

مطالعه عددی جریان نانوسیال و انتقال گرما در یک میکروکانال با یک ریب آشوب‌ساز جریان

وحید فرهنگ مهر*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بناب، بناب، ایران

ابوالفضل شافعی آسایش

دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بناب، بناب، ایران

چکیده

در تحقیق حاضر به مطالعه عددی جریان سیال حول یک ریب مستطیلی آشوب‌ساز جریان در یک میکروکانال مستطیلی پرداخته شده است. هدف از این مطالعه، بررسی تاثیر پارامترهای کلیدی طراحی شامل ارتفاع و طول ریب و عدد رینولدز بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی جریان سیال می‌باشد. همچنین انتقال گرمای جابجایی اجباری جریان نانوسیال درون میکروکانال مذکور مورد مطالعه عددی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه نیز بررسی اثر کسر حجمی نانوذرات و ریب بر انتقال گرما می‌باشد. معادلات پایه، دوبعدی و تراکم‌ناپذیر حاکم در رژیم‌های لایه‌ای و آشفته در یک شبکه بی‌سازمان هموار، با تعداد سلول‌های کافی و با فشرده‌سازی آنها در نواحی با گرادیان‌های شدید متغیرهای جریان با روش حجم محدود حل شده‌اند. اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها با مقایسه نتایج با اطلاعات تجربی موجود در ادبیات فن صورت گرفته است. این مقایسه نشان دهنده توافق خوب بین آنها می‌باشد. نتایج کار حاضر با جزئیات دقیق و اعتبارسنجی شده می‌تواند در طراحی میکروسیستم‌ها به کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: میکروکانال، ریب، نانوسیال، انتقال گرما، جریان لایه‌ای، جریان آشفته.

Numerical Investigation of Nanofluid Flow and Heat Transfer in a Microchannel with a Flow-Disturbing Rib

V. Farhangmehr

Department of Mechanical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

A. Shafei Asayesh

Department of Mechanical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

Abstract

In the present research, the fluid flow around a rectangular flow-disturbing rib in a rectangular microchannel has been numerically studied. The aim of this study is investigating the effect of key design parameters including the height and the length of rib and the Reynolds number on the hydrodynamic characteristics of fluid flow. Also, the forced convective heat transfer of the nanofluid flow in the aforementioned microchannel has been numerically studied. The aim of this study is investigating the effect of volumetric fraction of nanoparticles and the rib on the heat transfer. The steady, two-dimensional, and incompressible governing equations in laminar and turbulent regimes have been solved by the finite volume method in a smooth unstructured grid with appropriate number of cells clustered in the regions with intense gradients of flow parameters. The validation of simulations has been conducted by comparing the results with the available experimental data in the literature. This comparison shows a good agreement between them. The results of present work with great and validated details can be applied in the design of microsystems.

Keywords: Microchannel, Rib, Nanofluid, Heat transfer, Laminar regime, Turbulent regime.

تکنیک‌های فعال که در آنها نیاز به مصرف انرژی خارجی می‌باشد، میتوان به مکش یا دمش سیال از مرزهای فیزیکی، تزریق میکروحباب-ها یا میکروذرات به درون جریان اصلی و اعمال نیروهای الکتریکی یا مغناطیسی بر سیال اشاره نمود. در تکنیک‌های انفعالی بدون نیاز به مصرف انرژی خارجی تنها با ایجاد تغییراتی در مسیر جریان سیال به عنوان مثال با قرار دادن پله رو به عقب^(BFS)، پله رو به جلو^(FFS) یا ریب^۶ می‌توان عمل اختلاط را به آسانی و با صرف هزینه اقتصادی کم بهبود بخشید.

جریان گذرنده از روی یک BFS در ابعاد میکرو به عنوان یک مورد مطالعاتی محک^۷ قبلا به طور گسترده در ادبیات فن به صورت‌های

۱- مقدمه

توسعه قابل ملاحظه تکنولوژی‌های میکروفلوئیدی^۱ به عنوان یکی از رو به رشدترین زمینه‌ها در شاخه‌های مختلف مهندسی مانند مهندسی مکانیک، مهندسی شیمی و مهندسی پزشکی به کاربردهای متنوع آنها در گستره وسیعی از میکروسیستم‌ها انجامیده است. میکروسیستم‌های بهره‌مند از تکنولوژی‌های میکروفلوئیدی دارای نسبت سطح به حجم بالایی بوده و بازده و قابلیت عملکرد بهتری دارند. همچنین در آنها امکان کنترل مناسب پدیده‌های انتقال منتوم، گرما و جرم وجود دارد [۱].

اختلاط یکی از عملیات‌های زیربنایی برای بسیاری از فرایندهای مکانیکی و شیمیایی در ابعاد میکرو می‌باشد که می‌تواند با استفاده از تکنیک‌های فعال^۲ یا انفعالی^۳ و یا ترکیبی از آنها ایجاد شود. از جمله

³ Passive technique

⁴ Backward Facing Step

⁵ Forward Facing Step

⁶ Rib

⁷ Benchmark test case

¹ Microfluidic

² Active technique

برای بهبود انتقال گرما به کار گرفته می‌شوند. اکبری‌نیا و همکاران [۱۲] اثر قطر میکروذرات و نانوذرات بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی و انتقال گرمای جریان لایه‌ای در یک لوله خمیده افقی را با به‌کارگیری مدل مخلوط دوفازی^{۱۱} مطالعه عددی نمودند. آنها دریافته‌اند که با افزایش قطر ذرات در یک کسر حجمی^{۱۲} مشخص، سرعت محوری جریان و ضریب اصطکاک افزایش یافته و عدد ناسلت کاهش می‌یابد. برای میکروذرات، اثر گریز از مرکز باعث کشیده شدن آنها به سمت دیواره بیرونی لوله می‌شود، ولی برای نانوذرات چنین پدیده‌ای مشاهده نمی‌شود. امین‌فر و همکاران [۱۳] انتقال گرما و جریان نانوسیال را در یک لوله عمودی و در حضور یک میدان مغناطیسی غیریکنواخت با مدل مخلوط دوفازی مورد مطالعه قرار دادند. عباسیان‌ارانی و امانی [۱۴] انتقال گرمای نانوسیال در یک لوله افقی را با هدف بررسی اثر کسر حجمی نانوذرات بر انتقال گرما مطالعه تجربی نمودند. آنها مشاهده کردند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. آنها توصیه کردند که استفاده از نانوذرات در اعداد رینولدز خیلی بالا مناسب نیست، زیرا افت فشار جریان قابل توجه بوده و جبران آن در مقابل بهبود انتقال گرما مقرون به صرفه نمی‌باشد.

