

## شبیه‌سازی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال غیرنیوتنی محلول آبی کربوکسی متیل سلولز-اکسید آلومینیوم در یک میکرولوله در رژیم لغزشی\*

سید علی سجادی فر<sup>(۱)</sup>      آرش کریمی‌پور<sup>(۲)</sup>      داوود طغرای<sup>(۳)</sup>

**چکیده** در تحقیق حاضر جریان و انتقال حرارت نانوسیال غیرنیوتنی محلول آبی کربوکسی متیل سلولز-اکسید آلومینیوم با کسر حجمی‌های مختلف نانوذرات در یک میکرولوله دوبعدی شبیه‌سازی می‌شود. شرایط مرزی سرعت لغزشی و پرش دمایی روی دیواره میکرولوله نیز در نظر گرفته می‌شود. اعتبار داده‌های حاصل در مقایسه با داده‌های محققان پیشین مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل به صورت خطوط هم‌دما، عدد ناسلت، پروفیل‌های دما و سرعت در مقاطع مختلف میکرولوله ارائه می‌گردد. مشاهده می‌شود که عدد ناسلت با افزایش ضریب لغزش و درصد حجمی نانوذرات جامد افزایش می‌یابد و نرخ این افزایش در مقادیر بالای عدد رینولدز بیشتر است.

**واژه‌های کلیدی** نانوسیال غیرنیوتنی؛ میکرولوله؛ سرعت لغزشی؛ پرش دمایی.

### Simulation of the Forced Convection Heat Transfer Non-Newtonian Nanofluid, Aqueous Solution of Carboxymethyl Cellulose-Aluminum Oxide, in Slip Flow Regime Through a Microtube

S.A. Sajadifar

A. Karimipour

D. Toghraie

**Abstract** At present study the flow and heat transfer of Non-Newtonian nanofluid, aqueous solution of carboxymethyl cellulose-Aluminum oxide with different volume fractions of nano particles in a two dimensional microtube is simulated for the first time. Slip velocity and temperature jump boundary conditions are also considered along the microtube walls. The achieved results accuracy is investigated by comparison with those of previous data. The results are presented as isothermal contours, Nusselt number and the profiles of temperature and velocity at different cross sections of the microtube. It is observed that Nusselt number increases with slip velocity coefficient and volume fraction of nano particles; while its rate is more sensitive at higher values of Reynolds number.

**Key Words** Non-Newtonian nanofluid; Micro tube; Slip velocity; Temperature jump.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۴/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۷/۲۰ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v28i1.48222

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

arashkarimipour@gmail.com

(۳) استادیار مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، ایران.

## مقدمه

می دهد و مسئله ته نشینی را کاهش می دهد و هزینه های لازم برای نگهداری و انتقال سیالات را کم می کند. همچنین به صورت نظری مشخص است هرچه ذرات ریزتر باشند، سطح نسبی انتقال حرارت آنها بیشتر می شود و در نتیجه بازدهی حرارتی ذرات معلق که تابعی از سطوح انتقال حرارت می باشد با کاهش اندازه ذرات افزایش می یابد. در سیالات غیرنیوتنی برخلاف سیالات نیوتنی رابطه تنش برشی با نرخ برش خطی نیست و مدل های مختلفی برای بیان رفتار آنها وجود دارند که یکی از متداول ترین آنها، مدل پاورلا می باشد.

## مروری بر پژوهش های پیشین

تحقیقات متعددی رفتار جریان و انتقال حرارت را در کانال ها و میکروکانال ها در سطح مقطع های مختلف بررسی کرده اند. بخش عمده ای از این تحقیقات به بررسی تأثیر پارامترهایی چون عدد رینولدز، شکل سطح مقطع کانال و مشخصات هندسی پرداخته اند [1-5]. میکرو جریان ها برحسب میزان عددی نادسن

$$(Kn = \frac{\lambda}{D_H}) \text{ طبقه بندی می شوند. } D_H \text{ قطر هیدرولیکی}$$

(طول مشخصه) و  $\lambda$  فاصله پوش آزاد متوسط ملکولی است [6]. بررسی آزمایشگاهی خواص حرکتی و حرارتی جریان، منجر به ارائه حدود مشخصی برای رژیم های مختلف جریان برحسب عدد نادسن شده است [7]. به ازای  $Kn < 0.001$  سیال پیوسته است و معادلات ناویر-استوکس صادق می باشد. اما برای  $Kn > 10$ ،  $0.1 < Kn < 10$  و یا  $0.001 < Kn < 0.1$  حرکت سیال به ترتیب به عنوان یک جریان آزاد مولکولی، گذرا و لغزشی در نظر گرفته می شود. معمولاً از جریان و انتقال حرارت سیال در رژیم های لغزشی به عنوان یک میکرو جریان لغزشی نیز یاد می گردد [8-9]. کشاورز و همکارانش [10] انتقال حرارت جابه جایی اجباری در نانوسیال غیرنیوتنی تک فاز را

انتقال حرارت نقش بسیار مهمی در کاربری های متعدد و گوناگون ایفا می کند و با پیشرفت صنعت یکی از نیازهای اساسی در صنایع و کارهای تحقیقاتی، استفاده از روش های جدید انتقال حرارت با بازده حرارتی بالا می باشد. به عنوان مثال در فرآیندهای صنعتی مانند سرمایش و گرمایش منابع حرارتی و فرآیندهای تولیدی اعم از پاستوریزاسیون مواد غذایی و صنایع خودروسازی، داروسازی و حمل و نقل و سیستم های میکروالکترومکانیک و نانوالکترومکانیک نقش بسزایی دارند. در سال های اخیر این جریان در ابعاد کوچک بسیار مورد توجه قرار گرفته است و تلاش های زیادی برای کوچک کردن ابعاد دستگاه ها و افزایش راندمان آنها انجام شده است.

از آنجایی که در اکثر این کاربردها انتقال حرارت درون برخی تجهیزات تبادل حرارت مانند مبدل ها، چگالنده ها و مخازن گرمایی صورت می گیرد، با افزایش بازده حرارتی، فضای اشغال شده توسط این وسایل نیز کاهش می یابد. این موضوع در کاربردهایی است که به فضای کوچک تر و تراکم بیشتر نیاز دارند، مهم است. تغییر خواص ترموفیزیکی سیال عامل، تغییر شرایط مرزی و نوع هندسه جریان روش های مختلف برای بازدهی حرارتی می باشد. با پیشرفت صنعت و با کوچک تر شدن دستگاه های الکترونیکی، تحقیقات در زمینه جریان سیال و انتقال حرارت در مقیاس میکرو توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است که در بسیاری از کاربردهای مهندسی و پزشکی مورد استفاده قرار می گیرد. بدون شک پیشرفت های اخیر را در تولیدات ذرات نانو می توان یک تحول در روش های افزایش انتقال حرارت دانست زیرا اندازه کوچک ذرات و کسر حجمی پایین مورد استفاده مسائلی نظیر کلوخه شدن و افت فشار را حل می کند. علاوه بر این سطح نسبی بزرگ ذرات نانو، پایداری ذرات را افزایش

