

# مطالعه عددی جریان مغشوش و انتقال گرما نانوسیال آب- مس عبوری از روی موانع ناهمسان واقع در ناحیه ابتدائی سطح

مسعود ضیائی راد\*

ابراهیم افشاری

مصطفی صادقی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

## چکیده

جریان مغشوش و انتقال گرما نانوسیال آب-مس در ناحیه ورودی هیدرولیکی و گرمایی سطحی با دو مانع ناهمسان به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. اهمیت این مطالعه، بررسی همزمان اثر موانع جریانی و نانوذرات در لایه مرزی جریان مغشوش است که در مطالعات گذشته به آن پرداخته نشده بود. مدل‌سازی آشفستگی به کمک مدل  $k-\epsilon$  تعمیم‌یافته به انضمام مدل دولایه‌ای ولفشتاین انجام شده است. اثر عدد رینولدز، فاصله بین موانع، کسر حجمی و قطر نانوذرات بر پارامترهای جریان بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر فاصله بین موانع و با افزایش کسر حجمی نانوسیال، ناحیه بازچرخش بین موانع تغییر اندازه داده و عدد ناسلت به تبع آن تغییر می‌کند. در فواصل زیاد موانع، ناحیه چرخش پشت مانع اولی به دومی نمی‌رسد که این کاهش انتقال گرما را به همراه دارد. در اعداد رینولدز پایین‌تر، انتقال گرما جابجایی نسبت به پخش حرارتی کمتر شده و افزایش کسر حجمی نانوذرات تاثیر کمتری در افزایش انتقال گرما دارد. همچنین، بدلیل نقش حرکت نانوذرات در افزایش انتقال حرارت جابجایی، ذرات با قطر کمتر نرخ انتقال حرارت را بهبود می‌بخشند.

واژه‌های کلیدی: جریان مغشوش، انتقال گرما جابجایی، موانع جریانی ناهمسان، نانوسیال، ناحیه ورودی.

## A Numerical study on Turbulent flow and heat transfer of water-Copper Nan fluid Over Unequal Obstacles located at the leading edge of a Surface

M. Ziaei-Rad

E. Afshari

M. Sadeghi

Department of Mechanical Engineering , University of Isfahan, Isfahan, Iran

Department of Mechanical Engineering , University of Isfahan, Isfahan, Iran

Department of Mechanical Engineering , University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

## Abstract

Turbulent flow and heat transfer of water-copper nanofluid at the leading edge of a surface with two unequal obstacles is simulated numerically. The importance of this study is to simultaneously consider the effect of flow obstacles and nanoparticles on flow and heat transfer of turbulent boundary layer, which can not be found in previous literatures. Turbulent modeling is performed by a modified  $k-\epsilon$  model with two-layer zonal Wolfstein model for near wall treatment. The effects of Reynolds number, distance between the obstacles, the volume fraction and diameter of nanoparticles on the flow parameters are investigated. The results indicate that by changing both the blocks distance and solid volume fraction, the size of recirculation zone between the blocks changes and consequently, the Nusselt number is affected. At large distance between the obstacles, the recirculation zone behind the first block can not reach the second block and hence, the rate of heat transfer decreases. At low Reynolds numbers, convective heat transfer is less than thermal diffusion and therefore, the heat transfer rate is less influenced by the solid volume fraction. Moreover, due to the role of nanoparticles motion on the rate of convective heat transfer, smaller nanoparticles in diameter are more effective in heat transfer enhancement.

**Keywords:** Turbulent flow, convective heat transfer, unequal obstacles, nanofluid, entrance region.

توربین‌های گاز باید پره‌های آنها در محدوده دمایی مجاز کار کنند. به خصوص، پره‌های اول ثابت و متحرک توربین با توجه به شرایط ترمودینامیکی ورودی به توربین، نیاز شدید به سرد شدن دارند و ضریب انتقال گرما آنها باید بالا باشد. برای تحریک لایه مرزی بر روی این پره‌ها و افزایش ضریب انتقال گرما می‌توان از موانع در لایه مرزی استفاده کرد. در همه این کاربردها، مکانیزم افزایش انتقال گرما بر اساس جدایش و اتصال مجدد جریان و تاثیر این پدیده‌ها بر روی لایه مرزی است [۴-۷]. علاوه بر اضافه کردن مانع، نانو سیالات نیز بدلیل دارا بودن خواص گرمایی بهتری نسبت به سیال پایه، ایده خوبی برای افزایش انتقال گرما هستند که البته استفاده توامان موانع و نانوسیال می‌تواند انتقال گرما را بطور چشمگیری بهبود بخشد [۸].

تحقیقات متعددی در مورد تاثیر استفاده از مانع در داخل کانال انجام شده است. در کارهای گذشته، استفاده از مانع در جریان داخل

## ۱- مقدمه

در لایه‌های مغشوش ضریب انتقال گرما تحت تاثیر شدت آشفستگی در لایه مرزی قرار دارد. گردابه‌های موجود در لایه مرزی از طریق جابجا کردن موثر ذرات سیال، به همزنی بهتر لایه‌های گرم و سرد کمک کرده و از این طریق بر مقدار ضریب انتقال گرما اثر می‌گذارد. در بسیاری از کاربردها به دلیل وجود محدودیت‌هایی مانند فضا و هزینه، نیاز به افزایش ضریب انتقال گرما با استفاده از روش‌های مختلف احساس می‌شود. اضافه کردن مانع روی سطح به منظور بالا بردن آهنگ تبادل انتقال گرما، به طور وسیعی در بسیاری از تجهیزات مانند مبادله کن‌های گرما، گرمکن‌های خورشیدی و خنک‌کاری پره‌های توربین کاربرد دارد [۱-۳]. خنک‌کاری پره‌های توربین یکی از اساسی‌ترین این نیازها در صنعت است که برای بهره‌برداری بهینه از

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.ziaeirad@eng.ui.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۶/۰۷

