



بیست و چهارمین همایش  
سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک  
۷ تا ۹ اردیبهشت ۱۳۹۵



انجمن مهندسان مکانیک ایران

## گواهی ارائه مقاله

بدین وسیله گواهی می‌شود که مقاله‌ای با عنوان  
حساسیت سنجی انتقال حرارت نانوسیال آب - مس در بین

دو صفحه موازی با روش سطح پاسخ

توسط نویسندگان

بیژن درباری، محمدباقر آیانی

در

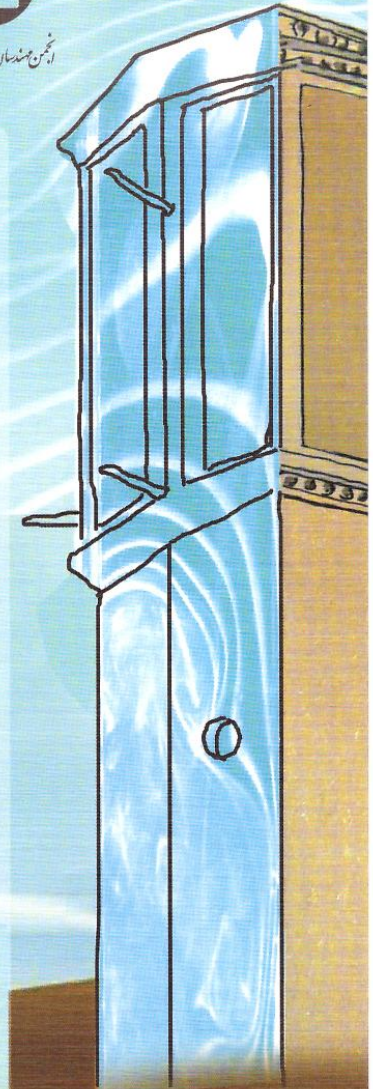
بیست و چهارمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران

که در دانشگاه یزد برگزار گردید، ارائه شده است.

دکتر محمد بزرگ  
دیربایش



دکتر منصور رفیعیان  
دیر علمی بایش



یزد، صفائییه، بلوار دانشگاه  
دانشگاه یزد  
پردیس فنی و مهندسی  
دانشکده مهندسی مکانیک  
صندوق پستی: ۷۴۱-۸۹۱۹۵

Department of Mechanical  
Engineering Yazd University  
Daneshgah Boulevard  
Safaieh, Yazd, Iran  
P.O.Box 89195 - 741

24<sup>th</sup>

ISME 2016

Annual International Conference on Mechanical Engineering  
April 26-28, 2016, Yazd, Iran

# حساسیت سنجی انتقال حرارت نانوسیال آب - مس در بین دو صفحه موازی با روش سطح پاسخ

بیژن درباری<sup>۱</sup>، محمد باقر آیبانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک Bijan.Darbari@stu.um.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی Mbayani@um.ac.ir

## چکیده

به خصوص در اعداد رینولدز بالا، انتقال حرارت افزایش یافته و نرخ انتقال حرارت سیال غیر نیوتونی در غلظت‌های بالا از سیال نیوتونی بیشتر است. رئیسی و همکاران [۲] جریان نانوسیال آب - مس را در میکرو کانال با تغییر ضرایب لغزش سرعت روی دیواره بررسی کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که با افزایش ضریب لغزش سرعت دیواره به خصوص در اعداد رینولدز بالا، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. کالته و همکاران [۳] جریان آرام نانوسیال آب - مس را در داخل یک میکرو کانال دوبعدی با استفاده از روش دوفاز اولری - اولری بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که سرعت نسبی و اختلاف دما بین ذرات نانو و سیال پایه اندک و قابل صرف نظر است. همچنین با افزایش عدد رینولدز یا غلظت نانوسیال و کاهش قطر نانو ذرات انتقال حرارت در داخل کانال بهبود می‌یابد.

یک از روش‌های مؤثر در بررسی حساسیت مسئله نسبت به تغییر پارامترهای مستقل ورودی به آن، روش سطح پاسخ است که در سالیان اخیر توجه زیادی به آن شده است. رشیدی و همکاران [۴] جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم را بر روی مانع مثلی تحت تأثیر سه پارامتر زاویه حمله مثلث، کسر حجمی نانوسیال  $\phi$  و تغییر عدد رینولدز  $Re$  حل کرده و حساسیت مسئله نسبت به این پارامترها را با استفاده از روش فوق بررسی کرده‌اند. آنها نتیجه گرفته‌اند که حساسیت عدد ناسلت و افت فشار نسبت به تغییر زاویه حمله مثلث بسیار بیشتر از تغییر غلظت نانوسیال و تغییر عدد رینولدز است. در بیشتر تحقیقات انجام گرفته بیان شده است که افزایش کسر حجمی نانوسیال  $\phi$ ، کاهش قطر نانوذرات  $d_p$  و افزایش عدد رینولدز  $Re$  موجب افزایش انتقال حرارت می‌گردد. ولی در حقیقت تأثیر این پارامترها در بهبود انتقال حرارت متفاوت است. پس مقایسه بین این پارامترها و بررسی میزان حساسیت مسئله نسبت به تغییرات این پارامترها در کاربردهای مهندسی و انتخاب بهترین حالت ممکن بسیار مفید و باارزش است.