برای یک کسر حجمی مشخص، با افزایش قطر ذرات نانویی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک پوسته‌ای کاهش می‌یابد. حجت و همکاران [14] به بررسی جابه‌جایی اجباری نانوسیال غیرنیوتنی در یک میکرولوله با شرایط مرزی دما ثابت پرداخته‌اند که در نتیجه، ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت نانوسیال نسبت به سیال پایه افزایش یافته است و هم‌چنین عدد ناسلت نانوسیال غیرنیوتنی تابعی از عدد رینولدز و عدد پراندتل می‌باشد. کومار و همکاران [15] به بررسی عددی نرخ انتقال حرارت جریان ترکیبی یک نانوسیال تک‌فازی آب-اکسید آلومینیوم داخل یک لوله پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ذرات نانویی به یک سیال پایه نرخ انتقال حرارت و عدد ناسلت میانگین افزایش یافته است. اکبرنیا و همکاران [16] به بررسی جابه‌جایی اجباری نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک میکروکانال مستطیلی دوبعدی همراه با لغزش و عدم لغزش پرداختند و افزایش انتقال حرارت بر اثر افزودن ذرات نانو را به سیال پایه در اعداد رینولدز پایین مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که عدد رینولدز در میکروکانال تحت تأثیر سرعت ورودی و ویسکوزیته سینتیکی نانوسیال است و ویسکوزیته با افزایش کسر حجمی نانو ذرات افزایش می‌یابد. منگ رولکار و همکاران [17] انتقال حرارت نانو سیالات در کانال را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که با استفاده از تغییراتی در هندسه جریان، شرایط مرزی و یا افزایش رسانایی حرارتی سیال، می‌توان انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش داد. آنها به بررسی اثر عدد رینولدز، کسر حجمی و اندازه ذرات در میزان انتقال حرارت پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش عدد رینولدز و پراندتل می‌تواند باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و در نتیجه باعث افزایش نرخ انتقال حرارت شود. هم‌چنین نشان دادند که با استفاده

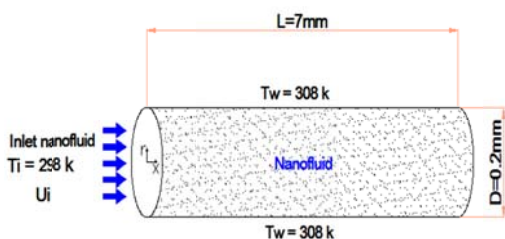
یک لوله افقی تحت شار حرارتی ثابت به روش عددی را مورد بررسی قرار دادند. آنها بیان کردند که با استفاده از تغییراتی در غلظت و قطر نانو سیال می‌توان انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش داد. آنها به بررسی اثر عدد رینولدز در میزان انتقال حرارت پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش عدد رینولدز و پراندتل می‌تواند باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت شود. هم‌چنین یک معادله برای عدد ناسلت به وسیله اعداد بی بعد به دست آورده شده است. چوی و همکارانش [11] به بررسی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم و جریان آرام در یک لوله با خم ۹۰ درجه پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که با افزایش عدد رینولدز و پراندتل، عدد ناسلت میانگین افزایش پیدا می‌کند و هم‌چنین عدد ناسلت میانگین در خم لوله بیشتر از نواحی ورودی و خروجی لوله می‌باشد و عدد ناسلت میانگین تابعی از عدد پراندتل می‌باشد. تهیر و همکاران [12] به بررسی عددی جابه‌جایی اجباری در یک جریان آرام توسعه یافته نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک لوله دایروی با شار حرارتی ثابت پرداختند و اثر قطر ذرات، عدد رینولدز و کسر حجمی نانو ذرات بر روی ضریب انتقال حرارت میانگین را بررسی کردند و نشان دادند که ضریب انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی به طور خطی افزایش می‌یابد و با افزایش اندازه ذرات به طور غیر خطی کاهش می‌یابد. اکبری‌نیا و همکاران [13] مطالعه عددی روی انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی جریان آرام نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک لوله دایره‌ای شکل را انجام دادند. آنها از مدل مخلوط دوفازی استفاده کردند و تأثیر قطر ذرات نانو را روی رفتارهای حرارتی و حرکتی نانوسیال بررسی کردند. آنها نشان دادند که

میکرولوله، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. رئیسی و همکاران [22] به مطالعه عددی جابه‌جایی اجباری جریان آرام نانوسیال در یک میکروکانال با شرایط مرزی سرعت لغزشی و عدم لغزش پرداختند و قدرت خنک‌کنندگی آب خالص و نانوسیال آب-اکسید مس را مورد بررسی قرار دادند. هم‌چنین اثرات تغییرات عدد رینولدز، کسر حجمی و ضریب لغزش در انتقال حرارت به فرم جابه‌جایی اجباری را نیز مورد مطالعه قرار دادند. رحمان و همکاران [23] انتقال حرارت یک جریان دوبعدی، پایدار و لغزشی را برای دو نانوسیال مختلف در یک گوه به‌صورت عددی انجام داده‌اند. آنها نشان دادند با افزایش ضریب لغزش عملکرد حرارتی افزایش خواهد یافت. احمد و همکاران [24] به بررسی عددی انتقال حرارت و افت فشار نانو سیال آب-مس در یک کانال هم‌دما پرداختند و با استفاده از شبیه‌سازی عددی به روش تفاضل محدود اثرات افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی بر انتقال حرارت را بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی انتقال حرارت افزایش می‌یابد درحالی‌که افت فشار اندک خواهد بود. جانگ و همکاران [25] جابه‌جایی اجباری برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را در یک میکروکانال مستطیلی مورد بررسی قرار دادند. آنها اثرات افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی ذرات جامد بر میزان انتقال حرارت را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که افزایش کسر حجمی باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود. هم‌چنین عدد ناسلت نیز با افزایش عدد رینولدز افزایش خواهد یافت. افشار و همکاران [26] به حل تحلیلی معادلات ناویر استوکس و انرژی برای جریان سیال در یک میکروکانال در رژیم جریان لغزشی پرداختند. آنها پروفیل‌های سرعت و دما را ارزیابی کردند و تأثیر پارامترهای مختلف را روی انتقال

از افزودن ذرات نانو به سیال پایه می‌توان ضریب هدایت حرارتی سیال را افزایش داد. سانترا و همکاران [18] به بررسی عددی انتقال حرارت و جریان آرام نانوسیال آب-اکسید مس در میان دو صفحه موازی هم‌دما پرداخته‌اند. این تحلیل در رینولدز و کسر حجمی‌های مختلف انجام گرفته است و نتایج نشان می‌دهد که عملکرد حرارتی با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد و نانوسیال نیز در مقایسه با آب خالص برای خنک‌سازی مفیدتر خواهد بود. برخورداری و همکاران [19] جابه‌جایی اجباری جریان لغزشی نانوسیال غیرنیوتنی در یک میکروکانال را تحت شرایط مرزی دما ثابت و شار ثابت مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند افزایش سرعت لغزشی ذرات جامد، موجب کاهش سرعت در مرکز لوله شده است درحالی‌که عدد ناسلت افزایش یافته است و هم‌چنین تأثیر سرعت لغزشی در شرط مرزی شار ثابت بیشتر از شرط مرزی دما ثابت بوده است. بهزاد مهر و همکاران [20] انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری جریان مغشوش در یک لوله دایره‌ای شکل، با نانو سیال آب-اکسید مس را به‌صورت عددی مطالعه کردند. آنها در این مطالعه، مدل مخلوط دوفازی را به‌کار بردند. با مقایسه نتیجه‌های محاسبه‌شده با مقادیر تجربی، نشان دادند که مدل مخلوط دوفازی دقیق‌تر از مدل تک‌فازی است. هم‌چنین چرخش محوری جریان و پروفیل‌های سرعت توسعه‌یافته را در عددهای رینولدز مختلف بررسی کردند. دینگ و همکاران [21] به مطالعه جریان و انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری جریان آرام در نانولوله‌های کربنی با شرط مرزی عدم لغزش پرداختند و قدرت خنک‌کنندگی آب خالص و نانوسیال آب-مس را مورد بررسی قرار دادند. هم‌چنین اثرات تغییرات عدد رینولدز، کسر حجمی را نیز مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند به‌دلیل نسبت هندسی بالای

### بيان مسئله

شكل (1) هندسه مورد نظر را در تحقيق حاضر كه يك ميكرولوله است نشان مي‌دهد. طول ميكرولوله  $L=7\text{mm}$  و قطر آن  $D=0.2\text{mm}$  است. طول ميكرولوله در مقايسه با قطر آن زياد است. نانوسيال غيرنيوتني كربوكسي متيل سلولز- اكسيد آلومينيوم با دماي  $298\text{k}$  و با سرعت ثابت ( $U_i$ ) وارد ميكرولوله مي‌شود و پس از خنكسازي ديواره‌هاي ميكرولوله از انتهاي آن خارج مي‌شود. قطر ذرات نانوسيال اكسيد آلومينيوم برابر  $25\text{nm}$  نانومتر مي‌باشد.



