

آنالیز سه بعدی جریان جابجایی نانوسیال در یک کانال دارای انقباض ناگهانی

میثم آتش افروز^۱ سجاد بدخشان^۲
 دانشکده مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی مکانیک
 دانشگاه صنعتی سیرجان مؤسسه آموزش عالی جاوید جیرفت
 (تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۱۵)

چکیده

در این تحقیق، تاثیر درصد حجمی نانو ذرات جامد نقره بر رفتارهای هیدرودینامیکی و حرارتی جریان جابجایی آرام در یک کانال سه بعدی و دارای انقباض ناگهانی، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند. انقباض موجود در کانال به وسیله یک پله پیشرو شیب دار ایجاد می‌شود. برای شبیه‌سازی این پله در داخل کانال، از روش مسدود شده در سیستم مختصات کارتیزین سه بعدی استفاده می‌شود. معادلات حاکم بر جریان که شامل معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی است، ابتدا بی بعد و سپس با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی و با بکارگیری الگوریتم سیمپل حل می‌شوند. برای بررسی تأثیر عملکرد درصد حجمی ذرات نانو، توزیع میدان‌های سرعت، دما، ضریب اصطکاک، عدد ناسلت و دمای متوسط مخلوط به صورت نموداری برای شرایط مختلف ارائه شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که درصد حجمی نانو ذرات نقره به طور قابل ملاحظه و چشم‌گیری بر رفتارهای حرارتی و هیدرودینامیکی جریان تأثیر می‌گذارد.

واژه‌های کلیدی: انقباض ناگهانی، ذرات نانو، نقره-آب، نانو سیال، پله پیشرو

Three-dimensional Analysis of the Convective Nanofluid Flow in a Duct with Abrupt Contraction

M. Atashafrooz S. Badakhshan
 Department of Mechanical Engineering Department of Mechanical Engineering
 Sirjan University of Technology Jiroft javid Higher Education Institute

(Received: 21/January/2018 ; Accepted: 05/May/2018)

ABSTRACT

In this research, the effects of Ag-nanoparticles, volume fraction on the hydrodynamic and thermal behaviors of convective flow in a three-dimensional duct with abrupt contraction are studied. The abrupt contraction is created by an inclined forward facing step. The blocked-off method is used to simulate the inclined surfaces of the step. The set of non-dimensional governing equations, consisting continuity, momentum, and energy were solved numerically by CFD techniques and SIMPLE algorithm. To investigate the influences of nanoparticle's volume fraction, distributions of temperature, velocity, friction coefficient, Nusselt number, and mean bulk temperature were presented graphically. Our numerical results show that the Ag-nanoparticles volume fraction has significant effects on thermal and hydrodynamical behaviors of the flow.

Keywords: Abrupt Contraction, Nanoparticles, Ag-Water, Nanofluid, Forward Step

فهرست علائم و اختصارات

نقره	Ag
نسبت عرض به ارتفاع بالادست کانال	AR
گرمای ویژه سیال، $J/(kg.K)$	c_p
عرض کانال، m	D
نسبت انقباض	DR
ارتفاع کانال قبل از پله، m	H
ارتفاع کانال بعد از پله، m	h
طول کانال قبل از پله، m	L_1
طول کانال بعد از پله، m	L_2
عدد ناسلت	Nu
فشار، N/m^2	p
فشار بدون بعد	P
عدد پرناتل	Pr
عدد رینولدز	Re
ارتفاع پله، m	S
دما، K	T
دمای سیال ورودی، K	T_{in}
دمای دیوار، K	T_w
مؤلفه‌های سرعت، m/s	u, v, w
مؤلفه‌های سرعت بدون بعد	U, V, W
سرعت یکنواخت ورودی، m/s	U_0
مختصات کارتزین، m	x, y, z
مختصات کارتزین بدون بعد	X, Y, Z

علائم یونانی

ضریب پخش حرارتی، m^2/s	α
درصد حجمی ذرات نانو	ϕ
ضریب هدایت حرارتی، $W/(m.K)$	k
دما بدون بعد	θ
دمای متوسط بدون بعد	θ_b
لزجت دینامیکی سیال، $(N.s)/m^2$	μ
چگالی، kg/m^3	ρ

زیرنویس

سیال	f
نانو سیال	nf
نانو ذرات جامد	s
آزمایشگاهی	Exp

۱- مقدمه

جدایش جریان و جریان بازگشتی به دلیل تغییرات ناگهانی در هندسه جریان، در بسیاری از صنایع و کاربردهای مهندسی

مشاهده می‌شوند. از جمله این صنایع و کاربردها، می‌توان به وسایل تولید توان، پخش کننده‌ها، مبدل‌های حرارتی، خنک‌کاری در وسایل الکترونیکی، پره‌های توربین و راکتورهای هسته‌ای اشاره کرد. در این نوع جریان‌ها، اندازه ناحیه جریان بازگشتی (ناحیه گردابه‌ای جریان) مشخص کننده ویژگی‌های کلی میدان جریان سیال و نرخ انتقال حرارت است.

کانال‌های دارای انبساط و انقباض ناگهانی از جمله هندسه‌هایی هستند، که جدایش جریان و جریان بازگشتی در آن‌ها به خوبی قابل مشاهده است. در بسیاری از موارد، این تغییرات ناگهانی در کانال به وسیله پله‌های پسرو و پیشرو ایجاد می‌شود. اگرچه این هندسه‌ها در ظاهر ساده به نظر می‌رسند، اما جریان سیال و انتقال حرارت در این کانال‌ها، پیچیدگی‌های زیادی را شامل می‌شوند. به گونه‌ای که از این هندسه‌ها به عنوان هندسه معیار برای معتبرسازی نتایج استفاده می‌شود. در دو دهه اخیر، آنالیز جریان سیال و انتقال حرارت در چنین هندسه‌هایی که دارای جدایش جریان می‌باشند، در مختصات دوبعدی و سه‌بعدی توسط محققین زیادی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است [۷-۱].

آیوای^۱ و همکاران [۸]، جریان جابجایی اجباری روی یک پله پسرو در یک کانال سه‌بعدی را به منظور بررسی اثرات نسبت عرض به ارتفاع کانال، به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. در آن مطالعه، تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در نسبت عرض به ارتفاع‌های مختلف نشان داده شده است. یوروبا^۲ و همکاران [۹]، اثرات پارامترهای مکش و دمش در زیر پله قائم موجود در یک کانال سه‌بعدی را بر رفتارهای سیالاتی و حرارتی جریان مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش دادند که اثرات مکش در ناحیه گردابه‌ای نزدیک پله بیشتر از اثرات دمش است.

در پژوهش‌های دیگری که توسط نای^۳ و همکاران [۱۰]، تسای^۴ و همکاران [۱۱] و سلایم فندیجیل و اوزتوپ^۵ [۱۲] انجام شده است، تاثیر وجود یک مانع بر جریان جابجایی آرام در کانال‌های دارای پله مورد مطالعه قرار گرفته شده است. در

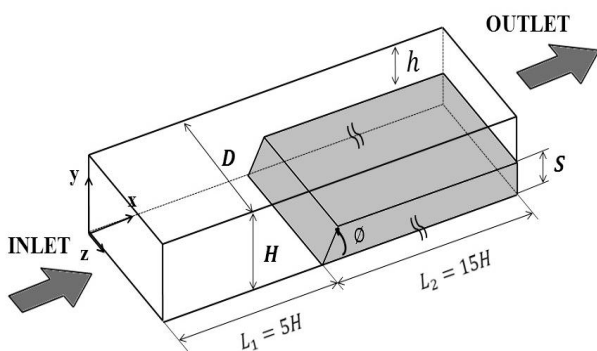
1- Iwai
2- Uruba
3- Nie
4- Tsay
5- Selimefendigil and Oztop

همچنین مشخصات هندسی مانع، اثرات متقابلی بر نرخ انتقال حرارت در هندسه مطالعه شده دارند.

اگرچه تاکنون در مطالعات متعددی، به تجزیه و تحلیل اثرات نانو ذرات جامد بر رفتارهای هیدرودینامیکی و حرارتی جریان جابجایی سیال درون کانال‌های دارای انقباض و انقباض ناگهانی پرداخته شده است؛ اما باید توجه داشت که اکثر این مطالعات، محدود به جریان دوبعدی بوده‌اند. از آنجایی که آنالیز جریان به صورت دوبعدی در بسیاری از موارد با خطای قابل ملاحظه‌ای همراه بوده و جریان‌های سه‌بعدی به واقعیت نزدیک‌تر هستند، لذا در این پژوهش، به بررسی تاثیر نانو سیال پرکاربرد نقره-آب بر رفتارهای حرارتی و هیدرودینامیکی جریان جابجایی اجباری در یک کانال دارای پله شیب‌دار پیشرو پرداخته می‌شود، تا بهترین شرایط جهت استفاده از نانو سیالات در کانال‌های سه‌بعدی دارای پله به دست آید.