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۰۲

کانال با رژیم آرام با شکل‌های مختلف مانع و زاویه‌های مختلف قرارگیری [۴ و ۵]، استفاده از مانع در داخل کانال با رژیم مغشوش [۶ و ۷] به صورت تجربی و عددی بررسی شده و تاثیر مانع بر الگوی جریان و به تبع آن افزایش انتقال گرما در آنها مطالعه شده است. محمدی پیروز و همکاران [۹] بر روی موضوع شبیه‌سازی بولتزمان انتقال گرماتوام شبکه در یک کانال مستطیلی با مانع متصل به دیوار تحقیق کردند. نتایج نشان می‌دهند که افزایش بارده پخش گرمایی به علت از بین رفتن مقدار بالای انرژی از سطح مانع است. علاوه بر این کاهش فاصله بین مانع جریان را در نزدیکی سطوح مانع منحرف و شتاب‌دار می‌کند و باعث افزایش آهنگ انتقال گرما مانع می‌شود. ربو و همکاران [۱۰] بر روی انتقال گرما آنالیز جریان مغشوش در کانال‌های زبر با دنده‌های دوبعدی و بلوک‌های سه بعدی به منظور تاثیر زبری سطح پرداختند. انتقال گرما و مقاومت سیال به یک روش رفتار می‌کنند. برای تمامی موارد پروفیل دمای متوسط فضایی، یک ناحیه لگاریتمی را نشان می‌دهد که با یک متغیر زبری انتقال حرارت (تابعی از قدرت ثابت عدد رینولدز زبری) تغییر می‌کند. ناحیه لگاریتمی در پروفیل دمای متوسط زمانی برای تمامی مواردی که پروفیل سرعت لگاریتمی بود وجود دارد. برای بررسی اثر ناهمواری سطح بر جریان مغشوش، لو و همکاران [۱۱] جریان مغشوش را در یک کانال با سطح صاف و سطحی با مانع مکعبی شکل به اندازه‌های مختلف به کمک روش شبیه سازی گردابه‌های بزرگ و روش مرز غوطه ور به صورت عددی حل کردند. آنها اثرات چیدمان ناهمواری سطح را بر روی پروفیل‌های متوسط و نوسانی سرعت، تنش‌های برشی رینولدز بررسی نمودند و بیان کردند که تاثیر قابل توجه نوسانات آشفتگی و ساختارهای آن در زیر لایه سطح زبر (پنج برابر ارتفاع زبری) نمایان می‌شود. همچنین دریافتند که ثابت فن-کارمن با افزایش ارتفاع زبری سطح کاهش می‌یابد. بن حزمه و همکارانش [۱۲] انتشار ذرات آلودگی را در جریان های مغشوش در کانال مطالعه کردند. آنها مدل هیدرولیکی پیش بینی کننده ای برای بررسی پدیده انتشار آلودگی در یک سطح آزاد حول یک مانع با استفاده از روش VOF و مدل آشفتگی k-ε ارائه نمودند. نتایج آنها نشان داد که ذرات درشت با چگالی  $1600 \text{ kg/m}^3$ ، سرعت  $2 \text{ m/s}$  و قطر بیشتر از  $70 \text{ mm}$  حول مانع و نزدیک ناحیه انتهایی کانال ته‌نشین می‌شوند، در حالی که ذرات بسیار کوچک با اندازه کمتر از  $5 \text{ mm}$  بدون ته‌نشینی در جریان معلق می‌مانند. دیمارکیز و همکاران [۱۳] بر روی تحلیل اثرات اتصال بین ساختارهای مغشوش نزدیک بستر جریان و حرکت ذرات جامد معلق در جریانهای چندفاز مغشوش محصور به دیوار مطالعه انجام دادند. آنها جریانهای مغشوش در کانالهای افقی با مرزهای زبر را بررسی کردند و با استفاده از شبیه سازی DNS و اتخاذ روش اویلری-لاگرانژی، اثرات متقابل جریان و ذرات را در این مطالعه در نظر گرفتند. در یک مطالعه تجربی، هو و همکارانش [۱۴] جریان مغشوش روی سطح دندانه دار را به صورت سه بعدی با استفاده از PIV و PTV برای مشخص شدن ساختار جریان مغشوش روی سطح دندانه ها و فاصله بین آنها اندازه گیری کردند. آنها نتایج اندازه گیری را با اندازه گیری روی یک سطح صاف و همچنین شبیه سازی عددی DNS مقایسه و ارزیابی کردند. از نتایج این تحقیق می‌توان به کاهش  $6/1$  درصدی ضریب اصطکاک و کاهش  $7/4$  درصدی تنش برشی دیواره روی سطح دندانه ها در

مشاهدات PIV اشاره کرد. سگوندا و همکارانش [۱۵] نیز جریان مغشوش روی یک دیواره موجی شکل با نسبت طول موج به دامنه  $10$  را در کانالی افقی به روش تجربی و عددی بررسی کردند. حل عددی آنها با استفاده از هفت مدل اغتشاشی مختلف و اندازه گیری تجربی به کمک دستگاه PIV برای تعیین سرعت متوسط و موقعیت ناحیه چرخش مجدد جریان انجام پذیرفت. آنها دریافتند که مدل‌های اغتشاشی k-ε استاندارد، Realizable k-ε و LPS به طور کلی بهترین تطابق را با داده های تجربی دارند. همچنین بیان کردند که رفتار نزدیک دیوار اهمیت بحرانی در بررسی توانایی مدل ها در پیش بینی جدایش جریان دارد.

در بعضی از تحقیقات نیز استفاده از نانوذرات بر افزایش انتقال گرما در جریان‌های لایه ای و مغشوش مورد بررسی قرار گرفته است. مانکا و همکارانش [۸] به مطالعه عددی جابجایی اجباری نانو سیال در کانال دندانه‌دار که دیواره خارجی آن در معرض شار گرمای یکنواختی قرار دارد پرداختند. نتایج حاکی از آن است که انتقال گرما با غلظت حجمی ذرات افزایش می‌یابد؛ ولی همراه با افزایش قدرت پمپاژ می‌باشد. همچنین، وقتی عدد رینولدز بالا می‌رود انتقال گرما بهبود می‌یابد؛ ولی افزایش قدرت پمپاژ نیز مشاهده می‌شود. میرمعصومی و بهزاد مهر [۱۶] در مورد اثر قطر متوسط ذرات نانو سیال در لوله‌های افقی با انتقال گرما جابجایی توام مطالعاتی انجام دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که ضریب انتقال گرما جابجایی به میزان قابل توجهی با کاهش قطر متوسط نانوذرات افزایش می‌یابد. پیشکار و قاسمی [۱۷] بررسی عددی روی جریان جابجایی توام نانوسیال در یک کانال افقی حاوی یک منبع گرمای را انجام دادند و نتایج آنها نشان می‌دهد که استفاده از نانو سیال موجب پخش بهتر و افزایش دمای متوسط میانگین می‌شود و همچنین افزایش درصد حجمی نانوذرات موجب افزایش انتقال گرما می‌شود که این افزایش در رینولدزهای بالاتر بیشتر است. رستمانی و همکارانش [۱۸] جریان آشفته نانوسیال با غلظت‌های متفاوت از نانوذرات را در یک کانال دو بعدی طویل تحت شرایط گرمایی ثابت به صورت عددی تحلیل کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که با افزایش غلظت حجمی، عدد ناسلت، تنش برشی دیواره و نرخ انتقال گرما افزایش می‌یابد. محمد و همکارانش [۱۹] مشخصه‌های حرارتی و هیدرولیکی جریان آشفته نانوسیال را در کانال دندانه‌دار به صورت عددی بررسی کردند و نتایج آنها حاکی از افزایش عدد ناسلت بر اثر افزایش عدد رینولدز، کسر حجمی نانوذرات و کاهش قطر نانوسیال است.

با وجود اهمیت موضوع و کاربرد آن، بویژه آنچه که در این متن در مورد خنک کاری پره های ابتدائی توربین بیان شد، در مطالعات گذشته که توسط نویسندگان مورد بررسی قرار گرفت، نتایجی از بررسی اثر توامان مانع و نانوذرات بر افزایش آهنگ انتقال گرما بویژه در ناحیه ورودی جریان‌های مغشوش نمی‌توان یافت. لذا مطالعه حاضر با بررسی این مساله و مطالعه اثر پارامترهایی همچون عدد رینولدز جریان، فاصله مانع، کسرحجمی نانوذرات و قطر آنها بر آهنگ انتقال گرما و افت فشار در جریان، اطلاعات مفیدی برای بهینه سازی انتقال گرما در کاربردهای مشابه ارائه خواهد داد.

## ۲- بیان مساله

هندسه مورد نظر مطابق شکل ۱، یک سطح افقی است که دو مانع با اندازه‌های نابرابر روی آن تعبیه شده است. نامگذاری ابعاد هندسی بر روی شکل مشخص شده است. جریان نانوسیال آب-مس به‌طور یکنواخت با سرعت  $u_\infty$  و دمای  $T_\infty$  وارد می‌شود. دیواره‌های پایینی در دمای ثابت  $T_w$  متفاوت از دمای ورودی جریان قرار دارد، در حالی که دما در مرز بالایی موانع برابر با دمای ورودی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین لایه مرزی حرارتی روی سطح و موانع تشکیل خواهد شد. شرط عدم لغزش نیز برای دیواره و موانع برقرار است و لایه مرزی سرعتی هم روی آن‌ها تشکیل خواهد شد. جریان در ورود به هندسه مغشوش فرض می‌شود. جریان سیال تراکم‌ناپذیر و دائم فرض می‌شود. همچنین نانوسیال همگن و دارای تعادل گرمایی بین ذرات جامد و سیال پایه فرض شده و برای محاسبه خواص آن از مدل‌های تک‌فاز استفاده خواهد شد. اگرچه نتایج کیفی حاصل از این شبیه‌سازی باتوجه به انتخاب مدل تک فاز و صرفاً ایجاد تفاوت در خواص نانوسیال‌ها، برای همه انواع آنها قابل استناد است، ولی در این تحقیق نتایج برای نانوسیال-آب مس ارائه می‌شود که باتوجه به و فورو ارزانی، استفاده بیشتری از آن در صنایع انتظار می‌رود. لذا، بررسی انواع نانوذررات در مطالعه حاضر ضروری دیده نشده و نتایج موجود تا حد زیادی قابل تعمیم به سایر نانوسیال‌ها خواهد بود.

