



## تحلیل عددی تأثیر وجود بافل بر افزایش انتقال حرارت جریان نانوسیال روی یک پله پسر: رابطه برازش برای عدد ناسلت متوسط

حسام مویدی\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۱  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۵  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۸/۰۶

### کلمات کلیدی:

تحلیل عددی  
پله پسر  
نانوسیال  
بافل  
انتقال حرارت

**خلاصه:** در مقاله حاضر، تأثیر حضور بافل بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال مس با پایه آب در محدوده رژیم آرام روی یک پله پسر به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای حل معادلات جریان و دما از روش حجم محدود استفاده شده است. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای هندسی بافل از قبیل ارتفاع، عرض و تعداد آن، و همچنین عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات بر الگوی جریان و انتقال حرارت بررسی شده است. همچنین به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار، شاخص ارزیابی عملکرد تعریف شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش ارتفاع بافل، عدد رینولدز و کاهش کسر حجمی، شاخص ارزیابی عملکرد افزایش می‌یابد. در تمامی شرایط، مقدار افزایش عدد ناسلت متوسط و شاخص ارزیابی عملکرد، برای عرض بافل معادل ۲ برابر ارتفاع پله نسبت به سایر مقادیر عرض بافل، به ترتیب حدود ۷/۶٪ و ۱۵٪ می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که حضور ۲ بافل بهتر از تعداد دیگر بافل‌ها است. به منظور جمع‌بندی، یک رابطه برازش برای نسبت عدد ناسلت متوسط همچون تابعی از عدد رینولدز، کسر حجمی نانو ذرات، تعداد بافل، ارتفاع بافل و عرض بافل با خطای متوسط ۲/۸۸٪ ارائه شده است.

### ۱- مقدمه

بافل در کانال‌هاست [۷-۴]. بوراج و همکاران [۴]، به بررسی تأثیر هندسه‌های متفاوت بافل بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت درون یک کانال با پله پسر به صورت عددی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از بافل مستطیلی در مقایسه با بافل‌های بیضوی و مثلثی موجب کاهش طول ناحیه اتصال مجدد جریان و افزایش انتقال حرارت می‌شود. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از آن است که در نزدیک بافل، عدد ناسلت به بیشینه مقدار خود می‌رسد. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش موقعیت بافل نسبت به پله، مقدار عدد ناسلت متوسط و افت فشار کاهش می‌یابد. نای و همکاران [۶]، تأثیر مکان نصب بافل بر الگوی جریان سیال و افزایش انتقال حرارت درون یک کانال با پله پسر را به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از آن است که با نزدیک شدن موقعیت بافل به سمت

پدیده جدایش جریان سیال و اتصال مجدد<sup>۱</sup> آن به دلیل تغییرات ناگهانی هندسه کانال، در بسیاری از صنایع مختلف از جمله تأسیسات تهویه مطبوع، حمل و نقل، هوافضا، انرژی هسته‌ای، نیروگاه‌ها، پتروشیمی و مواد غذایی رخ می‌دهد. یکی از معروف‌ترین مدل‌ها به منظور بررسی جریان و انتقال حرارت در مقاطع دارای انبساط ناگهانی، مدل پله پسر<sup>۲</sup> است. به دلیل وجود جریان برگشتی و وجود ناحیه‌ای در گوشه پله پسر، که در آن کمینه نرخ انتقال حرارت رخ می‌دهد، این هندسه همواره مورد توجه محققین قرار گرفته است [۳-۱].

یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش انتقال حرارت، استفاده از

1 Reattachment  
2 Backward-Facing Step (BFS)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hesam\_moayedi@phd.guilan.ac.ir

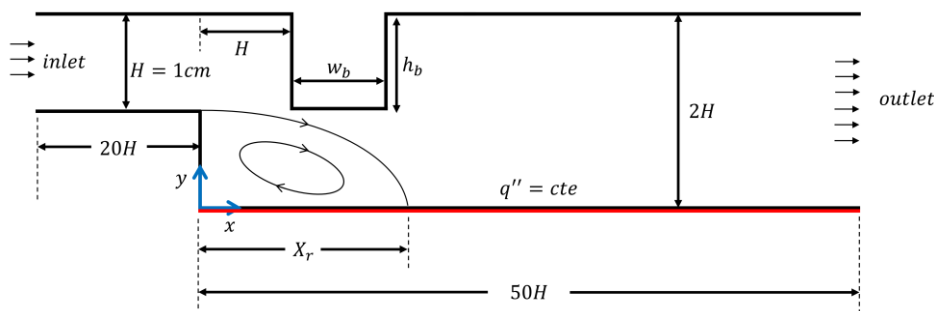


پایین دست جریان، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین دریافته‌اند که با تغییر مکان نصب بافل، مکان بیشینه عدد ناسلت و دما نیز تغییر می‌کند. کومار و ونگادسان [۷]، تأثیر نوسان بافل بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت در رژیم جریان آرام روی یک پله پسرور را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از بافل نوسانی، در مقایسه با بافل‌های ثابت، موجب ایجاد یک جریان پرپودیک و همچنین بهبود انتقال حرارت می‌شود.

از سوی دیگر، یکی از روش‌های غیرفعال افزایش انتقال حرارت، افزودن نانو ذرات به سیال پایه و تشکیل نانوسیالات<sup>۱</sup> است. با توجه به هدایت حرارتی ضعیف ذاتی سیالات پایه متداول در انتقال حرارت (مانند آب، روغن‌ها و اتیلن گلیکول)، با اضافه کردن نانو ذرات جامد و تأثیر بر روی خواص ترموفیزیکی سیال پایه مانند هدایت حرارتی، ویسکوزیته، چگالی و گرمای ویژه، انتقال حرارت بهبود می‌یابد [۸-۱۱]. بررسی جریان و انتقال حرارت نانوسیالات درون پله پسرور به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌است که به عنوان نمونه می‌توان به مطالعات انجام شده توسط پور و نساب [۱۲]، چمخا و سلیمفندیگیل [۱۳]، سلیمفندیگیل و اوزتوپ [۱۴]، حسین و همکاران [۱۵]، توگان و همکاران [۱۶]، ناث و کریشنان [۱۷] و همچنین سلمان و همکاران [۱۸] اشاره کرد. پور و نساب [۱۲] تأثیر انواع مختلف نانوسیالات بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت در محدوده رژیم جریان آرام در یک پله پسرور را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از نانوسیال در مقایسه با سیال پایه، سبب افزایش قابل توجه انتقال حرارت می‌شود. همچنین نتایج آن‌ها حاکی از آن است که استفاده از نانوذرات آلومینیوم (Ag) و مس (Cu) در مقایسه با سایر نانوذرات، موجب افزایش بیشتر انتقال حرارت می‌گردد. چمخا و سلیمفندیگیل [۱۳]، افزایش انتقال حرارت جریان نانوسیال در یک کانال با پله پسرور با جریان ورودی نوسانی را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها تأثیر دامنه نوسان و فرکانس جریان نوسانی و همچنین شکل‌های متفاوت نانوذرات را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از آن است که استفاده از جریان ورودی نوسانی سبب افزایش چشمگیر انتقال حرارت می‌گردد. همچنین نشان دادند که با استفاده از نانوذرات با شکل کروی، ضریب افزایش عدد ناسلت متوسط حدود ۳۰٫۲۴٪ می‌گردد. محمد و همکاران [۱۵] تأثیر انواع

موانع مختلف مثلثی، مستطیلی و دایروی بر الگوی جریان نانوسیال و افزایش انتقال حرارت ناشی از آن را در یک پله پسرور به صورت عددی بررسی نمودند. همچنین آن‌ها با تعریف نسبت عدد ناسلت متوسط به افت فشار، که این نسبت را شاخص ارزیابی عملکرد نامیدند، افزایش انتقال حرارت و افت فشار را به صورت همزمان بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که شاخص ارزیابی عملکرد و عدد ناسلت متوسط برای مانع مثلثی نسبت به سایر موانع، افزایش بیشتری دارد. توگان و همکاران [۱۶] به صورت عددی به بررسی جریان آرام و آشفته و انتقال حرارت نانوسیال روی یک پله پسرور 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 حرارت می‌گردد. همچنین با افزایش کسر حجمی نانو ذرات و عدد رینولدز، افت فشار نیز در مقایسه با سیال پایه افزایش می‌یابد. ناث و کریشنان [۱۷] نرخ انتقال جرم و انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال مس با پایه آب درون یک پله پسرور را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها تأثیر نسبت نیروهای شناوری ناشی از انتقال جرم به انتقال حرارت، عدد پرانتل و کسر حجمی نانو ذرات را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که مقادیر متفاوت نسبت نیروهای شناوری منجر به شکل‌گیری الگوهای متفاوت در جریان‌های چرخشی در نزدیکی پله پسرور می‌گردد. همچنین دریافته‌اند که افزایش کسر حجمی نانو ذرات موجب افزایش عدد ناسلت و طول اتصال مجدد جریان می‌شود.

همچنین لازم به ذکر است که مطالعات محدودی در مورد استفاده همزمان از هر دو روش غیرفعال بافل و نانوسیال بر میدان جریان و افزایش انتقال حرارت درون یک پله پسرور انجام شده‌است [۱۹-۲۲]. محمد و همکاران [۱۹، ۲۰]، تأثیر پیکربندی هندسی بافل بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت جریان نانوسیال در یک پله پسرور و یک پله پیشرو را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها همچنین تأثیر عدد رینولدز، کسر حجمی نانو ذرات، موقعیت بافل نسبت به پله و همچنین ارتفاع و عرض بافل را نیز بررسی کردند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که موقعیت نصب بافل نسبت به پله، تأثیر قابل توجهی بر افزایش انتقال حرارت دارد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که تأثیر عرض بافل بر افزایش انتقال حرارت ناچیز می‌باشد. علاوه بر این، آن‌ها تأثیر مکان نصب بافل بر دیواره بالا و پایین کانال



شکل ۱. نمایی شماتیک از دامنه محاسباتی

Fig. 1. Schematic view of the computational domain

پسرو نشده‌است. بر اساس مطالعه دیگر محققان و با توجه به عدم بررسی چیدمان و پارامترهای هندسی بافل‌ها و همچنین عدم بررسی شاخص ارزیابی عملکرد جهت تحلیل الگوی جریان و انتقال حرارت در شرایط مختلف جریان، نوآوری مطالعه حاضر بررسی جابجایی اجباری نانوسیال درون یک پله پسرو و ارزیابی همزمان تأثیر پارامترهای مؤثر بر افزایش انتقال حرارت از قبیل عدد رینولدز، کسر حجمی نانوذرات، پارامترهای هندسی بافل و همچنین بررسی آرایش بافل‌های چندگانه در تغییر الگوی جریان و تأثیر آن بر افزایش نرخ انتقال حرارت می‌باشد. همچنین به منظور جمع‌بندی و ساده‌شدن استفاده از نتایج این تحقیق، یک رابطه برازش برای عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز، کسر حجمی نانوذرات، تعداد، ارتفاع و عرض بافل‌ها ارائه می‌گردد.