۲- شرح مسأله

هندسه مورد مطالعه در این تحقیق، به صورت یک کانال سه‌بعدی دارای پله شیب‌دار پیشرو در نظر گرفته شده است. در اثر وجود این پله، یک انقباض ناگهانی در سطح مقطع کانال ایجاد می‌شود. شماتیک هندسی این کانال در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل (۱): هندسه مسأله مورد مطالعه.

همان‌طور که از این شکل مشخص است ارتفاع کانال در بالا دست و پایین دست جریان، به ترتیب H و h می‌باشند، به طوری که در این مسئله، نسبت انقباض $(DR=h/H)$ برابر $0/5$ در نظر گرفته شده است. به علاوه، عرض کانال با پارامتر D نشان داده شده و نسبت عرض به ارتفاع بالا دست کانال $(AR=D/H)$ برابر با ۲ انتخاب شده است $(D=2H)$.

تحقیقات دیگری در این زمینه، آتش افروز و همکاران [۱۵-۱۳] به مطالعه انتقال حرارت جابجایی اجباری همراه با اثرات تشعشع در جریان آرام سیال در کانال‌های دارای پله پرداختند. محققین در این مطالعات نشان دادند که در نظر گرفتن پدیده انتقال حرارت تشعشعی به شدت بر نرخ انتقال حرارت سامانه تاثیر می‌گذارد.

در سال‌های اخیر، تلاش‌های فراوانی به منظور بهبود انتقال حرارت جابجایی اجباری در بسیاری از وسایل مهندسی ذکر شده، صورت گرفته است. یکی از روش‌ها و تکنیک‌های مؤثری که در این زمینه پیشنهاد شده است، به کار بردن ذرات ریز جامد در یک سیال پایه (نانو سیال) می‌باشد.

تاکنون مطالعات آزمایشگاهی و تئوری متعددی، توسط محققین مختلف، برای آنالیز رفتارهای جریان نانو سیال در هندسه‌های مختلف انجام شده است [۲۱-۱۶]. از میان این مطالعات، زینالی و همکاران [۲۲]، با استفاده از مدل پراکندگی، حضور ذرات نانو در سیال پایه آب را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزودن نانو ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید مس به آب، مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت جریان آرام را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد.

علاوه بر مطالعات ذکر شده، در دهه اخیر نیز چندین تن از محققین، به بررسی اثرات نانو ذرات جامد بر رفتارهای هیدرودینامیکی و حرارتی جریان سیال درون کانال‌های دوبعدی و دارای پله پرداخته‌اند [۲۶-۲۳].

ابو نادا^۱ [۲۷] در یک مطالعه تئوری، انتقال حرارت جابجایی اجباری نانو سیالات مختلف را در یک کانال دوبعدی دارای پله پسر، مورد بررسی و آنالیز قرار داد. در این مطالعه نشان داده شد که مقدار عدد ناسلت در نواحی گردابه‌ای، به شدت وابسته به خواص ترموفیزیکی ذرات جامد نانو و درصد حجمی این ذرات است.

در یکی از جدیدترین تحقیقات، محمد و همکاران [۲۸] به بررسی اثرات نانو سیال بر جریان جابجایی ترکیبی آشفتنه در یک کانال دارای پله و مانع پرداختند. از نتایج این تحقیق می‌توان دریافت که ویژگی‌های ترموفیزیکی ذرات جامد نانو و

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} = - \frac{1}{(1-\varphi) + \varphi \frac{\rho_s}{\rho_f}} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{1}{(1-\varphi)^{2.5} \left((1-\varphi) + \varphi \frac{\rho_s}{\rho_f} \right)} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right), \quad (3)$$

$$U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} + W \frac{\partial W}{\partial Z} = - \frac{1}{(1-\varphi) + \varphi \frac{\rho_s}{\rho_f}} \frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{1}{(1-\varphi)^{2.5} \left((1-\varphi) + \varphi \frac{\rho_s}{\rho_f} \right)} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right), \quad (4)$$

$$U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y} + W \frac{\partial \Theta}{\partial Z} = \frac{k_{nf}}{\text{Re Pr} \frac{1}{(1-\varphi) + \varphi \frac{(\rho c_p)_s}{(\rho c_p)_f}}} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Z^2} \right). \quad (5)$$

برای ارائه این معادلات، از پارامترهای بی‌بعد کننده زیر استفاده شده است:

$$(X, Y, Z) = \left(\frac{x}{H}, \frac{y}{H}, \frac{z}{H} \right), \quad (6)$$

$$(U, V, W) = \left(\frac{u}{U_0}, \frac{v}{U_0}, \frac{w}{U_0} \right),$$

$$\Theta = \frac{T - T_{in}}{T_w - T_{in}}, \quad P = \frac{p}{\rho U_0^2},$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_f U_0 H}{\mu_f}, \quad \text{Pr} = \frac{g_f}{\alpha_f}.$$

در معادلات بالا، جهت X ، جهت محوری جریان، Y در جهت ارتفاع و Z در جهت عرضی کانال در نظر گرفته شده است، به طوری که، پارامترهای U ، V و W ، به ترتیب مؤلفه‌های بی‌بعد سرعت در جهات X ، Y و Z هستند.

همچنین، در معادلات (۵-۱)، برای محاسبه ترم‌های چگالی موثر (ρ_{nf})، لزجت دینامیکی (μ_{nf})، ضریب هدایت حرارتی (k_{nf}) و گرمای ویژه ($c_{p_{nf}}$) نانو سیال از روابط زیر استفاده شده است [۲۷ و ۱۶]:

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_s + (1 - \varphi) \rho_f, \quad (7)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}}, \quad (8)$$

همچنین، زاویه پله از محور افقی اندازه‌گیری شده و در این مطالعه برابر با 45° است. طول کانال قبل از پله برابر با $L_1=5H$ و بعد از پله برابر با $L_2=15H$ در نظر گرفته شده است. این طول‌ها بدین دلیل انتخاب شده‌اند که جریان در مقطع ورودی و خروجی کانال، تحت تاثیر تغییر ناگهانی در مقطع کانال قرار نگیرند.

برای کلیه دیوارهای کانال (دیوارهای بالایی و پایینی، دو دیوار جانبی و سطوح پله)، شرط عدم لغزش (سرعت صفر) برقرار است. تمامی این دیوارها، داغ و دارای دمای ثابت T_w می‌باشند. همچنین، جریان با سرعت یکنواخت U_0 و دمای سرد و ثابت T_{in} وارد کانال می‌شود ($T_{in} < T_w$). به علاوه، در مقطع خروجی کانال، فرض توسعه یافتگی هیدرودینامیکی و حرارتی برای جریان سیال برقرار است.

لازم به ذکر است که، سیال درون کانال، نانو سیال نقره- آب با غلظت‌های متفاوت ($0 \leq \phi \leq 0.2$) است. در جدول ۱، خواص ترموفیزیکی این نانو سیال آورده شده است.

جدول (۱): خواص ترموفیزیکی نانو سیال نقره-آب [۲۷ و ۱۶].

خاصیت ترموفیزیکی	سیال پایه (آب)	نانو ذرات نقره
$c_p (J/kg.K)$; z	۴۱۷۹	۲۳۵
$\rho (kg/m^3)$	۹۹۷/۱	۱۰۵۰۰
$\kappa (W/m.K)$	۰/۶۱۳	۴۲۹
$\mu (kg/m.s)$	۰/۰۰۱۰۰۳	-

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسئله مورد نظر، شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی هستند. فرم بدون بعد این معادلات برای جریان آرام، دائم و تراکم‌ناپذیر یک نانو سیال در حالت سه‌بعدی به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0, \quad (1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + W \frac{\partial U}{\partial Z} = - \frac{1}{(1-\varphi) + \varphi \frac{\rho_s}{\rho_f}} \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{1}{(1-\varphi)^{2.5} \left((1-\varphi) + \varphi \frac{\rho_s}{\rho_f} \right)} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right), \quad (2)$$

۴- الگوریتم حل عددی معادلات حاکم

برای حل عددی معادلات حاکم بدون بعد، ابتدا فرم مجزا شده این معادلات، با انتگرال گیری روی هر حجم کنترل به دست می آید. سپس این معادلات مجزا شده، با استفاده از الگوریتم سیمپل [۲۹] و روش تکراری خط به خط با پیشرفت در جهت محوری حل می شوند. لازم به ذکر است که برای محاسبه مؤلفه های سرعت از حجم کنترل های جابجا شده استفاده می شود؛ در حالی که سایر متغیرهای مورد نیاز، روی گره های اصلی محاسبه می شوند. همچنین برای شبیه سازی سطح شیب دار پله در مختصات کارتیزین، از روش کارآمد انسداد استفاده می شود [۷ و ۱۳]. کلیه محاسبات انجام شده در این مطالعه، با استفاده از یک برنامه کامپیوتری نوشته شده به زبان فرترن^۱ ۹۰، انجام شده است. برای درک بهتر روند این محاسبات، مراحل لازم جهت حل عددی معادلات حاکم به ترتیب در زیر آورده شده اند:

- برای مؤلفه های سرعت، فشار و دما در هر نقطه یک حدس اولیه زده می شود،
- از حل معادلات مومنوم در جهات X ، Y و Z ، مؤلفه های سرعت U ، V و W محاسبه می شوند،
- با استفاده از الگوریتم سیمپل، فشار در تمام نقاط محاسبه شده و سرعت ها تصحیح می شوند،
- با حل معادله انرژی، توزیع دما در داخل دامنه محاسباتی به دست می آید و
- مراحل ۲ تا ۴ آنقدر تکرار می شوند، تا زمانی که معیار همگرایی ارضا شود. معیار همگرایی در حل معادلات حاکم، رسیدن به مجموع باقیمانده کمتر از 10^{-5} برای کلیه مؤلفه های سرعت، دما و فشار است.