در سال‌های اخیر، توجهات به کاربرد نانوسیالات در میکروکانال‌ها و میکرولوله‌ها جلب شده است. کلته و همکاران [۱۵] انتقال گرمای نانوسیال در میکروکانال را با مدل دوفازی اوپلری-اوپلری مورد مطالعه عددی قرار دادند و دریافته‌اند که نانوسیال مانند یک سیال همگن غیرنیوتنی رفتار می‌کند و سرعت و دمای نانوذرات با سرعت و دمای سیال پایه^{۱۳} تقریباً یکی است. کلته و همکاران [۱۶] به مطالعه عددی و تجربی انتقال گرمای نانوسیال و جریان لایه‌ای در یک میکروکانال پرداختند. در کار آنها، یک دیواره عایق بود و دیگری تحت شار گرمایی ثابت قرار داشت. آنها از مدل مخلوط دوفازی در مطالعه عددی خود استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت افزایش یافته و با افزایش قطر نانوذرات عدد ناسلت کاهش می‌یابد. کلته و همکاران [۱۷] به مطالعه عددی انتقال گرما و افت فشار جریان نانوسیال با سیالات پایه مختلف در یک میکروکانال پرداختند. آنها دریافته‌اند که افت فشار ربطی به جنس نانوذرات در یک سیال پایه مشخص نداشته، در حالی که انتقال گرما ربط دارد. همچنین آنها دریافته‌اند که آب سیال پایه خوبی برای نانوذرات است، زیرا افت فشار برای نانوسیال با سیال پایه آب کمتر است و ضریب انتقال گرما برای آن بیشتر است.

متأسفانه انجام مطالعات آزمایشگاهی روی جریان سیال در میکروکانال‌ها بسیار وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد. امروزه با توسعه دینامیک سیالات محاسباتی امکان شبیه‌سازی‌های عددی اعتبارسنجی شده برای آن و فراهم نمودن جزئیات بیشتر و دقیق‌تر برای آن وجود دارد. بر اساس اطلاعات نویسندگان، تحقیقات عددی بسیار اندکی روی اثر ریب آشوب‌ساز جریان در میکروکانال‌ها انجام شده است. ما بر آن شدیم که با هدف بررسی موشکافانه اثر مشخصه‌های هندسی یک ریب

تجربی [۲ و ۳] یا عددی [۴ و ۵] مورد مطالعه قرار گرفته است. اخیراً مطالعه جریان مایع گذرنده از روی یک BFS واقع بر دیواره یک میکروکانال علاقه‌مندی زیادی را به خود جلب کرده است. خربیت و همکاران [۶] جریان حول یک BFS واقع بر دیواره یک میکروکانال را با روش حجم محدود^۱ به صورت عددی مطالعه کرده و گزارش دادند که مشخصه‌های هیدرودینامیکی اصلی جریان در ابعاد مایکرو مانند پروفیل‌های سرعت و نواحی گردش مجدد^۲ جریان عملاً در ابعاد میکرو تغییر چندانی نمی‌کنند. تین و همکاران [۷] آزمایشاتی روی جریان‌های پایا و ناپایا حول یک BFS واقع بر دیواره یک میکروکانال با هدف اعتبارسنجی یک تکنیک μPTV سه‌بعدی انجام دادند.

امروزه سیستم‌های MEMS^۳ که شامل میکروجرایانات می‌باشند، کاربردهای ارزشمند بیولوژیکی و پزشکی پیدا کرده‌اند. از جمله کاربردهای بیولوژیکی آنها می‌توان به جداسازی گلبول‌های قرمز خون از پلاسما با استفاده از یک هندسه BFS یا FFS^۴ یا ریب اشاره کرد [۸]. از جمله کاربردهای پزشکی آنها نیز می‌توان به رفع انسداد عروق اشاره نمود. در همودینامیک ثابت شده است که تنش برشی دیواره^۵ (WSS) به عنوان یک پارامتر اصلی، تشکیل پلاک^۶ انسداد کننده عروق را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. این پلاک معمولاً همانند یک BFS یا یک FFS^۷ و یا یک ریب عمل می‌کند [۹].

از آنجا که در تحقیق عددی حاضر برای اعتبارسنجی صحت نتایج به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۰] بهره گرفته شده است، لذا تنها به مرور آن به تفصیل پرداخته می‌شود. در این مرجع، استوگیانیس و همکاران جریان پایای آب در رژیم‌های لایه‌ای و آشفتنه درون میکروکانال مستطیلی با طول $L=100$ mm، ارتفاع $H=0.925$ mm و عرض $W=10$ mm که در دیواره پایینی آن یک ریب مستطیلی با ارتفاع $d=0.4$ mm، عرضی برابر با عرض میکروکانال و با طول متغیر^۸ در فاصله 60 mm از ورودی میکروکانال قرار داشت را مورد مطالعه تجربی قرار دادند. با این ابعاد میکروکانال و ریب، نسبت انسداد^۹ یعنی نسبت ارتفاع ریب به ارتفاع میکروکانال برابر 0.43 و نسبت دید عرضی^۷ یعنی نسبت عرض میکروکانال به ارتفاع ریب برابر 25 بود. این نسبت دید عرضی، دوبعدی در نظر گرفتن جریان در میکروکانال را در شبیه‌سازی‌های عددی امکان‌پذیر می‌ساخت. آنها از میکروسنسورهای الکترونیفون^۸ در دیواره بالایی میکروکانال جهت اندازه‌گیری نرخ برشی دیواره^۹ و از تکنیک $\mu - PIV$ برای اندازه‌گیری میدان سرعت سیال بدون تاثیرگذاری بر جریان و نیز با قابلیت اعتماد بالا استفاده کردند.

نانوسیال یک سوسپانسیون همگن از نانوذرات فلزی یا غیرفلزی در یک مایع است. از نانوذرات معمولاً برای افزایش رسانایی گرمایی مایع استفاده می‌شود [۱۱]. نانوسیالات در جریان‌های داخل کانال‌ها و لوله‌ها

¹ Finite volume method

² Recirculation areas

³ Micro-Electro-Mechanical Systems

⁴ Wall Shear Stress

⁵ Plaque

⁶ Blockage ratio

⁷ Spanwise aspect ratio

⁸ Electrodiffusion

⁹ Wall shear rate

¹⁰ Micro-Particle Image Velocimetry

¹¹ Two-phase mixture model

¹² Volumetric fraction

¹³ Base fluid

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]; i, j = 1, 2 \quad (2)$$

که در آنها x_1 و x_2 به ترتیب مختصات دکارتی x و y چگالی آب، ρ فشار p و μ لزجت دینامیکی آب می‌باشند. معادلات پیوستگی و ممنتوم در رژیم آشفته همراه با دو معادله مدل آشفتگی K و ϵ با در نظر گرفتن تنها بخش متوسط متغیرهای جریان عبارتند از:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0; i = 1, 2 \quad (3)$$