انرژی آشفتگی به دستگاه معادلات فوق اضافه خواهند شد که این دو معادله به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\rho_{nf} \left( u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} \right) = \frac{\mu_t}{\sigma_k} \left( \frac{\partial^2 k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial y^2} \right) + S_k \quad (5)$$

و معادله نرخ اتلاف انرژی آشفتگی:

$$\rho_{nf} \left( u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) = \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \left( \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial y^2} \right) + S_\varepsilon \quad (6)$$

در معادلات فوق،  $\mu_t$  و  $\rho_{nf}$  مولفه‌های سرعت جریان،  $p$  فشار،  $T$  دما،  $\mu_t$  لزجت ادی،  $\mu_{eff}$  لزجت موثر،  $\rho_{nf}$  چگالی نانوسیال،  $C_{p,nf}$  ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال،  $k_{nf}$  رسانایی گرمایی نانوسیال،  $S_k$  جمله تولید اغتشاش و  $S_\varepsilon$  جمله منبع اتلاف جریان است که با روابط زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} \mu_{eff} &= \mu_t + \mu_{nf} \quad , \quad S_k = G\mu_t - \rho_{nf}\varepsilon \\ S_\varepsilon &= \rho_{nf}C_{1k}G + \rho_{nf}C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad , \quad G = \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \\ \mu_t &= C_\mu \rho k^2 / \varepsilon \end{aligned} \quad (7)$$

در روابط بالا  $\mu_{nf}$  لزجت نانوسیال است و  $G$  جمله تولید آشفتگی است که از بخش غیرخطی آن بدلیل برآورد بیش از واقعیت لزجت ادی، صرفنظر شده است. مقادیر ثابت‌های موجود در روابط فوق در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ثابت‌های معادلات جریان مغشوش [۲۰]

$C_\mu$	$C_1$	$C_2$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$\sigma_t$
۰/۰۹	۱/۴۴	۱/۹۲	۱	۱/۳	۰/۹

برای حل عددی معادلات حاکم بر جریان، بی‌بعدسازی آن‌ها ضرورت دارد. برای بی‌بعد سازی معادلات، از پارامترهای بی‌بعد زیر استفاده می‌کنیم.

$$\begin{aligned} Y &= \frac{y}{H_1} \quad , \quad X = \frac{x}{H_1} \quad , \quad \bar{v} = \frac{v}{U_\infty} \quad , \quad \bar{u} = \frac{u}{U_\infty} \quad , \\ \theta &= \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty} \quad , \quad \bar{p} = \frac{p}{\rho_{nf} U_\infty^2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\bar{k} = \frac{k}{U_\infty^2} \quad , \quad \bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon H_1}{U_\infty^3} \quad , \quad Pr = \frac{\mu_f C_{p,f}}{k_f} \quad , \quad Re = \frac{\rho_f U_\infty H_1}{\mu_f}$$

که در آن‌ها،  $H_1$  ارتفاع مانع بزرگتر،  $T_w$  دمای دیواره پایینی،  $U_\infty$  سرعت ورودی،  $Pr$  عدد پرانتل سیال،  $Re$  عدد رینولدز جریان و  $T_\infty$  دمای ورودی است. اکنون معادلات حاکم بدون بعد به صورت زیر بازنویسی می‌شوند.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial X} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial Y} = 0 \quad (9)$$

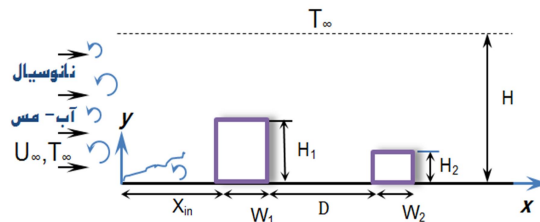
$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial X} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial Y} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial X} + \frac{\mu_{eff}}{\rho_{nf} U_\infty H_1} \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial Y^2} \right) \quad (10)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial X} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial Y} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial Y} + \frac{\mu_{eff}}{\rho_{nf} U_\infty H_1} \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial Y^2} \right) \quad (11)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \theta}{\partial X} + \bar{v} \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \left( \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{(\rho C_p)_f}{(\rho C_p)_{nf}} \frac{1}{Re Pr} + Pr_t \right) \times \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (12)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{K}}{\partial X} + \bar{v} \frac{\partial \bar{K}}{\partial Y} = \frac{\mu_t}{\rho_{nf} U_\infty H_1 \sigma_k} \left( \frac{\partial^2 \bar{K}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \bar{K}}{\partial Y^2} \right) + \bar{S}_k \quad (13)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial X} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial Y} = \frac{\mu_t}{\rho_{nf} U_\infty H_1 \sigma_\varepsilon} \left( \frac{\partial^2 \bar{\varepsilon}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \bar{\varepsilon}}{\partial Y^2} \right) + \bar{S}_\varepsilon \quad (14)$$



شکل ۱- موانع ناهمسان روی سطح در مسیر جریان مغشوش نانوسیال

## ۳- مدل سازی ریاضی

### ۳-۱- معادلات حاکم بر جریان

معادلات متوسط‌گیری شده زمانی (RANS) حاکم بر جریان مغشوش، تراکم‌ناپذیر و دائم نانوسیال از روی موانع با در نظر گرفتن تقریب بوزینسک (فرض جریان ایزوتروپیک)، شامل معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی، عبارتند از:

الف) معادله پیوستگی:

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

ب) معادله مومنتوم در راستای  $x$ :

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

ج) معادله مومنتوم در راستای  $y$ :

$$\rho_{nf} \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{eff} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

د) معادله بقای انرژی:

$$\rho_{nf} \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \left( \frac{k_{nf}}{C_{p,nf}} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

با استفاده از مدل آشفتگی  $k$ - $\varepsilon$  برای محاسبه لزجت آشفتگی، دو معادله انتقال مربوط به انرژی جنبشی آشفتگی  $k$  و نرخ اضمحلال

محاسبه کرد [۲۲]:

$$C_{f,x} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \frac{\partial \bar{u}}{\partial Y}, \quad C_{f,y} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \frac{\partial \bar{v}}{\partial X} \quad (20)$$

$$C_{f,m} = \frac{1}{A} \int C_{f,m} dA \quad (21)$$

در رابطه (۲۰)، بر اساس راستای دیوار که در جهت افقی یا عمودی باشد، از یکی از روابط ارائه شده استفاده خواهد شد.