## ۲- هندسه مسئله

نمای شماتیکی از هندسه دوبعدی و دامنه محاسباتی مسئله مورد نظر، ابعاد به کاررفته و مکان نصب بافل در شکل ۱ نشان داده شده‌است. نسبت انبساط<sup>۱</sup>، که نسبت سطح مقطع ورودی به سطح مقطع بعد از پله است، برابر ۲ و ارتفاع پله برابر  $H=1\text{cm}$  می‌باشد. به منظور ایجاد شرایط توسعه‌یافتگی جریان در ورودی و خروجی، طول ناحیه محاسباتی از ورودی کانال تا لبه پله و از لبه پله تا خروجی کانال به ترتیب  $20H$  و  $50H$  می‌باشد. همچنین بافل در فاصله  $H$  بعد از لبه پله بر روی دیواره بالا نصب شده‌است. دیواره پایین به طول  $50H$  تحت شار حرارتی یکنواخت و همچنین دیواره بالا عایق در نظر

را بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از آن است که با نصب بافل بر روی دیواره بالا کانال، ضریب انتقال حرارت به بیشینه مقدار خود می‌رسد. همچنین دریافتند که عدد ناسلت و توزیع سرعت با افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رینولدز افزایش می‌یابد. هشتمی و همکاران [۲۲]، تأثیر پیکربندی بافل شکافدار بر افزایش انتقال حرارت، افت فشار و الگوی جریان نانوسیال در یک کانال با پله پسرو در محدوده جریان آرام را به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که استفاده از نانوذرات  $\text{SiO}_2$  در مقایسه با سایر نانوذرات ( $\text{ZnO}$  و  $\text{CuO}$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) موجب بهبود انتقال حرارت می‌شود. همچنین آن‌ها نشان دادند که استفاده از بافل‌های شکافدار در مقایسه با بافل‌های معمول، سبب کاهش افت فشار می‌گردد. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از بافل مایل در مقایسه با بافل عمودی سبب تغییرات قابل توجه در الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت می‌شود. همچنین آن‌ها نشان دادند که به ازای استفاده از بافل مایل و نانوسیال، افزایش عدد ناسلت برای اعداد رینولدز ۲۰۰ و ۴۰۰ به ترتیب ۱۹۱٪ و ۲۵۵٪ می‌باشد.

با توجه به کاربردهای گسترده کانال‌های بافل‌دار در تأسیسات حرارتی، الزاماً یک طرح خاص جوابگوی همه مسائل نخواهد بود، لذا لازم است برای هر مسئله به صورت مستقل تحلیل جریان و انتقال حرارت صورت گیرد. اکثر مطالعات گذشته، تأثیر پارامترهایی همچون عدد رینولدز، نوع نانوسیال، کسر حجمی نانوذرات و نصب بافل بر میدان جریان و انتقال حرارت در کانال با پله پسرو را بررسی کرده‌اند و توجه‌ای به هندسه، چیدمان و مشخصات هندسی بافل‌ها در افزایش انتقال حرارت و افت فشار جریان نانوسیال درون یک پله

1 Expansion ratio (ER)

جدول ۱. خواص ترموفیزیکی

Table 1. Thermophysical properties.

پارامتر	آب	مس
چگالی ( $\rho$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	۹۹۷٫۱	۸۹۳۳
ضریب هدایت حرارتی ( $K$ ) ( $\text{W/m K}$ )	۰٫۶۱۳	۴۰۰
ظرفیت گرمای ویژه ( $c_p$ ) ( $\text{J/kg K}$ )	۴۱۷۹	۳۸۵
ویسکوزیته دینامیکی ( $\mu$ ) ( $\text{kg/m s}$ )	۰٫۰۰۱	-

جدول ۲. شرایط مرزی

Table 2. Boundary conditions.

مرز	دما	جریان
ورودی کانال	$T_0 = 293 \text{ K}$	$u = u_0, v = 0$
خروجی کانال	$\partial(T - T_m) / \partial x = 0$	$\partial u / \partial x = \partial v / \partial x = 0$
بافل	$q'' = 0$	$u = 0, v = 0$
دیواره شار ثابت	$q'' = 5000 \text{ W/m}^2$	$u = 0, v = 0$
دیواره‌های آدیاباتیک	$q'' = 0$	$u = 0, v = 0$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

پیوستگی:

(۱)

گرفته شده‌اند. مقادیر  $h_b$  و  $w_b$  نیز به عنوان پارامترهایی جهت تعیین مشخصات هندسی بافل می‌باشند. همچنین لازم به ذکر است که با توجه به اینکه در این تحقیق محدوده عدد رینولدز براساس ارتفاع پله برابر با  $Re \leq 400$  می‌باشد، جریان دوبعدی در نظر گرفته شده و عمق کانال تأثیری در نتایج ندارد [۲، ۱]. همچنین فرض دوبعدی بودن رفتار جریان در محدود جریان آرام، یک فرض معمول در شبیه‌سازی جریان نانوسیال درون پله پسر می‌باشد [۲۰-۱۲].

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

(۲)

نانوسیال مس با پایه آب به عنوان سیال عامل با سرعت ورودی مشخص از سمت چپ وارد کانال می‌شود و از سمت دیگر کانال خارج می‌شود. خواص ترمودینامیکی آب و نانوذرات مس در جدول ۱ ارائه شده‌است.

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

(۳)

انرژی:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{K_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

(۴)

۳- معادلات حاکم

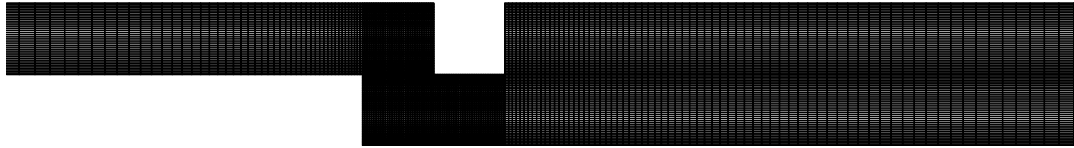
۳-۱- معادلات میدان جریان

همان‌گونه که از روابط (۱) تا (۴) مشخص است، به منظور حل معادلات حاکم، نیاز به تعیین خواص ترمودینامیکی نانوسیال می‌باشد.

معادلات حاکم بر جریان نانوسیال با فرض یک محیط پیوسته با تعادل گرمایی بین سیال پایه و ذرات جامد، تراکم‌ناپذیر، دوبعدی و آرام، شامل پیوستگی، مومنتم و بقای انرژی می‌باشند که به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۰-۸]:

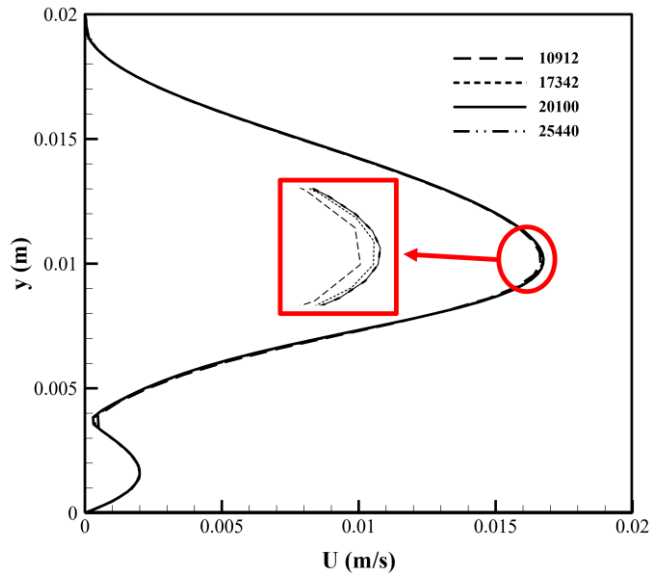
۳-۲- روابط مربوط به خواص نانوسیال

خواص ترمودینامیکی نانوسیال به کمک خواص سیال پایه (آب)



شکل ۲. نمایی از بخشی از شبکه محاسباتی

Fig. 2. The view of part of domain grid distribution



شکل ۳. توزیع سرعت در  $x=0.005$  m پس از پله و در امتداد ارتفاع کانال برای شبکه‌های مختلف ( $\phi=0.02$ ,  $Re=200$ ,  $h_b=H$ ,  $w_b=H$ )

Fig. 3. Grid independence test for velocity profile at  $x=0.005$  m right behind of step ( $Re=200$ ,  $\phi=0.02$ ,  $h_b=H$ ,  $w_b=H$ )

ضریب هدایت حرارتی نانوسیال براساس رابطه ماکسول-گارتس<sup>۱</sup> برای نانوذرات کروی در محدوده رژیم جریان آرام مطابق رابطه (۸) تعیین می‌گردد [۲۳]:

$$K_{nf} = K_f \left[ \frac{(K_p + 2K_f) - 2\phi(K_f - K_p)}{(K_p + 2K_f) + \phi(K_f - K_p)} \right] \quad (۸)$$

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

### ۳-۳- شرایط مرزی

نانوسیال مس با پایه آب به عنوان سیال عامل و با سرعت

و نانوذرات (مس) محاسبه می‌شوند. چگالی و ظرفیت گرمای ویژه نانوسیال به صورت زیر تعیین می‌گردد [۹-۱۶]:

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (۵)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p \quad (۶)$$

همچنین ویسکوزیته نانوسیال با غلظت کمتر از ۵ درصد براساس رابطه بریکمن به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (۷)$$

1 Maxwell-Garnetts (MG)

جدول ۳. مقایسه طول اتصال مجدد ( $X_r$ ) برای  $ER = 2$  و  $Re = 100$ .

