلاف دما بین دیواره و سیال کاهش می‌یابد. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که گرادیان دما در نزدیکی دیواره کانال برای نانو سیال‌ها (به خصوص نانو سیال‌ها حاوی CNT) کوچک‌تر از سیال پایه است.



شکل ۸: تولید انتروپی ویسکوز بی بعد در امتداد طول کانال برای سیال‌های مختلف

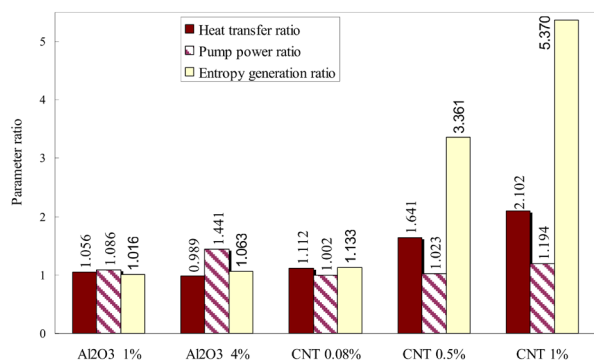


شکل ۷: تولید انتروپی گرمایی بی بعد در امتداد طول کانال برای سیال‌های مختلف

علاوه بر این، چون CNT رسانایی بسیار بالایی دارد، نانو سیال‌ها حاوی CNT، بالاترین نسبت‌های تولید انتروپی را دارا هستند. به‌طور کلی، Al_2O_3 با غلظت ۴٪ ضعیف‌ترین نتایج را نشان می‌دهد، چون نه تنها انتقال حرارت را کاهش می‌دهد بلکه توان پمپاژ را نیز افزایش می‌دهد (رابطه ۷).

$$PumpPower = Q * \Delta P \quad (7)$$

که در رابطه بالا Q دبی حجمی و ΔP اختلاف فشار ایجاد شده در کانال است.



شکل ۹: نسبت انتقال حرارت؛ توان پمپاژ و تولید انتروپی هر نانو سیال

۶- نتیجه‌گیری

شبه‌سازی عددی جریان آرام و انتقال حرارت نانو سیال‌ها با نانو ذرات Al_2O_3 و CNT انجام شدند. تولید انتروپی گرمایی، تولید انتروپی ویسکوز و پروفیل‌های دما برای هر نانو سیال و همچنین آب نمایش داده شده و مقایسه

شکل ۸ تولید انتروپی ویسکوز بی بعد را در امتداد طول کانال برای سیال‌ها مختلف نشان می‌دهد. مقادیر تولید انتروپی ویسکوز بی بعد در این شکل با استفاده از مقدار ماکزیمم تولید انتروپی ویسکوز بی بعد در بین تمامی حالت‌ها بی بعد شدند. شکل ۸ نشان می‌دهد چون مانع روی جریان بالادست تاثیر می‌گذارد، افزایش در منحنی تولید انتروپی ویسکوز بی بعد در بیش از ۱/۱ طول کانال قبل از مانع شروع می‌شود. همچنین، هنگامی که جریان به مانع می‌رسد تغییر شدید در گرادیان سرعت، افزایش زیاد در منحنی تولید انتروپی ویسکوز بی بعد را ایجاد می‌کند. در ادامه این مقدار کاهش یافته و تا انتهای مانع ثابت می‌شود. در لبه فرار مانع، گرادیان سرعت به دلیل ناحیه دنباله در پشت مانع تقویت شده و در نتیجه منحنی تولید انتروپی ویسکوز بی بعد نسبت به لبه حمله مانع با شیب بیشتر افزایش می‌یابد.

شکل ۹ نسبت انتقال حرارت، توان پمپاژ و تولید انتروپی کل هر نانو سیال به آب را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که تغییرات در Al_2O_3 با غلظت ۱٪ بسیار کوچک هستند. نانو سیال CNT با غلظت ۱٪ بالاترین افزایش انتقال حرارت را در بین سایر نانو سیال‌ها از خود نشان می‌دهد.