### ۳-۳- محاسبه خواص نانو سیال

خواص نانوسیال را می‌توان به کمک روابطی ترکیبی از خواص سیال پایه آب و نانوذرات مس محاسبه نمود. جدول ۲ خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات را نشان می‌دهد. در این روابط، چگالی و ظرفیت گرمایی نانوسیال بر مبنای کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه ( $\phi$ )، به صورت تابعی از این خواص برای سیال پایه (با اندیس  $f$ ) و نانوذرات (با اندیس  $p$ ) نوشته خواهد شد [۲۳]:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (22)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p \quad (23)$$

لزجت نانوسیال را می‌توان از رابطه تجربی زیر برحسب لزجت سیال پایه و دمای سیال و با فرض نانوذرات کروی شکل مس به قطر  $d_p = 29nm$  محاسبه کرد [۲۴]:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + (3.982 \times 10^{-4} T - 4.534 \times 10^{-2}) \phi^{0.4261} \quad (24)$$

ضریب رسانایی گرمایی نانوسیال برای نانو ذرات کروی بر طبق رابطه پاتل و همکاران [۲۵] به دست می‌آید:

$$k_{nf} = k_f \left[ 1 + \frac{k_p A_p}{k_f A_f} + c k_p Pe \frac{A_p}{A_f k_f} \right] \quad (25)$$

که در آن:

$$Pe = \frac{u_p d_p}{\alpha_f}, \quad u_p = \frac{2 k_b T}{\pi \mu_f d_p^2}, \quad \frac{A_p}{A_f} = \frac{d_p \phi}{d_f (1 - \phi)} \quad (26)$$

در این رابطه،  $k_b = 1.3807 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$  ثابت بولتزمن نام دارد و  $c$  ضریبی ثابت است که از روش‌های تجربی بدست می‌آید و مقدار پیشنهاد شده برای آن توسط ژان و روتزل، ۳۶۰۰۰ است [۲۶]. با توجه به اینکه بر اساس رابطه (۲۴) لزجت نانوسیال تابعی از دماست، اثر تغییر دما بطور ضمنی در روند محاسبه لزجت دیده می‌شود؛ بدین معنی که در هر تکرار از روند حل معادلات، پس از حل معادله انرژی و بدست آمدن دما، لزجت نانوسیال نیز از رابطه (۲۴) بروزرسانی می‌شود و در تکرار بعدی از این مقدار در حل معادلات استفاده خواهد شد. لذا با توجه به اینکه حل دائم جریان مدنظر است، مقدار صحیح لزجت نانوسیال در محاسبه نهائی میدان جریان و انتقال گرما لحاظ می‌گردد. با استفاده از روابط فوق، ضریب پخش حرارتی نانوسیال را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (27)$$

جدول ۲- خواص ترموفیزیکی اجزای نانوسیال آب- مس [۲۳]

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/kg.K)	$k$ (W/m.K)
۱۰۰۰/۵۲	۳۸۳/۱	۰/۵۹۶
۸۹۵۴	۴۱۸۱/۸	۳۸۶

دو معادله اخیر، معادلات بدون بعد انتقال برای  $k$  و  $\varepsilon$  هستند که در آن‌ها، جملات چشمه بی‌بعد  $\bar{S}_k$  و  $\bar{S}_\varepsilon$  تولید  $\bar{G}$  به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\bar{S}_k = \frac{\bar{G} \mu_t}{\rho_{nf} U_\infty H_1} - \bar{\varepsilon} \quad (15)$$

$$\bar{S}_\varepsilon = C_1 \frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{K}} \bar{G} - C_2 \frac{\bar{\varepsilon}^2}{\bar{K}}$$

$\bar{G} = \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial Y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial X} \right)^2$

با توجه به این‌که مدل استاندارد  $k-\varepsilon$  تنها در ناحیه کاملاً آشفته دقت قابل قبول دارد، برای محاسبه لزجت آشفتگی در ناحیه نزدیک دیوار از مدل‌سازی منطقه‌ای دولایه ولف‌اشتاين [۲۱] استفاده نموده‌ایم. در این مدل، دامنه‌ی مساله به دو قسمت کلی ناحیه متاثر از لزجت و ناحیه تمام آشفته تقسیم می‌گردد. با تعریف معیار  $y^+ = \rho u H_1 / \mu$ ، در این مدل ناحیه متاثر از لزجت ناحیه‌ای است که  $y^+ < 200$  باشد و در ناحیه تماماً آشفته  $y^+ > 200$  خواهد بود. مقدار لزجت آشفته و  $\varepsilon$  در ناحیه زیر لایه لزج در این مدل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\mu_t = C_\mu \rho_{nf} \sqrt{k} l_\mu \quad (16)$$

$$\varepsilon = \frac{l_\varepsilon}{l_\mu}$$

که در آن‌ها، طول‌های مقیاس  $l_\mu$  و  $l_\varepsilon$  به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$l_\mu = C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{A_\mu}\right) \right]$$

$$l_\varepsilon = C_l \left[ 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{A_\varepsilon}\right) \right]$$

مقادیر ثابت در این روابط  $C_1 = 0.41 C_\mu^{-3/4}$ ،  $A_\mu = 70$ ،  $A_\varepsilon = 2C_1$  هستند. شبکه محاسباتی بگونه‌ای تنظیم خواهد شد که  $y^+$  در اولین المان‌های مجاور دیوار از مرتبه یک باشد.

### ۲-۳- شرایط اولیه و مرزی

در ورودی، جریان یکنواخت ( $u = U_\infty, v = 0$ ) فرض می‌شود. شرط عدم لغزش روی سطح و موانع برقرار است ( $u = v = 0, \theta = 1$ ). برای مرز بالا، شرط نفوذی با سرعت نفوذی پایین در نظر گرفته می‌شود که در این صورت، برای سرعت،  $\varepsilon_0$  شرط نیومن اعمال خواهد شد و  $\theta = 0$  است. در خروجیاز تشابه برای پروفیل‌های سرعت و دما استفاده می‌شود و  $\varepsilon_0$  نیز شرط نیومن دارند.

میزان انتقال گرما با عدد ناسلت تعیین می‌شود که با توجه به پارامترهای مساله، تعریف عدد ناسلت موضعی [۲۰] به صورت زیر است:

$$Nu = \left( \frac{k_{nf}}{k_f} \right) \frac{H_1}{T_b - T_w} \left( \frac{dT}{dn} \right) \quad (17)$$

در این رابطه،  $n$  فاصله عمودی از دیوار و  $T_b$  دمای متوسط سیال در مقطع عرضی مجرای محاسباتی است.

$$T_b = \frac{\int_0^H T_p |u| dy}{\int_0^H |u| dy} \quad (18)$$

عدد ناسلت متوسط،  $Nu_m$ ، از انتگرال‌گیری ناسلت موضعی روی سطوح جامد به شکل زیر حاصل می‌شود:

$$Nu_m = \frac{1}{A} \int Nu dA \quad (19)$$

که در آن،  $A$  مساحت دیواره‌های جامد است. همچنین اصطکاک سطحی موضعی و متوسط روی سطوح جامد را نیز می‌توان از روابط زیر

#### ۴- روش حل عددی

برای حل عددی معادلات جریان مغشوش و انتقال گرما، یک کد عددی به زبان FORTRAN نوشته شده است که در آن، گسسته سازی معادلات حاکم به روش حجم محدود [۲۲] انجام می‌شود. در این روش، میدان حل با روش شبکه هم‌مکان (Collocated) شبکه‌بندی می‌شود. در این روش، تمامی اطلاعات جریان در مراکز سلول نگهداری می‌شود و برای محاسبه شار روی سطوح از نوعی میانبندی موسوم به روش رای-چو [۲۷] استفاده می‌گردد. ایجاد چنین شبکه‌هایی به مراتب آسانتر از شبکه‌های جابجا شده (Staggered) است و همچنین اعمال شرایط مرزی در این نوع شبکه، به دلیل منطبق شدن حجم کنترلها بر مرز بسیار آسان تر است [۲۸]. برای محاسبه میدان‌های فشار و سرعت کوپل نیز، از الگوریتم SIMPLE مبتنی بر حدس و تصحیح میدان فشار بکمک معادله پیوستگی، بهره برده می‌شود [۲۹]. ضمناً در گسسته‌سازی جملات جابجائی در معادلات انتقال حاکم، از روش مرتبه دوم آپویند و برای جملات دیفیوژن، از تقاضل مرکزی استفاده شده است.

