

تحلیل عددی تأثیر چیدمان پره بر الگوی جریان و افزایش انتقال گرما جریان نانوسیال غیرنیوتنی درون یک کانال چین‌دار

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران،
 afshinnaderifar@yahoo.com
افشین نادری‌فر
 استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران، m.nikiyan@tiau.ac.ir
محمد نیکیان*
 دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، javaherdeh@guilan.ac.ir
کوروش جواهرده
 استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران، mborji@liau.ac.ir
مهدی برجی

چکیده

در مقاله حاضر، تأثیر چیدمان پره درون یک کانال چین‌دار بر الگوی جریان و انتقال گرما جابجایی اجباری نانوسیال غیرنیوتنی در محدوده رژیم لایه‌ای به صورت عددی ارزیابی شده است. برای حل معادلات جریان و انرژی از روش حجم محدود به صورت دوبعدی، دائم و تک فاز استفاده شده است. در این مطالعه، تأثیر پارامترهایی از قبیل چیدمان‌های مختلف پره‌ها، و همچنین عدد رینولدز (۲۰۰ الی ۱۰۰۰) و کسر حجمی نانوذرات (۰.۵ الی ۱.۵ درصد) بر الگوی جریان و انتقال گرما بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که استفاده از سیال غیرنیوتنی آب+۰.۵٪ CMC بجای سیال نیوتنی آب، موجب افزایش عدد ناسلت متوسط می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که شاخص ارزیابی عملکرد در حضور پره برای چیدمان‌های A و D در تمامی شرایط مقداری بزرگتر از ۱ دارد که نشان‌دهنده موثر بودن حضور پره‌ها بر راندمان حرارتی جریان نانوسیال غیرنیوتنی درون یک کانال چین‌دار می‌باشد. همچنین چیدمان D نسبت به سایر چیدمان‌ها، دارای بیشترین مقدار افزایش انتقال گرما می‌باشد. علاوه بر این نتایج حاکی از آن است که با افزایش عدد رینولدز از ۲۰۰ به ۱۰۰۰ و کسر حجمی نانوذرات از ۰.۵ به ۱.۵ درصد برای چیدمان D، عدد ناسلت متوسط حدود ۹.۸۵ درصد و شاخص ارزیابی عملکرد ۹.۰۹ درصد افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل عددی، نانوسیال غیرنیوتنی، کانال چین‌دار، چیدمان پره، کسر حجمی نانوذرات، افزایش انتقال گرما.

Numerical analysis of the effect of arrangement of fin on flow field and heat transfer enhancement of a non-Newtonian nanofluid in a corrugated channel

A. Naderifar Department of Mechanical Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran
M. Nikian Department of Mechanical Engineering, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran
K. Javaherdeh Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
M. Borji Department of Mechanical Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

Abstract

In the present study, heat transfer enhancement of a non-Newtonian nanofluid by different arrangements of double fins in a corrugated channel was numerically investigated. Finite volume method is used to solve governing equations of flow and energy with assumptions of 2D, steady-state, and single phase. The fluid flow is in the hydraulically laminar regime and the channel is under a constant heat flux. A set of case studies are conducted for a corrugated channel model to analyze the influence of the main contributing factors; Reynolds number, nanofluid volume fraction, the different fin configurations, on the flow field and the heat transfer characteristics as well. Results indicate that using non-Newtonian fluid of water+0.5%CMC instead of water fluid leads to enhance heat transfer. The numerical results showed that implementing configuration D in a corrugated channel leads to heat transfer rate compared to other configurations. Besides, for configuration D, raising the Reynolds number from 200 to 1000 and the nanofluid volume fraction from 0.5% to 1.5% cause the mean Nusselt number and performance evaluation index to increase about 9.85% and 9.09%, respectively.

Keywords: Numerical analysis, Non-Newtonian nanofluid, Corrugated channel, Arrangement of fin, Nanofluid volume fraction, Heat transfer enhancement.

انتقال گرما استفاده از کانال‌های چین‌دار می‌باشد [۱-۳]. کانال‌های چین‌دار به دلیل تغییر ناگهانی سطح مقطع و جدایش جریان موجب بهم ریختگی لایه مرزی گرمایی و افزایش انتقال گرما می‌گردد. یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش انتقال گرما، استفاده از سیال خنک‌کننده کارآمد برای افزایش عملکرد حرارتی در سیستم‌های انتقال گرما می‌باشد. استفاده از سیالات غیرنیوتنی در کاربردهای صنعتی مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۴ و ۵]. موسوی و همکاران [۴]، به بررسی الگوی جریان و انتقال گرما سیال غیرنیوتنی ویسکوالاستیک

۱- مقدمه

جریان و انتقال گرما درون کانال‌ها در بسیاری از صنایع مختلف از جمله تأسیسات تهویه مطبوع، حمل و نقل، هوافضا، انرژی هسته‌ای، نیروگاه‌ها، پتروشیمی و مواد غذایی کاربرد دارد. به منظور افزایش راندمان حرارتی تأسیسات حرارتی و با توجه به محدودیت منابع انرژی، استفاده از روش‌های مختلف افزایش انتقال گرما در کانال‌ها توسط محققین توسعه داده شده است. یکی از روش‌های غیرفعال افزایش

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.nikiyan@tiau.ac.ir

درون یک کانال عمودی با پله پسر و به صورت عددی پرداختند. آن‌ها نتایج حاصل از سیال غیرنیوتنی ویسکوالاستیک را با سیال نیوتنی مقایسه نمودند. آن‌ها نشان دادند که لایه مرزی سرعت و دما برای سیال غیرنیوتنی ویسکوالاستیک نسبت به سیال نیوتنی بزرگتر می‌باشد. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از آن است که عدد ناسلت مربوط به سیال غیرنیوتنی ویسکوالاستیک نسبت به سیال نیوتنی هم در جریان درون پله پسر و هم جریان روی صفحه تخت، مقدار بیشتری دارد. دانان و همکاران [۵]، تأثیر هندسه‌های متفاوت پله پسر بر الگوی جریان سیال و افزایش انتقال گرما سیال بینگام درون یک کانال با پله پسر را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از پله عمودی در مقایسه با پله‌های شیب‌دار و منحنی موجب افزایش طول ناحیه اتصال مجدد جریان و افزایش افت فشار می‌شود. همچنین نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از آن است که استفاده از پله شیب‌دار موجب افزایش عدد ناسلت می‌شود.