Nu	عدد ناسلت
P	فشار، kPa
Pr	عدد پرنتل
Re	عدد رینولدز $\frac{\rho u D_h}{\mu}$
S_{gen}'''	تولید انترپی در واحد حجم، J/kg.m ³ .K
T	دما، K
TEG	تولید انترپی گرمایی، J/kg.K
u, v	المان‌های سرعت در راستاهای x و y، m/s
w	طول مانع، m
x, y	سیستم مختصات کارتزین
β	نسبت انسداد = h/H
μ	ویسکوزیته دینامیکی (kg/m.s)
\emptyset	کسر حجمی نانو ذرات
ρ	چگالی (kg/m ³)
e	زیر نویس‌ها
f	خواص موثر نانو سیال‌ها
m	سیال
out	متوسط
p	خروجی
s	ذره
w	مرکز مانع
∞	دیواره
	جریان ورودی

۱۰- منابع

[1] Haghghatjoo H, Yadegari M, Bak Khoshnevis A (2022) Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel. *Eur Phys J Plus* 137:1042. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03260-y>

[2] Choi SUS, Eastman JA. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States); 1995.

[3] Yadegari M, Bak Khoshnevis A (2020) A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 42:413. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02495-z>

[4] Yadegari M (2021) An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm. *Eur Phys J Plus* 136:1019. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01999-4>

[5] Yadegari M, Bak Khoshnevis A (2021) Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers. *Eur Phys J Plus* 136:69. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01071-1>

[6] Yadegari M, Bak Khoshnevis A (2020) Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems. *Eur Phys J Plus* 135:534. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00545-y>

[7] Li J, Kleinstreuer C. Entropy Generation Analysis for Nanofluid Flow in Microchannels. *J Heat Transfer* 2010;132. <https://doi.org/10.1115/1.4002395>.

[8] Vijaybabu TR. Influence of permeable circular body and CuO-H₂O nanofluid on buoyancy-driven flow and

شدند. در نهایت، انتقال حرارت، توان پمپاژ و تولید انترپی کل هر نانو سیال به دقت مورد بررسی قرار گرفت.

به‌طور خلاصه، نتایج عددی کار حاضر نشان دادند که:

- حضور مانع در کانال جریان، انتقال حرارت را افزایش می‌دهد.
- به‌کارگیری نانو سیال‌ها به‌منظور دستیابی به بازده گرمایی بالاتر همیشه مطلوب نیست. مطابق با نتایج، نانو ذرات استوانه‌ای CNT بازده گرمایی بالاتری نسبت به نانو ذرات کروی Al₂O₃ از خود نشان دادند. به علاوه، افزایش کسر حجمی نانو ذرات استوانه‌ای منجر به انتقال حرارت بیشتر می‌گردد در حالی که برای نانو ذرات کروی، نتایج برعکس بودند.
- علاوه بر بازده انتقال حرارت، در زمان انتخاب نانو سیال مناسب توان پمپاژ باید در نظر گرفته شود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که افزودن نانو ذرات به سیال پایه، توان پمپاژ را بهبود می‌بخشد. برای نانو سیال حاوی CNT با غلظت ۰/۵٪ انتقال حرارت خیلی بیشتر از توان پمپاژ افزایش یافته است که این نانو سیال را یک انتخاب اقتصادی می‌سازد. اگرچه برای شرایطی که توان پمپاژ از اهمیت بالایی برخوردار نیست، CNT ۱٪ انتخاب بهتری خواهد بود چون به لحاظ گرمایی بسیار کارآمدتر است.

۷- تشکر و قدردانی

از آقای دکتر وحید اطمینان فاروج، آقای دکتر احسان ابراهیم نیا بجستان و آقای مهندس مهرشاد محمدی سپاسگزاری می‌گردد.