Table 3. Comparison of recirculation length ( $X_r$ ) for  $ER = 2$  and  $Re = 100$ .

درصد اختلاف (%)	$X_r/H$	روش تحقیق	تحقیق
-	۴,۹۹	عددی	تحقیق حاضر
۰,۴	۴,۹۷	عددی	آچاربا و همکاران [۳]
۰,۲	۴,۹۸	عددی	کومار و ونگادسان [۷]
۰,۲-۲,۵	۴,۹۸-۵,۱۲	عددی	سلیمفندیگیل و اوزتوپ [۱۴]
۰,۵	۵,۰۲	عددی	چودحاری و وولف [۲۵]
۴,۶	۴,۷۷	عددی	الرفایی و همکاران [۲۶]
۰	۴,۹۹	عددی	کومار و دهیمن [۲۷]
۱,۶	۴,۹۱	تجربی	لین و همکاران [۲۸]

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 به ذکر است که کلیه محاسبات با استفاده از پردازشگر هفت هسته‌ای ۲ گیگاهرتز اینتل انجام شده و زمان محاسبات حدود ۲ الی ۴ ساعت می‌باشد.

#### ۵- شبکه محاسباتی و استقلال حل عددی از شبکه

شبکه‌بندی ناحیه محاسباتی توسط نرم افزار تجاری گمبیت ۲,۴<sup>۴</sup> به صورت سازمان‌یافته، غیریکنواخت و مستطیلی ایجاد شده‌است. به منظور افزایش دقت محاسباتی در مکان‌های نزدیک به دیواره‌ها، پله و بافل که گرادیان‌های شدید وجود دارد، از شبکه‌بندی با تراکم بیشتری استفاده شده‌است. ضمناً ناحیه محاسباتی به نواحی مختلفی تقسیم‌بندی شده‌است تا کنترل بهتری بر روی شبکه تولیدی صورت گیرد. در شکل (۲) نمایی از شبکه محاسباتی در اطراف پله و نزدیک بافل نشان داده شده‌است. همچنین به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی، توزیع سرعت در موقعیت طولی ۰,۰۰۵ متر پس از پله در امتداد ارتفاع کانال به‌عنوان پارامتر استقلال از شبکه انتخاب شده‌است. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، از چهار شبکه‌بندی مختلف در عدد رینولدز ۲۰۰ و کسر حجمی ۰,۰۲ برای هندسه با یک بافل استفاده شده است. با توجه به شکل ۳ واضح است که با تغییر تعداد شبکه از ۲۰۱۰۰ به ۲۵۴۴۰ تفاوت اندکی در جواب‌ها مشاهده می‌شود، بنابراین شبکه با تعداد ۲۰۱۰۰ به لحاظ

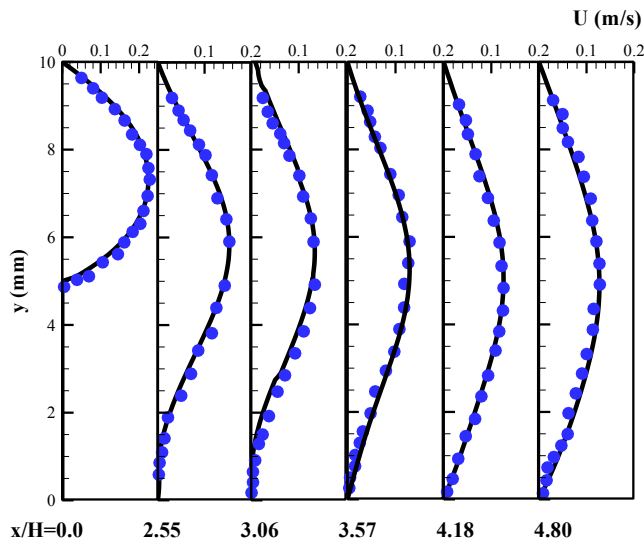
یکنواخت و دمای مشخص در ورودی در نظر گرفته شده‌است. همچنین شرط توسعه‌یافتگی در مرز خروجی در نظر گرفته شده‌است. بافل به دیواره بالا متصل شده‌است. دیواره‌های بالا و پایین به ترتیب به‌صورت آدیاباتیک و شار حرارتی ثابت و همه مرزهای جامد دارای شرط عدم لغزش می‌باشند. شرایط مرزی دما و سرعت، در جدول (۲) ارائه شده‌است.

#### ۴- روند حل عددی

در این مطالعه، به منظور حل عددی معادلات حاکم، از کد متن‌باز این‌فوم ۴<sup>۱</sup> استفاده شده‌است. معادلات حاکم در این فوم بر اساس روش حجم محدود گسسته‌سازی شده‌است. معادلات جریان سیال در حالت پایا و توسط حل‌کننده بر پایه فشار به صورت ضمنی شبیه‌سازی شده‌اند. جهت گسسته‌سازی ترم فشار و سایر ترم‌های معادلات به ترتیب، روش استاندارد و تقریب مرتبه دوم، ترم‌های شامل گرادیان به روش گرادیان حداقل مربعات<sup>۲</sup> گسسته شده و همچنین برای حل همزمان میدان فشار و سرعت، از الگوریتم سیمپل<sup>۳</sup> استفاده شده‌است. به منظور تشخیص همگرایی، معیار کاهش باقیمانده‌های تراز شده  $10^{-8}$  می‌باشد. علاوه بر آن، کاهش خالص شار جرمی به میزان کمتر از  $10^{-5}$  شار کل و رصد کردن تغییرات کمیت‌های مهم جریان در نواحی حساس به عنوان معیارهای همگرایی لحاظ شده‌اند. همچنین در شبیه‌سازی‌های پژوهش حاضر نیز ضرایب زیرتخفیف

1 OpenFoam4.0  
2 Least-squares gradient  
3 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-linked Equations)

4 Gambit2.4



شکل ۴. مقایسه توزیع سرعت با نتایج تجربی آرمالی و همکاران [۱] به ازای  $Re=100$  در مقاطع مختلف  $x/H$  (تحقیق کنونی (○)، نتایج تجربی (●))

Fig. 4. Comparison of the velocity profiles with experimental results of Armaly et al [1] for  $Re=100$  at different  $x/H$ -locations (Present work (○), Experimental (●))

$$Re = \frac{\rho_{nf} u_0 H}{\mu_{nf}} \quad (11)$$

در این رابطه  $u_0$  سرعت جریان در ورودی و  $H$  ارتفاع پله می‌باشد. همچنین افت فشار از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

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

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

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

$$\eta = \frac{(Nu_m / Nu_{m0})}{(\Delta P / \Delta P_0)^{1/3}} \quad (13)$$

در این رابطه،  $Nu_m$  و  $\Delta P$  به ترتیب عدد ناسلت متوسط و افت فشار جریان در کانال با پله پسرو در حضور بافل می‌باشد. همچنین،  $Nu_{m0}$  و  $\Delta P_0$  نیز به ترتیب عدد ناسلت متوسط و افت فشار جریان در کانال با پله پسرو بدون بافل می‌باشد.

داشتن دقت و زمان محاسباتی مناسب، به‌عنوان شبکه مناسب انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که استقلال حل عددی از شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است.

## ۶- تحلیل داده‌ها

به منظور ارزیابی تأثیر نصب بافل و ابعاد آن بر جریان نانوسیال و انتقال حرارت، از عدد ناسلت محلی روی دیواره شار ثابت و عدد ناسلت متوسط به ترتیب مطابق روابط (۹) و (۱۰) بهره گرفته شده‌است [۶]:

$$Nu_x = \frac{h_x H}{K_{nf}} = \frac{H}{K_{nf}} \left( \frac{q''}{T_{wall,x} - T_{ave}} \right) \quad (9)$$

$$Nu_m = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (10)$$

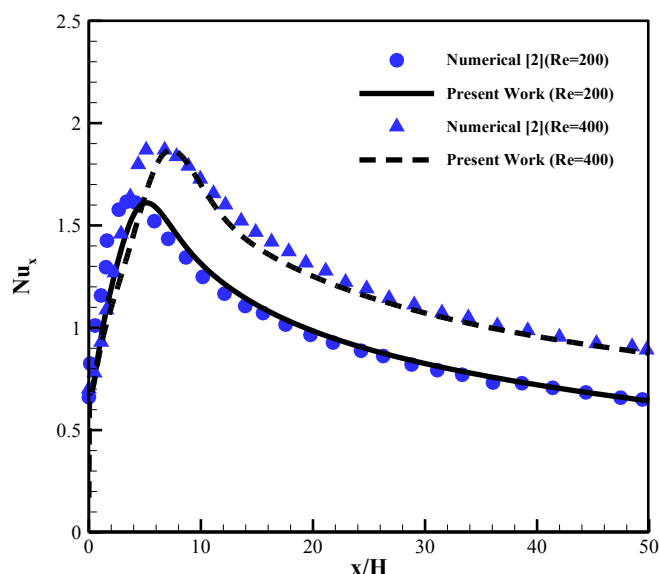
در رابطه (۹)،  $q''$  شار حرارتی ثابت منتقل شده از سطح دیواره پایین به سیال درون کانال،  $T_{wall,x}$  دمای موضعی دیواره پایین و  $T_{ave}$  دمای متوسط سیال ورودی و خروجی می‌باشد.

همچنین عدد رینولدز بر اساس ارتفاع پله به صورت زیر تعریف می‌گردد [۷]:

جدول ۴. مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره پایین ( $Nu_m$ ) برای  $ER = 2$  و  $Re = 200$ .

Table 4. Comparison of average Nusselt number on the bottom wall ( $Nu_m$ ) for  $ER = 2$  and  $Re = 200$ .