یکی از عوامل مؤثر در دستیابی به همگرایی حل، شکل شبکه و تمرکز معقول آن در نواحی مورد نیاز است. شبکه مورد استفاده در نقاطی که انتظار تغییرات شدید متغیرهای وابسته می رود، بایستی ریزتر و در نواحی که تغییرات شدید متغیرهای وابسته وجود ندارد و یا کم می باشد، باید درشت انتخاب شود. بدیهی است که در غیر این صورت، نحوه همگرایی روش حل با مشکل مواجه خواهد شد. با توجه به آنچه گفته شد، در این مطالعه برای دستیابی به نتایج

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \quad (9)$$

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

در این روابط، ϕ کسر حجمی نانو سیال و زیر نویس های s و f به ترتیب بیانگر خواص نانو سیال، نانو ذره (نقره) و سیال پایه (آب) هستند.

۳-۱- شرایط مرزی بی بعد

شرایط مرزی بی بعد هیدرودینامیکی و حرارتی لازم جهت حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر مساله مورد مطالعه، به صورت ارائه شده در جدول ۲ در نظر گرفته شده اند.

جدول (۲): شرایط مرزی بی بعد هیدرودینامیکی و حرارتی

برای هندسه مورد مطالعه.

نوع مرز	شرایط مرزی هیدرودینامیکی	شرایط مرزی حرارتی
مقطع ورودی جریان	$U = 1, V = W = 0$	$\Theta = 0$
دیوارهای کانال (شامل دیوارهای بالایی و پایینی، دو دیوار جانبی و سطوح پله)	$U = V = W = 0$	$\Theta = 1$
مقطع خروجی جریان	$\frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial V}{\partial X} = \frac{\partial W}{\partial X} = 0$	$\frac{\partial \Theta}{\partial X} = 0$

۳-۲- پارامترهای مورد بررسی

با حل عددی معادلات حاکم، می توان رفتارهای هیدرودینامیکی و حرارتی جریان سیال را به دست آورد. این هدف با محاسبه پارامترهای مهم، شامل ضریب اصطکاک، عدد ناسلت و دمای متوسط مخلوط به ترتیب با استفاده از روابط (۱۱) تا (۱۳) صورت می گیرد.

$$C_f = \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \frac{\partial U}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \quad (11)$$

$$Nu = \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{1}{(\Theta_w - \Theta_b)} \frac{\partial \Theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \quad (12)$$

$$\Theta_b = \frac{\int_0^1 \int_0^1 \Theta U dY dZ}{\int_0^1 \int_0^1 U dY dZ} \quad (13)$$

مطالعه، نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر با نتایج عددی و آزمایشگاهی محققین قبلی مقایسه می‌شوند.

۱-۵- اعتبار سنجی نتایج در مورد رفتارهای

هیدرودینامیکی جریان سیال بدون وجود ذرات نانو

به منظور بررسی نتایج مربوط به رفتارهای سیالاتی جریان در یک کانال سه بعدی دارای پله، مقادیر طول ناحیه بازگشتی (X_r) به دست آمده از حل عددی مطالعه حاضر، با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط لی [۳۰] در راستای عمق کانال با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این نتایج به علت وجود تقارن در هندسه و شرایط جریان، برای نیمی از کانال در جدول ۴ ارائه شده‌اند. همان‌طور که از این جدول پیدا است، سازگاری بسیار خوبی بین نتایج دو مطالعه برقرار است.

لازم به ذکر است که برای محاسبه درصد خطا در این

جدول، از رابطه $\left| \frac{X_r)_{Present} - X_r)_{Exp}}{X_r)_{Exp}} \right| \times 100$ استفاده شده

است. همچنین، منظور از طول ناحیه بازگشتی، طول ناحیه گردابه‌ای تشکیل شده روی دیوار پایینی کانال و بعد از پله پسرو است.

جدول (۴): مقایسه طول ناحیه بازگشتی (X_r) در عرض

کانال با مطالعه آزمایشگاهی لی [۳۰].

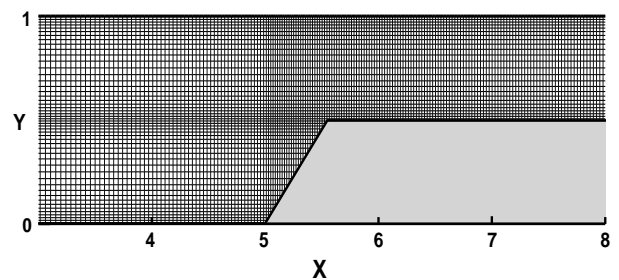
$\frac{z}{D}$	مطالعه حاضر	نتایج آزمایشگاهی [۳۰]	درصد خطا (%)
۰/۰۵	۷/۲۷	۷/۰۴	۳/۲۶
۰/۱	۵/۹۵	۵/۷۸	۲/۹۴
۰/۱۵	۶/۱۲	۶/۰۱	۱/۸۳
۰/۲	۶/۶۷	۶/۵۹	۱/۲۱
۰/۲۵	۷/۱۷	۷/۰۳	۱/۹۹
۰/۳	۷/۴۵	۷/۳۳	۱/۶۳
۰/۳۵	۷/۶۴	۷/۵۵	۱/۱۹
۰/۴	۷/۷۷	۷/۷۴	۰/۳۸
۰/۴۵	۷/۸۷	۷/۸۳	۰/۵۱
۰/۵	۷/۹۸	۷/۹۶	۰/۲۵

۲-۵- اعتبار سنجی نتایج در مورد رفتارهای حرارتی

جریان سیال بدون وجود ذرات نانو

برای اطمینان از درستی نتایج مربوط به رفتارهای حرارتی جریان سیال در حالت عدم وجود ذرات نانو، تغییرات عدد

دقیق‌تر، از شبکه غیریکنواخت استفاده گردیده است، به گونه‌ای که در نزدیکی دیوارها، شبکه متمرکز می‌شود. نمای از این شبکه در صفحه $X-Y$ و برای نواحی نزدیک به پله، در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل، شبکه بندی در جهت Y با بزرگ‌نمایی، رسم شده است.



شکل (۲): نمایی از شبکه انتخاب شده برای حل عددی

معادلات.

همچنین برای دستیابی به شبکه بهینه، برنامه محاسباتی نوشته شده، برای شبکه‌های متفاوتی اجرا شد. سپس مقادیر ضریب اصطکاک و عدد ناسلت در ناحیه توسعه یافته و روی خط مرکزی دیوار پایینی کانال، در تمام این شبکه‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. این مقایسه، در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که از این جدول مشخص است، مناسب‌ترین تعداد نقاط شبکه که در آن جواب مسأله مستقل از تعداد حجم‌های کنترل باشد، $526 \times 50 \times 46$ به ترتیب در راستاهای $X \times Y \times Z$ می‌باشد.

جدول (۳): انتخاب شبکه بهینه، $Re=250$ ، $\phi = 0.1$ ،

$Z=0.5$

اندازه شبکه	ضریب اصطکاک در ناحیه توسعه یافته	عدد ناسلت در ناحیه توسعه یافته
$298 \times 26 \times 24$	۰/۵۴۱	۸/۸۵
$360 \times 32 \times 28$	۰/۵۹۲	۹/۵۷
$424 \times 40 \times 34$	۰/۶۴۳	۱۰/۳۱
$480 \times 46 \times 42$	۰/۶۸۴	۱۰/۹۵
$526 \times 50 \times 46$	۰/۷۰۸	۱۱/۳۴
$560 \times 54 \times 50$	۰/۷۱۱	۱۱/۴۱

۵- اعتبار سنجی نتایج

جهت حصول اطمینان از عملکرد درست برنامه کامپیوتری و همچنین اعتبار بخشیدن به محاسبات انجام شده در این

ارائه شده توسط ابو نادا [۲۷] در یک کانال دوبعدی دارای پله پسر و عمودی مقایسه شده‌اند.

این نتایج در جدول ۵ با مقایسه مقادیر عدد ناسلت ماکزیمم و محل وقوع آن در درصد‌های حجمی مختلفی، برای دو عدد رینولدز متفاوت ارائه شده‌اند. همان‌طور که از این جدول پیدا است، برنامه کامپیوتری نوشته شده در این مطالعه، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که برای محاسبه مقادیر درصد خطا در این جدول، از رابطه‌ای مشابه با آنچه در توضیحات جدول ۴ ارائه شد، استفاده شده است.