در این مطالعه انتقال حرارت جریان توسعه یافته، پایا و آرام نانوسیال آب - مس بین دو صفحه موازی با استفاده از روش عددی حجم محدود حل شده است.

سپس با استفاده از روش سطح پاسخ و با انجام تعداد معدودی آزمایش ابتدا مقادیر عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  به ازای تمام مقادیر فوق تخمین زده شده و سپس میزان تغییر و حساسیت عدد ناسلت متوسط نسبت

در جریان‌های نانوسیال، تغییر قطر ذرات نانو، کسر حجمی نانوسیال و عدد رینولدز جریان، انتقال حرارت را به میزان متفاوتی تغییر می‌دهند و در حالت‌های خاصی تغییر این پارامترها جهت افزایش انتقال حرارت توجیه ندارد. هدف از این مطالعه بررسی و مقایسه تغییر هر کدام از پارامترهای فوق در افزایش عدد ناسلت متوسط با استفاده از روش سطح پاسخ<sup>۱</sup> است. در این مطالعه انتقال حرارت جریان آرام، دوبعدی و در حال توسعه نانوسیال آب - مس در بین دو صفحه موازی با استفاده از روش عددی حجم محدود حل شده و سپس با استفاده از روش سطح پاسخ، میزان و شدت افزایش عدد ناسلت متوسط در اثر تغییر پارامترهای فوق بررسی می‌شود. در انتها نتیجه شده است که در کسرهای حجمی بالاتر، عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز یا کاهش قطر ذرات نانو، افزایش بیشتری می‌یابد. در قطرهای بالاتر ذرات نانو، عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز با کاهش قطر ذرات نانو افزایش کمتری می‌یابد. در تمام حالات با افزایش کسر حجمی نانوسیال، عدد ناسلت متوسط به طور یکنواخت افزایش می‌یابد. تأثیر کسر حجمی نانوسیال در افزایش عدد ناسلت متوسط نسبت به دو پارامتر دیگر مسئله کمتر است.

## واژه‌های کلیدی

روش سطح پاسخ، نانوسیال آب - مس، انتقال حرارت، صفحه موازی، حساسیت سنجی<sup>۲</sup>

## مقدمه

در حالت کلی، ضریب هدایت حرارتی و شدت انتقال حرارت نانو سیال با کسر حجمی نانو سیال  $\phi$  رابطه مستقیم و با قطر ذرات نانو  $d_p$  رابطه معکوس دارد. همچنین افزایش عدد رینولدز  $Re$  نیز باعث افزایش شدت انتقال حرارت می‌شود.

در سالیان اخیر تعدادی از پژوهشگران جریان و انتقال حرارت نانوسیال در بین صفحات موازی را بررسی کرده‌اند. سانترا و همکاران [۱] جریان نانوسیال آب - مس با قطر ذرات ۱۰۰ نانومتر در بین صفحات موازی را با دو فرض سیال نیوتونی و غیر نیوتونی بررسی کرده‌اند. آن‌ها مشاهده کرده‌اند که با افزایش غلظت نانوسیال

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad (6)$$

$$\rho_{nf}Cp_{nf} = (1 - \varphi)\rho_fCp_f + \varphi\rho_pCp_p \quad (7)$$

ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از مدل پاتل و همکاران [۶] محاسبه شده است.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + \frac{k_p A_p}{k_f A_f} + ck_p Pe \frac{A_p}{k_f A_f} \quad (8)$$

$$\frac{A_p}{A_f} = \frac{d_f \varphi}{d_p (1 - \varphi)} \quad (9)$$

$$Pe = \frac{V_B d_p}{\alpha_f}; \quad V_B = \frac{1}{d_p} \sqrt{\frac{18k_B T}{\pi \rho_p d_p}} \quad (10)$$

منظور از  $V_B$  در بالا سرعت براونین متوسط ذرات نانو و  $k_B$  ثابت بولتزمن است. همچنین عدد ثابت  $c$  با توجه به نوع نانو سیال و تطابق مقادیر محاسبه شده با نتایج آزمایشگاهی تعیین شده است. برای نانوسیال آب - مس،  $c=36000$  مقدار مناسبی است.

لزجت دینامیک نانوسیال توسط مدل معصومی و همکاران [۷] محاسبه شده است.

$$\mu_{nf} = \mu_f + \frac{\rho_p V_B d_p^2}{72N\delta}; \quad \delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\rho_p} d_p} \quad (11)$$

$$N = \frac{1}{\mu_f} ((n_1 d_p + n_2)\varphi + (n_3 d_p + n_4)) \quad (12)$$

$$n_1 = -0.000001113; \quad n_2 = -0.000002771 \quad (13)$$

$$n_3 = 0.000000009; \quad n_4 = -0.000000393 \quad (14)$$

در رابطه بالا  $\delta$  میانگین فاصله بین ذرات نانو است.