شكل 1 شكل شماتيك ميكرولوله

نانوذرات آلومينيوم داراي شكل يكنواخت و كروي هستند و جريان در ميكرولوله به صورت آرام، غيرنيوتني و تراكم‌ناپذير و با شرط مرزي سرعت لغزشي و پرش دمائي در ديواره‌ها تحت دماي ديواره ثابت فرض مي‌شود و اثرات تشعشع قابل چشم پوشي است. سيال پايه محلول آبي كربوكسي متيل سلولز با درصد وزني  $0.5\%$  مي‌باشد. خواص ترموفيزيكي نانوسيال در دماي  $298\text{k}$  درجه كلوين در جدول (1) نشان داده شده است. در اين تحقيق پارامترهاي سيالاتي و انتقال حرارت با اعداد رينولدز  $Re=1$ ،  $Re=10$  و  $Re=20$  و با كسر حجمي  $1.5\%$  و  $0.5\%$  سه عدد ضريب لغزش  $\beta^*=0.01$ ،  $\beta^*=0.1$  و  $\beta^*=0.1$  بررسي مي‌شود.

حرارت و پراكندگي ذرات نانو بررسي كردند. نتايج نشان دادند كه مي‌توان با كنترل اختلاف فشار و موقعيت ورودی ذرات نانو و هم‌چنين توزيع همگن ذرات در جريان، انتقال حرارت را با افزودن ذرات نانو افزايش داد. كلته و همكاران [27] انتقال حرارت جابه‌جايي اجباري جريان آرام نانوسيال آب-مس در يك ميكروكانال هم‌دما را به صورت عددي بررسي كردند. آنها نانو سيال را با مدل دوفازي اويلري مدل كردند. معادلات حاكم براي فازها را با استفاده از روش حجم محدود حل كردند. آنها تفاوت بين سرعت و دما بين فازهاي مايع و ذرات نانو را بررسي كردند و مشاهده كردند كه سرعت و دماي نسبي فازها، خيلي كم و قابل صرف نظر است. هم‌چنين نشان دادند كه توزيع كسر حجمي ذرات نانو، يكنواخت است و افزايش انتقال حرارت براي مدل دوفازي، در مقايسه با مدل همگن بيشتري است. نايو و همكاران [28] به بررسي انتقال حرارت يك نانوسيال غيرنيوتني در يك ميكرولوله پرداخته‌اند. آنها شرط مرزي سرعت لغزشي را روي ديواره‌هاي ميكرولوله در نظر گرفتند و نشان دادند عدد ناسلت با افزايش ضريب سرعت لغزشي افزايش مي‌يابد.

در تحقيق حاضر نيز براي نخستين بار به مطالعه جابه‌جايي اجباري جريان آرام نانوسيال غيرنيوتني كربوكسي متيل سلولز-اكسيد آلومينيوم در رژيم لغزشي پرداخته شده است. در اين مطالعه عملكرد حرارتي نانوسيال تحت تأثير نيروي برشي، غلظت ذرات نانو، ضريب لغزش بررسي شده است. نتيجه‌هاي به دست آمده مسئله مفروض، با استفاده از پروفيل‌هاي سرعت، دما و مقادير عدد نوسلت موضعي و متوسط ارائه شده‌اند. نوآوری پژوهش حاضر با كار نايو و همكاران [28]، در نظر گرفتن شرط مرزي پرش دمائي روي ديواره‌هاي ميكرولوله مي‌باشد.

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial R} = -\frac{\partial P}{\partial R} + \frac{1}{Re_{nf}} \times \left( \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\partial V}{\partial X} \right)^n + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} R \left( \frac{\partial V}{\partial R} \right)^n \right) - \frac{V^2}{R} \quad (3)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial R} = \frac{1}{Re_{nf} Pr_{nf}} \times \left( \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\partial \theta}{\partial X} \right)^n + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} R \left( \frac{\partial \theta}{\partial R} \right)^n \right) \quad (4)$$

در معادلات فوق از پارامترهای بی بعد زیر استفاده می شود.

$$P = \frac{p}{\rho_{nf} u_i^2} \quad V = \frac{v}{u_i} \quad X = \frac{x}{D} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{T - T_i}{T_w - T_i} \quad U = \frac{u}{u_i} \quad R = \frac{r}{D}$$

اعداد رینولدز و پراتل مطابق فرمول های زیر محاسبه می شوند [30].

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} u_i^{2-n} D^n}{K} \quad Pr_{nf} = \frac{C_p \left( \frac{u_i}{D} \right)^{n-1} K}{k_{nf}} \quad (6)$$

که در معادلات فوق  $n$  و  $K$  ضریب و اندیس قاعده توانی و  $k_{nf}$  ضریب هدایت حرارتی و  $u_i$  نانوسیال می باشد.

از رابطه زیر برای محاسبه چگالی نانوسیال استفاده می شود [31].

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

که چگالی سیال پایه و چگالی نانوذرات اکسید آلومینیوم می باشد.

از قانون قاعده توانی برای محاسبه لزجت نانوسیال استفاده می شود [32].

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی نانوسیال

	$\phi=0.5\%$	$\phi=1.5\%$	
Cpnf(J/kg)	4121	4012	
Knf(W/mk)	0.6262	0.66	
pnf(kg/m3)	1013.5	1040.5	

هم چنین با توجه به غیرنیوتنی بودن سیال پایه مقادیر  $n$  و  $K$ ، یعنی ضریب و اندیس قاعده توانی در دمای 298k در جدول (۲) نشان داده شده است [29].

جدول ۲ ضریب و اندیس قاعده توانی در غلظت های مورد نظر

	$\phi=0.5\%$	$\phi=1.5\%$
n	0.48	0.51
K	0.22	0.24

همان طور که مشاهده می شود اندیس قاعده توانی  $n$  برای سیال پایه مورد تحقیق کوچکتر از یک است و بنابراین این سیال غیرنیوتنی از نوع شبه پلاستیک و نازک شونده است.

### فرمول بندی

**معادلات حاکم.** معادلات بی بعد حاکم شامل معادلات پیوستگی، ممتوم و انرژی است که برای حالت دائم و آرام و سیال غیرنیوتنی به صورت زیر حل می شوند.

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial R} = 0 \quad (1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial R} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re_{nf}} \times \left( \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\partial U}{\partial X} \right)^n + \frac{\partial}{\partial R} \left( \frac{\partial U}{\partial R} \right)^n \right) \quad (2)$$

در رابطه فوق  $q''$  شار حرارتی دیواره و  $T_w$  دمای دیواره و  $T_b$  دمای بالک می‌باشد.