درصد اختلاف (%)	$Nu_m$		$\phi$
	ابو نادا [۲۳]	تحقیق حاضر	
۰٫۴۷	۲٫۱۱	۲٫۱۰	۰
۱٫۰۸	۲٫۷۹	۲٫۸۲	۰٫۰۱
۰٫۲۷	۳٫۶۴	۳٫۶۵	۰٫۰۲



شکل ۵. مقایسه توزیع عدد ناسلت به ازای اعداد رینولدز متفاوت

Fig. 5. Comparison of the Nusselt number distribution for different Reynolds numbers

ناحیه محاسباتی این هندسه از ورودی کانال تا لبه پله و از لبه پله تا خروجی کانال به ترتیب ۲۰ و ۵۰ سانتیمتر، ارتفاع کانال ۱٫۰۱ سانتیمتر و همچنین نسبت انبساط  $ER=1.94$  می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج عددی مطالعه حاضر و نتایج تجربی آن‌ها با دقت قابل قبولی مطابقت دارند.

همچنین به منظور صحت‌سنجی نتایج اسکالر، توزیع عدد ناسلت روی دیواره پایین (دیواره شار ثابت) برای جریان روی پله پسرو با نتایج عددی سالدانا و همکاران [۲] به ازای اعداد رینولدز ۲۰۰ و ۴۰۰ در شکل ۵ مقایسه شده‌است. همچنین طول ناحیه محاسباتی برای این هندسه از ورودی کانال تا لبه پله و از لبه پله تا خروجی کانال به ترتیب برابر ۲ و ۵۰ سانتیمتر، ارتفاع پله ۱ سانتیمتر و همچنین نسبت انبساط  $ER=2$  می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج

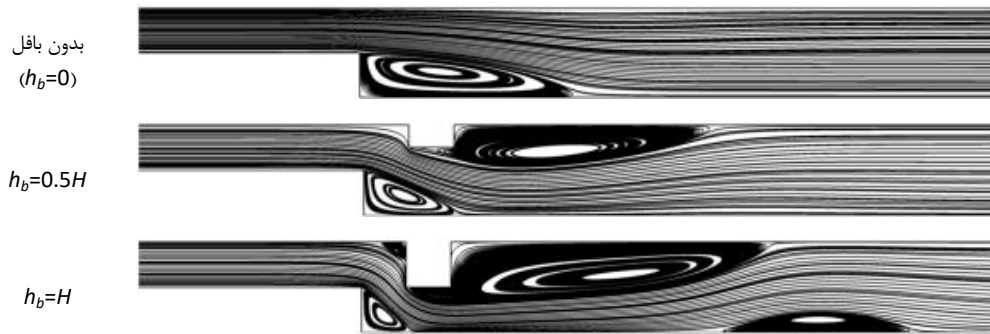
## ۷- بحث و بررسی نتایج

### ۷-۱- اعتبارسنجی نتایج

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج طول اتصال مجدد ( $X_p$ ) حاصل تحلیل عددی حاضر با نتایج تجربی و عددی در جدول ۳ مقایسه شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج تحلیل عددی تحقیق حاضر با داده‌های تجربی و عددی مقایسه شده و با بیشینه خطای ۴۶ درصد نسبت به نتایج محققین دیگر از تطابق مطلوبی برخوردار است.

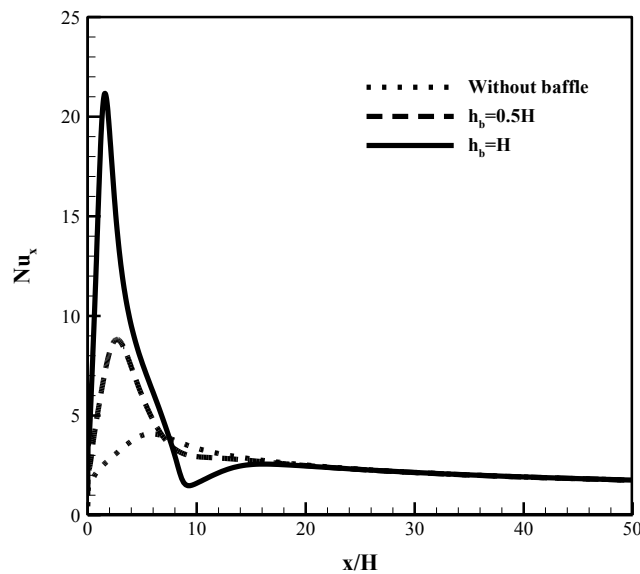
همچنین جهت بررسی صحت نتایج عددی جریان سیال، توزیع سرعت به ازای عدد رینولدز ۱۰۰، در مقاطع مختلف پس از پله، با نتایج تجربی آرمانی و همکاران [۱] برای جریان سیال آب درون پله پسرو در شکل ۴ مقایسه شده‌است. لازم به ذکر است که طول





شکل ۶. خطوط جریان ( $\phi=0.02, Re=200, w_b=H$ )

Fig. 6. Streamlines ( $\phi=0.02, Re=200, w_b=H$ )



شکل ۷. توزیع عدد ناسلت روی دیواره شار ثابت ( $\phi=0.02, Re=200, w_b=H$ )

Fig. 7. Longitudinal evolution of the Nusselt number on the heated wall ( $\phi=0.02, Re=200, w_b=H$ )

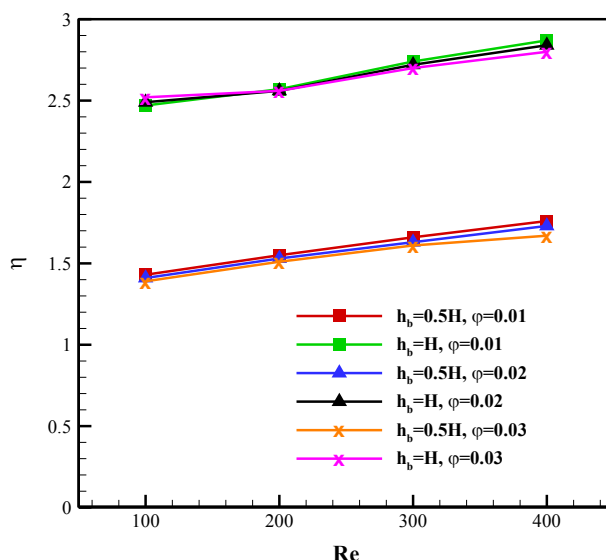
و به ازای کسر حجمی  $0.02$  برای ارتفاع مختلف بافل در شکل ۶ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش ارتفاع بافل، تأثیر حضور بافل بر الگوی جریان سیال و انحراف آن بیشتر است. همچنین نتایج حاکی از آن است که طول اتصال مجدد پس از پله پسرو نیز با افزایش ارتفاع بافل، کاهش می یابد. همچنین، به منظور ارزیابی ارتفاع بافل بر افزایش انتقال حرارت، توزیع طولی عدد ناسلت بر روی دیواره شار ثابت در شکل ۷ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، عدد ناسلت در نواحی دارای گردابه بعد از پله، بیشینه است و با نزدیک شدن به خروجی کانال، که تأثیر گردابه ها کاهش یافته است، مقدار آن کاهش یافته و به توسعه یافتگی می رسد. مشخص است که با تغییر اندازه بافل، توزیع عدد ناسلت و بویژه مقدار

از تطابق مطلوبی برخوردار می باشد.

همچنین جهت حصول اطمینان از صحت نتایج برای نانوسیال، نتایج حاصل از تحلیل عددی عدد ناسلت متوسط برای جریان نانوسیال مس با پایه آب روی یک پله پسرو با نتایج عددی ابو نادا [۲۳] به ازای عدد رینولدز  $200$  در جدول ۴ مقایسه شده است. طول دامنه مطالعاتی آن ها برابر با  $30H$  و نسبت انبساط آن برابر با  $ER=2$  می باشد. براساس جدول ۴، نتایج تحلیل عددی تحقیق حاضر، با بیشینه خطای  $1.08\%$ ، تطابق مطلوبی با نتایج ابو نادا [۲۳] دارد.

## ۲-۷- تأثیر ارتفاع بافل

خطوط جریان نانوسیال در اطراف پله و بافل در عدد رینولدز  $200$



شکل ۸. شاخص ارزیابی عملکرد بر حسب ارتفاع بافل ( $w_b=H$ )

Fig. 8. Performance Evaluation Index based on the height of baffle ( $w_b=H$ )



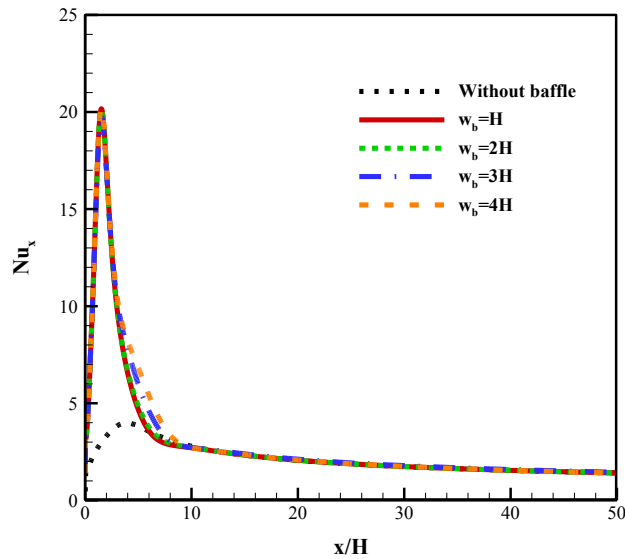
شکل ۹. خطوط جریان ( $\phi=0.03, Re=100, h_b=H$ )

Fig. 9. Streamlines ( $\phi=0.03, Re=100, h_b=H$ )

۲۱/۱۷ می‌باشد. از طرف دیگر مکان مقدار بیشینه عدد ناسلت با تغییر ارتفاع بافل، به دلیل وجود ناحیه گردابی طول اتصال مجدد، کمی متفاوت می‌باشد. به عبارت دیگر، با افزایش ارتفاع بافل، اندازه طول اتصال مجدد کاهش یافته و مقدار بیشینه عدد ناسلت نیز به ابتدای دیواره شار ثابت نزدیک‌تر می‌شود.