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_i \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right]; i, j = 1, 2$$

$$\bar{u}_i \frac{\partial K}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + \quad (5)$$

$$\mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon; \mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\epsilon}; i, j = 1, 2$$

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \quad (6)$$

$$C_1 \mu_t \frac{\epsilon}{K} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{K}; i, j = 1, 2$$

که در آنها x_1 و x_2 به ترتیب مختصات دکارتی x و y چگالی آب، ρ بخش متوسط فشار، μ_t لزجت دینامیک آب، ϵ و K به ترتیب آهنگ تولید انرژی جنبشی آشفتگی و آهنگ اتلاف آن، μ_t لزجت گردابه‌ای^۲، \bar{u}_1 و \bar{u}_2 به ترتیب بخش متوسط مولفه‌های x و y سرعت و σ_K ، σ_ϵ و C_1 و C_2 ثوابت مدل آشفتگی K و ϵ می‌باشند.

$$C_1 = 1.44; C_2 = 1.92; \sigma_K = 1; \sigma_\epsilon = 1.3; C_\mu = 0.09 \quad (7)$$

در صورت وجود نانوذرات درون آب و نیز انتقال گرما، معادله انرژی برای رژیم لایه‌ای به شکل معادله (۸) و برای رژیم آشفته به شکل معادله (۹) به معادلات فوق افزوده می‌شود و از ρ_{nf} در جای ρ و از μ_{nf} به جای μ در معادلات (۲)، (۴)، (۵) و (۶) استفاده می‌گردد:

$$\rho_{nf} c_{p,nf} \frac{\partial (u_i T)}{\partial x_j} = k_{nf} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\partial T}{\partial x_i} \right); i, j = 1, 2 \quad (8)$$

$$\rho_{nf} c_{p,nf} \frac{\partial (\bar{u}_i T)}{\partial x_j} = k_{nf} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\partial T}{\partial x_i} \right); i, j = 1, 2 \quad (9)$$

که در آنها ρ_{nf} ، $c_{p,nf}$ و k_{nf} به ترتیب چگالی، گرمای ویژه و رسانایی گرمایی نانو سیال و T دما است. این پارامترها و لزجت دینامیکی نانو سیال μ_{nf} بر پایه مدل بونجیورنو [۱۸] به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_p + (1 - \varphi) \rho_{bf} \quad (10)$$

$$c_{p,nf} = \varphi c_{p,p} + (1 - \varphi) c_{p,bf} \quad (11)$$

$$k_{nf} = \left[\frac{k_p + 2k_{bf} + 2\varphi(k_p - k_{bf})}{k_p + 2k_{bf} - \varphi(k_p - k_{bf})} \right] k_{bf} \quad (12)$$

$$\mu_{nf} = (1 + 5.45\varphi + 108.2\varphi^2) \mu_{bf} \quad (13)$$

که در آنها ρ_p ، $c_{p,p}$ و k_p

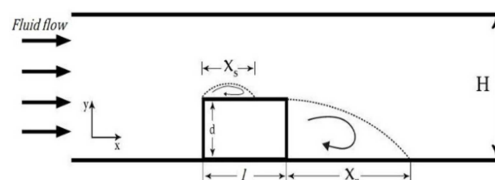
به ترتیب چگالی، گرمای ویژه و رسانایی گرمایی نانوذرات، μ_{bf} و $c_{p,bf}$ و k_{bf} به ترتیب چگالی، گرمای ویژه و رسانایی گرمایی آب و φ غلظت حجمی نانوذرات در آب می‌باشند. برای آب و

مستطیلی واقع بر دیواره پایینی یک میکروکانال مستطیلی بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی جریان آب حول آن مانند اندازه نواحی گردش مجدد و پروفیل‌های سرعت سیال، تحقیق حاضر را انجام دهیم. همچنین بر اساس مرور ما در ادبیات فن، انتقال گرمای جابجایی اجباری درون میکروکانال‌هایی با شرط مرزی چاه گرمایی^۱ که جریان آب حاوی نانوذرات از درون آنها عبور می‌کند، کمتر مورد مطالعه عددی قرار گرفته است. همین ما را بر آن داشت که به این موضوع نیز در این مقاله بپردازیم.

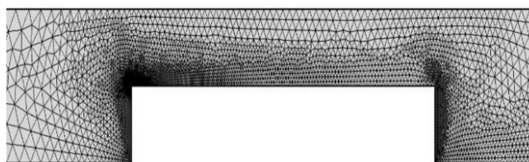
۲- معادلات حاکم و حل عددی آنها

در شکل ۱ طرحواره‌ای دوبعدی از یک میکروکانال مستطیلی به ارتفاع H با یک ریب مستطیلی به ارتفاع d و طول l واقع بر دیواره پایینی آن همراه با جهت جریان آب و ناحیه گردش جریان در بالای ریب به طول x_s و ناحیه گردش جریان در پشت ریب به طول x_r در دستگاه - مختصات کارتزین x, y نشان داده شده است. تمام مشخصات هندسی مربوط به میکروکانال و ریب و نیز محل قرارگیری ریب در میکروکانال طبق مرجع [۱۰] انتخاب شده‌اند. در مرجع مذکور، ریب در فاصله 20H از ورودی میکروکانال و در فاصله 30H از خروجی میکروکانال قرار داده شده بود تا اولاً جریان قبل از رسیدن به ریب توسعه یافته کامل هیدرودینامیکی شود و ثانیاً بتوان از اثرات خروج جریان از میکروکانال چشم‌پوشی نمود. در شکل ۲ شبکه بی‌سازمان^۲ تولید شده برای میدان حل عددی مساله نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود شبکه کاملاً هموار، با تعداد سلول کافی و با فشردگی مناسب آنها در جاهایی که گرادیان‌های شدید متغیرهای جریان وجود دارد، می‌باشد.