برای انتخاب تراکم مناسب شبکه محاسباتی، مطالعه‌ای بر روی تعداد بهینه نقاط شبکه انجام گرفت. برای این منظور، به عنوان نمونه در عدد رینولدز ۲۰۰۰، اثر تعداد نقاط شبکه بر عدد ناسلت متوسط و ضریب اصطکاک دیواره پایینی بررسی شد. جدول ۳ مقادیر این دو پارامتر را به ازای تعداد گره محاسباتی مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۳- تاثیر تعداد نقاط شبکه بر محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک متوسط جریان در  $\phi = 0.02$  و  $Pr = 10$ ،  $Re = 2000$

ابعاد شبکه	$Nu_m$	$C_{f,m}$
۴۰۰×۲۰۰	۳۷/۳۵۹	۱۰/۲۹۴
۵۰۰×۲۰۰	۳۶/۹۳۸	۱۰/۲۷۱
۶۰۰×۲۰۰	۳۶/۶۸۸	۱۰/۲۶۴
۷۰۰×۲۰۰	۳۶/۵۱۰	۱۰/۲۶۸
۶۰۰×۲۵۲	۳۲/۵۸۴	۱۰/۲۰۴
۶۰۰×۲۷۶	۳۱/۹۳۳	۱۰/۱۷۵
۶۰۰×۳۰۰	۳۱/۹۵۵	۱۰/۱۵۳

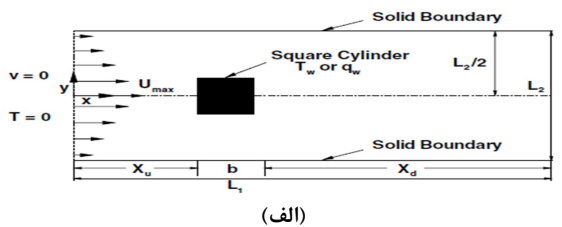
مشاهده می‌شود که ریزتر کردن شبکه از تعداد گره ۶۰۰ در جهت x و ۲۷۶ در جهت y تفاوت قابل ملاحظه‌ای در دقت محاسبه این دو پارامتر ایجاد نمی‌کند، ضمن اینکه این تعداد نقاط محاسباتی نسبت به شبکه‌های ریزتر، مقرون به صرفه خواهد بود. بنابراین این شبکه برای انجام سایر محاسبات در عدد رینولدز مورد نظر استفاده قرار می‌گیرد. روند همگرایی و انجام محاسبات تا رسیدن دقت مقادیر میدان سرعت به کمتر از  $10^{-6}$  روی شبکه محاسباتی انتخاب شده ادامه خواهد یافت.

#### ۵- بررسی نتایج و بحث

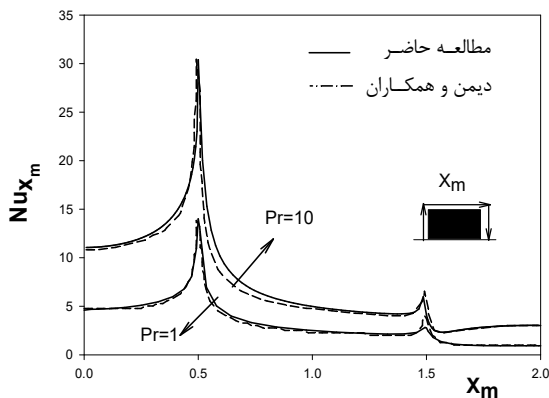
##### ۵-۱- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی روش و الگوریتم حل و تایید صحت روابط بکار رفته، نتایج عددی حاصل از کد فرتن حاضر با برخی مطالعات مشابه گذشته مقایسه شده است. در یک مورد، ابعاد کانال، مانع و

شرایط مرزی جریان مطابق با مطالعه عددی انجام شده توسط دیمن و همکارانش [۳۰] انتخاب می‌شود. در مقاله آن‌ها، مساله سرمایش جابجایی اجباری آرام از مانع تحت شار گرمایی ثابت در یک کانال افقی بررسی شده است. دیواره بالایی و پایینی کانال عایق فرض شده و مانع دمای ثابت داشته است. در این هندسه، ارتفاع و عرض مانع برابر  $b = D = 0.25L_2$  (ارتفاع مانع) انتخاب می‌شود. پروفیل سرعت در ورودی به صورت  $u = [1 - (2\beta y^2)]$  در نظر گرفته شده و نتایج عدد ناسلت موضعی اطراف مانع بررسی و مقایسه شده‌اند. نتایج به ازای عدد رینولدز ۴۵ در دو عدد پرانتل در شکل ۲ آمده است. ملاحظه می‌شود که تطابق مطلوبی بین نتایج حاصل از این روش با روش حل عددی دیمن [۳۰] وجود دارد که این موضوع، موید صحت عملکرد کد عددی حاضر خواهد بود.



(الف)



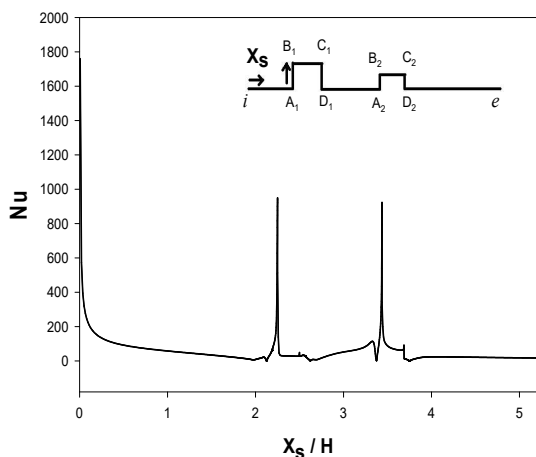
(ب)

شکل ۲- (الف) هندسه یک مانع واقع در مسیر جریان آرام سیال [۳۰] (ب) مقایسه عدد ناسلت موضعی در امتداد دیوار جامد در عدد رینولدز ۴۵

( $b=1$ ،  $L_2=8/5$ ،  $L=26$ ) و دو عدد پرانتل مختلف

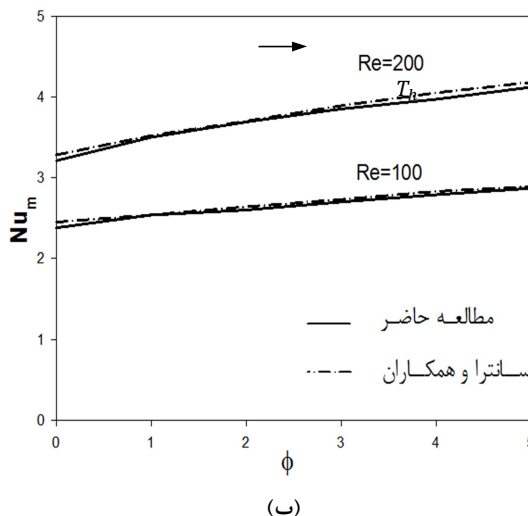
برای تایید عملکرد روش در مسائل انتقال گرما جابجایی نانوسیال، مقایسه دیگری با مطالعه عددی سانتر و همکارانش [۲۳] انجام شده است. آن‌ها نانوسیال آب-مس را در جریان خنک کاری بین دو صفحه موازی با طول  $L=100H$  و دمای ثابت  $T_h = 1$  به صورت عددی بررسی کردند. در شکل ۳ عدد ناسلت متوسط بین صفحات مطابق تعریف ارائه شده در مقاله آن‌ها برحسب کسر حجمی نانوذرات در دو عدد رینولدز مختلف رسم شده است. در این حالت نیز اختلاف بسیار ناچیزی بین نتایج مطالعه حاضر با مرجع [۲۳] مشاهده می‌شود که این تایید کننده صحت روابط بکار رفته در محاسبه خواص نانوسیال آب-مس در جریان جابجایی اجباری خواهد بود.

