

بررسی CFD انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات در یک کانال حاوی ذرات کروی

شکل

رضا گورکی^۱، حسین بیکی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۰۱	در این پژوهش انتقال حرارت نانوسیالات از سطح کروی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته است. در شبیه‌سازی‌ها از مدل‌های مختلف جریان جهت دستیابی به نتایج بهینه استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از روابط نیمه تجربی معتبر مورد مقایسه قرار گرفت و در نهایت مدل $k-\epsilon$ جهت شبیه‌سازی برگزیده شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیالات موجب بهبود انتقال حرارت در کانال پر شده می‌شود. با ۵ برابر شدن غلظت نانوذرات انتقال حرارت ۲.۶ برابر بهبود می‌یابد. در جریان‌های با رینولدز کم ($Re=1112$) استفاده از نانوسیالات حاوی نانوذرات نقره حداکثر ۲/۸ برابر موجب بهبود انتقال حرارت نسبت به نانوسیالات حاوی نانوذرات اکسید آلومینیوم می‌شود. با افزایش رینولدز از میزان تأثیر نانوسیالات بر میزان انتقال حرارت کاسته می‌شود به طوری که در $Re=11190$ اثر هر سه نوع نانوذرات نقره، اکسید آلومینیوم و مس بر درصد بهبودی یکسان است.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۱۹	
واژگان کلیدی: انتقال حرارت، سطح کروی، دینامیک سیالات محاسباتی، نانوسیالات.	

۱- مقدمه

پدیده‌های انتقال از مهمترین مباحث مربوط به مهندسی می‌باشند. با توجه به پیچیدگی روابط و معادلات حاکم بر این پدیده‌ها، بررسی دقیق آنها زمان بر و معمولاً غیرممکن می‌باشد. این پیچیدگی به شرایط محیطی، هندسه سطح، رژیم جریان، مکانیسم انتقال و ... وابسته است. افزایش نرخ انتقال حرارت در فرآیندهای صنعتی و زندگی روزمره یکی از دغدغه‌های بشر بوده است. یکی از شیوه‌های نوین افزایش انتقال حرارت افزودن نانوذرات فلزی و یا اکسید آنها به سیالات عامل می‌باشد. در نتیجه سوسپانسیون بوجود آمده به دلیل ضریب هدایت حرارتی بالای این ذرات دارای میزان هدایت حرارت بالاتری به نسبت سیالات مرسوم می‌باشند [۱-۲]. عنوان نانوسیالات اولین بار توسط چوی بکار برده شد [۳]. این سوسپانسیون‌ها جهت بهبود عملکرد انتقال حرارت ساخته می‌شوند [۴]. نانوذرات در نانوسیالات به صورت زیگزاگ و تصادفی در حرکت بوده، و با توجه به ضریب هدایتی بالا، ضریب هدایت حرارتی سیالات را به طور

قابل توجهی بالا می‌برند [۵]. نانوذرات اغلب از جنس فلزات مس، نقره، تیتانوم، آلومینیوم و اکسیدهای آنها می‌باشند، که در سیالات پایه مانند آب و یا روغن‌های موتور پخش می‌شوند [۲ و ۶]. از ویژگی‌های عمده نانوسیالات می‌توان به داشتن هدایت‌های گرمایی بسیار بالاتر از آنچه که سیالات مرسوم از خود نشان می‌دهند، وجود نسبت غیر-خطی میان هدایت گرمایی و غلظت نانوذرات، وابستگی شدید هدایت گرمایی به دما و افزایش چشم‌گیر در شار حرارتی بحرانی اشاره نمود [۷]. با توجه به اندازه نانومتری ذرات معلق در سیال، نانوسیالات دارای جنبه‌های ویژه‌ای می‌باشند. که آنها را از سیالات دو فازی که ذرات در آن در اندازه‌های میکرو یا میلی‌متری هستند، جدا می‌کند [۸]. مطالعات زیادی در زمینه خواص نانوسیالات انجام شده است، و روابطی برای محاسبه ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات برحسب کسر حجمی نانوذرات ارائه گردیده است [۱]، [۹-۱۲]. نتایج تحقیقاتی متعددی نشان داده‌اند که در غلظت‌های پایین نانوذرات (یک تا پنج درصد