معادلات حاکم بر جریان پایا، دوبعدی و تراکم‌ناپذیر آب، معادلات پیوستگی و ممنتوم می‌باشند. این معادلات در رژیم لایه‌ای عبارتند از:



شکل ۱- طرحواره‌ای از مساله



شکل ۲- شبکه تولید شده برای میدان حل عددی مساله

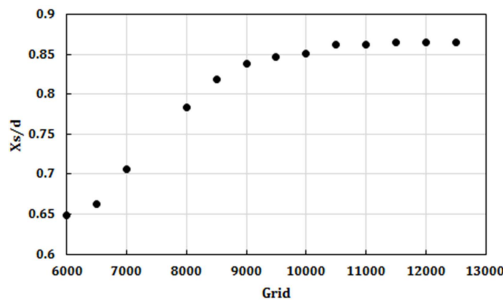
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; i = 1 \quad (1)$$

¹ Heat sink

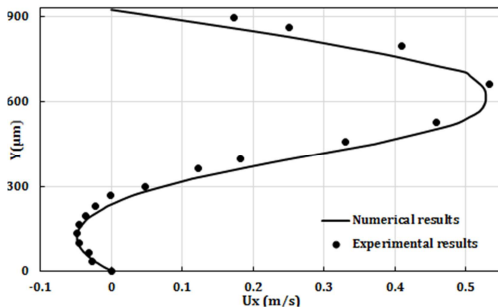
² Unstructured grid

³ Eddy viscosity

مجدد جریان در بالای ریب و در پشت آن، از ریب با طولها و ارتفاع-های مختلف و نیز اعداد رینولدز مختلف جریان استفاده می‌شود. برای بررسی حصول استقلال نتایج حل عددی از شبکه، نمودار طول بی‌بعد ناحیه گردش جریان در بالای ریب $\frac{x_s}{d}$ نسبت به تعداد سلول‌های چند شبکه برای ریب با $\frac{l}{d} = 9$ و $\frac{d}{H} = 0.4$ در $Re = 750$ در شکل ۳ ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که استقلال نتایج از شبکه در شبکه با تعداد سلول‌های 12000 حاصل شده و از این پس تمام نتایج در همین شبکه ارائه می‌گردد.



شکل ۳- نمودار استقلال نتایج از شبکه برای طول بی‌بعد ناحیه گردش جریان در بالای ریب $\frac{x_s}{d}$



شکل ۴- پروفیل سرعت در مقطع $\frac{x}{H} = 2$ در پایین دست ریب

در شکل‌های ۵ و ۴ برای $Re=220$ و در شکل ۶ برای اعداد رینولدز مختلف اعتبارسنجی درستی شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته به ترتیب با مقایسه پروفیل سرعت سیال در مقطع $\frac{x}{H} = 2$ در پایین دست ریب، توزیع نرخ برشی روی دیواره بالایی میکروکانال و طول بی‌بعد ناحیه گردش جریان در پشت ریب $\frac{x_r}{d}$ برای ریب با $\frac{l}{d} = 9$ و $\frac{d}{H} = 0.4$ با اطلاعات آزمایشگاهی مرجع [۱۰] انجام شده است که نشان دهنده وجود یک توافق بسیار خوب بین آنها می‌باشد. مقادیر همیشه مثبت نرخ برشی روی دیواره بالایی میکروکانال این مفهوم را می‌رساند که هیچ ناحیه گردش جریان روی دیواره بالایی میکروکانال وجود ندارد. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که تا عدد رینولدز حدود 600 یعنی در رژیم جریان لایه‌ای، $\frac{x_r}{d}$ به صورت خطی با عدد رینولدز افزایش می‌یابد. برای اعداد رینولدز بزرگتر از 600 یعنی در رژیم جریان آشفتنه، $\frac{x_r}{d}$ کاهش یافته و سریعاً به مقدار $\frac{x_r}{d} \approx 13.5$ می‌رسد و سپس عملاً تا عدد

نانوذرات اکسیدتیتانیوم با قطر $27nm$ که در کار حاضر استفاده شده‌اند، به ترتیب داریم:

$$\rho_{bf} = 1000kgm^{-3}; k_{bf} = 0.61Wm^{-1}K^{-1};$$

$$c_{p,bf} = 4171Jkg^{-1}K^{-1} \quad (14)$$

$$\rho_p = 4250kgm^{-3}; k_p = 8.95Wm^{-1}K^{-1};$$

$$c_{p,p} = 686.2Jkg^{-1}K^{-1} \quad (15)$$

در حل عددی معادلات، از الگوریتم SIMPLE به منظور کوپل کردن میدان‌های فشار و سرعت بهره گرفته و سپس از طرح گسسته-سازی قانون توانی^۱ در معادلات ممتوم، ϵ, K ، و انرژی و از طرح گسسته‌سازی مرتبه دوم بالادست به منظور محاسبه فشار در وجوه سلول‌های شبکه استفاده می‌شود. در نهایت، معادلات گسسته‌سازی - شده با روش حجم محدود و استفاده از الگوریتم رانگ-کوتای^۲ مرتبه پنج با فرایند پیمایش زمانی^۳ تا رسیدن به معیار همگرایی 10^{-6} حل - می‌گردند. در انتخاب الگوریتم کوپلینگ، طرح‌های گسسته‌سازی معادلات حاکم و الگوریتم پیمایش زمانی، به دقت قابل قبول برای نتایج و سرعت همگرایی مناسب برای حل عددی توجه می‌شود. شرایط مرزی هیدرودینامیکی در نظر گرفته شده عبارتند از: شرط عدم لغزش بر دیواره‌های میکروکانال و ریب، سرعت ثابت و یکنواخت جریان ورودی - میکروکانال که با توجه به عدد رینولدز تعیین می‌شود و شرط مرزی جریان خروجی در خروجی میکروکانال. شرایط مرزی گرمایی نیز عبارتند از: دمای ثابت و یکنواخت جریان ورودی به میکروکانال، دیواره عایق‌بندی شده پایینی میکروکانال که شامل ریب نیز می‌شود، چاه گرمایی بودن دیواره بالایی میکروکانال با ضخامت $200\mu m$ با دمای ثابت $333K$ جنس سیلیکون. برای مدل‌سازی نانوسیال از مدل مخلوط دوفازی همگن بهره گرفته می‌شود.

سه پارامتر بی‌بعد به عنوان متغیرهای اصلی طراحی عبارتند از: نسبت دید^۱ $\frac{l}{d}$ ، نسبت انسداد $\frac{d}{H}$ و عدد رینولدز $Re = \frac{UH}{\nu}$ تعریف شده بر اساس ارتفاع میکروکانال H ، سرعت جریان ورودی میکروکانال U و لزجت سینماتیک سیال $\nu = \mu/\rho$ در رژیم آرام، $\nu = \mu_t/\rho$ در رژیم آشفتنه و $\nu = \mu_{nf}/\rho_{nf}$ برای نانوسیال در رژیم‌های آرام و آشفتنه. نسبت دید عرضی ثابت و برابر 25، همان مقدار اشاره شده در مرجع [۱۰]، است. گستره متغیرهای اصلی طراحی عبارتند از: $\frac{d}{H}$ بین 0.4 تا 0.8، $\frac{l}{d}$ بین 2 تا 16، عدد رینولدز جریان لایه‌ای بین 100 تا 360 و عدد رینولدز جریان آشفتنه بین 650 تا 1600 است.