شکل ۵ تغییرات عدد ناسلت موضعی جریان در مجاورت دیواره جامد را نشان می‌دهد. در ورودی جریان، به علت اختلاف دمای جریان ورودی با دیواره‌ها عدد ناسلت زیاد است. به تدریج با فاصله گرفتن از ورودی با افزایش دمای میانگین سیال این اختلاف دما کاهش یافته و عدد ناسلت کاهش می‌یابد. عدد ناسلت روی دیواره عمودی موانع مجدداً افزایش می‌یابد که این افزایش به دلیل قرار گرفتن سطح در مقابل جریان و نزدیک شدن سطوح جامد به لایه‌های بالایی و کم‌دمای دور از دیواره است. پیک اول و دوم نمودار در سطوح  $A_1B_1$  و  $A_2B_2$  اتفاق می‌افتد. در بین دو مانع (سطح  $D_1A_2$ ) به دلیل تشکیل سیرکولاسیون در مسیر و اختلاط بیشتر لایه‌های جریان، عدد ناسلت افزایش خواهد یافت.



شکل ۵- عدد ناسلت موضعی در امتداد دیوار جامد با  $D/H=1$  در عدد رینولدز ۴۰۰۰ برای جریان مغشوش نانوسیال آب- مس با کسر حجمی  $\phi=0.01$

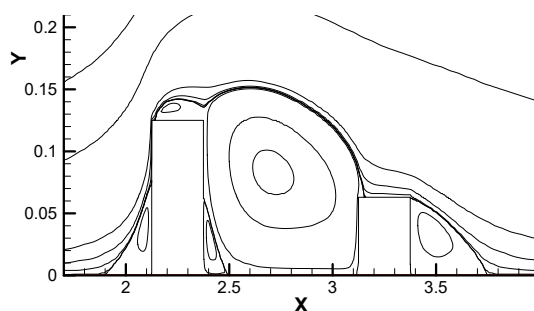
در شکل ۶ ضریب اصطکاک موضعی سطحی در مجاورت سطوح جامد رسم شده است. در ورودی جریان، به علت اختلاف سرعت ورودی و برقراری شرط عدم لغزش روی سطح، تنش برشی بسیار بالا بوده و به تدریج با کاهش سرعت میانگین درون کانال، مقدار آن نیز کاهش می‌یابد. در روی موانع مقدار اصطکاک سطح اهمیت بیشتری دارد. در سطح بالایی مانع اول لایه مرزی جدیدی تشکیل می‌شود. اولین پیک جریان بعد از ورودی در نقطه  $B_1$  اتفاق می‌افتد. ضخامت باریک لایه مرزی این ناحیه تنش برشی خیلی زیادی ایجاد خواهد کرد. پیک بعدی در  $C_1$  به علت ناپیوستگی ناگهانی در لبه مانع است. ناپیوستگی‌های مشابهی در جریان جرم و انتقال گرما حول موانع در مطالعات دیگر نیز مشاهده شده است [۳۰]. در پشت مانع اول بین نقاط  $D_1$  و  $A_2$  شاهد مقادیر منفی برای تنش برشی هستیم که ناشی از سیرکولاسیون بزرگ تشکیل شده در پشت مانع اول بدلیل برخورد جریان به این مانع است. مانع اول در پشت خود ناحیه کم فشاری ایجاد می‌کند که باعث کاهش قابل توجه تنش برشی در سطح مانع دوم نسبت به مانع اول می‌شود. در پشت مانع دوم ناحیه کم فشاری داریم که تنش برشی آن پایین است. بعد از گردابه در ناحیه  $D_2e$  لایه مرزی



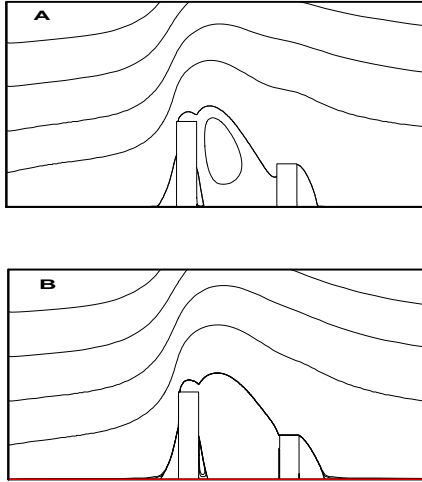
شکل ۳- (الف) هندسه جریان آرام نانوسیال آب- مس بین دو صفحه [۲۳] (ب) مقایسه عدد ناسلت متوسط برحسب کسر حجمی نانوذرات در دو عدد رینولدز مختلف

## ۲-۵- بررسی میدان جریان و انتقال حرارت

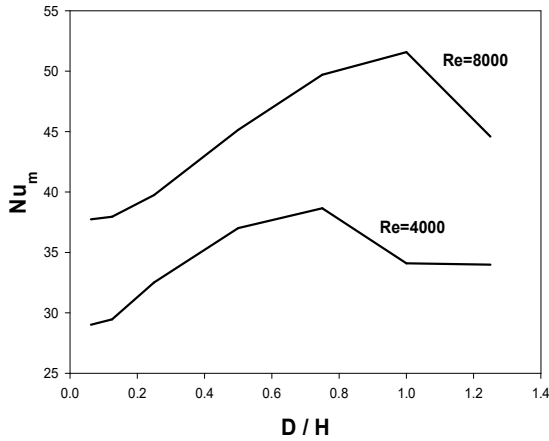
خطوط جریان اطراف موانع را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، سه ناحیه بازچرخش بزرگ در جریان تشکیل شده است که این چرخش‌ها از طریق هم‌زنی لایه مرزی به افزایش آشفتگی و ضریب انتقال گرما کمک می‌کنند. همچنین در نزدیکی موانع چرخش‌های کوچکتری نیز تشکیل شده‌اند که این چرخشها، اختلاط لایه‌های سیال را افزایش داده و باعث افزایش انتقال گرمای موضعی در روی موانع خواهند شد. با تغییر فاصله بین موانع و افزایش نسبت کسر حجمی نانوسیال، این نواحی تغییر اندازه داده و عدد ناسلت به تبع آن‌ها تغییر می‌کند.



شکل ۴- خطوط جریان در اطراف موانع با  $D/H=1$  در عدد رینولدز ۴۰۰۰ برای نانوسیال آب- مس با کسر حجمی  $\phi=0.01$



شکل ۷- خطوط جریان مغشوش نانوسیال آب- مس  $(\phi=0.1)$  اطراف موانع با  $D/H=1$  به ازای  $Re=4000$  (A) و  $Re=8000$  (B)

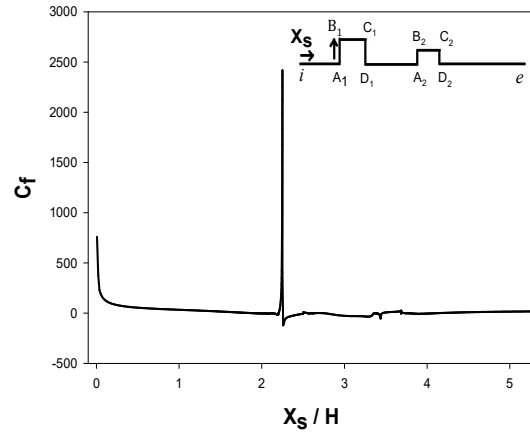


شکل ۸- تغییرات عدد ناسلت متوسط جریان مغشوش با فاصله بین موانع برای نانوسیال آب- مس  $(\phi=0.1)$  به ازای دو عدد رینولدز

#### ۴-۵ اثر کسرحجمی و قطر نانوذرات

اثر کسرحجمی نانوذرات جامد در سیال پایه  $(\phi)$  بر عدد ناسلت متوسط به ازای  $D/H=0.75$  در اعداد رینولدز ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ در شکل ۹ نشان داده شده است. در شکل به وضوح می‌توان دید که افزایش کسرحجمی نانوذرات سبب افزایش انتقال گرما می‌شود. در این نمودار می‌توان دید که شیب خط به ازای عدد رینولدز ۸۰۰۰ از شیب خط مشابه در عدد رینولدز ۴۰۰۰ اندکی بیشتر است که دلیل آن را می‌توان حرکت سریع‌تر لایه‌های مجاور دیوار در اعداد رینولدز بالاتر و به تبع آن افزایش انتقال گرما از سطح دانست. در اعداد رینولدز پایین‌تر، با کم‌رنگ‌تر شدن نقش انتقال گرما جابجایی نسبت به پخش گرمایی، افزایش کسرحجمی نانوذرات تاثیر کمتری در افزایش انتقال گرما ایفا خواهد کرد.