۸- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
A	مساحت، m ²
C _p	گرمای مخصوص، kJ/kg.K
CNT	نانولوله کربنی
D _h	قطر هیدرولیک، m
h	ارتفاع مانع، m
H	ارتفاع کانال، m
k	رسانایی گرمایی سیال، W/m.K
L	طول کانال، m
n	بردار واحد نرمال

biological nanofluid in a liquid block heat sink for cooling of an electronic processor: Thermal performance and irreversibility considerations. *Energy Convers Manag* 2017;149:155–67. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.020>.

[21] Siavashi M, Bahrami HRT, Saffari H. Numerical investigation of porous rib arrangement on heat transfer and entropy generation of nanofluid flow in an annulus using a two-phase mixture model. *Numer Heat Transf Part A Appl* 2017;71:1251–73. <https://doi.org/10.1080/10407782.2017.1345270>.

entropy generation. *Int J Mech Sci* 2020;166. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105240>.

[9] Khaleduzzaman SS, Sohel MR, Mahbubul IM, Saidur R, Selvaraj J. Exergy and entropy generation analysis of TiO₂-water nanofluid flow through the water block as an electronics device. *Int J Heat Mass Transf* 2016;101:104–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.026>.

[10] Khosravi R, Rabiei S, Bahiraei M, Teymourtash AR. Predicting entropy generation of a hybrid nanofluid containing graphene-platinum nanoparticles through a microchannel liquid block using neural networks. *Int Commun Heat Mass Transf* 2019;109:104351. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104351>.

[11] Nouri D, Pasandideh-Fard M, Javad Oboodi M, Mahian O, Sahin AZ. Entropy generation analysis of nanofluid flow over a spherical heat source inside a channel with sudden expansion and contraction. *Int J Heat Mass Transf* 2018;116:1036–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.097>.

[12] Mayeli P, Hesami H, Besharati-Foumani H, Nijalili M. Al₂O₃-Water nanofluid heat transfer and entropy generation in a ribbed channel with wavy wall in the presence of magnetic field. *Numer Heat Transf Part A Appl* 2018;73:604–23. <https://doi.org/10.1080/10407782.2018.1461494>.

[13] Barnoon P, Toghraie D, Eslami F, Mehmandoust B. Entropy generation analysis of different nanofluid flows in the space between two concentric horizontal pipes in the presence of magnetic field: Single-phase and two-phase approaches. *Comput Math with Appl* 2019;77:662–92. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2018.10.005>.

[14] Hussain S, Mehmood K, Sagheer M, Farooq A. Entropy generation analysis of mixed convective flow in an inclined channel with cavity with Al₂O₃-water nanofluid in porous medium. *Int Commun Heat Mass Transf* 2017;89:198–210. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.10.009>.

[15] Ghasemiasl R, Molana M, Armaghani T, Saffari Pour M. The Effects of Hot Blocks Geometry and Particle Migration on Heat Transfer and Entropy Generation of a Novel I-Shaped Porous Enclosure. *Sustainability* 2021;13:7190. <https://doi.org/10.3390/su13137190>.

[16] کیخواجه س، عصاره ا (۱۴۰۱) آنالیز عددی انتقال حرارت و جریان سیال درون یک لوله حاوی محیط متخلخل و استفاده از نانوسیال. فصلنامه مهندسی مکانیک تبدیل انرژی: ۹.

[17] محمدی م، عامری ح، صدیقی م (۱۴۰۲) بررسی تاثیر میدان مغناطیسی و محیط متخلخل بر انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب-مس درون لوله افقی. سومین کنفرانس بین المللی فناوری های نوین در علوم

[18] Ting TW, Hung YM, Guo N. Entropy generation of viscous dissipative nanofluid convection in asymmetrically heated porous microchannels with solid-phase heat generation. *Energy Convers Manag* 2015;105:731–45. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.022>.

[19] Ahammed N, Asirvatham LG, Wongwises S. Entropy generation analysis of graphene-alumina hybrid nanofluid in multiport minichannel heat exchanger coupled with thermoelectric cooler. *Int J Heat Mass Transf* 2016;103:1084–97. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.070>.

[20] Bahiraei M, Heshmatian S. Application of a novel