۳- نتایج و بحث روی آنها

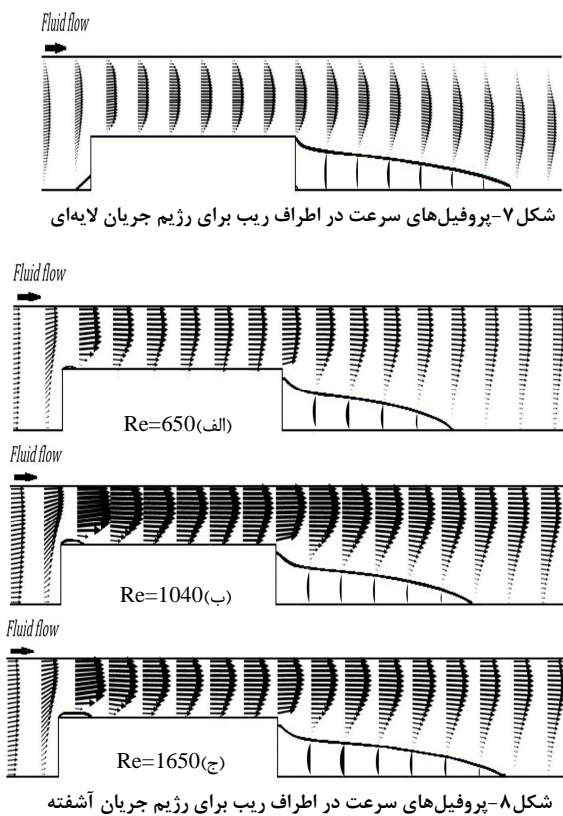
هدف از تحقیق عددی حاضر، درک بهتر هیدرودینامیک جریان پایا، تراکم‌ناپذیر و دوبعدی آب با رژیم‌های مختلف لایه‌ای و آشفتنه درون یک میکروکانال مستطیلی با یک ریب مستطیلی آشوب‌ساز جریان می‌باشد. بدین منظور و جهت فراهم نمودن اطلاعات بیشتر و دقیق‌تر برای میدان سرعت سیال اطراف ریب و طول نواحی گردش

¹ Power-law

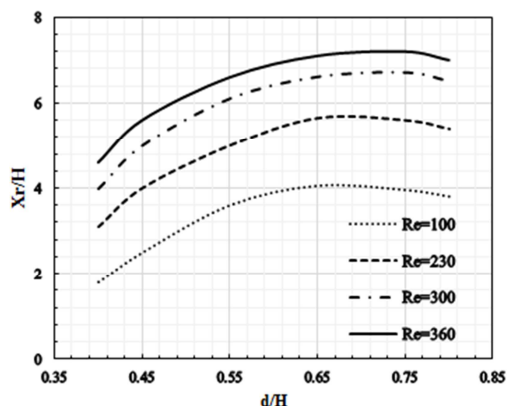
² Runge-Kutta

³ Time marching

⁴ Shear rate

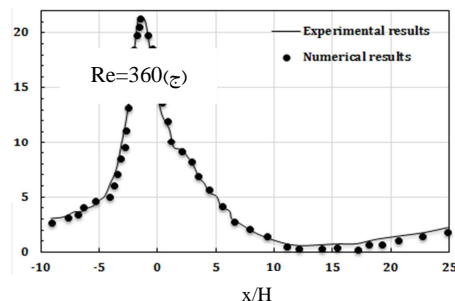


در شکل ۹ تغییر طول بی‌بعد ناحیه گردش جریان در پشت ریب $\frac{x_r}{d}$ با نسبت انسداد $\frac{d}{H}$ برای اعداد رینولدز مختلف و برای نسبت دید ریب $\frac{l}{d} = 9$ در رژیم جریان لایه‌ای ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در رژیم آرام آرام $\frac{x_r}{d}$ شدیداً متأثر از عدد رینولدز و نسبت انسداد است، در حالی که نسبت دید به نظر می‌رسد کمترین اثر روی آن داشته باشد. شکل متحنی‌ها برای تمام اعداد رینولدز مشابه بوده و در همه آنها، $\frac{x_r}{d}$ در نسبت انسداد $\frac{d}{H} = 0.65$ بیشینه می‌باشد.

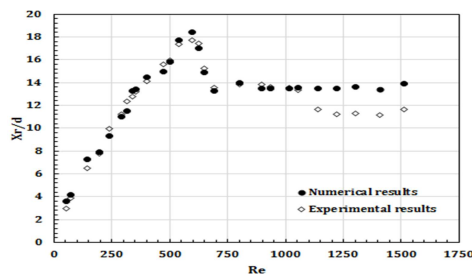


شکل ۹- تغییرات طول بی‌بعد ناحیه گردش جریان در پشت ریب $\frac{x_r}{d}$ با نسبت انسداد $\frac{d}{H}$ برای اعداد رینولدز مختلف در رژیم جریان لایه‌ای

رینولدز 1600 (بزرگترین عدد رینولدز مطالعه شده در کار حاضر) ثابت می‌ماند.

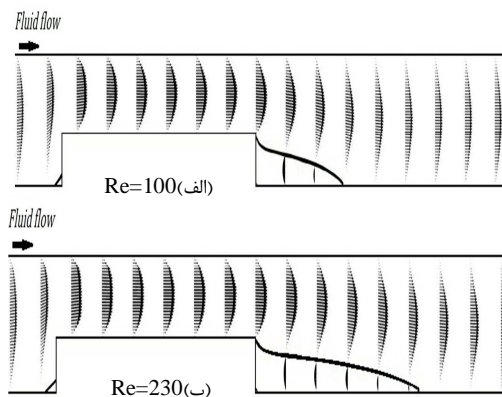


شکل ۵- توزیع نرخ برشی روی دیواره بالایی میکروکانال

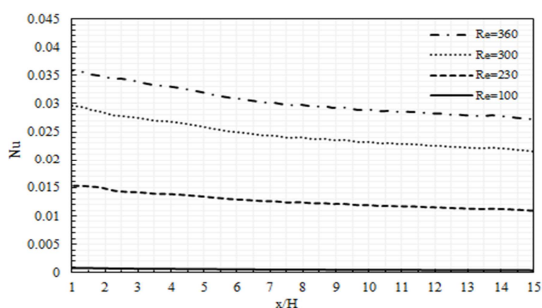


شکل ۶- طول بی‌بعد ناحیه گردش جریان در پشت ریب $\frac{x_r}{d}$ نسبت به عدد رینولدز