کلیه خواص ترموفیزیکی لازم در روابط بالا در جدول (۱) قرار دارد. از تغییرات خواص ترموفیزیکی سیال پایه و ذرات نانو با دما صرف نظر شده است.

جدول (۱): خواص ترموفیزیکی آب خالص و مس

خاصیت	آب خالص	مس
$C_p$ (J/Kg.K)	۴۱۸۱/۸۰	۳۸۳/۱۰
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	۱۰۰۰/۵۲	۸۹۵۴/۰۰
$k$ (W/m.K)	۰/۵۹۷	۳۸۶/۱
$\mu$ (Kg/m.s)	۰/۰۰۱	-----

عدد بدون بعد ناسلت محلی و متوسط توسط رابطه زیر محاسبه شده است.

$$Nu_x = -\frac{k_{nf}}{k_f} D_h \left. \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right|_{y=-\frac{H}{2}}; \quad \overline{Nu} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dX \quad (15)$$

در رابطه بالا،  $D_h = 2 * H$  قطر هیدرودینامیکی معادل است.

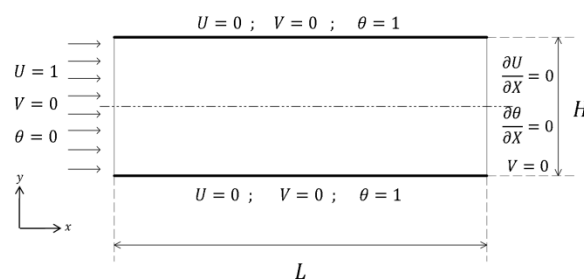
### حل عددی معادلات

معادلات بقای جرم، مومنوم و انرژی با استفاده از روش حجم محدود و تخمین بالادست مرتبه دوم<sup>۱</sup> حل شده اند. ارتباط معادلات بقای جرم و مومنوم با استفاده از الگوریتم سیمپل<sup>۲</sup> انجام شده است. به دلیل تقارن مسئله جهت کاهش زمان حل و حافظه، در حل عددی تنها نیمی از حوزه حل در نظر گرفته شده است. معیار همگرایی مسئله،

به تغییر پارامترهای فوق بررسی و مقایسه شده است. همچنین در حالت های حدی مختلف، موثرترین و کم اثرترین پارامتر در افزایش انتقال حرارت تعیین شده است.

### مدل سازی ریاضی

هندسه مسئله و شرایط مرزی در شکل (۱) نمایش داده شده است. هندسه شامل دو صفحه موازی به طول  $L$  و فاصله  $H$  است. نسبت طول به ارتفاع صفحه زیاد بوده ( $\frac{L}{H}=100$ ) طوری که جریان در قسمت انتهایی صفحه کاملاً توسعه یافته است. دمای صفحات گرم بالایی و پایینی مقدار ثابت  $T_H$  را دارند و جریان سرد با دمای یکنواخت  $T_C$  وارد هندسه می شود و با عبور از بین دو صفحه گرم می شود. نانوسیال شامل مخلوط همگن آب با ذرات کروی معلق مس با قطر ۳۰ تا ۹۰ نانومتر است. جریان نانوسیال پایا، تراکم ناپذیر و آرام است. فرض می شود که ذرات نانو با سیال پایه در حال تعادل دمایی و دارای سرعت یکسان هستند.



شکل (۱): هندسه و شرایط مرزی مسئله

### معادلات حاکم

معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، مومنوم و انرژی حرارتی برای جریان آرام، پایا، دوبعدی و تراکم ناپذیر است. از اثر شناوری ذرات نانو در سیال پایه صرف نظر شده است. این معادلات با تعریف متغیرهای بدون بعد (۱) و (۲) به فرم بدون بعد (۳) تا (۵) تبدیل شده اند.

$$X = \frac{x}{2*H}; \quad Y = \frac{y}{2*H}; \quad U = \frac{u}{u_{in}}; \quad V = \frac{v}{u_{in}} \quad (1)$$

$$P = \frac{p}{\rho_{nf} u_{in}^2}; \quad \theta = \frac{T - T_C}{T_H - T_C} \quad (2)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (3)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{\rho_f Cp_f}{\rho_{nf} Cp_{nf}} \frac{1}{RePr} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (5)$$

جهت حل جریان و انتقال حرارت نانوسیال، با فرض تکفاز و همگن بودن مخلوط نانوسیال، نیاز به تخمین خواص ترموفیزیکی مؤثر نانوسیال برحسب خواص سیال پایه و ذرات نانو است. چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال از روابط زیر محاسبه شده است [۵].

$$Res = \alpha_0 + \alpha_1 A + \alpha_2 B + \alpha_3 C + \alpha_{11} A^2 + \alpha_{22} B^2 + \alpha_{33} C^2 + \alpha_{12} AB + \alpha_{13} AC + \alpha_{23} BC \quad (16)$$