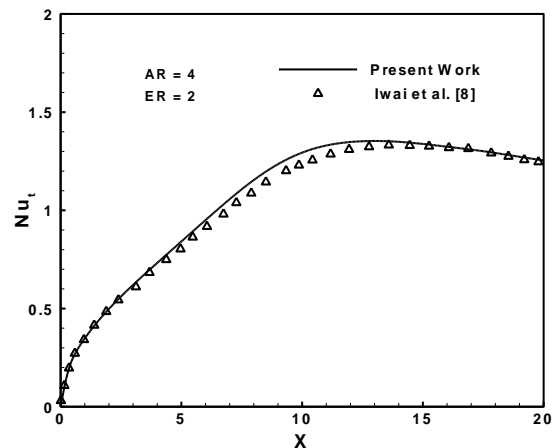
جدول (۵): مقایسه مقادیر عدد ناسلت ماکزیمم و محل وقوع آن با نتایج ارائه شده در مطالعه ابونادا [۲۷].

		درصد حجمی					
مطالعه حاضر	Re=200	X_{max}	۲/۹۵	۳/۴۴	۳/۷۲	۳/۷۶	۳/۸۸
		Nu_{max}	۲/۹۱	۳/۳۶	۳/۹۲	۴/۵۶	۵/۱۳
	Re=400	X_{max}	۴/۴۰	۵/۰۱	۵/۲۰	۵/۲۵	۵/۴۰
		Nu_{max}	۳/۵۵	۴/۴۱	۵/۵۳	۶/۵۱	۷/۴۹
ابونادا [۲۷]	Re=200	X_{max}	۲/۹۹	۳/۳۹	۳/۶۷	۳/۷۳	۳/۸۵
		Nu_{max}	۲/۹۴	۳/۳۰	۳/۸۶	۴/۵۱	۵/۰۹
	Re=400	X_{max}	۴/۴۵	۴/۹۷	۵/۱۷	۵/۲۳	۵/۳۷
		Nu_{max}	۳/۶۰	۴/۳۶	۵/۴۶	۶/۴۴	۷/۴۳
درصد خطا (%)	Re=200	X_{max}	۱/۳۴	۱/۴۷	۱/۳۶	۰/۸	۰/۷۸
		Nu_{max}	۱/۰۲	۱/۸۲	۱/۵۵	۱/۱۰	۰/۷۹
	Re=400	X_{max}	۱/۱۲	۰/۸	۰/۵۸	۰/۳۸	۰/۵۵
		Nu_{max}	۱/۳۹	۱/۱۴	۱/۲۸	۱/۰۸	۰/۸

۶- نتایج و بحث

در این قسمت تلاش می‌شود تا تاثیر درصد حجمی نانو ذرات نقره بر رفتارهای هیدرودینامیکی و حرارتی جریان سیال در هندسه مورد مطالعه، با رسم نمودارهای توزیع میدان‌های سرعت، دما، ضریب اصطکاک، عدد ناسلت و دمای متوسط مخلوط، مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

ناسلت روی خط مرکزی دیوار پایینی یک کانال سه‌بعدی، با مقادیر ارائه شده توسط آیوا و همکاران [۸]، در شکل ۳ مقایسه شده است.



شکل (۳): مقایسه تغییرات عدد ناسلت روی خط مرکزی دیوار پایین کانال با مقادیر ارائه شده توسط آیوا و همکاران [۸].

در مطالعه انجام شده توسط آیوا و همکاران [۸]، پله پسر و عمودی بوده و نسبت انبساط در مقطع کانال برابر با ۲ در نظر گرفته شده است، در حالی که نسبت عرض کانال به ارتفاع بالا دست جریان برابر با ۴ می‌باشد. همچنین شرایط مرزی شامل دمای داغ برای دیوارهای پایینی، بالایی و دیوار پله و شرط آدیاباتیک برای دیوارهای جانبی در راستای محور z است. پروفیل‌های سرعت و دما به ترتیب توسعه یافته و یکنواخت در مقطع ورودی کانال در نظر گرفته شده‌اند.

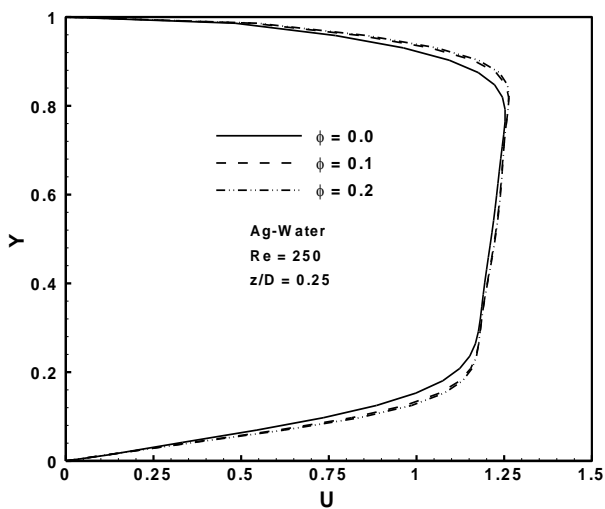
به‌طور کلی نتایج ارائه شده در شکل ۳ بیانگر انطباق خوبی بین نتایج عددی به‌دست آمده از کار حاضر و نتایج عددی ارائه شده توسط آیوا و همکاران [۸] می‌باشد.

۵-۳- اعتبارسنجی نتایج در مورد رفتارهای

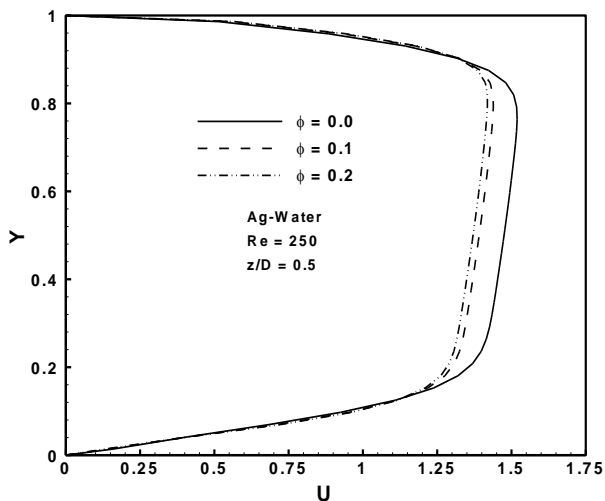
هیدرودینامیکی و حرارتی جریان نانو سیال

همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، تاکنون کانال‌های سه‌بعدی دارای پله پیشرو، با در نظر گرفتن اثرات نانو سیال توسط هیچ محقق دیگری مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین، به‌منظور بررسی اعتبار عملکرد برنامه کامپیوتری در مورد رفتارهای هیدرودینامیکی و حرارتی جریان نانو سیال با جابجایی اجباری روی پله، نتایج عددی مطالعه حاضر با نتایج

است. همان‌طور که از این شکل‌ها به خوبی مشاهده می‌شود، به‌علت وجود انقباض ناگهانی در مسیر جریان، مقادیر پروفیل سرعت در مقاطع عرضی مختلف، با پیشروی در جهت جریان افزایش قابل توجهی می‌یابند. همچنین، در مقاطع طولی مختلف، پروفیل‌های سرعت سیال در صفحات میانی کانال ($z/D = 0.5$) دارای مقادیر بزرگ‌تری نسبت به سایر مقاطع عرضی ($z/D = 0.25$) هستند. در حقیقت، تفاوت مقادیر سرعت در مقاطع عرضی مختلف، به‌علت وجود دیوارهای جانبی دارای شرط عدم لغزش (سرعت صفر) است.



الف) $z/D = 0.25$



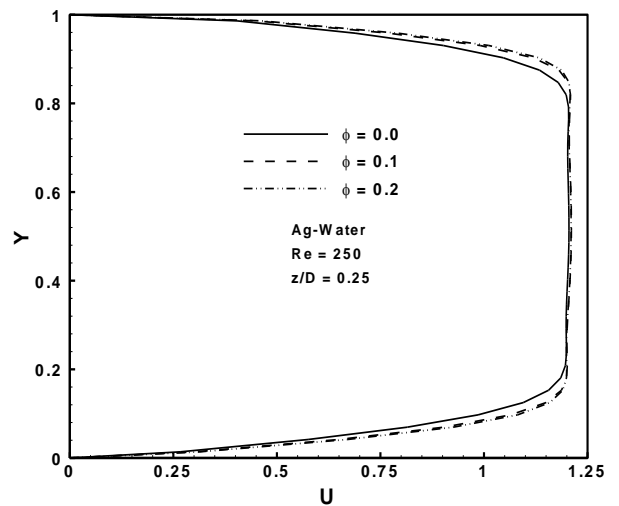
ب) $z/D = 0.5$

شکل (۵): تاثیر درصد حجمی ذرات نانو، روی توزیع پروفیل‌های سرعت U در دو مقطع عرضی مختلف، $X=4.5$