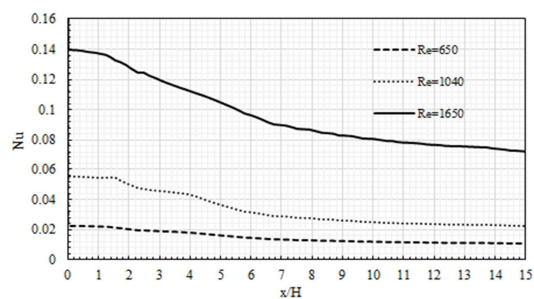
در شکل‌های ۷ و ۸ پروفیل‌های سرعت اطراف ریب با $\frac{d}{H} = \frac{l}{d} = 9$ در رژیم جریان لایه‌ای با سه عدد رینولدز مختلف $Re = 100, 230, 360$ و رژیم آشفته با سه عدد رینولدز مختلف $Re = 650, 1040, 1650$ نشان داده شده است. در رژیم جریان لایه‌ای مشاهده می‌شود که طول ناحیه گردش جریان در پشت ریب شدیداً متأثر از عدد رینولدز بوده و با آن افزایش می‌یابد، در حالی که در رژیم جریان آشفته تأثیر عدد رینولدز بر افزایش طول ناحیه گردش جریان در پشت ریب کمتر است. همچنین مشاهده می‌شود که برای $Re=650$ یک ناحیه گردش جریان در بالای ریب شروع به شکل‌گیری می‌کند و با افزایش عدد رینولدز بر طول آن افزوده می‌شود.



دیواره پایینی میکروکانال بعد از ریب در رژیم جریان لایه‌ای با چهار عدد رینولدز مختلف 100, 230, 300, 360 و در رژیم آشفته با سه عدد رینولدز مختلف 650, 1040, 1650 را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها نسبت دید و نسبت انسداد ریب به ترتیب $9 = \frac{l}{d}$ و $0.4 = \frac{d}{H}$ و کسر حجمی نانوذرات در آب $\phi = 1\%$ می‌باشد. مشاهده می‌شود که در هر دو رژیم لایه‌ای و آشفته با افزایش عدد رینولدز و افزایش طول - گردابه بزرگ پشت ریب ناسلت موضعی در پشت ریب افزایش پیدا کرده و انتقال گرما بهبود می‌یابد. در شکل‌های ۱۵ و ۱۴ ناسلت موضعی در پشت ریب در رژیم آرام با عدد رینولدز 230 و در رژیم آشفته با عدد رینولدز 1040 برای چهار کسر حجمی مختلف نانوذرات در آب $\phi = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$ ارائه شده است. در اینجا نیز نسبت دید و نسبت انسداد ریب به ترتیب $9 = \frac{l}{d}$ و $0.4 = \frac{d}{H}$ دیده می‌شود که در رژیم‌های لایه‌ای و آشفته با افزایش کسر حجمی نانوذرات در آب ناسلت موضعی در پشت ریب افزایش یافته و انتقال گرما بهبود می‌یابد. مشاهده گردید که کسر حجمی نانوذرات تأثیری بر پروفیل‌های سرعت بی‌بعد و دمای بی‌بعد ندارد و افزایش عدد ناسلت تنها ناشی از افزایش ضریب رسانش گرمایی آب توسط نانوذرات است.

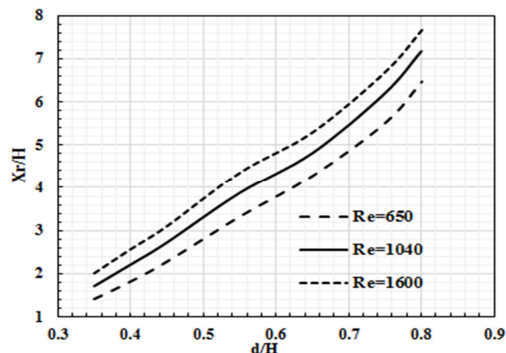


شکل ۱۲- ناسلت موضعی رژیم لایه‌ای روی دیواره پایینی میکروکانال در پشت ریب با نسبت‌های دید و انسداد $9 = \frac{l}{d}$ و $0.4 = \frac{d}{H}$ و کسر حجمی نانوذرات $\phi = 1\%$ در آب

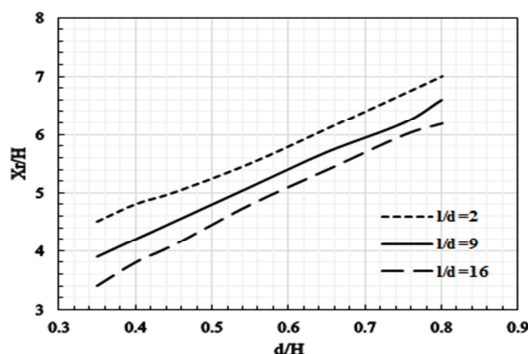


شکل ۱۳- ناسلت موضعی رژیم آشفته روی دیواره پایینی میکروکانال در پشت ریب با نسبت‌های دید و انسداد $9 = \frac{l}{d}$ و $0.4 = \frac{d}{H}$ و کسر حجمی نانوذرات $\phi = 1\%$ در آب

در شکل ۱۰ تغییرات طول بی‌بعد ناحیه گردش جریان در پشت ریب $\frac{x_r}{d}$ با نسبت انسداد $\frac{d}{H}$ به ترتیب برای رینولدزهای مختلف در رژیم جریان آشفته و برای ریب با نسبت دید $9 = \frac{l}{d}$ و در شکل ۱۱ برای $Re=1040$ در رژیم جریان آشفته و برای ریب با نسبت دیدهای مختلف نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو شکل $\frac{x_r}{d}$ به صورت خطی با نسبت انسداد افزایش می‌یابد و تأثیر عدد رینولدز بر آن در مقایسه با رژیم جریان لایه‌ای ضعیف‌تر است. همچنین مشاهده می‌شود که اثر نسبت دید ریب روی $\frac{x_r}{d}$ در رژیم جریان آشفته برای مقادیر کوچک نسبت انسداد با اهمیت می‌باشد.