جدیدی تشکیل می‌شود که تنش برشی روی آن در طول کانال روند افزایشی ملایمی دارد.



شکل ۶- ضریب اصطکاک موضعی در امتداد دیوار جامد با  $D/H=1$  عدد رینولدز ۴۰۰۰ برای جریان مغشوش نانوسیال آب- مس با کسرحجمی  $\phi=0.1$

#### ۵-۳ اثر عدد رینولدز و فاصله بین موانع

انتقال گرمای متوسط سطح را می‌توان با تغییر فاصله موانع کنترل کرد. در این بخش، تاثیر فاصله بین موانع  $D/H$  بر عملکرد گرمایی نانوسیال آب- مس با کسرحجمی  $0.1$  در دو عدد رینولدز مغشوش ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ مورد مطالعه قرار گرفته است. بیشترین عدد ناسلت متوسط در دو عدد رینولدز مختلف، متفاوت خواهد بود که این موضوع را می‌توان به علت کوچک شدن ناحیه چرخش تشکیل شده در پشت مانع اول دانست. همانگونه که در خطوط جریان نشان داده شده در شکل ۷ می‌توان مشاهده نمود، این بازچرخش در عدد رینولدز ۸۰۰۰ بزرگتر از اندازه آن در عدد رینولدز ۴۰۰۰ است که این مساله باعث می‌شود گردابه در  $D/H$  بزرگتری به مانع دوم برسد و عدد ناسلت در  $D/H$  بزرگتری کاهش یابد. در  $D/H$  بزرگتر از  $0.25$ ، ناحیه باز چرخشی بین دو مانع تشکیل می‌شود و اندازه آن با افزایش فاصله بین موانع افزایش می‌یابد.

شکل ۸ تغییر عدد ناسلت متوسط‌گیری شده روی سطح جامد را با نسبت  $D/H$  در دو عدد رینولدز جریان مغشوش نشان می‌دهد. با افزایش فاصله بین موانع، به دلیل بزرگ شدن ناحیه چرخش بین آن‌ها، فرصت بیشتری برای اختلاط لایه‌های سیال فراهم شده و انتظار افزایش انتقال گرما در فواصل  $A_2B_2$ ،  $C_1D_1$  و  $D_1A_2$  می‌رود؛ با این حال در فاصله  $C_1D_1$  با توجه به ساعتگرد بودن ناحیه چرخش بین موانع و دمای بالای این ناحیه، تغییر چندانی بوجود نمی‌آید. انتقال گرما سطح بالایی مانع دوم  $(B_2C_2)$  با افزایش  $D/H$  به سبب تماس بیشتر بین نانوسیال و سطح، افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر فاصله بین موانع، تاثیر چندانی در بزرگی بازچرخش پشت آن‌ها نخواهد گذاشت که در نتیجه، عدد ناسلت در  $C_2D_2$  و  $D_2E$  تقریباً ثابت می‌ماند. در فواصل خیلی زیاد موانع، ناحیه چرخش تشکیل شده در پشت مانع اول به مانع دوم نخواهد رسید که این باعث تشکیل لایه مرزی جدید روی سطوح  $A_2B_2$  و  $D_1A_2$  شده و کاهش انتقال گرما را به همراه خواهد داشت.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، جریان مغشوش جابجایی اجباری نانوسیال از روی یک سطح با دو مانع ناهمسان در ناحیه ورودی به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال گرما به همراه معادلات انتقال مدل اغتشاشی  $k-\epsilon$  و مدل تک معادله‌ای ولفاستین برای نزدیک دیوار به کمک روش حجم محدود جبری شده و توسط الگوریتم SIMPLE بر روی شبکه هم‌مکان حل شدند. خواص نانوسیال نیز با استفاده از روابط تجربی جدید مبتنی بر مدل تک‌فاز محاسبه شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که ناحیه بازچرخش بزرگی بین موانع بوجود می‌آید که سبب افزایش ضریب انتقال گرما در این ناحیه می‌گردد. همچنین عدد نوسلت روی دیواره عمودی موانع و در بین دو مانع افزایش می‌یابد. با تغییر فاصله بین موانع و افزایش کسر حجمی نانوسیال، این نواحی تغییر اندازه داده و عدد ناسلت به تبع آن‌ها دچار تغییر می‌شود. در لبه‌های ابتدایی موانع اول و دوم، ضریب اصطکاک سطحی بالائی ایجاد می‌شود. در پشت مانع اول ناحیه کم فشار بوجود آمده سبب کاهش قابل توجه ضریب اصطکاک روی سطح مانع دوم نسبت به مانع اول می‌گردد. نتایج همچنین نشان داد که افزایش کسر حجمی نانوذرات سبب افزایش انتقال گرما خواهد شد که شیب تغییرات عدد نوسلت برحسب کسر حجمی نانوذرات به ازای اعداد رینولدز بالاتر، اندکی بیشتر است. افزایش قطر نانوذرات نیز سبب کاهش عدد ناسلت جریان شد که شیب این تغییر، با افزایش قطر نانوذرات روند کاهشی خواهد داشت.

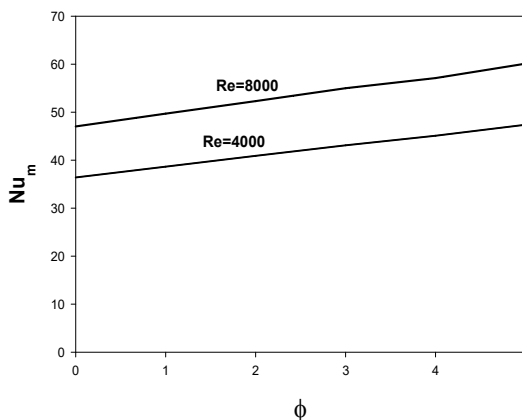
## ۷- نمادها

### علائم لاتین

C	ضریب اصطکاک سطح
$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه سیال ( $\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
D	فاصله بین دو مانع (m)
H	ارتفاع مانع یا عرض میدان جریان (m)
k	رسانایی گرمایی سیال ( $\text{Jm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{S}^{-1}$ )
k	انرژی جنبشی اغتشاش ( $\text{ms}^{-1}$ )
Nu	عدد ناسلت جریان
p	فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
Pr	عدد پراتل
Re	عدد رینولدز جریان
T	دما (K)
u	سرعت در جهت X ( $\text{ms}^{-1}$ )
v	سرعت در جهت Y ( $\text{ms}^{-1}$ )
W	عرض موانع (m)
x	مختصه افقی (m)
y	مختصه عمودی (m)

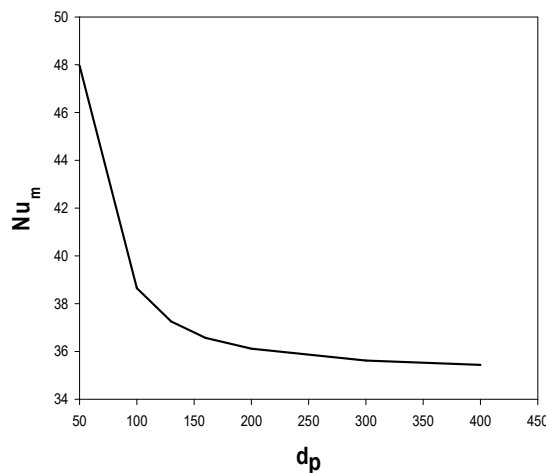
### علائم یونانی

$\epsilon$	اتلاف لرج ( $\text{m}^2\text{s}^{-3}$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\phi$	کسر حجمی نانوذرات



شکل ۹- تغییر در عدد ناسلت متوسط جریان مغشوش با کسر حجمی نانوذرات مس اطراف موانع با  $D/H=0.75$  به ازای دو عدد رینولدز

اثر قطر نانو ذرات بر عدد ناسلت متوسط جریان در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان دید که افزایش قطر نانو ذرات در نانوسیال باعث کاهش عدد ناسلت جریان می‌شود. البته میزان این تغییرات با افزایش قطر نانو ذرات روند کاهشی داشته و به تدریج در مقادیر بالاتر، قطر نانوذرات تاثیر چندانی بر انتقال حرارت نخواهد گذاشت.