جدول (۳): مقدار تغییر متغیرهای ورودی به مسئله، اسم و مقادیر نسبت داده شده به آنها

متغیر	اسم نسبت داده شده	مقادیر نسبت داده شده		
		-۱	۰	۱
$Re$	A	۲۰۰	۵۰۰	۸۰۰
$d_p$ (nm)	B	۳۰	۶۰	۹۰
$\varphi$	C	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۵

در معادله (۱۶)،  $Res$  متغیر وابسته خروجی از مسئله یعنی عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  بوده و مقادیر A و B و C در هر بار حل مسئله با توجه به جدول (۳) جایگذاری شده است.

تعداد آزمایش‌های لازم جهت به دست آوردن حساسیت متغیر خروجی نسبت به تغییرات متغیرهای ورودی با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی توسط رابطه (۱۷) تعیین شده است. a تعداد نقاط مشترک و b تعداد نقاط مرکزی است [۱۰].

$$n_{exp} = 2^a + 2a + b = 2^3 + 2 * 3 + 6 = 20 \quad (17)$$

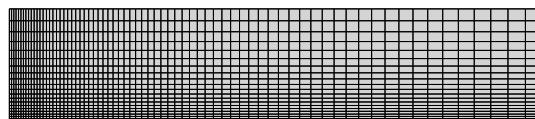
#### نتایج

نتایج عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  حاصله از ۲۰ آزمایش انجام شده در جدول (۴) نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت کلی، عدد ناسلت  $Nu$  با افزایش عدد رینولدز یا افزایش کسر حجمی نانوسیال یا کاهش قطر ذرات نانو، افزایش می‌یابد.

جدول (۴): نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده

آزمایش	اسامی نسبت داده شده			متغیر مستقل ورودی به مسئله			ناسلت متوسط $\overline{Nu}$
	A	B	C	Re	$d_p$ (nm)	$\varphi$	
۱	۱	۱	۱	۲۰	۳۰	۰/۰۱	۶/۲۴۱
	-	-	-	۰	۰	۰	
۲	۱	۱	۱	۸۰	۳۰	۰/۰۱	۱/۸۶۱
	-	-	-	۰	۰	۰	۳
۳	۱	۱	۱	۲۰	۹۰	۰/۰۱	۵/۹۷۴
	-	-	-	۰	۰	۰	
۴	۱	۱	۱	۸۰	۹۰	۰/۰۱	۸/۱۵۴
	-	-	-	۰	۰	۰	
۵	۱	۱	۱	۲۰	۳۰	۰/۰۵	۷/۹۶۸
	-	-	-	۰	۰	۰	
۶	۱	۱	۱	۸۰	۳۰	۰/۰۵	۲/۵۱۸
	-	-	-	۰	۰	۰	۲
۷	۱	۱	۱	۲۰	۹۰	۰/۰۵	۵/۲۴۹
	-	-	-	۰	۰	۰	
۸	۱	۱	۱	۸۰	۹۰	۰/۰۵	۱/۸۸۸
	-	-	-	۰	۰	۰	۱
۹	۱	۰	۰	۲۰	۶۰	۰/۰۳	۵/۶۶۸
	-	-	-	۰	۰	۰	
۱۰	۱	۰	۰	۸۰	۶۰	۰/۰۳	۱/۹۲۸
	-	-	-	۰	۰	۰	۲
۱۱	۰	۱	۰	۵۰	۳۰	۰/۰۳	۱/۲۸۴
	-	-	-	۰	۰	۰	۴
۱۲	۰	۱	۰	۵۰	۹۰	۰/۰۳	۸/۹۸۶
	-	-	-	۰	۰	۰	

باقیمانده‌های نسبی کمتر از  $10^{-7}$  است. شبکه ایجاد شده دارای حجم‌های مستطیلی بوده و جهت افزایش دقت حل، اندازه شبکه در نزدیکی دیواره و ورودی لوله ریز شده است. به ازای اندازه‌های مختلف شبکه، پروفیل سرعت محوری در یک خط عمودی در ورودی لوله رسم شده و با مقایسه آنها، اندازه شبکه  $800 * 80$  انتخاب شده است. نمای کلی از شبکه ایجاد شده در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل (۲): شبکه ایجاد شده جهت حل مسئله

جهت اعتبار سنجی نتایج حل، مقادیر عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  این حل و مقادیر موجود در مطالعه سانترا و همکاران [۱] برای سیال خالص آب در جدول (۲) نمایش داده شده و نتایج این دو حل باهم مقایسه شده است. تطابق خوبی بین دو نتیجه مشاهده شده است.