برای محاسبه عدد ناسلت میانگین از رابطه زیر استفاده می‌کنیم [35].

$$Nu_m = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (13)$$

### شرایط مرزی هیدرو دینامیکی و حرارتی

با توجه به هندسه میکرولوله، شرط عدم لغزش و عدم پخش دمایی ممکن است برای جریان در مقیاس میکرو مناسب نباشد. در واقع در رژیم‌های لغزش در همسایگی دیواره ناحیه‌ای وجود دارد که ملکول‌های سیال دارای نوسان هستند. این ناحیه لایه نادسن نامیده می‌شود و ضخامت آن متناسب با فاصله پویس آزاد ملکولی است. در نادسن‌های کوچک اثرات لایه نادسن قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد اما در رژیم‌های لغزشی اثرات لایه نادسن باید در نظر گرفته شود چرا که شرط مرزی لغزش بین سیال و مرز جامد می‌تواند تأثیر سطح و فعالیت ذرات ملکولی را بازتاب نماید. سرعت لغزشی و پخش دمایی در دیواره یک میکرولوله به وسیله فرمول‌های زیر محاسبه می‌شوند [36-39]. برای حل سرعت لغزشی  $u_s$ ،  $\beta$  و  $F_m$  به ترتیب ضریب سرعت لغزشی و سرعت لغزشی و ضریب انطباق حرارتی می‌باشد.

$$u_s = -\frac{2-F_m}{F_m} \beta \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)_{r=r_0} \quad (14)$$

ضریب انطباق حرارتی را برابر یک در نظر می‌گیریم و معادله را بی‌بعد می‌کنیم.

$$U_s = -\beta^* \left( \frac{\partial U}{\partial R} \right)_{R=R_0} \quad (15)$$

$$\eta_{nf} = K (\gamma')^{n-1} \quad (8)$$

که در آن  $\gamma'$  نرخ برش و  $n$  و  $K$  ضرایب قاعده توانی هستند.

ضریب پخش حرارتی مؤثر نانوسیال با فرمول زیر محاسبه می‌شود [33].

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{eff}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (9)$$

ظرفیت گرمای ویژه نانوسیال با فرمول زیر محاسبه می‌شود [16].

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

برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی مؤثر نانوسیال برای محلول‌هایی که دارای ذرات کروی شکل هستند از رابطه جون و همکاران استفاده می‌شود [34].

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + 64.7 \phi^{0.7476} \left( \frac{d_f}{d_s} \right) \left( \frac{k_s}{k_f} \right)^{0.7476} \times Pr^{0.9955} Re^{1.2321} \quad (11)$$

که در رابطه (۱۱) اثر حرکت براونی و هم‌چنین اندازه ذرات در تعیین مقدار ضریب هدایت حرارتی مورد توجه قرار می‌گیرد. این رابطه برای ذراتی با اندازه‌های ۱۱ تا ۱۵۰ نانومتر معتبر است.  $d_f$  قطر ذرات ملکولی سیال پایه و  $d_s$  قطر ذرات ملکولی نانوذرات جامد و  $k_s$  ضریب هدایت حرارتی سیال پایه و  $k_f$  ضریب هدایت حرارتی نانو ذرات می‌باشد.

برای محاسبه عدد ناسلت موضعی از رابطه زیر استفاده می‌کنیم [35].

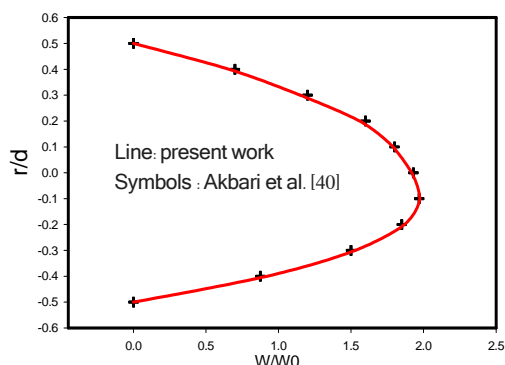
$$Nu_x = \frac{q''_w}{k_{eff} (T_w - T_b)} \quad (12)$$

جدول ۳ سرعت و دما در شبکه‌های مختلف برای

$$Re=1 \text{ و } \phi=0.5\%$$

	30×750	40×1000	50×1250
U	1.6458	1.6464	1.6468
$\theta$	0.8905	0.8906	0.8906

برای اعتبارسنجی مسئله، پروفیل‌های سرعت توسعه‌یافته نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم درون یک لوله برای مقادیر  $Gr = 5 \times 10^5$  و  $\phi = 2\%$ ، با نتایج اکبری و همکاران [40] در شکل (۲) مقایسه شده است. بیشترین اختلاف کار حاضر با مرجع [40] 8% می‌باشد.



شکل ۲ اعتبارسنجی حل با مقایسه پروفیل‌های سرعت توسعه‌یافته

هم‌چنین برای اعتبارسنجی مسئله ضریب انتقال حرارت متوسط نانوسیال غیرنیوتنی زانتان-اکسید آلومینیوم در یک لوله برای کسر حجمی 4% و عدد رینولدز  $Re=1510$  با نتایج کشاورز و همکاران [41] در شکل (۳) مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد هم‌خوانی مناسبی بین کار حاضر و کار کشاورز و همکاران وجود دارد. بیشترین اختلاف کار حاضر با مرجع [41] 7% می‌باشد.

در رابطه فوق  $\beta^*$  ضریب سرعت لغزشی بی‌بعد می‌باشد که برابر با  $\frac{\beta}{D}$  می‌باشد.

برای شرط مرزی حرارتی  $\gamma$ ،  $T_s$ ،  $T_w$  و  $F_t$  به ترتیب نسبت گرمای ویژه، پرش دمایی، دمای دیواره و ضریب انطباق حرارتی می‌باشد.

$$T_s - T_w = -\frac{2 - F_t}{F_t} \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \frac{\beta}{Pr} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R_0} \quad (16)$$

ضریب انطباق حرارتی و نسبت گرمایی ویژه را برابر یک در نظر می‌گیریم و معادله را بی‌بعد می‌کنیم.

$$\theta_s - \theta_w = -\frac{\beta^*}{Pr} \left( \frac{\partial \theta}{\partial R} \right)_{R=R_0} \quad (17)$$

برای حل معادلات حاکم و گسسته‌سازی ناحیه حل، از شبکه‌ی سازمان‌یافته استفاده شده است برای گسسته‌سازی معادلات حاکم از روش حجم محدود استفاده شده است. برای ارتباط بین میدان سرعت و فشار، الگوریتم سیمپل به کار برده شده است. طرح اختلاف بالادست مرتبه دوم برای گسسته‌سازی عبارات نفوذ و جابه‌جایی معادلات حاکم، استفاده شده است. زمانی که مقادیر باقی‌مانده همه پارامترها کمتر از  $10^{-8}$  شود، حل مسئله همگرا می‌شود و محاسبات به نتیجه می‌رسد.

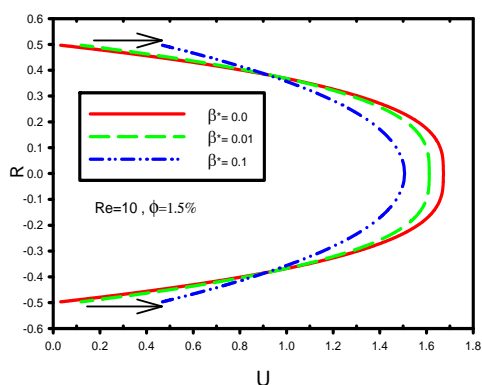
## نتایج و بحث

**استقلال نتایج از شبکه و اعتبارسنجی حل عددی.** مقادیر سرعت بی‌بعد و دمای بی‌بعد در نقطه  $(0, 0.0025)$  در جدول (۳) در شبکه‌های مختلف  $30 \times 750$ ،  $40 \times 1000$  و  $50 \times 1250$  نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اختلاف بین شبکه‌های  $40 \times 1000$  و  $50 \times 1250$  کم می‌باشد. در نتیجه شبکه  $40 \times 1000$  برای محاسبات در نظر گرفته شده است.