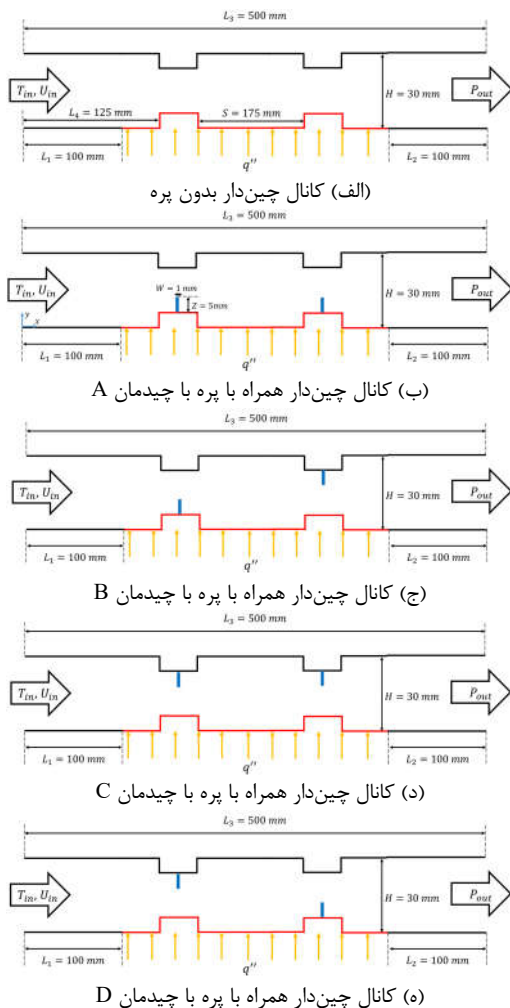
از سوی دیگر، یکی از روش‌های غیرفعال افزایش انتقال گرما، افزودن نانو ذرات به سیال پایه و تشکیل نانوسیالات^۱ است. با توجه به رسانایی گرمایی ضعیف ذاتی سیالات پایه متداول در انتقال گرما (مانند آب، روغن‌ها و اتیلن گلیکول)، با اضافه کردن نانو ذرات جامد و تأثیر بر روی خواص ترموفیزیکی سیال پایه مانند رسانایی گرمایی، لزجت، چگالی و گرمای ویژه، انتقال گرما بهبود می‌یابد [۱۰-۶]. تحقیقات متعددی برای بررسی جریان و انتقال گرما نانوسیالات درون پله پسر انجام شده است که به عنوان نمونه می‌توان به مطالعات انجام شده توسط احمد و همکاران [۶]، پور و نساب [۷]، توگان و همکاران [۸]، سلطانی و همکاران [۹] و حجت و همکاران [۱۱ و ۱۰] اشاره کرد. احمد و همکاران [۶] تأثیر انواع مختلف نانوسیالات بر انتقال گرما جابجایی اجباری درون یک کانال را ارزیابی نمودند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که با تغییر نوع نانوسیال، آهنگ انتقال گرما تغییر می‌کند. همچنین پور و نساب [۷] تأثیر انواع مختلف نانوسیالات بر الگوی جریان و افزایش انتقال گرما در محدوده رژیم جریان لایه‌ای را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از نانوسیال در مقایسه با سیال پایه، سبب افزایش قابل توجه انتقال گرما می‌شود. همچنین نتایج آن‌ها حاکی از آن است که استفاده از نانو ذرات آلومینیوم (Ag) و مس (Cu) در مقایسه با سایر نانو ذرات، موجب افزایش بیشتر انتقال گرما می‌گردد. توگان و همکاران [۸] به صورت عددی به بررسی جریان لایه‌ای و آشفته و انتقال حرارت نانوسیال پرداختند. در این تحقیق، از نانوسیال مس با پایه آب استفاده شده بود. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که تأثیر استفاده از نانوسیالات با افزایش کسر حجمی نانو ذرات و عدد رینولدز بیشتر بوده و موجب بهبود انتقال گرما می‌گردد. همچنین با افزایش کسر حجمی نانو ذرات و عدد رینولدز، افت فشار نیز در مقایسه با سیال پایه افزایش می‌یابد. سلطانی و همکاران [۹] به صورت آزمایشگاهی پدیده جوش هسته‌ای نانوسیال غیرنیوتنی را بررسی نمودند. آن‌ها گزارش کردند که افزایش کسر حجمی نانو ذرات موجب افزایش انتقال گرما جوش می‌شود. همچنین حجت و همکاران [۱۱ و ۱۰] تأثیر اضافه شدن نانو ذرات به سیال غیرنیوتنی را در محدوده رژیم جریان لایه‌ای درون یک کانال به صورت تجربی بررسی کردند.

¹ Nanofluids

نتایج آن‌ها نشان داد که با اضافه شدن نانو ذرات، آهنگ انتقال گرما در مقایسه با سیال پایه افزایش می‌یابد. همچنین تأثیر انواع مختلف نانوسیالات بر انتقال گرما جابجایی در محدوده رژیم جریان آشفته را نیز به صورت تجربی ارزیابی نمودند [۱۱]. آن‌ها یک رابطه همپوشانی برای ضریب انتقال گرما متوسط برحسب عدد رینولدز و عدد پرانتل سیال غیرنیوتنی ارائه نمودند.

یکی دیگر از راه‌های افزایش انتقال گرما درون کانال‌ها، استفاده از پره است [۱۵-۱۲]. الناک [۱۲] تأثیر وجود پره مستطیلی بر روی دیواره بالایی یک کانال چین‌دار بر الگوی جریان و انتقال گرما را به صورت عددی بررسی نمود. نتایج وی حاکی از آن است که با تغییر زاویه نصب پره نسبت به جهت جریان، افت فشار کاهش و عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. همچنین با تعریف پارامتر راندمان هیدرولیکی حرارتی، نتایج حاکی از آن است که نصب پره‌ها به ازای زاویه ۴۵ درجه، بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. هوندیو و همکاران [۱۳] تأثیر نصب پره‌های مثلثی شکل را بر الگوی جریان و انتقال گرما هوا درون یک صفحه خورشیدی را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش عدد رینولدز و ارتفاع پره، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. بوراج و همکاران [۱۵]، تأثیر هندسه‌های متفاوت پره بر الگوی جریان و افزایش انتقال گرما درون یک کانال با تغییر سطح مقطع ناگهانی را به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از پره مستطیلی در مقایسه با پره‌های بیضی و مثلثی موجب افزایش انتقال گرما می‌شود. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از آن است که در نزدیکی پره، عدد ناسلت به بیشینه مقدار خود می‌رسد. قره قونلو و رضازاده [۱۶]، تأثیر تغییر شکل پره‌های یک مبادله‌کن گرمایی بر انتقال گرما و الگوی جریان سیال درون آن را به صورت عددی ارزیابی نمودند. آن‌ها نشان دادند که مبادله‌کن گرمایی با شش پره، دارای بیشترین راندمان حرارتی و کمترین افت فشار نسبت به سایر شرایط می‌باشد. میرزاپور و بیاتی [۱۷]، به صورت عددی به بررسی تأثیر تعداد پره و سهم دیواره پره‌دار و دیواره بدون پره بر مقدار انتقال گرمای سیال غیرنیوتنی درون یک کانال مستطیلی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش تعداد پره‌ها، انتقال گرمای کلی افزایش می‌یابد ولی نرخ افزایش آن غیرخطی می‌باشد. همچنین نتایج آن‌ها حاکی از آن است که سهم مقدار انتقال گرما در دیواره پره‌دار و دیواره بدون پره روند منظمی را طی نمی‌کند و به مکان قرارگیری پره‌ها وابسته است.