شکل ۱۰- تغییر در عدد ناسلت متوسط جریان مغشوش با قطر نانوذرات ( $\phi=0.1$ ) اطراف موانعی با  $D/H=0.75$  در عدد رینولدز ۴۰۰۰

شکل ۱۰ به خوبی نشان می‌دهد که اگرچه با افزایش قطر نانوذرات، سطح ذرات جامد با رسانایی گرمایی بالا در سیال پایه افزایش خواهد یافت، ولی از آنجائی که نقش مهم‌تر در افزایش انتقال گرما جابجائی را حرکت نانوذرات در سیال پایه دارد، به ازای یک کسر حجمی مشخص نانوذرات، ذرات با قطر کمتر تبادل گرمای جابجائی بیشتری انجام می‌دهند و در نتیجه آهنگ انتقال گرما را بهبود می‌بخشند.



- turbulent two-phase flows around an obstacle, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 45, May 2017, pp. 97-122.
- [13] De Marchis M., Milici B., Napoli E., Solid sediment transport in turbulent channel flow over irregular rough boundaries, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 65, June 2017, pp. 114-126.
- [14] Hou J., Vajdi Hokmabad B., Ghaemi S., Three-dimensional measurement of turbulent flow over a riblet surface, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 85, July 2017, pp. 229-239.
- [15] Segunda V.M., Ormiston S.J., Tachie M.F., Experimental and numerical investigation of developing turbulent flow over a wavy wall in a horizontal channel, *European Journal of Mechanics – B/Fluids*, Vol. 68, March–April 2018, pp. 128-143.
- [16] Mirmasoumi S., Behzadmehr A., Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizontal tube, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, No. 2, pp. 557–566, 2008.
- [17] Pishkar I., Ghasemi B., Effect of nanoparticles on mixed convection heat transfer in a horizontal channel with heat source, *modares mechanics journal*, Vol. 12, No. 2, pp.95-108, 2012.
- [18] Rostamani M., Hosseinizadeh S. F., Gorji M. and Khodadadi J. M., Numerical study of turbulent forced convection flow of nanofluids in a long horizontal duct considering variable properties, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 10, pp. 1426–1431, 2010.
- [19] Mohammed H. A., Al-Shamani A. N. and Sherif J. M., Thermal and hydraulic characteristics of turbulent nanofluids flow in a rib-groove channel, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 10, pp. 1584–1594, 2012.
- [20] Yuan Z. X., Numerical study of periodically turbulent flow and heat transfer in a channel with transverse fin arrays, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 10, No. 8, pp. 842-861, 2000.
- [21] Wolfshtiein M., The velocity and temperature distribution in one-dimensional flow with turbulence augmentation and pressure gradient, *Int. J. Heat Mass transfer*, Vol. 12, No. 3, pp. 301-318, 1969.
- [22] Patankar S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington D. C., 1980.
- [23] Santra A. K., Sen S., Chakraborty N., Study of heat transfer due to laminar flow of copper-water nanofluid through two isothermally heated parallel plates, *International journal of thermal sciences*, Vol. 48, No. 2, pp. 391-400, 2009.
- [24] Khoshvaght-Aliabadi M., Hormozi F., Zamzamanian A., Experimental analysis of thermal-hydraulic performance of copper-water nanofluid flow in different plate-fin channels, *Experimental thermal and fluid science*, Vol. 52, pp. 248–258, 2014.
- [25] Patel H. E., Pradeep T., Sundarajan T., Dasgupta A., Dasgupta N. and Das S. K., A Micro-Convection Model for Thermal Conductivity of Nanofluid, *Pramana - Journal of Physics*, Vol. 65, No. 5, pp. 863-869, 2005.
- [26] Xuan Y., Roetzel W., Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 19, pp. 3701-3707, 2000.
- [27] Rhie C.M., Chow W.L., Numerical Study of the Turbulent Flow past an Airfoil with Trailing Edge Separation, *AIAA Journal*, Vol. 21, pp. 1525–1532, 1983.
- [28] Ferziger J.H., Peric M., *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, 1999.
- [29] Versteeg H.K., Malalasekera W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Pearson Education Limited, 2007.
- [30] Dhiman A.K., Chhabra R.P. and Eswaran V., Flow and heat transfer across a confined square cylinder in the steady flow regime: Effect of Peclet number, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 21-22, pp. 4598–4614, 2005.

## زیر نویس ها

b	المان افقی
eff	موثر
f	سیال خالص پایه
m	متوسط
nf	نانوسیال
p	نانوذرات
s	در امتداد سطح پایینی
t	مغشوش
w	دیوار
x	المان نقطه‌ای
$\infty$	جریان ورودی
1	مانع اول
2	مانع دوم

## ۸- مراجع

- [1] Nasiruddin Kamran M. H. S., Heat transfer augmentation in a heat exchanger tube using a baffle, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, No.2, pp. 318-328, 2007.
- [2] Promvong P., Sripattanapipat S., Tamna S., Kwankao -meng S. and Thianpong C., Numerical investigation of laminar heat transfer in a square channel with 45° inclined baffles, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 2, pp. 170-177, 2010.
- [3] Nuntadusit C., Piyal., Wae-hayee M. and Eiamsa-ard S., Heat transfer characteristics in a channel fitted with zigzag-cut baffles, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 6, pp. 2547-2554, 2015.
- [4] Promvong P., Sripattanapipat S. and Kwankaomeng S., Laminar periodic flow and heat transfer in square channel with 45° inline baffles on two opposite walls, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 6, pp. 963-975, 2010.
- [5] Jedsadaratanachai W., Suwannapan S. and Promvong P., Numerical study of laminar heat transfer in baffled square channel with various pitches, *Energy Procedia*, Vol. 9, pp. 630-642, 2011.
- [6] Sriromreun P., Thianpong C. and Promvong P., Experimental and numerical study on heat transfer enhancement in a channel with Z-shaped baffles, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 7, pp. 945-952, 2012.
- [7] Promvong P., Heat transfer and pressure drop in a channel with multiple 60° V-baffles, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 7, pp. 835–840, 2010.
- [8] Manca O., Nardini S. and Ricci D., A numerical study of nanofluid forced convection in ribbed channels, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 37, pp. 280-292, 2012.
- [9] Mohammadi Pirouz M., Farhadi M., Sedighi K., Nemati H. and Fattahi E., Lattice Boltzmann simulation of conjugate heat transfer in a rectangular channel with wall-mounted obstacles, *Scientia Iranica B*, Vol. 18, No. 2, pp. 213–221, 2011.
- [10] Ryu D. N., Choi D. H. and Patel V. C., Analysis of turbulent flow in channels roughened by two-dimensional ribs and three-dimensional blocks. Part II: Heat transfer, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, No. 5, pp. 1112–1124, 2007.
- [11] Lu H., Zhao W.J., Zhang H.Q., Wang B., Wang X.L., Three-dimensional turbulent flow over cube-obstacles, *Chinese Physics B*, Vol. 26, No. 1, 2017.
- [12] Ben Hamza S., Ben Kalifa R., Mahjoub Saïd N., Bourmot H., Le Palec G., Numerical study of sediment transport in