جدول (۲): اعتبارسنجی نتایج مطالعه حاضر و سانترا و همکاران [۱]

عدد رینولدز Re	عدد ناسلت متوسط (W/m <sup>2</sup> .K)		اختلاف %
	مطالعه حاضر	سانترا و همکاران [۱]	
۱۰۰	۳/۱۲	۳/۰۸	۱/۲۹ %
۲۰۰	۴/۸۸	۴/۸۲	۱/۳۶ %
۴۰۰	۶/۶۸	۶/۵۶	۱/۸۳ %
۱۰۰۰	۹/۲۷	۹/۱۴	۱/۴۲ %

#### روش سطح پاسخ

در این روش ارتباط بین چندین متغیر مستقل ورودی به مسئله و یک متغیر وابسته خروجی از مساله به عنوان پاسخ از مسئله با استفاده از یک تابع نمایی غیرخطی تخمین زده شده است و همچنین در چند مرحله با تغییر یکی از متغیرهای ورودی، می‌توان حساسیت متغیر خروجی نسبت به آنها را به دست آورد [۸].

متغیرهای مستقل ورودی به مسئله شامل عدد بدون بعد رینولدز  $Re$ ، قطر ذرات نانو  $d_p$  و کسر حجمی نانوسیال  $\varphi$  و متغیر وابسته خروجی عدد بدون بعد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  است. فرض شده است که مقدار مرکزی نسبت داده شده به هر کدام از متغیرهای فوق صفر بوده و تغییر متغیرهای فوق حول نقطه مرکزی به صورت متقارن است. به تغییر هر کدام از متغیرهای فوق حول نقطه مرکزی آنها عددی صحیح مثبت و منفی حول نقطه صفر نسبت داده شده است. مقدار تغییر هر کدام از متغیرهای فوق و مقادیر نسبت داده شده به آنها در جدول (۳) نمایش داده شده است.

معادله نمایی و غیرخطی (۱۶) جهت تخمین مقدار متغیر خروجی نسبت به متغیرهای ورودی ارائه شده است [۹].

از شکل (۳-ب) می توان دریافت که عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  حداکثر در بالاترین عدد رینولدز  $Re$  و بالاترین کسر حجمی نانوسیال  $\phi$  بدست آمده است. با این توضیح که افزایش کسر حجمی نانوسیال تأثیر اندکی بر روی عدد  $Re$  گذاشته است.

از شکل (۳-ج) می توان دریافت که عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  حداکثر در کمترین قطر ذرات نانو  $d_p$  و بالاترین کسر حجمی نانوسیال  $\phi$  بدست آمده است.

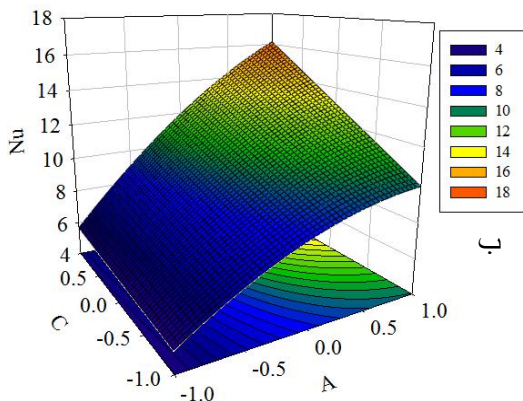
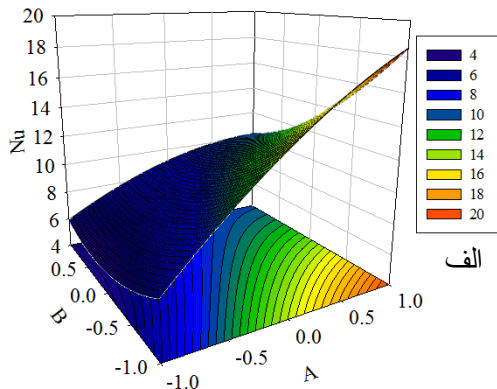
حساسیت عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  نسبت به تغییر متغیر مستقل ورودی توسط روابط (۱۹) تا (۲۱) تعیین شده است.

$$\frac{\partial \overline{Nu}}{\partial A} = 3.82 - 2.02A - 1.66B + 1.42C \quad (19)$$

$$\frac{\partial \overline{Nu}}{\partial B} = -2.46 + 2.64B - 1.66A - 0.92C \quad (20)$$

$$\frac{\partial \overline{Nu}}{\partial C} = 1.68 + 1.42A - 0.92B \quad (21)$$

مقدار حساسیت، تعیین کننده این است که در همسایگی مقادیر خاصی از متغیرهای ورودی، تغییر کدام متغیر مستقل ورودی باعث تغییر عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  شده است. مقدار مثبت حساسیت نشان دهنده افزایش عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  با افزایش متغیر مستقل ورودی است و مقدار منفی نشان دهنده کاهش عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  با افزایش متغیر مستقل ورودی است. همچنین مقدار حساسیت بالا نشان دهنده تغییر چشمگیر عدد ناسلت  $\overline{Nu}$  نسبت به متغیر مستقل ورودی است و بالعکس.