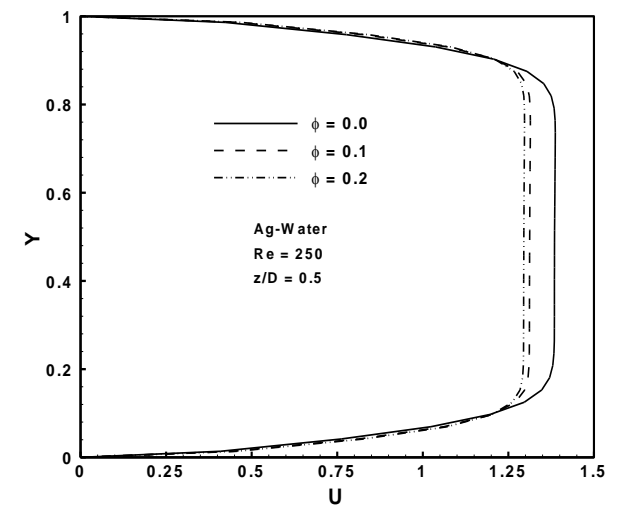
۶-۱- بررسی تاثیر درصد حجمی ذرات جامد نانو بر

تغییرات توزیع سرعت

نخست، برای بررسی اثرات درصد حجمی ذرات نانو بر رفتارهای هیدرودینامیکی جریان سیال، توزیع پروفیل‌های سرعت U برحسب ارتفاع کانال (Y) در مقاطع عرضی و طولی مختلف، در شکل‌های ۶-۴ نشان داده شده‌اند.



الف) $z/D = 0.25$



ب) $z/D = 0.5$

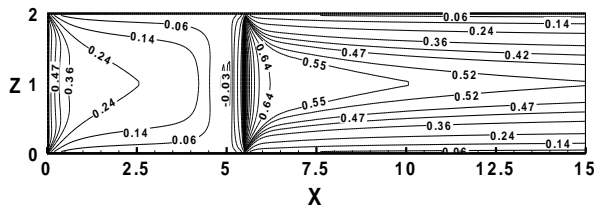
شکل (۴): تاثیر درصد حجمی ذرات نانو، روی توزیع پروفیل‌های سرعت U در دو مقطع عرضی مختلف، $X=3.0$

تاثیر تغییرات ناگهانی هندسه (وجود پله در مسیر جریان) بر توزیع پروفیل‌های سرعت U ، کاملاً در این شکل‌ها مشخص

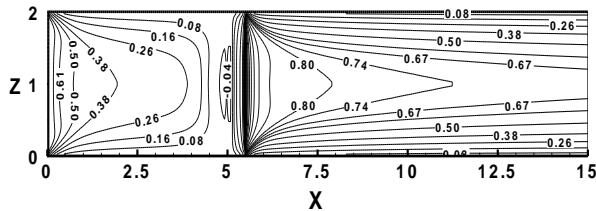
پروفیل‌های سرعت با افزایش درصد حجمی ذرات نانو، به‌علت تغییرات چگالی موثر و لزجت دینامیکی نانو سیال با تغییرات درصد حجمی ذرات نانو است. براساس روابط (۷) و (۸)، با افزودن بیشتر ذرات نانو به سیال پایه، چگالی و لزجت دینامیکی نانو سیالات زیاد شده و این افزایش منجر به تغییر در پروفیل‌های سرعت می‌شود.

۲-۶- بررسی تاثیر درصد حجمی ذرات جامد نانو بر چگونگی تغییرات ضریب اصطکاک

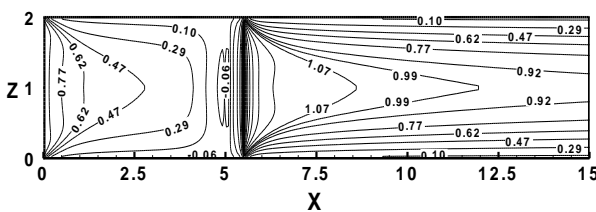
برای درک بیشتر از تاثیر درصد حجمی ذرات نانو بر رفتارهای هیدرودینامیکی جریان سیال، توزیع ضریب اصطکاک روی دیوار پایینی کانال در شکل ۷ برای نسبت‌های حجمی مختلف ارائه شده‌اند.



الف) $\phi = 0.0$



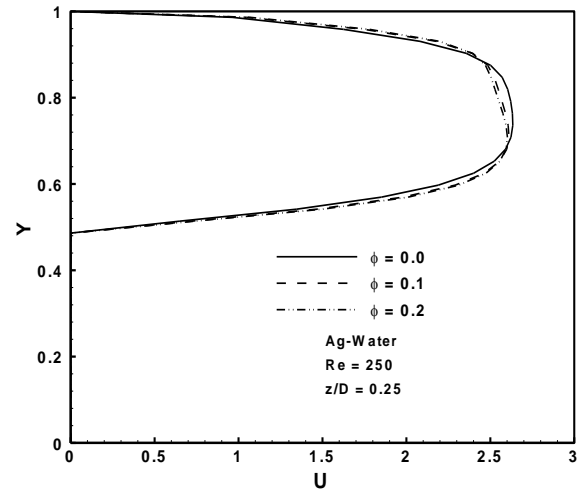
ب) $\phi = 0.1$



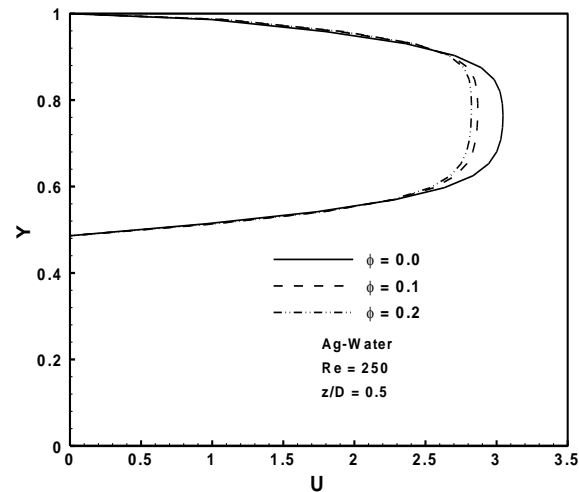
ج) $\phi = 0.2$

شکل (۷): تاثیر درصد حجمی ذرات نانو بر توزیع ضریب اصطکاک روی دیوار پایینی کانال.

همان‌طور که از این شکل مشخص است، در تمامی مقادیر درصد حجمی ذرات نانو، ضریب اصطکاک روی دیوار پایین کانال با یک مقدار ماکزیمم محلی در مقطع ورودی آغاز می‌شود. سپس، این ضریب در جهت جریان کاهش پیدا می‌کند، به طوری که در نزدیکی کنج پله، جایی که سرعت سیال ناچیز است، به یک مقدار منفی کوچک می‌رسد. سپس با پیشروی روی پله شیب‌دار، به‌علت بالا بودن گرادیان‌های



الف) $z/D = 0.25$



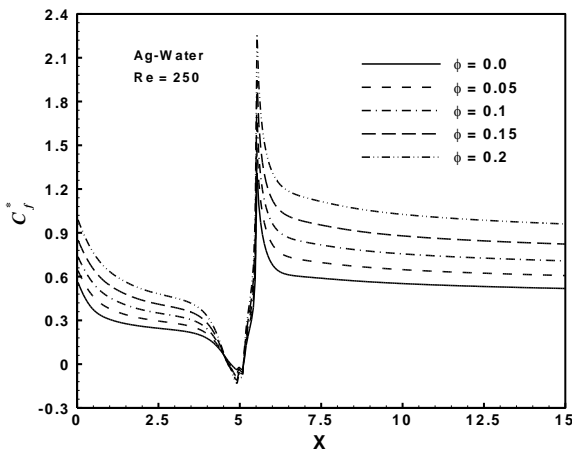
ب) $z/D = 0.5$

شکل (۶): تاثیر درصد حجمی ذرات نانو، روی توزیع پروفیل‌های سرعت U در دو مقطع عرضی مختلف، $X=10$.

همچنین، لازم به‌ذکر است که به‌علت تقارن هندسه در جهت عرضی، مقادیر پروفیل سرعت در مقطع $z/D = 0.75$ برابر با مقطع $z/D = 0.25$ بوده که برای پرهیز از رسم شکل‌های تکراری، نشان داده نشده‌اند.

علاوه بر آنچه گفته شد، شکل‌های ۴ تا ۶ به‌وضوح نشان می‌دهند که تاثیر درصد حجمی ذرات نانو روی پروفیل‌های سرعت با دور شدن از دیوارهای جانبی افزایش می‌یابد، به‌گونه‌ای که بیشترین تاثیر در صفحه میانی کانال ایجاد می‌شود. البته آنالیز دقیق این شکل‌ها به‌خوبی بیان می‌کند که درصد حجمی ذرات نانو تاثیر قابل توجهی بر مقادیر گرادیان‌های سرعت روی دیوارها ندارد. در حقیقت، تغییر

است. به منظور وضوح بیشتر در نشان دادن اثرات درصد حجمی ذرات نانو بر رفتارهای هیدرودینامیکی، توزیع ضریب اصطکاک روی خط مرکزی دیوار پایینی کانال برای پنج مقدار مختلف درصد حجمی ذرات نانو، در شکل ۹ رسم شده است. آنالیز نتایج این شکل، رفتاری مشابه با آنچه در توضیحات شکل ۷ گفته شد را بیان می‌کند. بنابراین، برای جلوگیری از تکرار مطالب، از ذکر آن‌ها خودداری می‌شود.