اکثر مطالعات گذشته، تأثیر هر یک از پارامترهای مؤثر بر جریان و انتقال گرما از قبیل: عدد رینولدز، نوع سیال غیرنیوتنی و نانوسیال، کسر حجمی نانو ذرات و نصب پره در کانال‌های چین‌دار را بررسی کرده‌اند و تأثیر همزمان رفتار سیال غیرنیوتنی، کسر حجمی نانو ذرات و چیدمان پره‌ها بر عملکرد هیدرولیکی حرارتی جریان و انتقال گرما نانوسیال غیرنیوتنی درون یک کانال چین‌دار هنوز مورد توجه قرار نگرفته است. بر اساس مطالعه دیگر محققان و با توجه به عدم بررسی همزمان این پارامترها و تأثیر متقابل این پارامترها بر یکدیگر و عملکرد حرارتی کانال چین‌دار و همچنین عدم بررسی شاخص ارزیابی عملکرد جهت تحلیل الگوی جریان و انتقال گرما در شرایط مختلف جریان نانوسیال غیرنیوتنی، نوآوری مطالعه حاضر بررسی جابجایی اجباری نانوسیال غیرنیوتنی درون یک کانال چین‌دار و ارزیابی همزمان تأثیر پارامترهای مؤثر بر افزایش انتقال گرما از قبیل عدد رینولدز، کسر



شکل ۱- نمایشی شماتیک از دامنه محاسباتی

(الف) کانال چین‌دار بدون پره
 (ب) کانال چین‌دار همراه با پره با چیدمان A
 (ج) کانال چین‌دار همراه با پره با چیدمان B
 (د) کانال چین‌دار همراه با پره با چیدمان C
 (ه) کانال چین‌دار همراه با پره با چیدمان D

حجمی نانوذرات و همچنین بررسی آرایش پرها در تغییر الگوی جریان و تأثیر آن بر افزایش آهنگ انتقال گرما می‌باشد.

۲- هندسه مسئله

نمایی از هندسه دو بعدی و دامنه محاسباتی مسئله مورد نظر، ابعاد به کار رفته و مکان نصب پرها در شکل ۱ نشان داده شده است. طول کلی کانال ۵۰۰ میلی‌متر و ارتفاع کانال نیز ۳۰ میلی‌متر می‌باشد. طول ناحیه محاسباتی از ورودی تا بخش چین‌دار کانال و از بخش انتهایی چین‌دار تا خروجی کانال یکسان بوده و برابر ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. در ورودی سیال سرد با دمای ۲۹۳ کلوین و سرعت معین وارد شده و از سمت دیگر کانال خارج می‌شود. دیواره پایین به طول ۳۰۰ میلی‌متر تحت شار گرمایی یکنواخت و همچنین دیواره بالا عایق در نظر گرفته شده‌اند. به منظور ارزیابی تأثیر چیدمان پرها، که با رنگ آبی نشان داده شده‌اند، بر الگوی جریان و انتقال گرما، چهار چیدمان مختلف مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است. همچنین نمایی از کانال چین‌دار بدون پره نیز در شکل ۱ (الف) ارائه شده است. لازم به ذکر است که ابعاد طول و ارتفاع کانال مورد بررسی برابر با کانال مورد استفاده برای اعتبارسنجی می‌باشد [۱۸]. همچنین با توجه به اینکه هدف این مطالعه، ارزیابی چیدمان‌های مختلف پره بر انتقال گرما می‌باشد، دیواره پایین به عنوان دیواره گرم (با شار گرمایی ثابت) در نظر گرفته شده است که جز شرایط مرزی مرسوم در بررسی کانال‌های حرارتی می‌باشد [۲۲-۱۴ و ۱۲]. همچنین لازم به ذکر است که با توجه به اینکه در این تحقیق عدد رینولدز در محدوده جریان لایه‌ای می‌باشد، جریان دوبعدی در نظر گرفته شده و عمق کانال تأثیری در نتایج ندارد. فرض دوبعدی بودن رفتار جریان در محدوده جریان لایه‌ای، یک فرض مرسوم در شبیه‌سازی جریان نانوسیال غیرنیوتنی درون کانال‌های می‌باشد [۲۲-۱۴ و ۱۲ و ۸ و ۷].

نانوسیال غیرنیوتنی با نانوذرات اکسید آلومینیوم به عنوان سیال عامل درون کانال را پر کرده و خواص ترمودینامیکی آب؛ نانوذرات و نانوسیال غیرنیوتنی با کسر حجمی‌های ۰/۵ و ۱/۵ درصد در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین در این جدول خواص مربوط به سیال آب نیز به منظور مقایسه محلول آب- کربوکسی متیل سلولز^۱ با آب خالص ارائه شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی [۱۸]

پارامتر	آب	اکسید آلومینیوم	CMC(0.5%)+ 0.5% Al ₂ O ₃	CMC(0.5%)+ 1.5% Al ₂ O ₃
چگالی (kg/m ³)	۹۹۷/۱	۳۹۷۰	۱۰۱۳/۵	۱۰۴۰/۵
رسانایی گرمایی (W/m.K)	۰/۶۱۳	۴۰	۰/۶۲۶۲	۰/۶۶
گرمای ویژه (J/kg.K)	۴۱۷۹	۷۶۵	۴۱۲۱	۴۰۱۲
عدد پراختل	۶۲	-	-	-

^۱ Carboxymethyl Cellulose (CMC)

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان و انتقال گرما با فرض یک محیط پیوسته با تعادل گرمایی بین سیال پایه و ذرات جامد، خواص ثابت، دائم، تراکم‌ناپذیر، دو بعدی و لایه‌ای، شامل پیوستگی، مومنتم و بقای انرژی می‌باشند که به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۱-۱۶ و ۵ و ۴]:

پیوستگی:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

مومنتم:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K \dot{\gamma}^{n-1} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

انرژی:

$$Pr = \frac{Kc_p}{K_f} \left(\frac{U_{in}}{H} \right)^{n-1} \quad (9)$$

به منظور ارزیابی تأثیر نصب پره و چیدمان آن بر جریان نانوسیال غیرنیوتنی و انتقال گرما، از عدد ناسلت محلی روی دیواره شار ثابت و عدد ناسلت متوسط به ترتیب مطابق روابط (۱۰) و (۱۱) بهره گرفته شده است:

$$Nu_x = \frac{h_x H}{K_{nf}} = \frac{H}{K_{nf}} \left(\frac{q''}{T_x - T_{in}} \right) \quad (10)$$

$$Nu_m = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (11)$$

در رابطه (۱۰)، q'' شار گرمایی ثابت منتقل شده از سطح دیواره پایین به سیال درون کانال، T_x دمای موضعی دیواره پایین و T_m دمای سیال ورودی می‌باشد.

همچنین افت فشار از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$\Delta P = P_{inlet} - P_{outlet} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، P_{outlet} و P_{inlet} به ترتیب فشار استاتیکی متوسط در مقاطع ورودی و خروجی هستند.