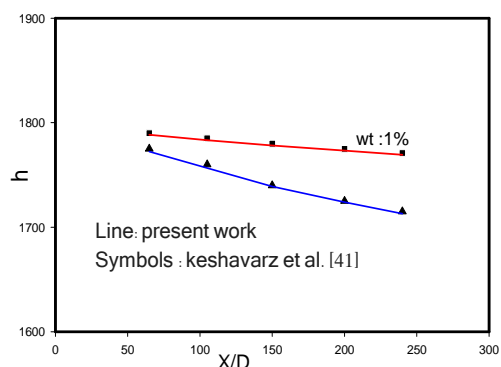
میکرولوله همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، تحت دمای  $T_w$  قرار گرفته‌اند. نانوسیال غیرنیوتنی کربوکسی متیل سلولز اکسید آلومینیوم با دمای 298k و با سرعت ثابت ( $U_i$ ) وارد میکرولوله می‌شود و پس از خنک‌سازی دیواره‌های میکرولوله از انتهای آن خارج می‌شود.

شکل (۵) تأثیرات مقادیر مختلف ضریب لغزش را بر پروفیل سرعت در امتداد خط عمودی وسط میکرولوله، نشان می‌دهد. به دلیل وجود رژیم لغزش، نانوسیال روی دیواره‌های میکرولوله دارای سرعت می‌باشد. لذا سرعت نانوسیال روی دیواره‌های میکرولوله دارای مقدار غیرصفر می‌باشد و هرچه ضریب لغزش افزایش می‌یابد، مقدار سرعت نانوسیال روی دیواره‌ها بیشتر می‌شود. مقدار ماکزیمم سرعت روی خط عمودی وسط میکرولوله نیز با افزایش ضریب لغزش به دلیل قانون بقای جرم کاهش می‌یابد. در این نمودار، جریان نانوسیال با پروفیل‌های سهمی شکل توسعه داده شده است و به دلیل وجود شرایط مرزی لغزش روی دیواره‌های میکرولوله، نانوسیال روی دیواره‌های میکرولوله دارای سرعت می‌باشد.



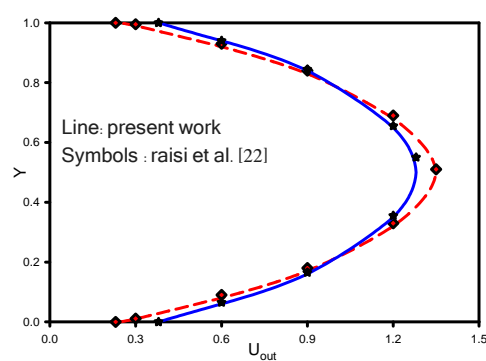
شکل ۵ تغییرات سرعت نانوسیال روی خط عمودی وسط میکرولوله ( $X=L/2$ )، برای مقادیر مختلف ضریب لغزش، در  $Re=10$ ،  $\phi=1.5\%$

شکل (۶) تأثیرات مقادیر مختلف ضریب لغزش را بر پروفیل دما ( $\theta$ ) در طول خط عمودی وسط



شکل ۳ اعتبارسنجی حل با مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط برای مقادیر مختلف درصد وزنی محلول آبی زانتان در  $Re=1510$

هم‌چنین پروفیل سرعت توسعه‌یافته نانوسیال آب-اکسید مس درون یک میکروکانال در رژیم لغزشی برای مقادیر مختلف ضریب لغزشی در  $Re=50$  و  $\phi=5\%$  با نتایج رئیسی و همکاران در شکل (۴) مقایسه شده است. خطوط کار حاضر و نشانه‌ها مربوط به مقاله رئیسی و همکاران می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد هم‌خوانی مناسبی بین کار حاضر و کار رئیسی و همکاران وجود دارد. بیشترین اختلاف کار حاضر با مرجع [22] 11% می‌باشد.

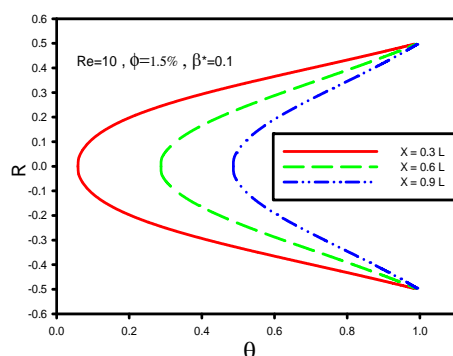


شکل ۴ اعتبارسنجی حل با مقایسه پروفیل‌های سرعت توسعه‌یافته برای مقادیر مختلف ضریب لغزش

تأثیر ضریب لغزشی. در این تحقیق انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال غیرنیوتنی در یک میکرولوله افقی مطالعه شده است. دیواره‌های

شکل (۸) تغییرات دمای نانوسیال روی مقاطع مختلف میکرولوله را برای  $Re=10, \phi=1.5\%$  و  $\beta^*=0.1$  نشان می‌دهد. با افزایش  $X$ ، مقدار دمای بی‌بعد در خط مرکزی میکرولوله افزایش می‌یابد. پروفیل دما نشان می‌دهد دمای نانوسیال ورودی به میکرولوله به دلیل تبادل گرما با دیواره‌های میکرولوله که تحت دمای  $308\text{ k}$  قرار دارد به صورت یکنواخت گرم شده‌اند و با افزایش  $X$  افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل انتقال حرارت از دیواره‌های میکرولوله به جریان نانوسیال در طول میکرولوله می‌باشد.

پروفیل دما نشان می‌دهد که دمای نانوسیال در نزدیکی دیواره‌های گرم افزایش می‌یابد.

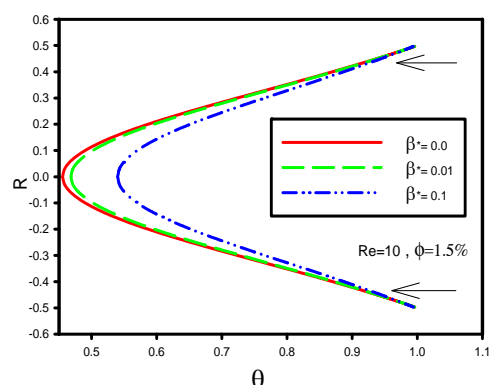


شکل ۸ تغییرات دمای نانوسیال روی مقاطع مختلف میکرولوله برای  $Re=10$  و  $\phi=1.5\%$ ،  $\beta^*=0.1$

با مقایسه شکل (۷) و شکل (۸) نیز مشخص می‌گردد که دمای بی‌بعد در یک مقطع مشخص با افزایش ضریب لغزش، افزایش می‌یابد.

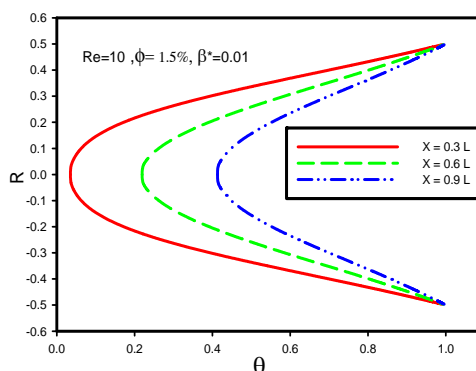
**تأثیر کسر حجمی نانوسیال.** شکل (۹) تأثیرات کسر حجمی نانوسیال را بر روی پروفیل دما در  $(X=L/2)$  در  $Re=10$  و  $\beta^*=0.1$  در درصد های حجمی مختلف نشان می‌دهد. با افزودن ذرات نانویی به سیال پایه، به دلیل بالا بودن قابلیت حرارتی این ذرات، نفوذ حرارت از دیواره بیشتر می‌شود. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود افزایش کسر حجمی نانوذرات جامد،

میکرولوله نشان می‌دهد. به دلیل وجود پرش دمایی روی دیواره‌های میکرولوله، دمای نانوسیال روی دیواره‌های میکرولوله با دمای دیواره برابر نمی‌باشد. مقدار دما روی خط عمودی وسط میکرولوله نیز با افزایش ضریب لغزش افزایش می‌یابد.