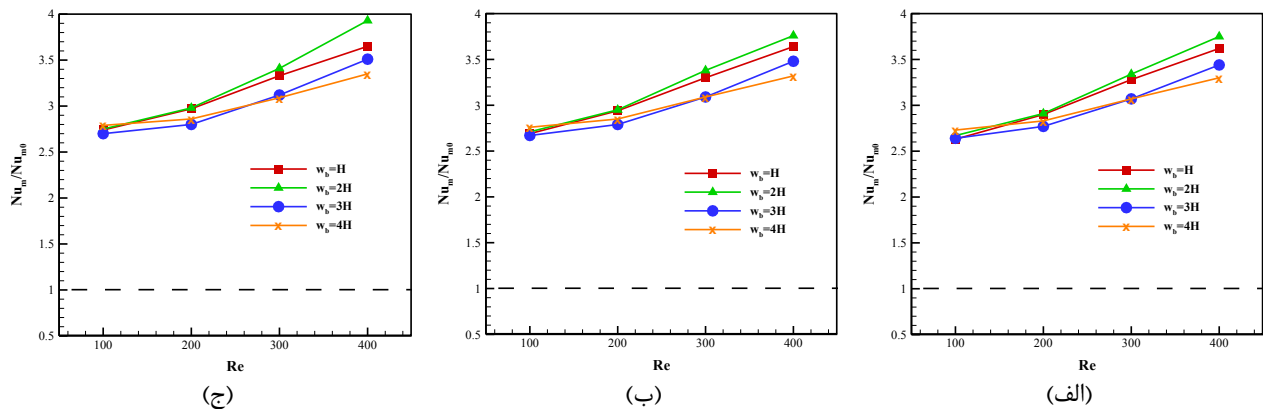
از سوی دیگر، حضور بافل به عنوان مانعی در مقابل جریان نانوسیال، همواره باعث افزایش افت فشار می‌گردد. به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار ناشی از حضور بافل، شاخص ارزیابی عملکرد برای اعداد رینولدز و مقادیر مختلف کسر

بیشینه آن به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. نتایج حاکی از آن است که عدد ناسلت از ابتدا تا نقطه انتهایی طول اتصال مجدد در حال افزایش است، زیرا در این ناحیه لایه مرزی توسط تداخل گردابه تشکیل شده در این ناحیه حذف شده است. همچنین، مقدار بیشینه عدد ناسلت نیز در طول اتصال مجدد (ناحیه‌ای که لایه مرزی در حال تشکیل دوباره است) قرار دارد. همانگونه که مشخص است عدد ناسلت با افزایش ارتفاع بافل، به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد، به طوری که مقدار بیشینه عدد ناسلت در حالت بدون بافل و با وجود بافل با ارتفاع  $h_b=0.5H$  و  $h_b=H$  به ترتیب حدود ۴,۰۸ و ۸,۸۲ و



شکل ۱۰. توزیع عدد ناسلت روی دیواره شار ثابت ( $\phi=0.03, Re=100, h_b=H$ )

Fig. 10. Longitudinal evolution of the Nusselt number on the heated wall ( $\phi=0.03, Re=100, h_b=H$ )



شکل ۱۱. نسبت عدد ناسلت متوسط بر حسب عرض بافل در کسر حجمی مختلف ( $h_b=H$ ) (الف)  $\phi=0.01$  (ب)  $\phi=0.02$  (ج)  $\phi=0.03$

Fig. 11. Ratio of average Nusselt number based on the width of baffle for various the nanoparticles volume fraction ( $h_b=H$ ), (a)  $\phi=0.01$ , (b)  $\phi=0.02$ , (c)  $\phi=0.03$

دیگر، انحراف سیال به دلیل وجود بافل در رینولدزهای بالاتر، باعث تولید گردابه‌های قوی‌تر و حجیم‌تر در مجاورت بافل و دیواره شار ثابت می‌شود. به‌طور واضح مشخص است که حضور بافل همچون مانعی در مقابل جریان در شرایطی که مومنتم جریان ورودی بیشتر باشد، مؤثرتر واقع می‌شود و در مقادیر بالاتر مومنتم، دارای قدرت و حجم گردابه تولیدشده بیشتری است.

### ۳-۷- تأثیر عرض بافل

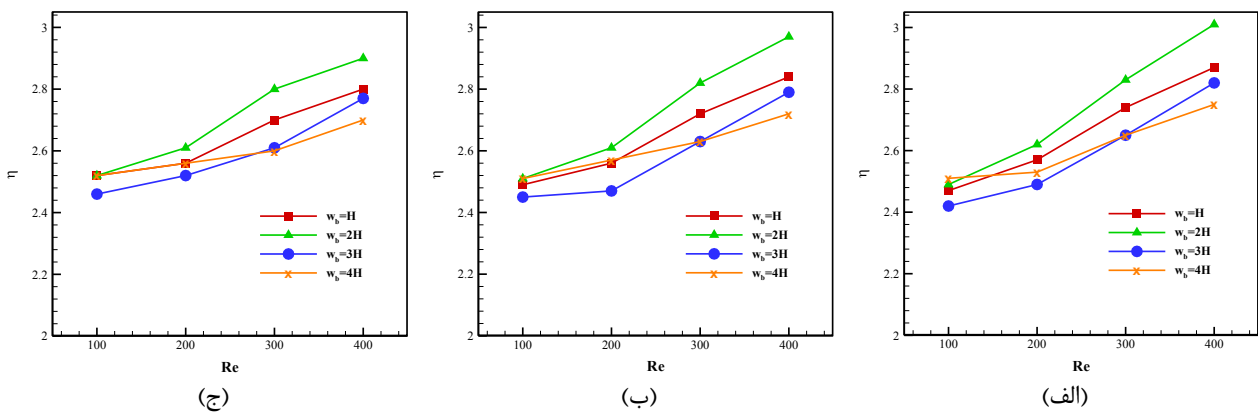
در این بخش، تأثیر عرض بافل بر الگوی جریان و افزایش انتقال

حجمی نانوذرات، برای دو بافل با ارتفاع  $h_b=H$  و  $h_b=0.5H$  شکل مشخص ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، در حضور بافل، نسبت نرخ افزایش انتقال حرارت به افزایش افت فشار در تمامی حالات بیشتر بوده و شاخص ارزیابی عملکرد همواره بزرگ‌تر از ۱ است. از طرف دیگر، همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود در یک عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات ثابت، با افزایش ارتفاع بافل، شاخص ارزیابی عملکرد به‌طور چشمگیری افزایش یافته و حدود ۱.۵ الی ۲ برابر می‌شود. با توجه به شکل ۸، با افزایش عدد رینولدز نیز شاخص ارزیابی عملکرد همواره افزایش می‌یابد. به عبارت

امر را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که مقدار بیشینه عدد ناسلت کاملاً به گردابه پس از پله پسرو (طول اتصال مجدد) بستگی دارد که با ثابت ماندن ارتفاع بافل ( $h_b=H$ ) تقریباً ثابت است. همچنین، با افزایش  $W_b$ ، توزیع عدد ناسلت از مقدار بیشینه با شیب کمتری به مقدار توسعه‌یافتگی، که تأثیر گردابه‌های ناشی از پله و بافل کاهش یافته‌است، رسیده و می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با افزایش  $W_b$ ، توزیع عدد ناسلت در نزدیک بافل افزایش اندکی می‌یابد.

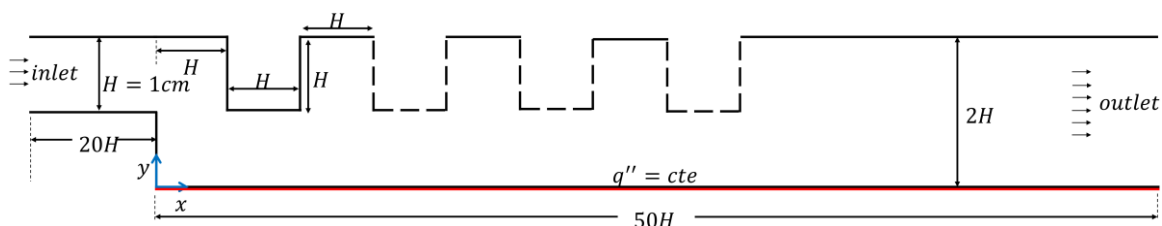
با توجه به اینکه عرض بافل جز پارامترهای طراحی بافل و تأثیرگذار بر جریان و انتقال حرارت می‌باشد، لازم است تأثیر آن بر افزایش انتقال حرارت نیز بررسی گردد. به عنوان معیار مناسبی از افزایش انتقال حرارت، نسبت «عدد ناسلت متوسط با حضور بافل» به «عدد ناسلت متوسط بدون بافل» بر حسب عرض بافل برای اعداد

حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد. خطوط جریان حاصل از تغییر عرض بافل در عدد رینولدز ۱۰۰ و کسر حجمی نانوذرات ۰٫۰۳ در شکل ۹ نشان داده شده‌است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، با تغییر اندازه عرض بافل، اندازه گردابه‌های ناشی از حضور بافل نیز تغییر می‌کند. لازم به ذکر است که با تغییر عرض بافل، مکان و اندازه گردابه پس از پله (قبل از بافل) تقریباً یکسان می‌ماند اما گردابه ثانویه (پس از بافل) کاملاً متغیر است. به منظور ارزیابی افزایش انتقال حرارت به ازای مقادیر مختلف عرض بافل، توزیع طولی عدد ناسلت روی دیواره شار ثابت در عدد رینولدز ۱۰۰ و کسر حجمی نانوذرات ۰٫۰۳ در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه عدد ناسلت و مقدار توسعه‌یافتگی به ازای تمامی مقادیر عرض بافل تقریباً یکسان می‌باشد. دلیل این



شکل ۱۲. شاخص ارزیابی عملکرد بر حسب عرض بافل در کسر حجمی مختلف ( $h_b=H$ ) (الف)  $\phi=0.01$  (ب)  $\phi=0.02$  (ج)  $\phi=0.03$

Fig. 12. Performance Evaluation Index based on the width of baffle for various the nanoparticles volume fraction ( $h_b=H$ ), (a)  $\phi=0.01$ , (b)  $\phi=0.02$ , (c)  $\phi=0.03$



شکل ۱۳. نمایی شماتیک از دامنه محاسباتی برای تعداد بافل مختلف

Fig. 13. Schematic view of the computational domain for various numbers of baffles