شکل ۱۰- تغییرات طول بی‌بعد ناحیه گردش جریان در پشت ریب $\frac{x_r}{d}$ با نسبت انسداد $\frac{d}{H}$ برای اعداد رینولدز مختلف در رژیم جریان آشفته

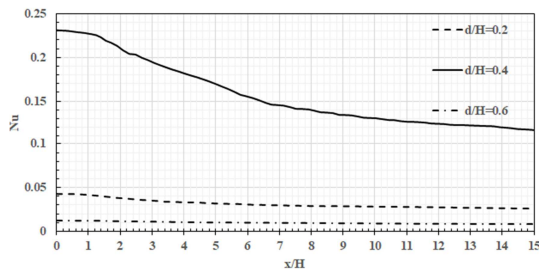


شکل ۱۱- تغییرات طول بی‌بعد ناحیه گردش جریان در پشت ریب $\frac{x_r}{d}$ با نسبت انسداد $\frac{d}{H}$ برای $Re=1040$ در رژیم آشفته برای نسبت دیدهای مختلف ریب

از نانوذرات فلزی یا غیرفلزی برای بهبود مشخصه‌های انتقال گرما مایعات استفاده می‌شود. با علم بر این موضوع، حال در این بخش نتایج برای حالتی که درون آب نانوذرات اکسید تیتانیوم وجود دارد و انتقال - گرما جابجایی اجباری بدون انتقال جرم نیز رخ می‌دهد، ارائه می‌شود. نانوسیال با دمای ثابت 300K وارد میکروکانال می‌شود. عدد ناسلت موضعی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

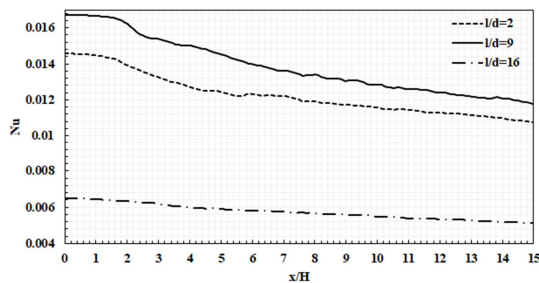
$$Nu = \frac{k_{nf} H}{k_{bf} T_{sink} - T_0} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (16)$$

که در آن T_{sink} دمای چاه گرمایی و T_0 دمای نانوسیال ورودی به میکروکانال می‌باشند. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب ناسلت موضعی روی

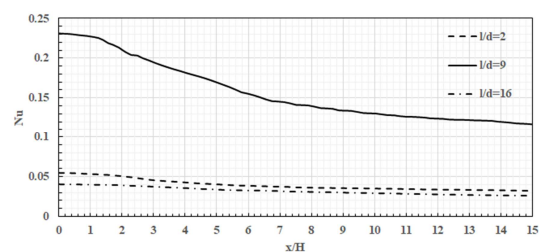


شکل ۱۷- تاثیر نسبت انسداد ریب بر انتقال گرما در رژیم جریان نانوسیال آشفته با $Re=1040$ و $\phi = 1\%$

در شکل ۱۸، برای نسبت انسداد بهینه ریب 0.4 ، تاثیر نسبت دید ریب $\frac{l}{d}$ بر انتقال گرما در رژیم جریان نانوسیال لایه‌ای با $Re=230$ و غلظت نانوذرات ثابت، برای سه مقدار مختلف $\frac{l}{d}$ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت دید ریب از 2 به 9 با افزایش طول بی‌بعد ناحیه گردش جریان در پشت ریب، عدد ناسلت موضعی روی دیواره پایینی میکروکانال افزایش یافته و انتقال گرما بهبود می‌یابد، ولی در افزایش نسبت دید ریب از 9 به 16 ، عدد ناسلت به دلیل افزایش انسداد جریان توسط ریب کاهش می‌یابد. بنابراین نسبت دید ریب 9 بهینه‌ترین است. در شکل ۱۹ برای رژیم جریان نانوسیال آشفته با $Re=1040$ نیز چنین می‌باشد.



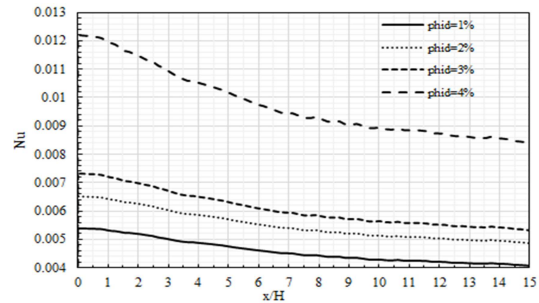
شکل ۱۸- تاثیر نسبت دید ریب بر انتقال گرما در رژیم جریان نانوسیال لایه‌ای با $Re=230$ و $\phi = 1\%$ و $\frac{d}{H} = 0.4$



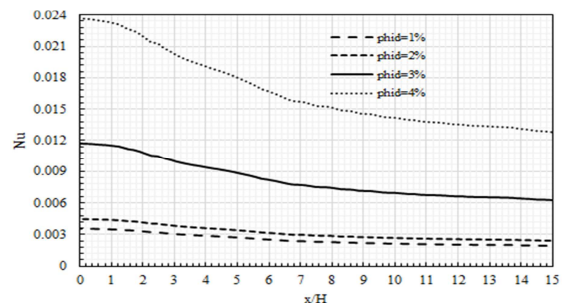
شکل ۱۹- تاثیر نسبت دید ریب بر انتقال گرما در رژیم جریان نانوسیال آشفته با $Re=1040$ و $\phi = 1\%$ و $\frac{d}{H} = 0.4$

۴- نتیجه‌گیری

در کار حاضر، جریان پایا، تراکم‌ناپذیر و دوبعدی آب حول یک ریب مستطیلی آشوب‌ساز جریان واقع بر دیواره پایینی یک میکروکانال مستطیلی در رژیم‌های لایه‌ای و آشفته به صورت عددی مطالعه گردید. ابتدا شبیه‌سازی‌ها با مقایسه نتایج عددی با اطلاعات تجربی مرجع [۱۰] اعتبارسنجی شد و توافق خوبی بین آنها مشاهده گردید. سپس تاثیر پارامترهای طراحی اصلی شامل عدد رینولدز، نسبت انسداد

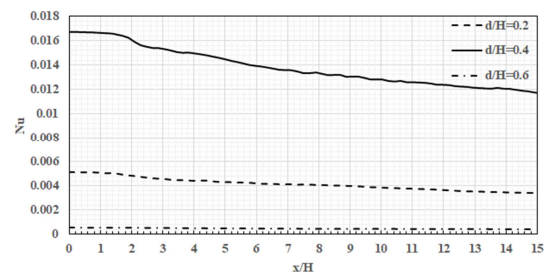


شکل ۱۴- ناسلت موضعی رژیم آرام $Re=230$ روی دیواره پایینی میکروکانال در پشت ریب با نسبت‌های دید و انسداد $\frac{l}{d} = 9$ و $\frac{d}{H} = 0.4$



شکل ۱۵- ناسلت موضعی رژیم آشفته $Re=1040$ روی دیواره پایینی میکروکانال در پشت ریب با نسبت‌های دید و انسداد $\frac{l}{d} = 9$ و $\frac{d}{H} = 0.4$

در شکل ۱۶، برای یک طول ریب ثابت، تاثیر نسبت انسداد ریب $\frac{d}{H}$ بر انتقال گرما در رژیم جریان نانوسیال لایه‌ای با $Re=230$ و غلظت نانوذرات ثابت، برای سه مقدار مختلف $\frac{d}{H}$ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت انسداد ریب از 0.2 به 0.4 با افزایش طول بی‌بعد ناحیه گردش جریان در پشت ریب، عدد ناسلت موضعی روی دیواره پایینی میکروکانال افزایش یافته و انتقال گرما بهبود می‌یابد، ولی در افزایش نسبت انسداد ریب از 0.4 به 0.6 ، عدد ناسلت به دلیل افزایش انسداد جریان توسط ریب کاهش می‌یابد. بنابراین نسبت انسداد ریب 0.4 بهینه‌ترین است. در شکل ۱۷ برای رژیم جریان نانوسیال آشفته با $Re=1040$ نیز چنین می‌باشد.