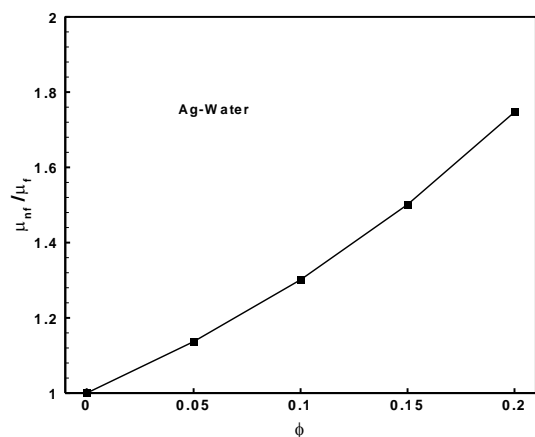
شکل (۹): تاثیر درصد حجمی ذرات نانو بر توزیع ضریب اصطکاک روی خط مرکزی دیوار پایینی کانال.

۳-۶- بررسی تاثیر درصد حجمی ذرات جامد نانو بر تغییرات توزیع دما

برای مشاهده اثرات درصد حجمی ذرات نانو روی رفتارهای حرارتی جریان سیال، توزیع پروفیل‌های دما بر حسب ارتفاع کانال (Y) در مقاطع عرضی و طولی مختلف، در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود، تغییرات ناگهانی سطح مقطع، تأثیر بسیار زیادی روی توزیع پروفیل‌های دما دارد. به علاوه، چگونگی نفوذ انتقال حرارت از دیوارهای گرم کانال به سیال داخل کانال در مقاطع مختلف، کاملاً از شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ مشخص می‌باشد. این شکل‌ها به وضوح بیان می‌کنند که در مقاطع طولی مختلف، مقادیر پروفیل‌های دمای سیال با دور شدن از دیوارهای جانبی کاهش می‌یابند، به گونه‌ای که کمترین مقادیر دمای سیال در صفحات میانی کانال ($z/D = 0.5$) وجود دارند. در حقیقت، تفاوت پروفیل‌های دما در مقاطع عرضی مختلف، به علت وجود دیوارهای داغ جانبی است. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر گردید، با توجه به تقارن کانال در جهت z، پروفیل‌های دما در مقطع $z/D = 0.75$ برابر با مقادیر مقطع $z/D = 0.25$ بوده که برای

سرعت جریان سیال، ضریب اصطکاک با یک شیب تند افزایش یافته و به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد. بعد از این مقدار ماکزیمم، این ضریب کاهش یافته تا این‌که به علت توسعه یافتگی هیدرودینامیکی جریان، به یک مقدار ثابت میل می‌کند.

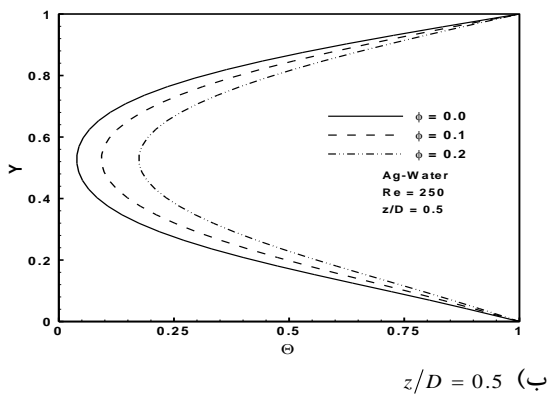
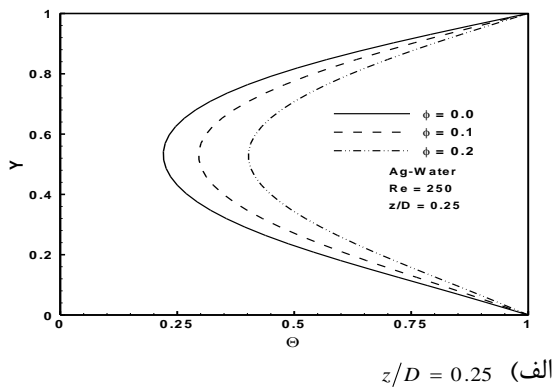
به‌هر حال شکل ۷ نشان می‌دهد که مقادیر درصد حجمی ذرات نانو به شدت بر توزیع ضریب اصطکاک تاثیر می‌گذارند. در حقیقت، آنالیز نتایج حاصل از این شکل به خوبی بیان می‌کند که با افزایش نسبت حجمی ذرات نانو، ضریب اصطکاک به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. برای تفسیر این نتیجه، کافی است به رابطه تعریف ضریب اصطکاک توجه کرد. براساس رابطه $C_f = \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \frac{\partial U}{\partial Y} \Big|_{Y=0}$ ، ضریب اصطکاک به دو پارامتر $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}$ و $\frac{\partial U}{\partial Y} \Big|_{Y=0}$ وابسته است. تاثیر درصد حجمی ذرات نانو بر ترم گرادیان‌های سرعت ($\frac{\partial U}{\partial Y} \Big|_{Y=0}$)، قبلاً در شکل‌های ۴ تا ۶ به طور کامل شرح داده شده است. برای مطالعه تاثیر درصد حجمی ذرات نانو روی ترم $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}$ ، شکل ۸ با توجه به رابطه (۸)، ارائه شده است. براساس این شکل، با افزایش درصد حجمی ذرات نانو، ترم $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}$ به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد.



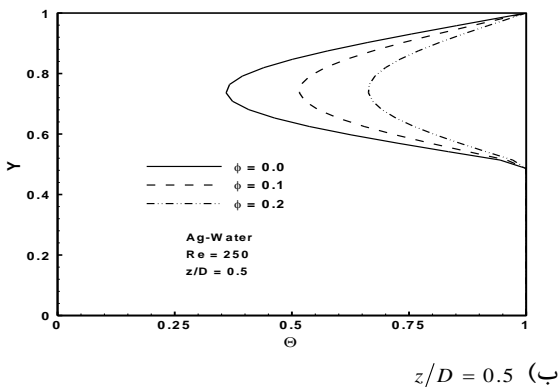
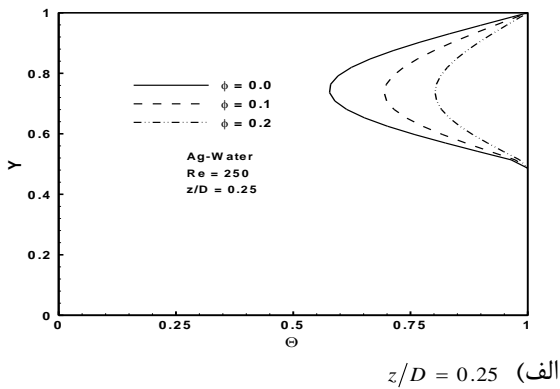
شکل (۸): تاثیر درصد حجمی ذرات نانو روی توزیع $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}$.

بنابراین، با توجه به آنچه در شکل‌های ۴-۶ و ۸ گفته شد، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ضریب اصطکاک با افزایش درصد حجمی ذرات نانو، به علت افزایش ترم $\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}$

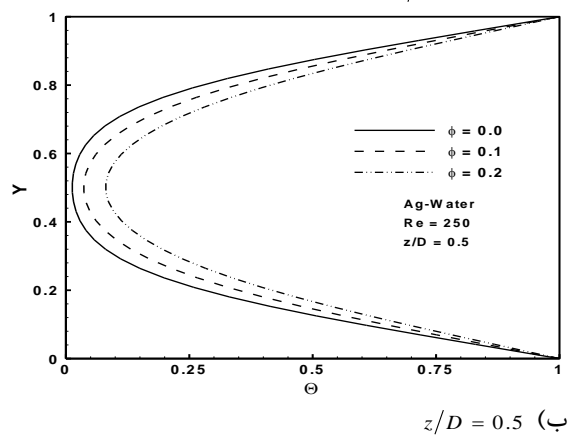
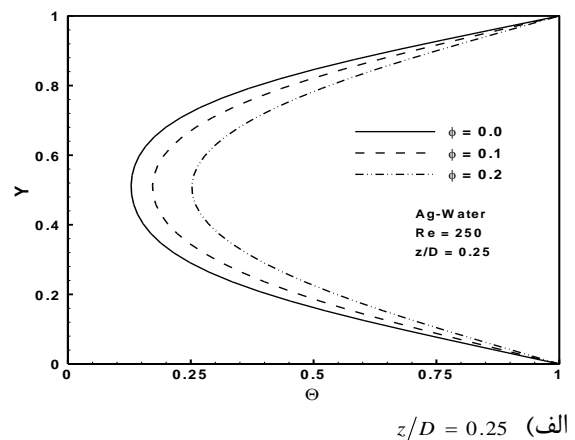
پرهیز از تکرار، ارائه نشده‌اند. همچنین مقایسه دقیق شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ به خوبی نشان می‌دهد که با افزایش نسبت حجمی ذرات نانو، مقادیر پروفیل‌های دما در مقاطع مختلف، افزایش قابل توجهی می‌یابند. این افزایش در مقادیر پروفیل دما، به علت افزایش نرخ انتقال حرارت از دیوارهای داغ کانال به جریان سیال است. براساس رابطه (۹) و مقادیر ارائه شده در جدول ۱، با افزایش درصد حجمی نانو ذرات نقره، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش یافته و در نتیجه نرخ انتقال حرارت به سیال افزایش پیدا می‌کند. با افزایش نرخ انتقال حرارت، رشد لایه مرزی حرارتی بیشتر شده و در نتیجه دمای سیال نیز افزایش یافته و به دمای دیوارهای داغ کانال نزدیک می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد حجمی ذرات نانو، قدر مطلق گرادیان‌های دما روی دیوارهای بالا و پایینی کانال به طور قابل ملاحظه‌ای، کاهش می‌یابند. همچنین، لازم به ذکر است که با رشد لایه مرزی حرارتی، توسعه یافتگی حرارتی جریان نیز در طول کمتری از ابتدای کانال رخ می‌دهد.