۱۳	۰	۰	۱	۵۰	۶۰	/۰.۱	۸/۲۶۱
۱۴	۰	۰	۱	۵۰	۶۰	/۰.۵	۱/۷۲۱
۱۵	۰	۰	۰	۵۰	۶۰	/۰.۳	۱/۲۱۵
۱۶	۰	۰	۰	۵۰	۶۰	/۰.۳	۱/۲۱۴
۱۷	۰	۰	۰	۵۰	۶۰	/۰.۳	۱/۲۱۶
۱۸	۰	۰	۰	۵۰	۶۰	/۰.۳	۱/۲۱۳
۱۹	۰	۰	۰	۵۰	۶۰	/۰.۳	۱/۲۱۴
۲۰	۰	۰	۰	۵۰	۶۰	/۰.۳	۱/۲۱۴

ضرایب محاسبه شده معادله (۱۶) در جدول (۵) نمایش داده شده است. مقدار  $P - Value$  در این جدول، اعتبار این مدل در نگاه آماری را نشان می دهد.

در این مدل فقط ضرایب با  $P - Value \leq 0.05$  قابل اعتماد هستند و مابقی ضرایب باید حذف شوند. بنابراین  $C^2$  از معادله (۱۶) حذف می شود. مقادیر بالا  $R^2$  و  $R^2 - adj$  در جدول (۵) نشان دهنده دقت بالای نتایج از روش سطح پاسخ است.

جدول (۵): ضرایب محاسبه برای معادله (۱۶)

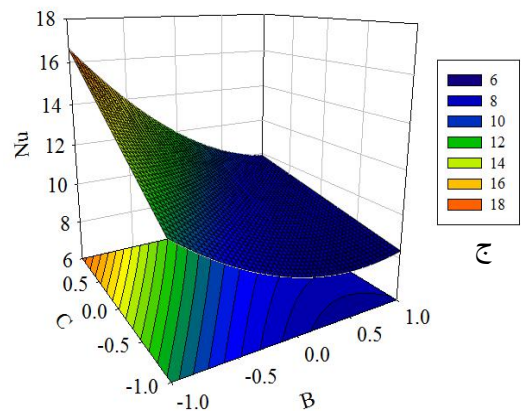
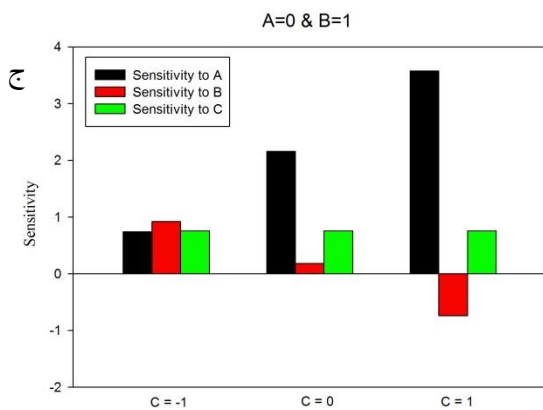
ضریب	مقدار	P-value
$\alpha_0$	۱۰/۲۵	<۰/۰۰۰۱
$\alpha_1$	۳/۸۲	<۰/۰۰۰۱
$\alpha_2$	-۲/۴۶	<۰/۰۰۰۱
$\alpha_3$	۱/۶۸	<۰/۰۰۰۱
$\alpha_{11}$	-۱/۰۱	<۰/۰۰۰۱
$\alpha_{22}$	۱/۳۲	<۰/۰۰۰۱
$\alpha_{33}$	-۰/۳۱	۰/۱۲۲
$\alpha_{12}$	-۱/۶۶	<۰/۰۰۰۱
$\alpha_{13}$	۱/۴۲	<۰/۰۰۰۱
$\alpha_{23}$	-۰/۹۲	<۰/۰۰۰۱
	$R^2=99.66\%$	$R^2-adj=99.35\%$

در نهایت رابطه زیر برای محاسبه عدد بدون بعد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  به دست آمده است.

$$\overline{Nu} = 10.25 + 3.82A - 2.46B + 1.68C + 1.01A^2 + 1.32B^2 - 1.66AB + 1.42AC - 0.92BC \quad (18)$$

عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  تخمین زده شده از رابطه (۱۸) در شکل (۳) نمایش داده شده است. هر بار یکی از متغیرهای ورودی مقدار ثابت صفر داشته و عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  برحسب دو متغیر ورودی دیگر تخمین زده شده است.

از شکل (۳-الف) می توان دریافت که عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  حداکثر در بالاترین عدد رینولدز  $Re$  و کمترین قطر ذرات نانو  $d_p$  به دست آمده و این روند کاملاً صعودی است.



شکل (۴): حساسیت عدد ناسلت متوسط نسبت به متغیرهای ورودی به مسئله

شکل (۳): عدد ناسلت متوسط تخمین زده شده از رابطه (۱۸)

شکل (۴-ب): نشان‌دهنده حساسیت عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  نسبت به تغییر متغیرهای ورودی، در رینولدز  $Re = 500$  و قطر ذرات نانو  $d_p = 60nm$  است. کلیه توضیحات مربوط به شکل (۴-الف)، در این مورد نیز صادق است.