شکل ۱۶- تاثیر نسبت انسداد ریب بر انتقال گرما در رژیم جریان نانوسیال لایه‌ای با $Re=230$ و $\phi = 1\%$

- [10] Stogiannis I. A., Passos A. D., Mouza A. A., Paras S. V., Penkavova V. and Tihon J., Flow Investigation in a Microchannel with a Flow Disturbing Rib. *Chemical Engineering Science*, Vol. 119, pp. 65-76, 2014.
- [11] Kakaç S. and Pramuanjaroenkij A., Review of Convective Heat Transfer Enhancement with Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 3187-3196, 2009.
- [12] Akbarinia A. and Laur R., Investigating the Diameter of Solid Particles Effects on a Laminar Nanofluid Flow in a Curved Tube Using a Two Phase Approach. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, pp. 706-714, 2008.
- [13] Aminfar H, Mohammadpourfard M. and Kahnamouei Y. N., A 3D Numerical Simulation of Mixed Convection of a Magnetic Nanofluid in the Presence of Non-Uniform Magnetic Field in a Vertical Tube Using Two Phase Mixture Model. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323, pp. 1963-1972, 2011.
- [14] Abbasian Arani A. A. and Amani J., Experimental Investigation of Diameter Effect on Heat Transfer Performance and Pressure Drop of TiO₂-Water Nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 520-533, 2013.
- [15] Kalteh M., Abbassi A., Saffar-Avval M. and Harting J., Eulerian-Eulerian Two-Phase Numerical Simulation of Nanofluid Laminar Forced Convection in a Microchannel. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32, pp. 107-116, 2011.
- [16] Kalteh M., Abbassi A., Saffar-Avval M., Frijns A., Darhuber A., Harting J., Experimental and Numerical Investigation of Nanofluid Forced Convection Inside a Wide Microchannel Heat Sink. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 36, pp. 260-268, 2012.
- [17] Kalteh M., Investigating the Effect of Various Nanoparticle and Base Liquid Types on the Nanofluids Heat and Fluid Flow in a microchannel. *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 37, pp. 8600-8609, 2013.
- [18] Khanafer Kh. and Vafai K., A Critical Synthesis of Thermophysical Characteristics of Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 4410-4428, 2011.

و نسبت دید ریب بر طول ناحیه گردش جریان در پشت ریب با فراهم نمودن جزئیات بیشتر و دقیق تر بررسی گردید. خلاصه این بررسی عبارتند از:

۱- طول ناحیه گردش جریان در پشت ریب عمدتاً متأثر از نسبت انسداد میکروکانال و عدد رینولدز می باشد و اثر نسبت دید ریب تنها در رژیم جریان آشفته با اهمیت می شود.

۲- طول ناحیه گردش جریان در پشت ریب تقریباً به صورت خطی در رژیم جریان لایه ای افزایش یافته و به یک بیشینه مقدار می رسد و سپس کاهش می یابد.

۳- طول ناحیه گردش جریان در پشت ریب به صورت خطی با نسبت انسداد در رژیم آشفته جریان افزایش می یابد و تاثیر عدد رینولدز بر آن در مقایسه با رژیم جریان لایه ای ضعیف تر است. همچنین اثر نسبت دید ریب روی آن در رژیم جریان آشفته برای مقادیر کوچک نسبت انسداد با اهمیت می باشد.

همچنین انتقال گرمای جابجایی اجباری برای جریان آب حاوی نانوذرات در رژیم های لایه ای و آشفته نیز مطالعه گردید و مشاهده شد که با افزایش عدد رینولدز به دلیل افزایش طول گردابه پشت ریب، ناسلت موضعی روی دیواره پایینی میکروکانال و پشت ریب افزایش می یابد. همچنین افزایش غلظت نانوذرات در آب نیز به افزایش ناسلت موضعی در پشت ریب و روی دیواره پایینی میکروکانال می انجامد.

همچنین مشاهده گردید که یک نسبت انسداد و نسبت دید بهینه برای ریب باعث بالاترین بهبود انتقال گرما می شود.

۵- مراجع

- [1] Kockmann N., *Micro Process Engineering: Fundamentals, Devices, Fabrication, and Applications*. Wiley-VCH, Weinheim, 2006.
- [2] Lee T. and Mateescu D., Experimental and Numerical Investigation of 2-D Backward-Facing Step Flow. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 12, pp. 703-716, 1998.
- [3] Wengle H., Huppertz A., Barwolff G. and Janke G., The Manipulated Transitional Backward-Facing Step Flow: An Experimental and Direct Numerical Simulation Investigation. *European Journal of Mechanics. B. Fluids*, Vol. 20, pp. 25-46, 2001.
- [4] Le H., Moin P. and Kim J., Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow over a Backward-Facing Step. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 330, pp. 349-374, 1997.
- [5] Kaiktsis L. and Monkewitz, P. A., Global Destabilization of Flow over a Backward-Facing Step. *Physics of Fluids*, Vol. 15, pp. 3647-3658, 2003.
- [6] Kherbeet A. S., Mohammed H. A., Munisamy K. M. and Salman B. H., The Effect of Step Height of Microscale Backward-Facing Step on Mixed Convection Nanofluid Flow and Heat Transfer Characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 68, pp. 554-566, 2014.
- [7] Tien W. H., Dabiri D. and Hove J., Color-Coded Three-Dimensional Micro Particle Tracking Velocimetry and Application to Micro Backward-Facing Step Flows. *Experiments in Fluids*, Vol. 55, pp. 1-14, 2014.
- [8] Huang C. T., Li P. N., Pai C. Y., Leu T. S. and Jen C. P., Design and Simulation of a Microfluidic Blood-Plasma Separation Chip Using Microchannel Structures. *Separation Science and Technology*, Vol. 45, pp. 42-49, 2010.
- [9] Kanaris A. G., Anastasiou A. D. and Paras S. V., Modeling the Effect of Blood Viscosity on Hemodynamic Factors in a Small Bifurcated Artery. *Chemical Engineering Science*, Vol. 71, pp. 202-211, 2012.