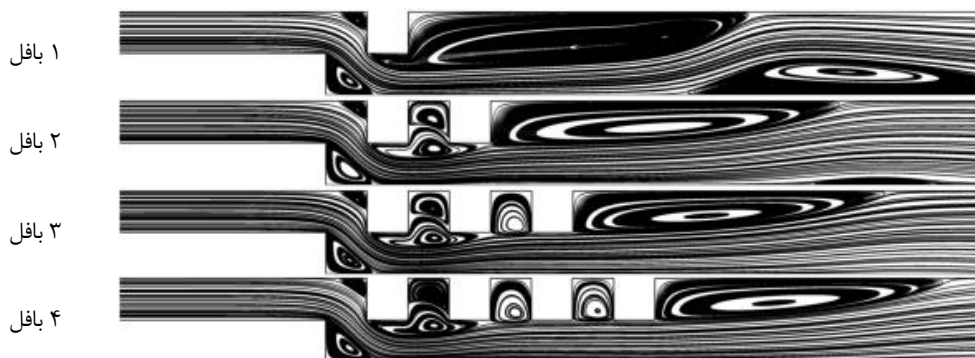
افزایش کسر حجمی مقدار عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد، اما افت فشار ناشی از اضافه‌شدن نانو ذرات نیز افزایش می‌یابد و در نهایت منجر به کاهش شاخص ارزیابی عملکرد می‌شود. بر اساس این شکل، مقدار بیشینه شاخص ارزیابی عملکرد به ازای عدد رینولدز ۴۰۰ و  $w_b=2H$  در کسر حجمی ۰٫۰۱، ۰٫۰۲ و ۰٫۰۳ به ترتیب حدود ۳٫۰۱، ۲٫۹۷ و ۲٫۹۰ می‌باشد.

#### ۴-۷- تأثیر تعداد بافل

در این بخش، تأثیر تعداد بافل بر میدان جریان و انتقال حرارت نانوسیال و همچنین تأثیر آن بر شاخص ارزیابی عملکرد مورد بررسی قرار گرفته‌شده‌است. نمای شماتیکی از هندسه دوبعدی و دامنه محاسباتی برای ارزیابی تعداد بافل در شکل ۱۳ نشان داده‌شده‌است. لازم به ذکر است که فاصله بین بافل‌ها مقدار ثابت  $H$  می‌باشد. خطوط جریان حاصل از افزایش تعداد بافل در عدد رینولدز ۳۰۰ و کسر حجمی نانو ذرات ۰٫۰۱ در شکل ۱۴ نشان داده‌شده‌است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، با تغییر تعداد بافل، تعداد و اندازه گردابه‌های تشکیل‌شده در اطراف بافل‌ها نیز تغییر می‌کند. لازم به ذکر است که با تغییر تعداد بافل‌ها، اندازه گردابه اولیه بعد از پله تقریباً یکسان می‌ماند اما اندازه گردابه‌های بعد از آخرین بافل کاملاً متغیر است. به منظور ارزیابی انتقال حرارت در آرایش‌های مختلف تعداد بافل، توزیع طولی عدد ناسلت روی دیواره شار ثابت در شکل ۱۵ نشان داده‌شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد بافل رفتار عدد ناسلت تا نقطه بیشینه کاملاً ثابت است، اما پس از

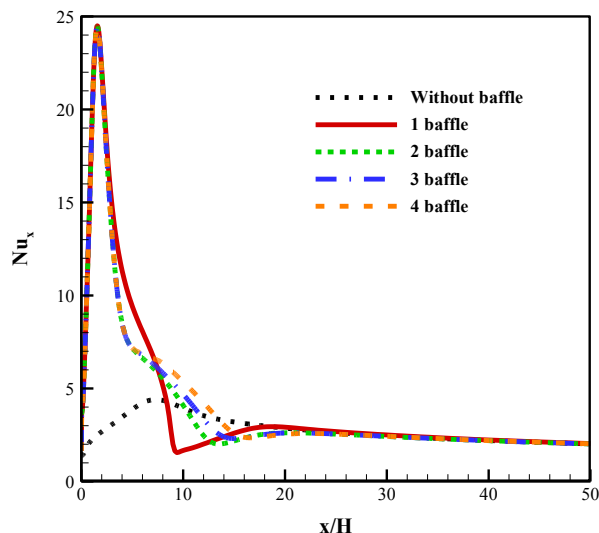
رینولدز و کسر حجمی مختلف در شکل ۱۱ نشان داده‌شده‌است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، در تمامی حالت‌ها مقدار افزایش عدد ناسلت متوسط برای عرض بافل  $w_b=2H$  نسبت به سایر مقادیر عرض بافل، دارای مقدار بیشینه می‌باشد. همچنین همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز در محدوده ۱۰۰ تا ۴۰۰، عدد ناسلت متوسط افزایش یافته‌است. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد با افزایش کسر حجمی نانو ذرات به سیال پایه، هدایت حرارتی سیال افزایش می‌یابد. به این ترتیب مشاهده می‌شود، نسبت عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانو ذرات افزایش می‌یابد، به طوری که مقدار بیشینه  $Nu_m/Nu_{m0}$  به ازای عدد رینولدز ۴۰۰ و  $w_b=2H$  در کسر حجمی ۰٫۰۱، ۰٫۰۲ و ۰٫۰۳ به ترتیب حدود ۳٫۷۵، ۳٫۷۶ و ۳٫۹۳ می‌باشد.

از سوی دیگر، با توجه به تغییر در الگوی جریان و اندازه گردابه‌های اطراف بافل با تغییر اندازه عرض بافل، افت فشار نیز دچار تغییر می‌شود. به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار ناشی از تغییر  $w_b$ ، شاخص ارزیابی عملکرد ( $\eta$ ) برای مقادیر مختلف عرض بافل در شکل ۱۲ نشان داده‌شده‌است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، مقادیر بیشینه شاخص ارزیابی عملکرد در  $w_b=2H$  رخ می‌دهد. همچنین براساس این شکل، شاخص ارزیابی عملکرد در تمامی شرایط مقداری بزرگتر از ۱ دارد که نشان‌دهنده مؤثر بودن حضور بافل بر راندمان حرارتی می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز و کاهش کسر حجمی، شاخص ارزیابی عملکرد افزایش یافته‌است. به عبارت دیگر، اگرچه با



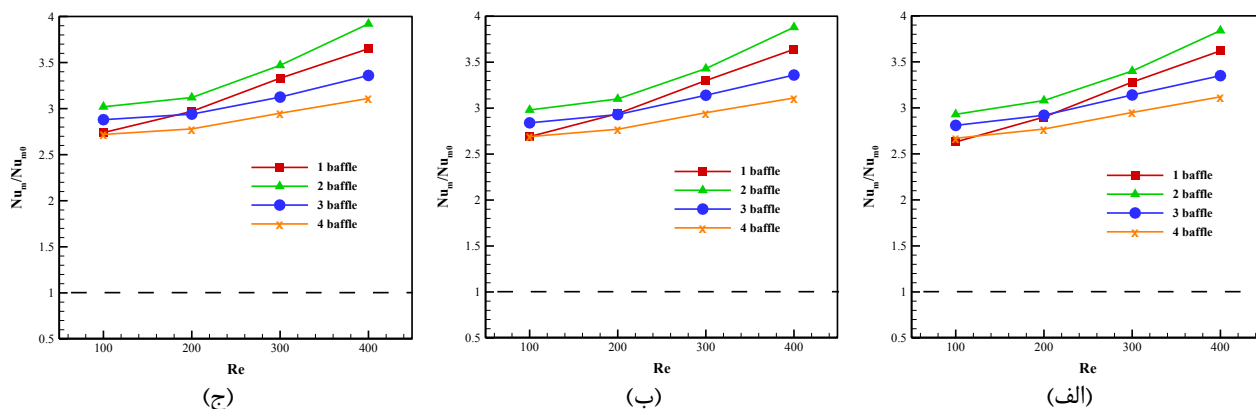
شکل ۱۴. خطوط جریان ( $\phi=0.01, Re=300, h_b=H, w_b=H$ )

Fig. 14. Streamlines ( $\phi=0.01, Re=300, h_b=H, w_b=H$ )



شکل ۱۵. توزیع عدد ناسلت روی دیواره شار ثابت ( $\phi=0.01, Re=300, h_b=H, w_b=H$ )

Fig. 15. Longitudinal evolution of the Nusselt number on the heated wall ( $\phi=0.01, Re=300, h_b=H, w_b=H$ )



شکل ۱۶. نسبت عدد ناسلت متوسط بر حسب تعداد بافل در کسر حجمی مختلف ( $h_b=H, w_b=H$ ) (الف)  $\phi=0.01$  (ب)  $\phi=0.02$  (ج)  $\phi=0.03$

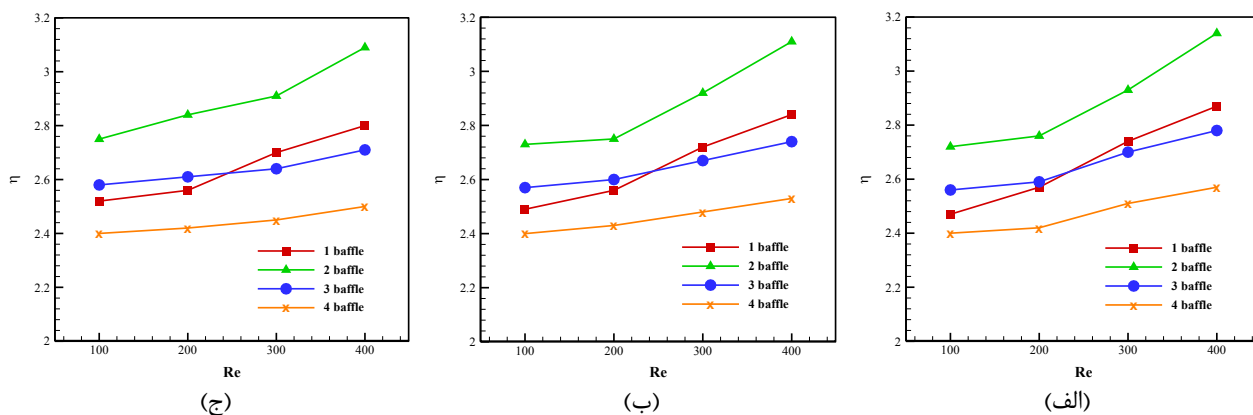
Fig. 16. Ratio of average Nusselt number based on the number of baffle for various the nanoparticles volume fraction

( $h_b=H, w_b=H$ ), (a)  $\phi=0.01$ , (b)  $\phi=0.02$ , (c)  $\phi=0.03$

که مشخص است عدد ناسلت توسعه‌یافتگی در تمامی حالات یکسان است.