شکل (۱۱): تاثیر درصد حجمی ذرات نانو روی توزیع دما در دو مقطع مختلف عرضی، $X=4.5$

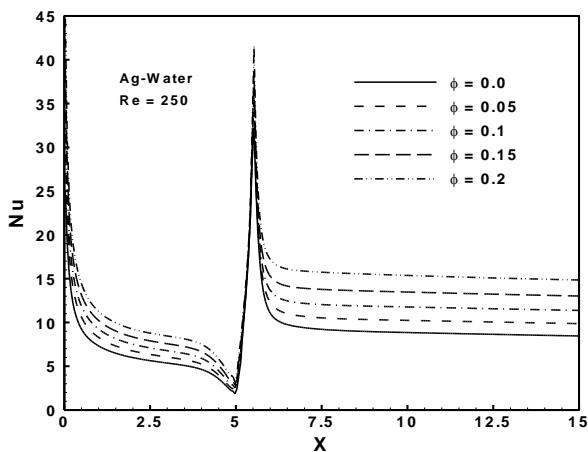


شکل (۱۲): تاثیر درصد حجمی ذرات نانو روی توزیع دما در دو مقطع مختلف عرضی، $X=10$



شکل (۱۰): تاثیر درصد حجمی ذرات نانو روی توزیع دما در دو مقطع عرضی مختلف، $X=3.0$

که ضریب جابجایی سیال ناچیز است، به مقدار حداقل خود می‌رسد. سپس با پیشروی روی پله شیب‌دار و به‌علت وجود دیوار گرم و اختلاط بیشتر سیال، عدد ناسلت با یک شیب تند افزایش یافته و به یک مقدار بیشینه می‌رسد. بعد از این مقدار بیشینه، عدد ناسلت کاهش یافته و در نهایت به‌علت توسعه یافتگی حرارتی جریان به یک مقدار ثابت میل می‌کند. به‌رحال شکل ۱۴ نشان می‌دهد که توزیع عدد ناسلت، به‌طور قابل توجهی به درصد حجمی ذرات نانو وابسته است. آنالیز نتایج حاصل از این شکل به‌وضوح نشان می‌دهد که با افزایش نسبت حجمی ذرات نانو، عدد ناسلت به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.



شکل (۱۴): تاثیر درصد حجمی ذرات نانو بر توزیع عدد ناسلت روی خط مرکزی دیوار پایینی کانال.

این نتیجه را می‌توان با آنالیز دقیق رابطه ارائه شده برای تعریف عدد ناسلت تفسیر کرد. براساس رابطه

$$Nu = \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{1}{(\theta_w - \theta_b)} \left. \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right|_{Y=0}$$

و $\frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0}$ وابسته است. تاثیر درصد حجمی ذرات نانو روی ترم‌های $\frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0}$ و $\frac{1}{(\theta_w - \theta_b)}$ ، قبلاً در

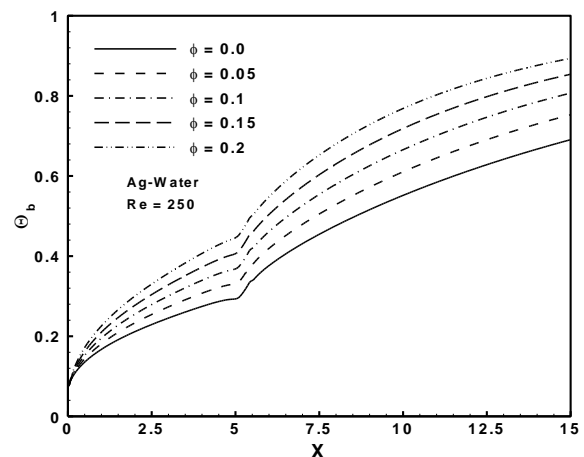
شکل‌های ۱۳-۱۰ به‌طور کامل شرح داده شد. براساس توضیحات آن شکل‌ها، با افزایش درصد حجمی ذرات نانو، گرادیان‌های دما $\left(\frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \right)$ روی دیوار پایینی کانال به‌طور قابل

توجهی کاهش یافته، در حالی که ترم $\frac{1}{(\theta_w - \theta_b)}$ به‌طور

چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

۴-۶- بررسی تاثیر درصد حجمی ذرات جامد نانو بر چگونگی تغییرات توزیع دمای متوسط مخلوط

یکی دیگر از پارامترهای مهم حرارتی در مطالعه سیستم‌های دارای انتقال حرارت جابجایی، توزیع دمای متوسط مخلوط است. برای مطالعه اثرات درصد حجمی ذرات نانو بر دمای متوسط مخلوط، تغییرات این پارامتر در طول کانال، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. از این شکل به‌خوبی مشخص است که با افزایش درصد حجمی ذرات نانو، دمای متوسط سیال افزایش یافته و توسعه یافتگی حرارتی در طول کمتری از ابتدای کانال رخ می‌دهد. همان‌طور که در تفسیر نتایج شکل‌های ۹-۱۲ گفته شد، این افزایش در دمای متوسط مخلوط به‌علت افزایش نرخ انتقال حرارت از دیوارهای گرم کانال به داخل سیال است.



شکل (۱۳): تاثیر درصد حجمی ذرات نانو روی توزیع دمای متوسط مخلوط در داخل کانال.

۵-۶- بررسی تاثیر درصد حجمی ذرات جامد نانو بر چگونگی تغییرات عدد ناسلت

برای مطالعه بیشتر و دقیق‌تر تاثیر درصد حجمی ذرات نانو بر رفتارهای حرارتی جریان سیال، چگونگی تغییرات عدد ناسلت روی خط مرکزی دیوار پایینی کانال در شکل ۱۴ رسم شده است. همان‌طور که از این شکل پیدا است، در تمامی مقادیر درصد حجمی ذرات نانو، توزیع عدد ناسلت روی دیوار پایینی کانال، با یک مقدار ماکزیمم که به‌علت بالا بودن شار حرارتی در مقطع ورودی جریان است، آغاز می‌شود. سپس عدد ناسلت در جهت جریان کاهش پیدا کرده و در نزدیکی کنج پله، جایی

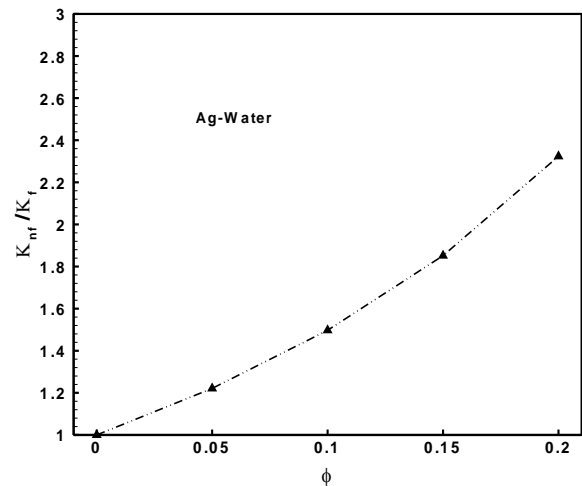
۴- با افزایش درصد حجمی ذرات نانو، توزیع عدد ناسلت روی دیوار پایینی کانال افزایش می‌یابد. این افزایش در عدد ناسلت به‌علت افزایش ترم‌های $\frac{1}{(\Theta_w - \Theta_b)}$ و $\frac{k_{nf}}{k_f}$ با افزایش درصد حجمی ذرات نانو است و

۵- با افزایش درصد حجمی ذرات نانو، رشد لایه مرزی بیشتر شده و توسعه یافتگی حرارتی جریان سیال در طول کمتری از کانال رخ می‌دهد.