شکل ۶ تغییرات دمای نانوسیال روی خط عمودی وسط میکرولوله  $(X=L/2)$ ، برای مقادیر مختلف ضریب لغزش، در  $Re=10$ ،  $\phi=1.5\%$

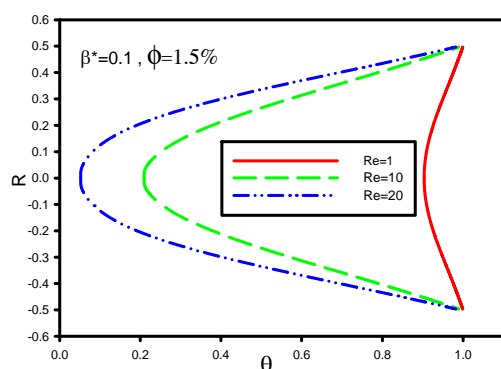
شکل (۷) تغییرات دمای نانوسیال را روی مقاطع مختلف میکرولوله در  $Re=10$ ،  $\phi=1.5\%$  و  $\beta^*=0.01$  نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش  $X$ ، مقدار دمای بی‌بعد در خط مرکزی میکرولوله افزایش می‌یابد.



شکل ۷ تغییرات دمای نانوسیال روی مقاطع مختلف برای  $\beta^*=0.01$  و  $Re=10$ ،  $\phi=1.5\%$

سرعت ذرات نانویی و کاهش تبادل انتقال حرارت، کاهش می‌یابد.

در سرعت‌های بالا زمان کافی برای تبادل انتقال حرارت بین دیواره‌های میکرولوله و نانوسیال وجود ندارد. در  $Re=1$  به دلیل سرعت پایین ذرات تبادل گرما بیشتر است. با افزایش عدد رینولدز، تغییرات قابل توجهی در پروفیل‌های دما مشاهده می‌شود. دلیل این رفتار سرعت نانوسیال و نرخ تبادل انتقال حرارت بین نانوسیال و دیواره‌های میکرولوله می‌باشد.

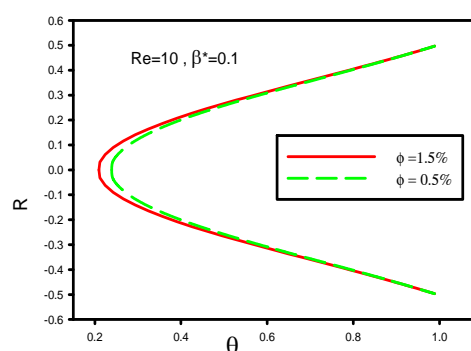


شکل ۱۱ تغییرات دمای نانوسیال روی خط عمودی میکرولوله در  $(X=L/2)$  برای مقادیر مختلف  $Re$  در  $\beta^*=0.1, \phi=1.5\%$

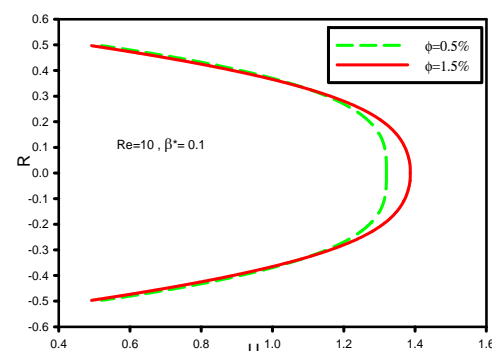
شکل (۱۲) تأثیرات مقادیر مختلف ضریب لغزش را بر روی سرعت لغزشی  $U_s$  در  $(X=L/2)$  در  $Re=10$  و  $\phi=1.5\%$  نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که سرعت لغزشی دیواره در ورودی میکرولوله مقدار ماکزیمم است و در طول کمی از دیواره ورودی میکرولوله با افزایش  $x$  کاهش می‌یابد و سپس به یک مقدار ثابت می‌رسد و کاملاً توسعه یافته هیدرودینامیکی می‌شود. ضریب لغزش تأثیر قابل توجهی بر سرعت لغزشی نانوسیال در نزدیکی دیواره‌های میکرولوله دارد. به گونه‌ای که با افزایش ضریب لغزش جریان به رژیم لغزشی نزدیکتر می‌شود و سرعت لغزشی در طول دیواره‌های میکرولوله افزایش می‌یابد. در  $\beta^*=0.0$  سرعت لغزشی صفر می‌باشد.

باعث افزایش دمای بدون بعد نانوسیال به دلیل افزایش ضریب هدایت گرمایی نانوسیال می‌شود.

شکل (۱۰) تأثیرات کسر حجمی نانوسیال را بر روی پروفیل سرعت نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که با توجه به ثابت بودن عدد رینولدز با افزایش کسر حجمی، سرعت نانوسیال افزایش می‌یابد.



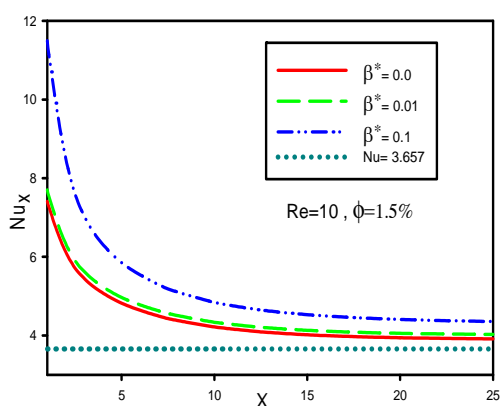
شکل ۹ تغییرات دمای نانوسیال روی خط عمودی وسط میکرولوله  $(X=L/2)$ ، برای مقادیر مختلف کسر حجمی، در  $Re=10, \beta^*=0.1$



شکل ۱۰ تغییرات سرعت نانوسیال روی خط عمودی میکرولوله برای مقادیر مختلف کسر حجمی در  $Re=10, \beta^*=0.1$

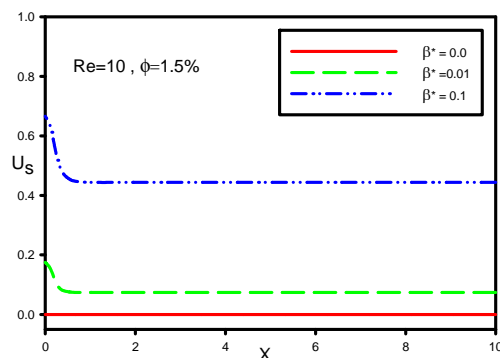
تأثیر رینولدز، کسر حجمی و ضریب لغزش. شکل (۱۱) تأثیرات عدد رینولدز را بر روی پروفیل دما در  $(X=L/2)$  در  $\beta^*=0.1$  و  $\phi=1.5\%$  نشان می‌دهد. با افزایش عدد رینولدز دمای بی‌بعد به دلیل افزایش

مقادیر مختلف  $\beta^*$  را بر عدد ناسلت موضعی در طول دیواره میکرولوله در  $Re=10$  و  $\phi=1.5\%$  نشان می‌دهد. نتیجه‌ها نشان می‌دهد افزایش ضریب لغزش موجب افزایش عدد ناسلت می‌گردد زیرا با افزایش ضریب لغزش، گرادیان دما در طول دیواره گرم‌شده میکرولوله افزایش می‌یابد. عدد ناسلت در ورودی میکرولوله به دلیل بیشترین اختلاف دما بین نانوسیال و دیواره‌های میکرولوله دارای مقدار ماکزیمم می‌باشد و در طول میکرولوله با افزایش  $X$  به دلیل افزایش دمای نانوسیال، کاهش می‌یابد. در خروجی میکرولوله که دمای نانوسیال و دمای دیواره میکرولوله بسیار به هم نزدیک می‌شوند، مقدار عدد ناسلت بسیار کم می‌شود.