همچنین در شکل ۱۶ نسبت «عدد ناسلت متوسط با حضور بافل» به «عدد ناسلت متوسط بدون بافل» بر حسب تعداد بافل برای اعداد رینولدز و کسر حجمی مختلف نشان داده شده است. بر اساس این شکل مشخص است که در تمامی حالت‌ها مقدار افزایش عدد ناسلت متوسط برای ۲ بافل نسبت به سایر تعداد بافل، بیشتر است. همچنین

آن، توزیع عدد ناسلت کاملاً وابسته به تعداد بافل‌ها متغیر می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با افزایش تعداد بافل، ناحیه گسترده‌تری از کانال پله پسرو، به ویژه در اطراف بافل‌ها، دارای سطح مقطع کمتر و سرعت بیشتر بوده که موجب افزایش ترم انتقال حرارت جابجایی نسبت به ترم انتقال حرارت هدایتی می‌باشد و سبب افزایش عدد ناسلت می‌گردد. با دور شدن از این ناحیه و نزدیک شدن به خروجی، جریان نانوسیال به توسعه‌یافتگی می‌رسد و همان‌گونه

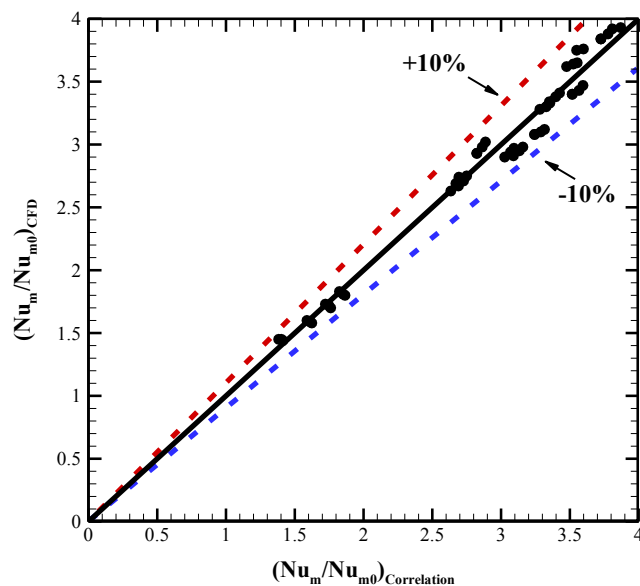


شکل ۱۷. شاخص ارزیابی عملکرد بر حسب تعداد بافل در کسر حجمی مختلف ( $h_b=H, w_b=H$ ) (الف  $\phi=0.01$  (ب  $\phi=0.02$  (ج  $\phi=0.03$ )

**Fig. 17. Performance Evaluation Index based on the number of baffle for various the nanoparticles volume fraction ( $h_b=H, w_b=H$ ), (a)  $\phi=0.01$ , (b)  $\phi=0.02$ , (c)  $\phi=0.03$**

افزایش تعداد آن بر راندمان حرارتی می‌باشد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، به ازای ۲ بافل، شاخص ارزیابی عملکرد در تمامی حالت‌ها دارای مقدار بیشینه است. بر اساس این شکل، مقدار بیشینه شاخص ارزیابی عملکرد به ازای ۲ بافل و عدد رینولدز ۴۰۰ در کسر حجمی ۰،۰۱، ۰،۰۲ و ۰،۰۳ به ترتیب حدود ۳،۱۴، ۳،۱۱ و ۳،۰۹ می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در حالت ۴ بافل، اگرچه مقادیر شاخص ارزیابی عملکرد در تمامی شرایط بزرگتر از ۲،۳ است، اما نسبت به سایر حالت‌ها تأثیر کمتری داشته و می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد بافل‌ها لزوماً موجب افزایش شاخص ارزیابی عملکرد و انتقال حرارت نمی‌شود. همچنین همان‌گونه که مشاهده می‌شود، استفاده از ۳ بافل نسبت به ۱ بافل نیز فقط در محدوده اعداد رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ مؤثر می‌باشد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد بافل، افت فشار نیز افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، براساس شکل‌های ۱۴ و ۱۶، استفاده از ۲ بافل نسبت به استفاده از ۳ و ۴ بافل موجب افزایش بیشتر عدد ناسلت می‌گردد. بنابراین، واضح است که برای تعداد بافل، یک مقدار بهینه وجود دارد که به ازای آن مقدار، تعامل بین ترم جابجایی جریان (به دلیل کاهش سطح مقطع) و ترم نفوذ جریان (به علت وجود جریان گردابی اطراف بافل)، موجب ایجاد حالت بهینه از نظر عدد ناسلت متوسط و شاخص ارزیابی عملکرد می‌گردد، که برای این هندسه با شرایط مشخص جریان، تعداد ۲ بافل نسبت به سایر تعداد بافل‌ها راندمان حرارتی بالاتری دارد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز،

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در حالت ۴ بافل، اگرچه انتقال حرارت نسبت به حالت بدون بافل افزایش می‌یابد، اما نسبت به حالت استفاده از ۱ بافل، نسبت عدد ناسلت کاهش چشمگیری یافته است. همچنین با افزایش تعداد بافل از ۱ بافل به ۳، عدد ناسلت متوسط در عدد رینولدز ۱۰۰ افزایش یافته‌است، اما در سایر اعداد رینولدز، عدد ناسلت نسبت به حالت ۱ بافل، مقدار کمتری دارد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت متوسط افزایش یافته‌است. همچنین براساس این شکل می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ۲ بافل نسبت به استفاده از ۳ و ۴ بافل موجب افزایش بیشتر عدد ناسلت می‌گردد. دلیل این امر را اینگونه می‌توان توجیه نمود که براساس شکل ۱۴، با افزایش تعداد بافل از ۱ به ۲ بافل، گرده‌ای در فضای بین ۲ بافل ایجاد می‌گردد. براساس این شکل، واضح است که با افزایش بیشتر تعداد بافل‌ها (برای ۳ و ۴ بافل)، جریان گردابی تقویت نمی‌گردد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که با افزایش بیشتر تعداد بافل‌ها، علی‌رغم کاهش سطح مقطع و افزایش ترم جابجایی جریان در ناحیه زیر بافل‌ها، جریان گردابی مؤثر بر افزایش ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت افزایش نمی‌یابد. به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار ناشی از افزایش تعداد بافل‌ها، نتایج حاصل از شاخص ارزیابی عملکرد برای مقادیر مختلف عرض بافل در شکل ۱۷ آمده‌است. براساس نتایج حاصل از این شکل، شاخص ارزیابی عملکرد در تمامی شرایط مقداری بزرگتر از ۱ دارد که نشان‌دهنده مؤثر بودن حضور بافل و



شکل ۱۸. نسبت عدد ناسلت متوسط حاصل از رابطه برازش و شبیه‌سازی عددی تحقیق کنونی با محدوده انحراف ۱۰٪

Fig. 18. The ratio of average Nusselt number from the correlation and numerical simulation of the present study within the tolerance range of 10%

تعداد بافل:  $N=1/2$

ارتفاع بافل:  $h_b=0.5H, H$

عرض بافل:  $w_b=H, 2H$

شاخص ارزیابی عملکرد افزایش یافته‌است. همچنین شاخص ارزیابی عملکرد، با افزایش کسر حجمی، به دلیل افزایش افت فشار ناشی از اضافه‌شدن نانو ذرات، کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۸ دقت رابطه برازش با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی تحقیق کنونی با محدوده انحراف ۱۰٪ نشان داده شده‌است. لازم به ذکر است که برای محاسبه رابطه برازش از ۶۴ داده تحقیق کنونی استفاده شده‌است. همچنین خطای متوسط بین نتایج حاصل از رابطه برازش (۱۴) و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی برابر ۲٫۸۸٪ می‌باشد. خطای متوسط مطابق رابطه (۱۵) محاسبه شده‌است.

$$\text{Average error} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\left( \frac{Nu_m}{Nu_{m0}} \right)_{CFD} - \left( \frac{Nu_m}{Nu_{m0}} \right)_{Correlation}}{\left( \frac{Nu_m}{Nu_{m0}} \right)_{CFD}} \right| \quad (15)$$

#### ۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر حضور بافل بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در محدوده رژیم آرام روی یک پله پسر، به صورت عددی بررسی شده‌است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بافل از جمله ارتفاع، عرض و تعداد

#### ۷-۵- رابطه برازش برای عدد ناسلت

به منظور جمع‌بندی و کمک به محاسبات مهندسی، یک رابطه برازش برای نسبت «عدد ناسلت متوسط با حضور بافل» به «عدد ناسلت متوسط بدون بافل» همچون تابعی از عدد رینولدز، کسر حجمی نانو ذرات، تعداد بافل، ارتفاع بافل و عرض بافل برای انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در محدوده رژیم آرام روی یک پله پسر در شرایط بهینه، از نظر چیدمان و هندسی بافل، مطابق رابطه (۱۴) محاسبه شده‌است:

$$\frac{Nu_m}{Nu_{m0}} = 1.15 \text{Re}^{0.2} \phi^{0.02} N^{0.19} \left( \frac{h_b}{H} \right)^{0.93} \left( \frac{w_b}{H} \right)^{0.03}; \quad R^2 = 0.98 \quad (14)$$

محدوده پارامترهای بکاربرده شده در رابطه بالا به ترتیب زیر می‌باشند:

عدد رینولدز:  $100 \leq \text{Re} \leq 400$

کسر حجمی نانو ذرات:  $0.1 \leq \phi \leq 0.3$



ارتفاع پله (m)	$H$
ضریب هدایت حرارتی (W/m K)	$K$
طول دیواره شار ثابت (m)	$L$
تعداد بافل	$N$
عدد ناسلت	$Nu$
فشار (N/m <sup>2</sup> )	$P$
شار حرارتی (W/m <sup>2</sup> )	$q''$
عدد رینولدز	$Re$
دما (K)	$T$
مولفه افقی سرعت (m/s)	$u$
سرعت متوسط (m/s)	$U$
مولفه عمودی سرعت (m/s)	$v$
عرض بافل (m)	$w_b$
طول چرخش (m)	$X_r$
<b>علائم یونانی</b>	
شاخص ارزیابی عملکرد	$\eta$
لزجت دینامیکی (kg/m <sup>2</sup> s)	$\mu$
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$
کسر حجمی نانوذرات	$\phi$
<b>زیرنویس</b>	
میانگین ورودی و خروجی	$ave$
سیال پایه	$f$
متوسط	$m$
نانوسیال	$nf$
نانوذرات	$p$
سطح دیواره	$wall$
بدون بافل	$0$

### مراجع

- [1] B.F. Armaly, F. Durst, J. Pereira, B. Schönung, Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow, *Journal of fluid Mechanics*, 127 (1983) 496-473.
- [2] J.B. Saldana, N. Anand, V. Sarin, Forced convection over a three-dimensional horizontal backward facing step, *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 4(6) (2005) 234-225.
- [3] S. Acharya, G. Dixit, Q. Hou, Laminar mixed convection in a vertical channel with a backstep: a benchmark study, *ASME-PUBLICATIONS-HTD*, 258 (1993) 11-11.
- [4] M.P. Boruah, P.R. Randive, S. Pati, Hydrothermal performance and entropy generation analysis for mixed

آن است. همچنین تأثیر پارامترهایی همچون عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات نیز بررسی شده است. به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار ناشی از حضور بافل و افزایش کسر حجمی نانوذرات، شاخص ارزیابی عملکرد تعریف شده است. شاخص ارزیابی عملکرد در حضور بافل در تمامی شرایط مقادیری بزرگتر از ۱ دارد که نشان دهنده مؤثر بودن حضور بافل بر راندمان حرارتی می باشد. همچنین نتایج حاکی از آن است که با افزایش عدد رینولدز و کاهش کسر حجمی، شاخص ارزیابی عملکرد افزایش می یابد. نتایج نشان می دهد که با افزایش ارتفاع بافل، عدد ناسلت محلی و متوسط و همچنین شاخص ارزیابی عملکرد افزایش چشمگیری می یابد، به طوری که مقدار بیشینه عدد ناسلت در حالت  $h_b = H$  و  $h_b = 0.5H$  به ترتیب حدود ۸۸۲ و ۲۱۱۷ می باشد. با توجه به نتایج به دست آمده با افزایش ارتفاع بافل، اندازه طول اتصال مجدد کاهش یافته و مقدار بیشینه عدد ناسلت نیز به ابتدای دیواره شار ثابت نزدیک تر می شود. همچنین نتایج نشان می دهد که در تمامی شرایط، مقدار افزایش عدد ناسلت متوسط و شاخص ارزیابی عملکرد، برای عرض بافل  $w_b = 2H$  نسبت به سایر مقادیر عرض بافل، دارای مقدار بیشینه می باشد. به منظور ارزیابی تأثیر تعداد بافل بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت، آرایش های مختلفی از ۱ تا ۴ بافل در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از آن است که افزایش تعداد بافل ها لزوماً موجب افزایش شاخص ارزیابی عملکرد و انتقال حرارت نمی شود، به نحوی که به ازای ۲ بافل، عدد ناسلت متوسط و شاخص ارزیابی عملکرد در تمامی شرایط دارای مقدار بیشینه است. همچنین به منظور جمع بندی و کمک به محاسبات مهندسی، یک رابطه برازش برای نسبت "عدد ناسلت متوسط با حضور بافل" به "عدد ناسلت متوسط بدون بافل" همچون تابعی از عدد رینولدز، کسر حجمی نانو ذرات، تعداد بافل، ارتفاع بافل و عرض بافل با خطای متوسط ۲.۸۸٪ ارائه شده است.

### فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg K)	$C_p$
نسبت انبساط	$ER$
ارتفاع بافل (m)	$h_b$
ضریب انتقال حرارت (W/m <sup>2</sup> K)	$h_x$

- [13] A.J. Chamkha, F. Selimefendigil, Forced convection of pulsating nanofluid flow over a backward facing step with various particle shapes, *Energies*, 11(11) (2018) 3068.
- [14] F. Selimefendigil, H.F. Öztöp, Numerical analysis of laminar pulsating flow at a backward facing step with an upper wall mounted adiabatic thin fin, *Computers & Fluids*, 88 (2013) 107-93.
- [15] H.A. Mohammed, F. Fathinia, H.B. Vuthaluru, S. Liu, CFD based investigations on the effects of blockage shapes on transient mixed convective nanofluid flow over a backward facing step, *Powder technology*, 346 (2019) 451-441.
- [16] H. Togun, M.R. Safaei, R. Sadri, S.N. Kazi, A. Badarudin, K. Hooman, E. Sadeghinezhad, Numerical simulation of laminar to turbulent nanofluid flow and heat transfer over a backward-facing step, *Applied Mathematics and Computation*, 239 (2014) 170-153.
- [17] R. Nath, M. Krishnan, Numerical study of double diffusive mixed convection in a backward facing step channel filled with Cu-water nanofluid, *International Journal of Mechanical Sciences*, 153 (2019) 63-48.
- [18] S. Salman, A.A. Talib, S. Saadon, M.H. Sultan, Hybrid nanofluid flow and heat transfer over backward and forward steps: A review, *Powder Technology*, 363 (2020) 472-448.
- [19] H. Mohammed, O.A. Alawi, M. Wahid, Mixed convective nanofluid flow in a channel having backward-facing step with a baffle, *Powder Technology*, 275 (2015) 343-329.
- [20] H. Mohammed, O. Alawi, N.C. Sidik, Mixed convective nanofluids flow in a channel having forward-facing step with baffle, *J. Adv. Res. Appl. Mech*, 24 (2016) 21-1.
- [21] Y. Ma, R. Mohebbi, M.M. Rashidi, Z. Yang, Y. Fang, Baffle and geometry effects on nanofluid forced convection over forward-and backward-facing steps channel by means of lattice Boltzmann method, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, (2020) 124696.
- [22] A. Heshmati, H. Mohammed, A. Darus, Mixed convection heat transfer of nanofluids over backward facing step having a slotted baffle, *Applied Mathematics and Computation*, 240 (2014) 386-368.
- convective flows over a backward facing step channel with baffle, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125 (2018) 542-525.
- [5] M. Moradzadeh, B. Ghasemi, A. Raisi, Nanofluid mixed-convection heat transfer in a ventilated cavity with a baffle, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 3(48) (2016) 266-257. (in Persian).
- [6] J. Nie, Y. Chen, R.F. Boehm, H.-T. Hsieh, Parametric Study of Turbulent Separated Convection Flow Over a Backward-Facing Step in a Duct, in: *ASME/JSME 2007 5th Joint Fluids Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2007, pp. 1004-997.
- [7] S. Kumar, S. Vengadesan, The effect of fin oscillation in heat transfer enhancement in separated flow over a backward facing step, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128 (2019) 963-954.
- [8] X. Shi, P. Jaryani, A. Amiri, A. Rahimi, E.H. Malekshah, Heat transfer and nanofluid flow of free convection in a quarter cylinder channel considering nanoparticle shape effect, *Powder Technology*, 346 (2019) 170-160.
- [9] H. Namadchian, I. Zahmatkesh, S. Alavi, Numerical simulation of nanofluid flow in a annular porous channel with using the Darcy-Brinkman-Forcheimer model and two-phase mixed model, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (2020). (in Persian).
- [10] M. Nazari, S. Maleki-Delarestaghi, A. Shakeri, Experimental Investigation of the Forced Convection Heat Transfer of Nanofluids in Curved Tubes, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 2(50) (2018) 358-347. (in Persian).
- [11] A. Aghaei, H. Khorasanizadeh, G.A. Sheikhzadeh, A numerical study of the effect of the magnetic field on turbulent fluid flow, heat transfer and entropy generation of hybrid nanofluid in a trapezoidal enclosure, *The European Physical Journal Plus*, 6(134) (2019) 310.
- [12] M.S. Pour, S.G. Nassab, Numerical investigation of forced laminar convection flow of nanofluids over a backward facing step under bleeding condition, *Journal of Mechanics*, 2(28) (2012) N7-N12.

- ASME, NEW YORK, NY,(USA), 1993, 258 (1993) 36-29.
- [26] M. El-Refae, M. Elsayed, N. Al-Najem, I. Megahid, Steady-state solutions of buoyancy-assisted internal flows using a fast false implicit transient scheme (FITS), International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 6(6) (1996) 23-3.
- [27] A. Kumar, A.K. Dhiman, Effect of a circular cylinder on separated forced convection at a backward-facing step, International journal of thermal sciences, 52 (2012) 185-176.
- [28] J.-T. Lin, B.F. Armaly, T. Chen, Mixed convection in buoyancy-assisting, vertical backward-facing step flows, International Journal of Heat and Mass Transfer, 10(33) (1990) 2132-2121.
- [23] E. Abu-Nada, Application of nanofluids for heat transfer enhancement of separated flows encountered in a backward facing step, International Journal of Heat and Fluid Flow, 1(29) (2008) 249-242.
- [24] Y. Malmir-Chegin, N. Amanifard, Heat transfer enhancement inside semi-insulated horizontal pipe by controlling the secondary flow of oil-based ferro-fluid in the presence of non-uniform magnetic field: A general correlation for the Nusselt number, Applied Thermal Engineering, 159 (2019) 113839.
- [25] D. Choudhury, A.E. Woolfe, Computation of laminar forced and mixed convection in a heated vertical duct with a step, ASME HEAT TRANSFER DIV PUBL HTD,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Moayedi, Numerical analysis of the effect of baffle on heat transfer enhancement nanofluid flow over a backward facing step: A correlation for the average Nusselt number, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 4309-4328.

DOI: [10.22060/mej.2020.18564.6848](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18564.6848)