همچنین به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال گرما و افت فشار ناشی از حضور پره، شاخص ارزیابی عملکرد مطابق رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$\eta = \frac{(Nu_m / Nu_{m0})}{(\Delta P_m / \Delta P_{m0})^{1/3}} \quad (13)$$

در این رابطه، Nu_m و ΔP_m به ترتیب عدد ناسلت متوسط و افت فشار جریان در کانال چین‌دار در حضور پره می‌باشد. همچنین، Nu_{m0} و ΔP_{m0} نیز به ترتیب عدد ناسلت متوسط و افت فشار جریان در کانال چین‌دار بدون پره می‌باشد.

۴- روش عددی

۴-۱- روند حل عددی

در این مطالعه، به‌منظور حل عددی معادلات حاکم، از نرم‌افزار Ansys Fluent 18 استفاده شده است. معادلات حاکم بر اساس روش حجم محدود گسسته‌سازی شده است. معادلات جریان سیال در حالت پایا و توسط حل‌کننده بر پایه فشار به صورت ضمنی شبیه‌سازی شده‌اند. جهت گسسته‌سازی جمله فشار و سایر جملات معادلات به ترتیب، روش استاندارد و تقریب مرتبه دوم، ترم‌های شامل گرادیان به روش گرادیان حداقل مربعات^۲ گسسته شده و همچنین برای حل همزمان میدان فشار و سرعت، از الگوریتم SIMPLE استفاده شده است. به منظور تشخیص همگرایی، معیار کاهش باقیمانده‌های تراز شده 10^{-8} می‌باشد. علاوه بر آن، رصد کردن تغییرات کمیت‌های مهم جریان در نواحی حساس به عنوان معیارهای همگرایی لحاظ شده‌اند. همچنین در شبیه‌سازی‌های پژوهش حاضر نیز ضرایب زیرتخفیف بگونه‌ای تنظیم شده‌اند که همگرایی بهتری برای حل معادلات بدست آید. مقدار ضرایب زیرتخفیف برای معادلات فشار، مومنتم و انرژی به ترتیب برابر 0.3 ، 0.6 و 0.6 انتخاب گردید. لازم به‌ذکر است که کلیه محاسبات با

² Least-squares gradient

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i T) = \frac{K_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \right) \quad (3)$$

لازم به ذکر است که محلول آب-CMC رفتار رئولوژیکی شبه پلاستیک از خود نشان می‌دهد. همچنین لزجت ظاهری این سیال را می‌توان با مدل قانون توانی به صورت زیر بدست آورد [۲۱]:

$$\tau = K \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، K و n به ترتیب نمایانگر آهنگ برش سیال غیرنیوتنی، شاخص پایداری و شاخص قانون توانی می‌باشد. لازم به ذکر است که n و K برای ارزیابی لزجت نانوسیالات غیرنیوتنی، براساس تحقیق حجت و همکاران محاسبه می‌شوند که در جدول ۲ ارائه شده‌اند [۱۰].

جدول ۲- مقادیر شاخص پایداری و شاخص قانون توانی

بر حسب کسر حجمی نانوذرات [۱۰]

n	k	سیال
۰.۴۹۵	۰.۲۰۶	CMC(0.5%)+ 0.5% Al ₂ O ₃
۰.۵۰۱	۰.۲۲۴	CMC(0.5%)+ 1.5% Al ₂ O ₃

شایان ذکر است که از اثرات جاذبه در معادلات مومنتم و اتلاف لزجت در معادله انرژی چشم‌پوشی شده است. همان‌گونه که از روابط (۱) تا (۳) مشخص است، به منظور حل معادلات حاکم، نیاز به تعیین خواص ترمودینامیکی نانوسیال می‌باشد. چگالی و گرمای ویژه نانوسیال براساس مدل تک فاز به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۹-۱۵]:

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (5)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p \quad (6)$$

رسانایی گرمایی نانوسیال براساس رابطه ماکسول-گارتنس^۱ برای نانوذرات کروی در محدوده رژیم جریان لایه‌ای مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$K_{nf} = K_f \left[\frac{(K_p + 2K_f) - 2\phi(K_f - K_p)}{(K_p + 2K_f) + \phi(K_f - K_p)} \right] \quad (7)$$

در روابط بالا اندیس‌های f و p به ترتیب نشان‌دهنده نانوسیال، سیال پایه و نانوذرات می‌باشند. همچنین ϕ کسر حجمی نانوذرات می‌باشد.

همچنین عدد رینولدز بر حسب ارتفاع کانال به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$Re = \frac{\rho_{nf} U_{in}^{2-n} H^n}{K} \quad (8)$$

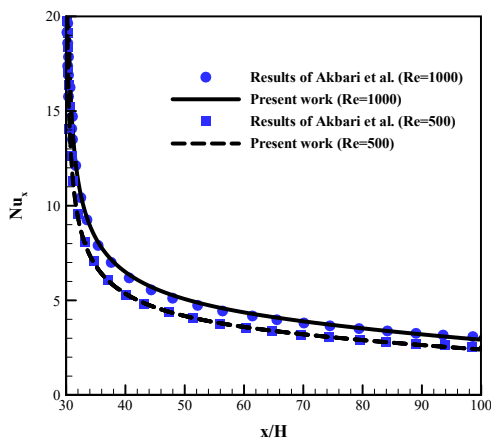
در این رابطه U_{in} سرعت جریان در ورودی و H ارتفاع کانال می‌باشد.

عدد پراکتل برای سیال پایه به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۲۳]:

¹ Maxwell-Garnetts (MG)

۳-۴- اعتبارسنجی نتایج

به منظور اعتبارسنجی نتایج، توزیع عدد ناسلت روی دیواره گرم یک کانال صاف با نتایج اکبری و همکاران [۱۸] برای نانوسیال غیرنیوتنی به ازای اعداد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ در شکل ۴ مقایسه شده است. لازم به ذکر است که طول ناحیه محاسباتی آن‌ها $100H$ بوده که $30H$ طول اولیه دیواره‌های آن دارای شرط مرزی عایق حرارتی می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج عددی مطالعه حاضر با بیشینه خطای $2/5$ درصد در عدد رینولدز ۱۰۰۰، تطابق قابل قبولی با نتایج عددی اکبری و همکاران [۱۸] دارد.



شکل ۴- توزیع عدد ناسلت روی دیواره گرم یک کانال صاف برای اعداد رینولدز مختلف

۵- نتایج

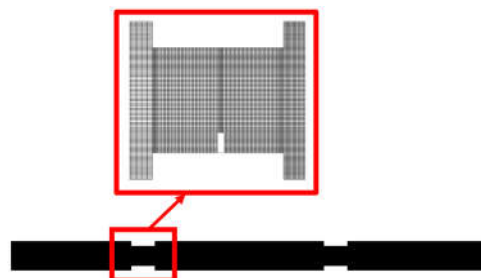
در این تحقیق، تأثیر چیدمان‌های مختلف پره درون یک کانال چین‌دار در حضور نانوسیال غیرنیوتنی بررسی شده است. همچنین تأثیر پارامترهایی همچون عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور ارزیابی تأثیر این پارامترها، نتایج در قالب خطوط جریان، عدد ناسلت متوسط و همچنین شاخص ارزیابی عملکرد ارائه شده است.