۸- مراجع

1. Iwai, H., Nakabe, K., Suzuki K., and Matsubara, K. "The Effects of Duct Inclination Angle on Laminar Mixed Convective Flows over a Backward-Facing Step", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, No. 3, pp. 473-485, 2000.
2. Nie, J.H. and Armaly, B.F. "Convection in Laminar Three-dimensional Separated Flow", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, No. 25, pp. 5407-5416, 2004.
3. Chen, Y.T., Nie, J.H., Hsieh, H.T., and Sun, L.J. "Three-dimensional Convection Flow Adjacent to Inclined Backward-Facing Step", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, No. 25-26, pp. 4795-4803, 2006.
4. Erturk, E. "Numerical Solutions of 2-D Steady Incompressible Flow over a Backward-Facing Step, Part I: High Reynolds Number Solutions", Computers & Fluids, Vol. 37, No. 6, pp. 633-655, 2008.
5. Atashafrooz, M., Gandjalikhan Nassab, S.A., and Ansari, A.B. "Numerical Study of Entropy Generation in Laminar Forced Convection Flow over Inclined Backward and Forward Facing Steps in a Duct", International Review of Mechanical Engineering, Vol. 5, No. 5, pp. 898-907, 2011.
6. Atashafrooz, M., Gandjalikhan Nassab, S.A., and Behineh, E.S. "Effects of Baffle on Separated Convection Step Flow of Radiating Gas in a Duct", International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 33-47, 2015.
7. Dehghani Rayeni, A., and Gandjalikhan Nassab, S.A. "Numerical Simulation of Forced Convection Duct Flow of a Radiating Gas with Separation", Fluid Mechanics and Aerodynamics, Vol. 6, No. 1, pp. 53-66, 2017 (In Persian).
8. Iwai, H., Nakabe K., and Suzuki, K. "Flow and Heat Transfer Characteristics of Backward Facing Step Laminar Flow in a Rectangular Duct", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, No. 3, pp. 457-471, 2000.
9. Uruba, V., Jona's P., and Mazur, O. "Control of a Channel-Flow Behind a Backward-Facing Step by

برای مطالعه تاثیر درصد حجمی ذرات نانو روی ترم $\frac{k_{nf}}{k_f}$ ، شکل ۱۵ با توجه به رابطه (۹)، ارائه شده است. براساس این شکل، با افزایش درصد حجمی ذرات نانو، ترم $\frac{k_{nf}}{k_f}$ به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. بنابراین، با توجه به آنچه گفته شد، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش عدد ناسلت با افزایش درصد حجمی ذرات نانو، به‌علت افزایش ترم‌های $\frac{1}{(\Theta_w - \Theta_b)}$ و $\frac{k_{nf}}{k_f}$ است.



شکل (۱۵): تاثیر درصد حجمی ذرات نانو بر توزیع $\frac{k_{nf}}{k_f}$.

۷- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، تاثیر درصد حجمی ذرات نانو نقره بر رفتارهای هیدرودینامیکی و حرارتی جریان سیال در یک کانال سه‌بعدی و دارای پله پیشرو با ذکر جزئیات، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق، به‌طور خلاصه ارائه می‌شوند:

- ۱- با افزایش درصد حجمی ذرات نانو، ترم‌های k_{nf}/k_f و μ_{nf}/μ_f به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابند،
- ۲- تاثیر درصد حجمی ذرات نانو بر توزیع میدان دما بسیار بیشتر از تاثیر این پارامتر بر توزیع میدان سرعت است،
- ۳- با افزایش درصد حجمی ذرات نانو، توزیع ضریب اصطکاک روی دیوار پایینی کانال به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. در حقیقت، این افزایش به‌علت افزایش ترم μ_{nf}/μ_f برحسب درصد حجمی ذرات نانو است،

- Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 72, pp. 39-47, 2016.
20. Gholamrezaee, H., Raisi, A., and Ghasemi, B. "Mixed Convection of a Water- Al_2O_3 Nanofluid in an Open Square Cavity, Containing a Solid Body Heat Source", Fluid Mechanics and Aerodynamics, Vol. 6, No. 1, pp. 13-26, 2017 (In Persian).
 21. Mansour, R.B., Galanis, N., and Nguyen, C.T. "Experimental Study of Mixed Convection with Water- Al_2O_3 Nanofluid in Inclined Tube with Uniform Wall Heat Flux", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 50, No. 3, pp. 403-410, 2011.
 22. Zeinali Heris, S., Esfahany, M.N., and Etemad, S.G. "Experimental Investigation of Convective Heat Transfer of Al_2O_3 /Water Nanofluid in Circular Tube", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, No. 2, pp. 203-210, 2007.
 23. Al-aswadi, A.A., Mohammed, H.A., Shuaib N.H., and Campo, A. "Laminar Forced Convection Flow over a Backward Facing Step Using Nanofluids", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 37, No. 8, pp. 950-957, 2010.
 24. Mohammed, H.A., Al-aswadi, A.A., Abu-Mulaweh H.I., and Shuaib, N.H. "Influence of Nanofluids on Mixed Convective Heat Transfer over a Horizontal Backward Facing Step", Heat Transfer-Asian Research, Vol. 40, No. 4, pp. 287-307, 2011.
 25. Alawi, O.A., Sidik, N.A.C., Kazi, S.N., and Abdolbaqi, M.K. "Comparative Study on Heat Transfer Enhancement and Nanofluids Flow over Backward and Forward Facing Steps", Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, Vol. 23, No. 1, pp. 25-49, 2016.
 26. Pour, M.S., and Gandjalikhan Nassab, S.A. "Numerical Investigation of Forced Laminar Convection Flow of Nanofluids over a Backward Facing Step under Bleeding Condition", Journal of Mechanics, Vol. 28, No. 2, pp. N7-N12, 2012.
 27. 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, No. 1, pp. 242-249, 2008.
 28. Mohammed, H.A. Alawi, O.A., and Wahid, M.A. "Mixed Convective Nanofluid Flow in a Channel Having Backward-Facing Step with a Baffle", Powder Technology, Vol. 275, pp. 329-343, 2015.
 29. Patankar, S.V. and Spalding, D.B. "A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15, No. 10, pp. 1787-1806, 1972.
 30. Li, A. "Experimental and Numerical Study of Three-Dimensional Laminar Separated Flow Adjacent to Backward-Facing step", Ph.D. Dissertation, University of Missouri, Rolla, MO, 2001.
 - Suction/Blowing", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, No. 4, pp. 665-672, 2007.
 10. Nie, J.H., Chen Y.T., and Hsieh, H.T. "Effects of a Baffle on Separated Convection Flow Adjacent to Backward-Facing Step", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 48, No. 3, pp.618-625, 2009.
 11. Tsay, Y.L. Chang T.S. and Cheng, J.C. "Heat Transfer Enhancement of Backward-Facing Step Flow in a Channel by Using Baffle Installation on Channel Wall", ACTA Mechanica, Vol. 174, No. 1-2, pp. 63-76, 2005.
 12. Selimefendigil F. and Oztop, H.F. "Numerical Analysis of Laminar Pulsating Flow at a Backward Facing Step with an Upper Wall Mounted Adiabatic Thin Fin", Computers & Fluids, Vol. 88, pp. 93-107, 2013.
 13. Atashafrooz M., and Gandjalikhan Nassab, S.A. "Simulation of Three-Dimensional Laminar Forced Convection Flow of a Radiating Gas over an Inclined Backward-Facing Step in a Duct under Bleeding Condition", Institution of Mechanical Engineers, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 227, No. 2, pp. 332-345, 2012.
 14. Atashafrooz, M., Gandjalikhan Nassab S.A., and Lari, K. "Application of Full-Spectrum k Distribution Method to Combined Non-Gray Radiation and Forced Convection Flow in a Duct with an Expansion", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 29, No. 2, pp. 845-859, 2015.
 15. Atashafrooz, M., Gandjalikhan Nassab S.A., and Lari, K. "Coupled Thermal Radiation and Mixed Convection Step Flow of Non-gray Gas", Journal of Heat Transfer (ASME), Vol. 138, No. 7, pp. 072701-9, 2016.
 16. Khanafer, K., Vafai K., and Lightstone, M. "Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure, Utilizing Nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, No. 19, pp. 3639-3653, 2003.
 17. Akbari, M., Behzadmehr, A., and Shahraki, F. "Fully Developed Mixed Convection in Horizontal and Inclined Tubes with Uniform Heat Flux Using Nanofluid", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 29, No. 2, pp. 545-556, 2008.
 18. Sidik, N.A.C., Mohammed, H.A., Alawi, O.A., and Samion, S. "A Review on Preparation Methods and Challenges of Nanofluids", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 54, pp. 115-125, 2014.
 19. Sidik, N.A.C., Samion, S., Musa, M.N., Muhammad, M.J., Muhammad, A.I., Yazid, M.N.A.W.M., and Mamat, R. "The Significant Effect of Turbulence Characteristics on Heat Transfer Enhancement, Using Nanofluids: A Comprehensive Review", International