شکل (۴-ج): نشان‌دهنده حساسیت عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  نسبت به تغییر متغیرهای ورودی، در رینولدز  $Re = 500$  و قطر ذرات نانو  $d_p = 90nm$  است. مشاهده می‌شود که در همسایگی تمام کسرهای حجمی نانوسیال  $\phi$ ، عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  با افزایش عدد رینولدز  $Re$  یا افزایش کسر حجمی نانوسیال  $\phi$ ، افزایش یافته است. در همسایگی کسرهای حجمی  $\phi = 0.01$  و  $\phi = 0.03$ ، عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  با افزایش قطر ذرات نانو  $d_p$  افزایش یافته است. در همسایگی کسر حجمی  $\phi = 0.05$ ، عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  با افزایش قطر ذرات نانو  $d_p$  کاهش یافته است. در کسرهای حجمی بالاتر، عدد ناسلت  $\overline{Nu}$  با افزایش عدد رینولدز  $Re$  افزایش بیشتری یافته است. با افزایش کسر حجمی نانوسیال  $\phi$  در همسایگی تمام مقادیر کسر حجمی، عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  به یک میزان افزایش یافته است. در کسر حجمی نانوسیال  $\phi = 0.03$ ، تأثیر افزایش قطر ذرات نانو  $d_p$  در افزایش عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  اندک است.

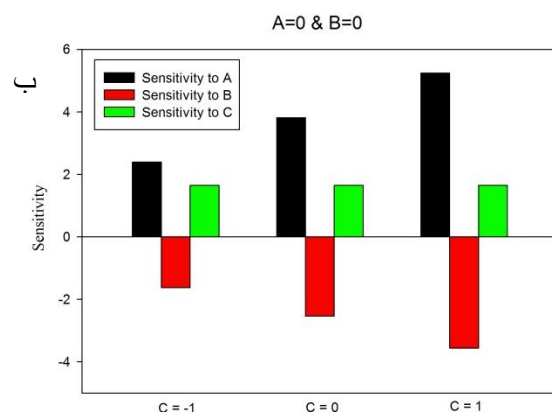
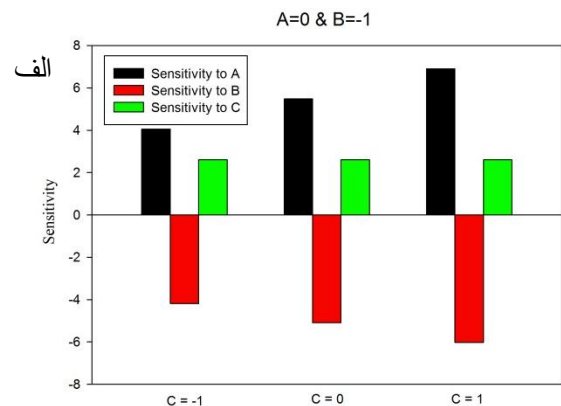
همچنین با مقایسه شکل‌های (۴-الف) تا (۴-ج) می‌توان دریافت که با افزایش قطر ذرات نانو  $d_p$ ، اثر افزایش عدد رینولدز  $Re$  یا افزایش کسر حجمی نانوسیال  $\phi$  در افزایش عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  کاهش یافته است. همچنین در تمام حالات افزایش عدد رینولدز  $Re$  و کاهش قطر ذرات نانو  $d_p$  به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را در افزایش عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  دارد.

### جمع بندی

در این مطالعه، انتقال حرارت جریان پایا، آرام و درحال توسعه نانوسیال آب - مس در بین دو صفحه موازی با فرض دوبعدی بودن جریان به روش عددی حجم محدود حل شده است. سپس با استفاده از روش سطح پاسخ، تأثیر متغیرهای مستقل ورودی به مسئله شامل عدد رینولدز  $Re$ ، قطر ذرات نانو  $d_p$  و کسر حجمی نانوسیال  $\phi$  بر روی تغییرات عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  بررسی شده است و با انجام

نتایج بررسی حساسیت عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  نسبت به متغیرهای ورودی مسئله در شکل (۴) نمایش داده شده است.

شکل (۴-الف): نشان‌دهنده حساسیت عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  نسبت به تغییر متغیرهای ورودی، در رینولدز  $Re = 500$  و قطر ذرات نانو  $d_p = 30nm$  است. مشاهده می‌شود که در همسایگی تمام کسرهای حجمی نانوسیال  $\phi$ ، عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  با افزایش عدد رینولدز  $Re$ ، افزایش کسر حجمی نانوسیال  $\phi$  و یا کاهش قطر ذرات نانو  $d_p$  افزایش یافته است. در کسرهای حجمی بالاتر، عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  با افزایش عدد رینولدز یا کاهش قطر ذرات نانو  $d_p$  افزایش بیشتری یافته است. همچنین با افزایش کسر حجمی نانوسیال  $\phi$  در همسایگی تمام مقادیر کسر حجمی، عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  به یک میزان افزایش یافته است.