در این بخش، ابتدا به مقایسه رفتار سیال غیرنیوتنی (آب+CMC/0.5) با سیال آب خالص پرداخته می‌شود. به منظور بررسی تأثیر استفاده از سیال غیرنیوتنی بجای سیال آب، توزیع سرعت درون کانال چین‌دار برای سیالات غیرنیوتنی و آب به ازای عدد رینولدز ۲۰۰ برای چیدمان A در شکل ۵ نشان داده شده است. براساس نتایج حاصل از این شکل، استفاده از سیال غیرنیوتنی موجب تغییر چشمگیری در توزیع سرعت درون کانال چین‌دار، بویژه در اطراف پرها که گرادیان سرعت بیشتر است، می‌گردد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در سیال با رفتار غیرنیوتنی در مقایسه با سیال نیوتنی آب، جریان سیال پس از عبور از پرها، در نزدیک دیواره گرم (دیواره پایین کانال) دارای سرعت بیشتری می‌باشد و موجب افزایش جمله جابجایی می‌گردد که می‌تواند موجب افزایش انتقال گرما در این نواحی باشد. در حالی که برای سیال آب، سرعت جریان پس از عبور از پره، به دلیل کاهش سطح مقطع عبور جریان، در نزدیک دیواره بالا افزایش یافته و در مجاورت با دیواره سرد، کاهش یافته است. براساس شکل ۵ مشخص

استفاده از پردازشگر هفت هسته‌ای ۲ گیگاهرتز اینتل انجام شده و زمان محاسبات حدود ۲ الی ۴ ساعت می‌باشد.

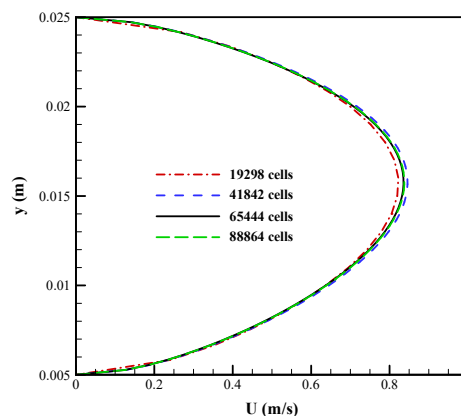
۲-۴- شبکه محاسباتی و استقلال حل عددی از شبکه

شبکه‌بندی ناحیه محاسباتی توسط نرم افزار تجاری Gambit2.4 به صورت سازمان‌یافته، غیریکنواخت و مستطیلی ایجاد شده است. به منظور افزایش دقت محاسباتی در مکان‌های نزدیک به دیواره‌ها، چین‌ها و پرها که گرادیان‌های شدید وجود دارد، از شبکه‌بندی با تراکم بیشتری استفاده شده است. ضمناً ناحیه محاسباتی به نواحی مختلفی تقسیم‌بندی شده است تا کنترل بهتری بر روی شبکه تولیدی صورت گیرد. در شکل ۲ نمای از شبکه محاسباتی در اطراف چین‌های کانال نشان داده شده است.

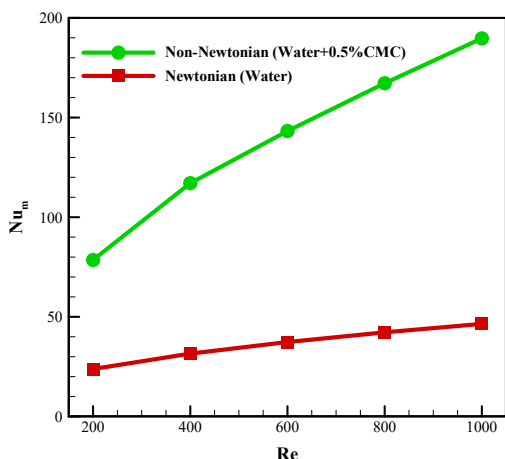


شکل ۲- نمای از شبکه محاسباتی

همچنین به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی، توزیع سرعت در موقعیت طولی 0.125 متر در امتداد ارتفاع کانال به عنوان پارامتر استقلال از شبکه انتخاب شده است. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، از ۴ شبکه‌بندی مختلف در عدد رینولدز ۶۰۰ و کسر حجمی 0.15 برای چیدمان A استفاده شده است. با توجه به شکل ۳ واضح است که شبکه با تعداد ۶۵۴۴۴ به لحاظ داشتن دقت و زمان محاسباتی مناسب، به عنوان شبکه مناسب انتخاب می‌شود. همچنین بیشینه اختلاف نتایج میان ریزترین و درشت‌ترین شبکه $1/86$ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است که استقلال حل عددی از شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

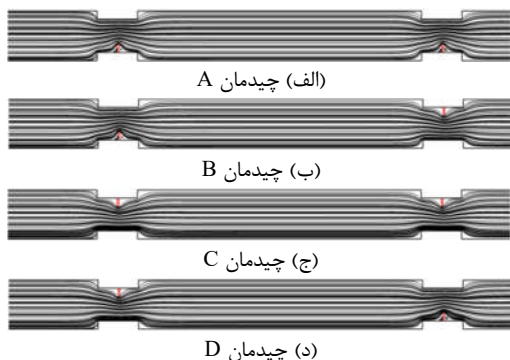


شکل ۳- توزیع سرعت در موقعیت طولی 0.125 متر و در امتداد ارتفاع کانال برای چیدمان A برای شبکه‌های مختلف ($\phi=0.15$, $Re=600$)



شکل ۶- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای سیال غیرنیوتنی (آب+۰٫۵٪CMC) و سیال آب بر حسب اعداد رینولدز مختلف برای چیدمان A

به منظور ارزیابی تأثیر چیدمان پرها بر الگوی جریان، خطوط جریان به ازای چیدمان‌های مختلف پره در عدد رینولدز ۴۰۰ و کسر حجمی ۰٫۱۵ در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با حضور پرها درون کانال چین‌دار، الگوی جریان، بویژه در اطراف چین‌ها و پرها تغییر می‌کند. نتایج حاکی از آن است که وجود پرها درون کانال چین‌دار موجب انحراف جریان و همچنین بهم ریختگی لایه مرزی می‌گردد که موجب بهبود انتقال گرما نسبت به کانال بدون پره می‌گردد.