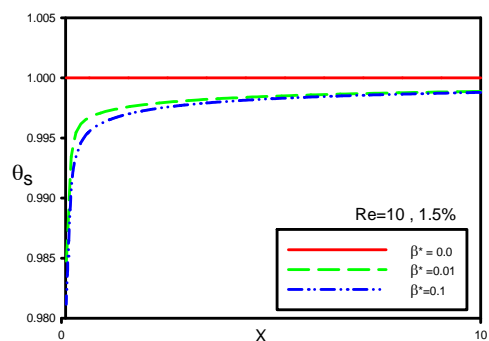
شکل ۱۴ تغییرات عدد ناسلت موضعی برای مقادیر مختلف ضریب لغزشی در  $Re=10$ ,  $\phi=1.5\%$

شکل (۱۵) تأثیرات مقادیر مختلف عدد  $Re$  را بر عدد ناسلت موضعی در طول دیواره میکرولوله در  $\phi=1.5\%$  و  $\beta^*=0.1$  نشان می‌دهد. نتیجه‌ها نشان می‌دهد افزایش عدد رینولدز موجب افزایش عدد ناسلت می‌گردد. زیرا گرادیان دما در طول دیواره گرم‌شده میکرولوله افزایش می‌یابد. در عدددهای رینولدز پایین افزایش عدد ناسلت کمتر می‌باشد. سرعت نانوسیال در نزدیکی دیواره‌های میکرولوله کم می‌باشد و زمان کافی برای تبادل انتقال حرارت بین نانوسیال و دیواره‌های میکرولوله وجود دارد و دمای



شکل ۱۲ تغییرات سرعت لغزشی نانوسیال در امتداد دیواره‌های میکرولوله در  $Re=10$ ,  $\phi=1.5\%$  در کسر حجمی‌های مختلف

شکل (۱۳) تأثیرات مقادیر مختلف ضریب لغزش را بر روی پخش دمایی در  $(X=L/2)$  در  $\phi=1.5\%$  و  $Re=10$  نشان می‌دهد. باتوجه به نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب لغزش، پخش دمایی دیواره بیشتر می‌شود ولی به‌رحال در طول میکرولوله روند کاهش‌ی دارد. در  $\beta^*=0.0$  دمای نانوسیال روی دیواره، دمای دیواره است.



شکل ۱۳ تغییرات پخش دمایی نانوسیال در امتداد دیواره‌های میکرولوله در  $Re=10$ ,  $\phi=1.5\%$  در کسر حجمی‌های مختلف

مقادیر عدد ناسلت نانوسیال روی دیواره میکرولوله برای مقادیر مختلف ضریب لغزش سرعت در شکل (۱۴) ارائه شده است. عدد ناسلت لوله در شرایط مرزی دما ثابت در جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته مقدار  $Nu=3.657$  محاسبه شده است. این شکل تأثیرات

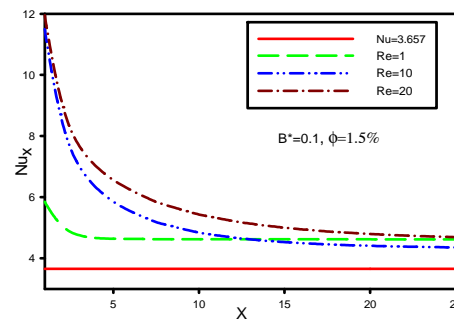
ذرات نانو، نیروی برشی، ضریب لغزش سرعت بر روی میدان جریان و نرخ انتقال حرارت بررسی گردید. سرعت لغزشی و پرش دمایی با افزایش ضریب لغزش، افزایش می‌یابد اما مقدار عدد ناسلت در خروجی میکرولوله کاهش می‌یابد. مقدار ماکزیمم عدد ناسلت در ورودی رخ می‌دهد و سپس طی یک روند کاهشی به‌طور مجانبی به سمت یک مقدار ثابت در راستای میکرولوله میل می‌کند. ضریب لغزش تأثیر قابل توجهی بر سرعت لغزشی و پرش دمایی نانوسیال در نزدیکی دیواره‌های میکرولوله دارد. به‌گونه‌ای که با افزایش ضریب لغزش، جریان به رژیم لغزشی نزدیکتر می‌شود و سرعت لغزشی و پرش دمایی در طول دیواره‌های میکرولوله افزایش می‌یابد.

### فهرست علائم

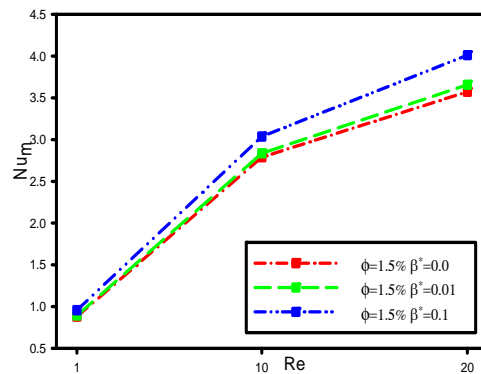
$\beta^*$	ضریب لغزش سرعت بدون بعد، $\beta^* = \beta/h$
$C_p$	گرمای ویژه، J/kgK
$d$	قطر میکرولوله، m
$K$	ضریب هدایت حرارتی، W/mk
$l$	طول میکرولوله، m
$L$	طول بدون بعد میکرولوله، m
$Nu_x$	عدد نوسلت موضعی
$P$	فشار سیال، $P_a$
$Pr$	عدد پراوتل
$q''$	شار حرارتی، $W/m^2$
$Re$	عدد رینولدز
$T$	دما، k
$u$	سرعت افقی، $s^{-1}m$
$U$	سرعت افقی بدون بعد، $U=U/u_i$
$u_s$	سرعت لغزشی، $s^{-1}m$

نانوسیال افزایش می‌یابد و به دمای دیواره‌های میکرولوله می‌رسد و اختلاف دمای نانوسیال و دیواره‌های میکرولوله کاهش می‌یابد. ماکزیمم عدد ناسلت روی دیواره‌های میکرولوله در  $Re=20$  و  $\beta^*=0.1$  به دست می‌آید.

مقادیر عدد ناسلت میانگین نانوسیال روی دیوار میکرولوله برای مقادیر مختلف ضریب لغزش سرعت در شکل (۱۶) ارائه شده است. مشاهده می‌شود با افزایش ضریب لغزش عدد ناسلت افزایش می‌یابد.