$\mu$	لزجت دینامیک، $\frac{kg}{m.s}$
$\rho$	چگالی، $\frac{kg}{m^3}$
$\varphi$	کسر حجمی
$\delta$	میانگین فاصله بین ذرات نانو، $m$
<b>زیرنویس</b>	
$f$	سیال
$p$	ذره جامد
$nf$	نانوسیال

تعداد معدودی آزمایش، میزان تغییرات عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  در کل حوزه تغییرات مقادیر متغیرهای مستقل ورودی به مسئله تخمین زده شده است. در ادامه حساسیت عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  نسبت به تغییر هر کدام از متغیرهای مستقل ورودی به مسئله محاسبه شده و بدین ترتیب شدت تغییرات عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  نسبت به تغییر این متغیرها تخمین زده شده است. در پایان مؤثرترین و کم اثرترین متغیر مستقل ورودی به مسئله در افزایش عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  را در هر محدوده دلخواه انتخاب شده است. خلاصه نتایج این مطالعه عبارت است از:

- در محدوده قطر ذرات نانو  $d_p = 30nm \& 60nm$  ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  با افزایش عدد رینولدز  $Re$ ، افزایش کسر حجمی نانوسیال  $\varphi$  و یا کاهش قطر ذرات نانو  $d_p$  افزایش یافته است.
- در محدوده قطر ذرات نانو  $d_p = 30nm \& 60nm$  و در کسرهای حجمی  $\varphi$  بالاتر، عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  با افزایش عدد رینولدز یا کاهش قطر ذرات نانو  $d_p$  افزایش بیشتری یافته است.
- در تمام محدوده قطر ذرات نانو  $d_p$ ، عدد رینولدز  $Re$  و کسر حجمی نانوسیال  $\varphi$ ، با افزایش کسر حجمی نانوسیال عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  به یک میزان افزایش یافته است.
- در محدوده قطر ذرات نانو  $d_p = 90nm$ ، در همسایگی کسرهای حجمی  $\varphi = 0.01$  و  $\varphi = 0.03$ ، عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  با افزایش قطر ذرات نانو  $d_p$  افزایش و در همسایگی کسر حجمی  $\varphi = 0.05$  کاهش یافته است.
- با افزایش قطر ذرات نانو  $d_p$ ، افزایش عدد رینولدز  $Re$  یا افزایش کسر حجمی نانوسیال  $\varphi$  باعث افزایش کمتر عدد ناسلت متوسط  $\overline{Nu}$  شده است.

#### مراجع

- [1] A.K. Santra, S. Sen, N. Chakraborty, Study of heat transfer due to laminar flow of copper-water nanofluid through two isothermally heated parallel plates, International Journal of Thermal Sciences, 48 (2009) 391-400.
- [2] A. Raisi, B. Ghasemi, S.M. Aminossadati, A Numerical Study on the Forced Convection of Laminar Nanofluid in a Microchannel with Both Slip and No-Slip Conditions, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 59 (2011) 114-129.
- [3] M. Kalteh, A. Abbassi, M. Saffar-Avval, J. Harting, Eulerian-Eulerian two-phase numerical simulation of nanofluid laminar forced convection in a microchannel, International Journal of Heat and Fluid Flow, 32 (2011) 107-116.
- [4] S. Rashidi, M. Bovand, J. Abolfazli Esfahani, Structural optimization of nanofluid flow around an equilateral triangular obstacle, Energy, 88 (2015) 385-398.
- [5] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, 43 (2000) 3701-3707.
- [6] H. Patel, T. Sundararajan, T. Pradeep, A. Dasgupta, N. Dasgupta, S. Das, A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluids, Pramana - J Phys, 65 (2005) 863-869.
- [7] N. Masoumi, N. Sohrabi, A. Behzadmehr, A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids, Journal of Physics D: Applied Physics, 42 (2009) 055501.
- [8] A.I. Khuri, S. Mukhopadhyay, Response surface methodology, Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2 (2010) 128-149.
- [9] Montgomery DC. Design and analysis of experiments. New York: John Wiley;1996.
- [10] G.E.P. Box, J.S. Hunter, Multi-Factor Experimental Designs for Exploring Response Surfaces, (1957) 195-241.

#### فهرست علائم

$k_B$	ثابت بولتزمن، $1.38 * 10^{-23} \frac{J}{K}$
$C_p$	گرمای ویژه، $\frac{J}{kg.K}$
$V_B$	سرعت براونین، $\frac{m}{s}$
$Nu$	عدد ناسلت
$P$	فشار، $Pa$
$Pe$	عدد پکلت
$Re$	عدد رینولدز
$T$	دما، $K$
$U, V$	سرعت بدون بعد
$k$	ضریب هدایت حرارتی، $\frac{W}{m.K}$
$X, Y, Z$	مکان بدون بعد
$d$	قطر، $m$

#### علائم یونانی