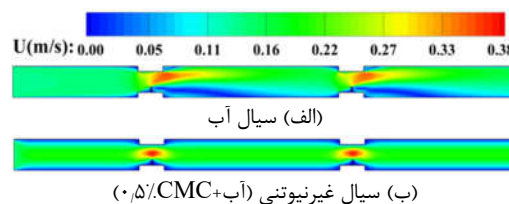


شکل ۷- خطوط جریان

(الف) چیدمان A (ب) چیدمان B (ج) چیدمان C (د) چیدمان D

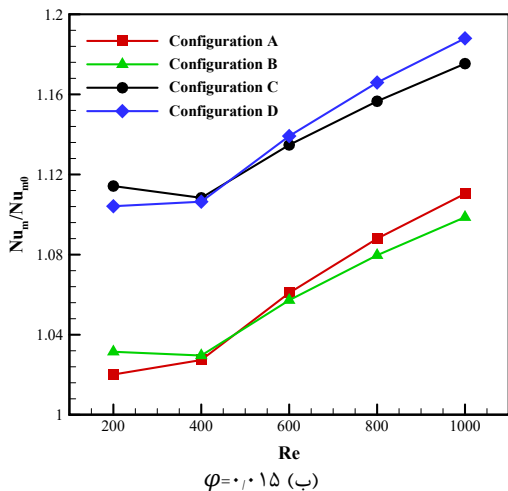
به منظور ارزیابی افزایش انتقال گرما به ازای چیدمان‌های مختلف، نسبت عدد ناسلت متوسط در حضور پره به عدد ناسلت متوسط بدون پره، در اعداد رینولدز و کسر حجمی‌های مختلف نانوذرات در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در تمامی حالت‌ها مقدار نسبت عدد ناسلت متوسط در حضور پره به عدد ناسلت متوسط بدون پره، بزرگتر از ۱ می‌باشد که نشان‌دهنده موثر بودن حضور پره بر افزایش انتقال گرما درون کانال چین‌دار می‌باشد. همچنین براساس نتایج مشخص است که چیدمان D نسبت به سایر چیدمان‌ها، دارای بیشترین افزایش انتقال گرما می‌باشد. دلیل این امر را

است که به دلیل حضور پره درون کانال چین‌دار، سطح مقطع کانال کاهش یافته است. این تغییر و کاهش سطح مقطع، در سیال نیوتنی آب، موجب کاهش سرعت و ایجاد یک جریان برگشتی پس از پله شده است. براساس قانون پیوستگی جرم، با توجه به اینکه در ناحیه پشت پره، جریان برگشتی با سرعت کم تشکیل شده است، در ناحیه بالا سرعت سیال افزایش داشته است و با توجه به اندازه گردابه تشکیل شده در جریان برگشتی، موجب کشیدگی سرعت پیشینه جریان سیال نیوتنی در قسمت بالای جریان برگشتی شده است. از سوی دیگر برای سیال غیرنیوتنی، با توجه به اینکه لزجت سیال وابسته به نرخ برش می‌باشد، با افزایش نرخ برش و گردابان سرعت در اطراف پره، به دلیل اختلاف سرعت جریان سیال با دیواره‌ها، لزجت ظاهری سیال غیرنیوتنی نیز در این نواحی افزایش یافته است و مانع از تشکیل جریان گردابی در پشت پره شده است. به همین دلیل در سیال غیرنیوتنی، براساس قانون پیوستگی جرم، به دلیل کاهش سطح مقطع در بالای پره، سرعت به صورت موضعی فقط در این ناحیه پیشینه می‌باشد.



شکل ۸- کانتور سرعت برای چیدمان A در عدد رینولدز ۲۰۰ (الف) سیال آب (ب) سیال غیرنیوتنی (آب+۰٫۵٪CMC)

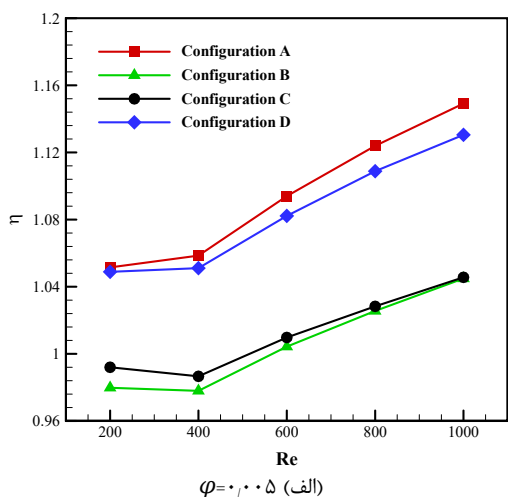
به منظور ارزیابی رفتار سیال غیرنیوتنی (آب+۰٫۵CMC) بر افزایش انتقال گرما، عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز مختلف برای سیال غیرنیوتنی و سیال آب برای چیدمان A در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، عدد ناسلت مربوط به سیال غیرنیوتنی نسبت به سیال نیوتنی آب مقدار بیشتری داشته است. همچنین نتایج حاکی از آن است که با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت متوسط افزایش چشمگیری یافته است. علاوه بر این، واضح است که با افزایش عدد رینولدز نرخ رشد عدد ناسلت متوسط سیال غیرنیوتنی نسبت به سیال نیوتنی آب، افزایش بیشتری دارد، به نحوی که با افزایش عدد رینولدز از ۲۰۰ به ۱۰۰۰، عدد ناسلت سیال غیرنیوتنی نسبت به آب به ترتیب ۲۲۹٫۸۶٪ و ۳۰۸٫۲۸٪ افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان اینگونه توجیه نمود که در سیال نیوتنی، به دلیل وجود جریان گردابی در پشت پرها و چین‌های کانال، سرعت در این نواحی نسبت به سیال غیرنیوتنی کمتر می‌باشد. بنابراین جمله جابجایی در نزدیک دیواره گرم برای سیال غیرنیوتنی نسبت به سیال نیوتنی بیشتر بوده و موجب افزایش بیشتر ضریب انتقال گرما و عدد ناسلت متوسط می‌گردد.



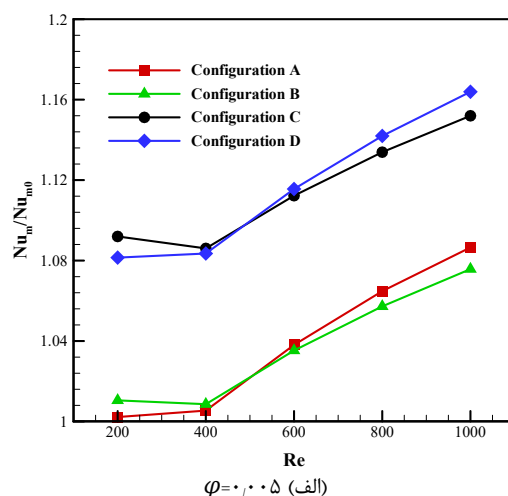
شکل ۸- نسبت عدد ناسلت در حضور پره نسبت به عدد ناسلت بدون پره برای چیدمان‌های مختلف برحسب عدد رینولدز و کسر حجمی مختلف

(الف) φ = 0.05 (ب) φ = 0.15

به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال گرما و افت فشار ناشی از وجود پره‌ها، نتایج حاصل از شاخص ارزیابی عملکرد برای چیدمان‌های مختلف بر حسب عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات در شکل ۹ آمده است. براساس نتایج حاصل از این شکل، شاخص ارزیابی عملکرد برای تمامی چیدمان‌ها، با افزایش عدد رینولدز افزایش یافته است. همچنین مشخص است که در چیدمان‌های A و D، شاخص ارزیابی عملکرد در تمامی شرایط، مقداری بزرگتر از ۱ دارد که نشان‌دهنده موثر بودن حضور پره بر راندمان حرارتی می‌باشد. براساس این شکل، بیشینه شاخص ارزیابی عملکرد به ازای چیدمان A و عدد رینولدز ۱۰۰۰ و کسر حجمی ۱/۱۵٪ برابر ۱/۱۶ می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، چیدمان A نسبت به سایر چیدمان‌ها دارای شاخص ارزیابی عملکرد بیشتری می‌باشد. همچنین براساس نتایج مشخص است که اگرچه با اضافه شدن کسر حجمی نانوذرات افت فشار افزایش می‌یابد، اما در چیدمان‌های A و D آهنگ افزایش انتقال گرما دارای رشد بیشتری است که موجب افزایش شاخص ارزیابی عملکرد می‌گردد.