شکل ۱۵ تغییرات عدد ناسلت موضعی برای مقادیر مختلف عدد رینولدز در  $\phi=1.5\%$ ,  $\beta^*=0.1$



شکل ۱۶ تغییرات عدد ناسلت میانگین برای مقادیر مختلف  $\beta^*$

### نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال غیرنیوتنی محلول آبی CMC-اکسید آلومینیوم در یک رژیم لغزشی بررسی گردید. تأثیرات غلظت

علائم یونانی		
		$v$ سرعت عمودی، $s^{-1}m$
$\beta$ ضریب لغزش سرعت، $s^{-1}m$		$V=v/u_c$ سرعت عمودی بدون بعد، $V=v/u_c$
$\phi$ کسر حجمی نانوذرات جامد		$x$ مختصه افقی، $m$
$\eta$ لزجت دینامیکی، $Pa.S$		$X$ مختصه افقی بدون بعد، $X=x/d$
$\theta = (T - T_0)/(T_w - T_0)$ دمای بدون بعد، $\theta$		$r$ مختصه عمودی، $m$
$\rho$ دانسیته، $kgm^{-3}$		$R$ مختصه عمودی بدون بعد، $R=r/d$

### مراجع

- Li, J. and Kleinstreuer, C., "Thermal performance of nanofluid flow in microchannels", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, pp. 1221-1232, (2008).
- Pawan Singh, K., Harikrishna, P.V., Sundararajan, T. and Sarit Das, K., "Experimental and numerical investigation into the hydrodynamics of nanofluids in microchannels", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 42, pp. 174-186, (2012).
- Jung, Ju., Oh, H. and Kwak, H., "Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 466-472, (2009).
- Aminossadati, S.M., Raisi, A. and Ghasemi, B., "Effect of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 46, pp. 1373-1382, (2011).
- Shariat, M., HosseinNezhad, A.A., Behzadmehr, A. and Laur, R., "Numerical study of two phase laminar mixed convection nanofluid in elliptic ducts", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 2348-2359, (2011)
- Gad-el Hak, M., "Flow physics in MEMS", *Rev. Mec. Ind.*, 2, 313-341, (2001).
- Adams, T.M., Abdel-Khalik, S.I., Jeter, S.I. and Qureshi, Z.H., "An experimental investigation of single-phase forced convection in microchannel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 851-857, (1998).
- Xuan, Y., Li, Q. and Ye, M., "Investigation of convection heat transfer in ferrofluidmicroflows using lattice-Boltzmann approach", *International Journal of Heat and Mass Transfer Thermal Sciences*, Vol. 46, pp. 105-111, (2007).
- Ho, C. and Tia, Y., "Micro-electro-mechanical-system(MEMS) And fluid flows", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 30, pp. 579-612, (1998).
- Keshavarz, M., Hossein Haddad, S.M. and Darabi, M., "Modeling of Force Convection Heat Transfer of a Non-Newtonian Nanofluid in the Horizontal Tube Under Constant Heat Flux With Computational Fluid Dynamics", *Internatinal Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 995-999, (2012).
- Choi, Z. and Zhang, Y., "Numerical simulation of laminar forced convection heat transfer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid in a pipe with return bend", Vol. 55, pp. 90-102, (2012).

12. Tahir, S. and Mital, M., "Numerical investigation of laminar nanofluid developing flow and heat transfer in a circular channel", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 39, pp. 8-14, (2012).
13. 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. 30, pp. 706-718, (2009).
14. Hojati, M., Etemad, S.GH., Bagheri, R. and Thibault, J., "Convection Heat Transfer of Non-Newtonian Nanofluid Through a Uniformly Circular Tube", *Experrimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, pp. 1351-1356, (2011).
15. Kumar P. and Ganesan, R., "A CFD Study of Turbulent Convection Heat Transfer Enhancement in Circular Pipeflow", *Internatinal Journal of Civil and Envirronmental Engineering*, Vol. 7, pp. 385-392, (2012).
16. Akbarinia, A., Abdolzadeh, M. and Laur, R., "Critical investigation of heat transfer enhancement using nanofluids in microchannels with slip and non-slip flow regimes", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 556-565, (2011).
17. ChidanandMangrulkar, K. and VilayatraiKriplani, M., "Nanofluid Heat Transfer-A Review", *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 3, pp. 136-142, (2013).
18. Santra, A., Sen, S. and Chakraborty, N., "Study of Heat Transfer Due to Lminar Flow of Copper-Water Nanofluid Through Two Isothermally Heated Parallel Plates", *Internatinal Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 391-400, (2009).
19. Barkhordari, M. and Etemad, S.GH., "Numerical Study of Slip Flow Heat Transfer of Non-Newtonian Fluids in Circular Microchanel", *Internatinal Journal of Heat nad Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 1027-1033, (2007).
20. Behzadmehr, A., Saffar-Avval, M. and Galanis, N., "Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 211-219, (2007).
21. Ding, Y., Alias, H., Wen, D. and Williams, R., "Heat Transfer of Aqueous Suspension of Carbon Nanotube", *Internatinal Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 240-250, (2006).
22. Raisi, A., Ghasemi, B., S Aminossadati, M., "A Numerical Study on the Forced Convection of Laminar Nanofluid in a Microchannel with Both Slip and No-Slip Conditions", *International Journal of Computation and Methodology*, Vol. 59, pp. 114-129, (2012).
23. Rahman, M.M., Al-Lawatia, M.A., Eltayeb, I.A. and Al-Salti, N., "Hydromagnetic slip flow of water based nanofluids past a wedge with convective surface in the presence of heat generation or absorption", *Internatinal Journal of Nonlinear Mechanics*, Vol. 46, pp. 1373-1382, (2011).
24. Ahmed, M.A., Shuaib, N.H., Yusoff, M.Z. and Al-Falahi, A.H., "Numerical investigations of flow and heat transfer enhancement in a corrugated channel using nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 1368-1375, (2011).
25. Jung, J., Oh, H. and Kwak, H., "Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 466-472, (2009).
26. Afshar, H., Shams, M., Nainian, S.M.M. and Ahmadi, G., "Microchannel heat transfer and dispersion of nanoparticles in slip flow regime with constant heat flux", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 1060-1066, (2009).

27. Kalteh, M. and Abbassi Saffar-Avval, A.,M.,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).
28. Niu, J., Fu, C. and Tan, W., "slip flow and heat transfer pf a Non-Newtonian nanofluid in a microtube", *Plos one*, Vol. 7, 99-106, (2012).
29. Hojati, M., Etemad, S.GH., Bagheri, R. and Thibault, J., "Rheological Characteristics of Non-Newtonian nanofluids: Experimental investigation", *Internatinal Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 144-148, (2011).
30. Shayam, R. and Chhabra, R.P., "Effect of Prandtl number on heat transfer from tandem square cylinders immersed in power-law fluids in the low Reynolds number regime", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, pp. 742-755, (2013).
31. J Han, C., Zhang, Y.M., "High performance heat transfer ducts with parallel broken and V-shaped broken ribs", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 513-523, (1992).
32. Kamali, R. and Binesh, A.R., "Numerical Investigation of Heat Transfer Enhancement Using Carbon Nanotube Non-Newtonian Nanofluids", *Internatinal Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1153-1157, (2010).
33. Brinkman, H.C., "The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solution", *J. Chem. Phys.*, Vol. 20, pp. 571-581, (1952).
34. Chon, C.H., Kihm, K.D., Lee, S.P. and Choi, S.U.S., "Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) thermal conductivity enhancement", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, pp. 1-3, (2005).
35. Mirmasomi, S. and Behzadmehr, A., "Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 717-727, (2007).
36. Hadjiconstantinou, N.G. and Simek, O., "Constant-wall-temperature nusselt number in micro nano-channels", *Transactions of ASME*, Vol. 124, pp. 356-364, (2002).
37. Beskok, A. and Karniadakis, G.E., "Simulation of heat and momentum transfer in complex microgeometries", *J. Thermophys Heat Transfer*, Vol. 8, pp. 647-655, (1994).
38. Satapathy, A.K., "Slip flow heat transfer in an infinite microtube with axial conduction", Vol. 49, pp. 153-160, (2010).
39. Vandadi, V., Vandadi, A. and Aghanajafi., C., "Slip-Flow heat transfer circular microchannel with Viscous dissipation", *IJRRAS*, Vol. 6, pp. 176-181, (2011).
40. Akbari, M., Behzadmehr, A. and Shahraki, F., "Fully developed mixed convection in horizontal and inclined tubes with uniform heat flux using nanofluid", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, pp. 545-556, (2008).
41. Keshavarz, M., Hossein Haddad, S.M. and Darabi, M., "Modeling of Force Convection Heat Transfer of a Non-Newtonian Nanofluid in the Horizontal Tube Under Constant Heat Flux With Computational Fluid Dynamics", *Internatinal Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 995-999, (2012).