می‌توان اینگونه توجیه نمود که هنگامی که پره‌ها بر روی دیواره بالا قرار دارند، به دلیل کاهش سطح مقطع کانال و افزایش سرعت جریان و افزایش جمله جابجایی جریان در نزدیک دیواره گرم کانال چین‌دار، نرخ انتقال گرما و عدد ناسلت افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه دو چیدمان B و D واضح است که افزایش انتقال گرما برای چیدمان D بیشتر می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با توجه به اینکه در چیدمان D، پره اول بر روی دیواره بالا قرار دارد، موجب کاهش سطح مقطع در اطراف پره شده و سرعت جریان در نزدیک به دیواره پایین (دیواره گرم) افزایش می‌یابد که موجب افزایش ترم انتقال حرارت جابجایی نسبت به ترم انتقال حرارت هدایتی می‌باشد و سبب افزایش عدد ناسلت می‌گردد. در حالی که در چیدمان B، پره اول بر روی دیواره پایین بود و سرعت جریان در نزدیک دیواره بالا افزایش می‌یابد که تأثیر اندکی بر افزایش انتقال حرارت دارد. همچنین در چیدمان D، پره دوم بر روی دیواره پایین در نزدیک به ناحیه توسعه‌یافتگی می‌باشد که حضور پره موجب بهم ریختگی مجدد لایه مرزی گرمایی و افزایش موضعی ضریب انتقال گرما می‌گردد، درحالی که در چیدمان B، موقعیت پره دوم تأثیر چندانی بر لایه مرزی گرمایی نزدیک به دیواره گرم ندارد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، با افزایش عدد رینولدز جریان ورودی، نسبت عدد ناسلت افزایش چشمگیری یافته است. همچنین واضح است که در عدد رینولدز ۱۰۰۰، با افزایش کسر حجمی نانوذرات از ۰/۵٪ به ۱/۱۵٪، نسبت عدد ناسلت متوسط از ۱/۱۶۴ به ۱/۱۸۸ افزایش یافته است. همچنین واضح است که در اعداد رینولدز پایین (عدد رینولدز ۲۰۰ و ۴۰۰)، چیدمان C دارای راندمان حرارتی بیشتری می‌باشد. مشخص است که در عدد رینولدز ۲۰۰، نسبت عدد ناسلت متوسط برای چیدمان C نسبت به چیدمان D، برای کسر حجمی نانوذرات از ۰/۵٪ و ۱/۱۵٪، به ترتیب ۰/۹۷٪ و ۰/۹۱٪ افزایش یافته است.



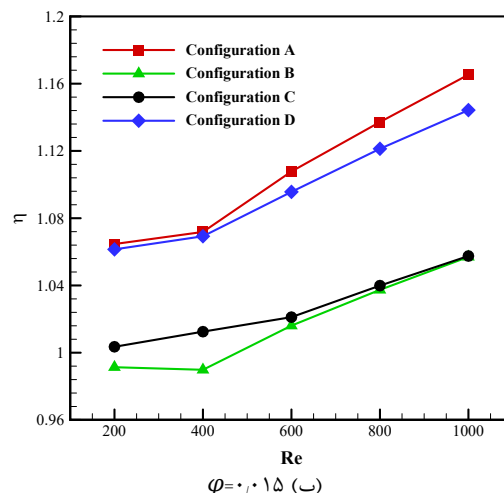
ناسلت متوسط حدود ۹/۸۵ درصد و شاخص ارزیابی عملکرد ۹/۰۹ درصد افزایش می‌یابد.

۷- نمادها

C_p	گرمای ویژه (J/kg K)
h_x	ضریب انتقال گرما ($W/m^2 K$)
H	ارتفاع کانال (m)
K	رسانایی گرمایی ($W/m K$)
L_1	طول ورودی (m)
L_2	طول بخش چین‌دار کانال (m)
L_3	طول خروجی (m)
n	شاخص پاورلا
Nu	عدد ناسلت
P	فشار (N/m^2)
q''	شار گرمایی (W/m^2)
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
u	مولفه افقی سرعت (m/s)
U	سرعت متوسط (m/s)
W	ضخامت پره (m)
Z	ارتفاع پره (m)
علائم یونانی	
η	شاخص ارزیابی عملکرد
μ	لزجت دینامیکی ($kg/m s$)
ρ	چگالی (kg/m^3)
ϕ	کسر حجمی نانوذرات
τ	لزجت ظاهری
زیرنویس	
in	مقدار موضعی در مقطع ورودی
f	سیال پایه
m	متوسط
nf	نانوسیال
out	مقدار موضعی در مقطع خروجی
P	نانوذرات
0	بدون پره

۸- مراجع

- [1] Salami M., Khoshvaght-Aliabadi M., & Feizabadi A. Investigation of corrugated channel performance with different wave shapes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 138(5), pp. 3159-3174, 2019.
- [۲] اتحاد ا. و الهامی امیری ع.، بررسی عددی تأثیر تعداد هندسه بلوک‌های متخلخل بر افزایش انتقال گرمای جابجایی و افت فشار در جریان نانوسیال درون کانال‌ها، *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۱، ش. ۴، ص ۳۱-۴۰، ۱۴۰۰.
- [۳] ضیائی‌راد م. و الیاسی پ.، بررسی عددی تأثیر استفاده همزمان از نوسان و نانوذرات در جریان داخل کانالی با موانع متناوب. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۶، ش. ۴، ص ۱۵۹-۱۶۹، ۱۳۹۶.



شکل ۹- شاخص ارزیابی عملکرد برای چیدمان‌های مختلف برحسب عدد رینولدز و کسر حجمی مختلف (الف) $\phi=0.05$ (ب) $\phi=0.15$

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر چیدمان پره درون یک کانال چین‌دار بر الگوی جریان و انتقال گرما جابجایی اجباری نانوسیال غیرنیوتنی در محدوده رژیم جریان لایه‌ای به صورت عددی ارزیابی شده است. هدف اصلی این مطالعه ارزیابی همزمان تأثیر پارامترهای موثر بر افزایش انتقال گرما از قبیل چیدمان پرها، عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات است. به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال گرما و افت فشار ناشی از حضور پرها و افزایش کسر حجمی نانوذرات، شاخص ارزیابی عملکرد معرفی شده است. همچنین به منظور ارزیابی تأثیر چیدمان پرها بر الگوی جریان و افزایش انتقال گرما، ۴ چیدمان مختلف (A, B, C, D) در نظر گرفته شده است. مهمترین یافته‌های این تحقیق عبارتند از:

- با استفاده سیال غیرنیوتنی بجای سیال نیوتنی آب، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد.
- نتایج حاکی از آن است که وجود پرها درون کانال چین‌دار موجب انحراف جریان می‌گردد که موجب بهبود انتقال گرما می‌گردد.
- نتایج نشان می‌دهد که چیدمان D نسبت به سایر چیدمان‌ها، دارای بیشترین مقدار افزایش انتقال حرارت می‌باشد.
- نتایج حاکی از آن است که چیدمان A نسبت به سایر چیدمان‌ها، دارای بیشترین مقدار شاخص ارزیابی عملکرد می‌باشد. همچنین شاخص ارزیابی عملکرد در حضور پره برای چیدمان‌های A و D در تمامی شرایط مقداری بزرگتر از ۱ دارد که نشان‌دهنده موثر بودن حضور پرها بر راندمان حرارتی جریان نانوسیال غیرنیوتنی درون یک کانال چین‌دار می‌باشد.
- با افزایش عدد رینولدز از ۲۰۰ به ۱۰۰۰ و کسر حجمی نانوذرات از ۰/۵ به ۱/۵ درصد برای چیدمان D، عدد

- non-Newtonian nanofluid. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, Vol. 86, pp. 68-75, 2017.
- [19] Bahirai M., Mazaheri N., & Alighardashi M. Development of chaotic advection in laminar flow of a non-Newtonian nanofluid: a novel application for efficient use of energy. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 124, pp. 1213-1223, 2017.
- [20] Rahmati A. R., Akbari O. A., Marzban A., Toghraie D., Karimi R., & Pourfattah F. Simultaneous investigations the effects of non-Newtonian nanofluid flow in different volume fractions of solid nanoparticles with slip and no-slip boundary conditions. *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 5, pp. 263-277, 2018.
- [۲۱] فلاح ک، شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت عددی سیال غیرنیوتنی گذرنده از روی سیلندر دایروی چرخان با روش شبکه بولتزمن. *نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه امیرکبیر*، د. ۴۸، ش. ۲، ص ۲۰۹-۲۱۸، ۱۳۹۷.
- [22] Abu-Nada E. Application of nanofluids for heat transfer enhancement of separated flows encountered in a backward facing step. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29(1), pp. 242-249, 2008.
- [۲۳] جواهرده ک، مظفری س، و زارع طلب ز، شبیه‌سازی عددی انتقال گرمای جریان آشفته نانو سیال غیرنیوتنی در مبدل گرمایی دولوله‌ای مارپیچ. *نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه امیرکبیر*، د. ۵۳، ش. ۱، ص ۱۶-۱۶، ۱۴۰۰.
- [24] Mosavi A., Hekmatifar M., Alizadeh A. A., Toghraie D., Sabetvand R., & Karimipour A. The molecular dynamics simulation of thermal manner of Ar/Cu nanofluid flow: the effects of spherical barriers size. *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 319, pp. 114183, 2020.
- [4] Moosavi R., Moltafet R., & Shekari Y. Analysis of viscoelastic non-Newtonian fluid over a vertical forward-facing step using the Maxwell fractional model. *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 401, pp. 126119, 2021.
- [5] Danane F., Boudiaf A., Mahfoud O., Ouyahia S. E., Labsi N., & Benkahla Y. K. Effect of backward facing step shape on 3D mixed convection of Bingham fluid. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 147, pp. 106116, 2020.
- [6] Ahmed, H. E., & Yusoff, M. Z. Impact of delta-winglet pair of vortex generators on the thermal and hydraulic performance of a triangular channel using Al₂O₃-water nanofluid. *Journal of heat transfer*, Vol. 136(2), 2014.
- [7] Pour M. S., & Nassab S. G. Numerical investigation of forced laminar convection flow of nanofluids over a backward facing step under bleeding condition. *Journal of Mechanics*, Vol. 28(2), pp. 7-12, 2012.
- [8] Togun H., Safaei M. R., Sadri R., Kazi S. N., Badarudin A., Hooman K., & Sadeghinezhad E. Numerical simulation of laminar to turbulent nanofluid flow and heat transfer over a backward-facing step. *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 239, pp. 153-170, 2014.
- [9] Soltani S., Etemad S. G., & Thibault J. Pool boiling heat transfer of non-Newtonian nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37(1), pp. 29-33, 2010.
- [10] Hojjat M., Etemad S. G., & Bagheri R. Laminar heat transfer of non-Newtonian nanofluids in a circular tube. *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 27(5), pp. 1391-1396, 2010.
- [11] Hojjat M., Etemad S. G., Bagheri R., & Thibault J. Rheological characteristics of non-Newtonian nanofluids: experimental investigation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38(2), pp. 144-148, 2011.
- [12] Alnak D. E. Thermohydraulic performance study of different square baffle angles in cross-corrugated channel. *Journal of Energy Storage*, Vol. 28, pp. 101295, 2020.
- [13] Handoyo E. A., & Ichsani D. Numerical studies on the effect of delta-shaped obstacles' spacing on the heat transfer and pressure drop in v-corrugated channel of solar air heater. *Solar Energy*, Vol. 131, pp. 47-60, 2016.
- [۱۴] علوی لواسانی م، و پیرمحمدی م، مطالعه عددی اثر موقعیت پره بر انتقال حرارت جابجایی اجباری درون یک کانال در حالت جریان آشفته. *نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه امیرکبیر*، د. ۵۲، ش. ۶، ص ۱۶۲۷-۱۶۴۰، ۱۳۹۷.
- [15] Boruah M. P., Randive P. R., & Pati S. Hydrothermal performance and entropy generation analysis for mixed convective flows over a backward facing step channel with baffle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 125, pp. 525-542, 2018.
- [۱۶] جلایری قره قونلو ع، و رضازاده س، مطالعه عددی تأثیر لوله‌های پره‌دار طولی در مبادله‌کن گرمایی بر انتقال گرما و الگوی جریان. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۱، ش. ۴، ص ۵۸۵-۵۹۲، ۱۴۰۰.
- [۱۷] میرزاپور م، و بیانی م، بررسی عددی تأثیر تعداد پره بر نرخ افزایش انتقال گرمای داخل کانال در حضور سیال غیرنیوتنی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۰، ش. ۳، ص ۲۳۹-۲۴۸، ۱۳۹۹.
- [18] Akbari O. A., Toghraie D., Karimipour A., Marzban A., & Ahmadi G. R. The effect of velocity and dimension of solid nanoparticles on heat transfer in