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hbeiki@qiet.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان
۲. استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان

شبیه‌سازی بسترهای ثابت با ذرات کروی را در حالت سه بعدی و به روش اجزای محدود انجام دادند و به این نتیجه رسیدند، که با افزایش ضریب درگ در رینولدزهای بالا و همچنین کاهش فضای بین کرات یا به عبارتی تخلخل کمتر مقدار انتقال حرارت در بستر افزایش می‌یابد [۲۳]. دینگ و ون شبیه‌سازی انتقال حرارت در بسترهای پر شده را به صورت سه بعدی و در حالت‌های پایدار و ناپایدار شبیه‌سازی نموده، و با روابط تجربی مورد اعتبار سنجی قرار دادند [۲۴]. لاگورو همکاران انتقال حرارت جابجایی آزاد و گذرا در بستر پر شده را با دو روش CFD و تحلیلی بررسی نمودند. آنها سهم انتقال حرارت هدایتی در مولکول‌های سیال عبوری و حتی تشعشع در سطح را در مدل‌سازی خود لحاظ کردند. سپس نتایج حاصل از این دو مدل را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه نمودند [۲۵]. ردی و جوشی در یک شبیه‌سازی CFD افت فشار و ضریب درگ را مورد مطالعه قرار دادند. آنان تاثیر مقادیر مختلف پارامتر N (قطر کانال به قطر ذره) را مورد بررسی قرار دادند. در حقیقت آنها بسترهایی با قطرهای مختلف کانال و کره را مورد بررسی قرار دادند، و با توجه به نتایج گزارش دادند که در $N \leq 15$ به دلیل تنگ بودن کانال اثرات دیواره قابل ملاحظه بوده و در نتیجه مقداری انحراف از نتایج حاصل از رابطه ارگون [۲۶] برای ضریب درگ و افت فشار مشاهده می‌شود. این درحالی است که در مقادیر بالاتر N و با افزایش این پارامتر بر دقت نتایج افزوده می‌شود [۲۷]. رائو و همکاران ضرایب انتقال حرارت جابجایی اجباری و اصطکاک را در یک بستر عمودی در مقیاس آزمایشگاهی به صورت تجربی و در آزمایشگاه برای نانوسیالات مورد بررسی قرار دادند. آنها بستر را با گلوله‌های شیشه‌ای جهت شبیه‌سازی ذرات کروی پر نمودند. و در پایان شاهد افزایش ۱۲ تا ۱۵ درصدی انتقال حرارت با افزایش غلظت از ۰/۲ به ۰/۵ درصد برای نانوسیال اکسید آلومینیوم به نسبت آب بودند [۲۸].

با وجود پژوهش‌های انجام شده در زمینه انتقال حرارت نانوسیالات، فقدان اطلاعات کافی آزمایشگاهی و عددی در زمینه انتقال حرارت نانوسیالات در بسترهای پر شده احساس می‌شود، از اینرو در این پژوهش انتقال حرارت از سطوح کروی به نانوسیالات با استفاده از دینامیک سیالات

(حجمی)، هدایت گرمایی می‌تواند تا ۲۰٪ افزایش پیدا کند [۱۳].

در این پژوهش انتقال حرارت درون یک کانال پر شده از ذرات کروی توسط نانوسیالات مورد بررسی قرار گرفته است. انتقال حرارت از سطح ذرات کروی شکل پدیده‌ای است، که در صنعت و زندگی روزمره بسیار پرکاربرد می‌باشد. از جمله این موارد می‌توان به انتقال حرارت در راکتورهای پر شده با کاتالیست‌های کروی [۱۴]، راکتورهای هسته‌ای [۱۵]، یخچال‌های مغناطیسی [۱۶]، انباره‌های ذخیره‌ی حرارت^۱ [۱۷] و یا عملیات سردسازی^۲ سریع فلزات در صنعت [۱۸] نام برد. با این وجود مطالعات تجربی و عددی انتقال حرارت از سطوح کروی در نانوسیالات کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اهمیت انتقال حرارت از سطوح کروی، در این پژوهش انتقال حرارت جابجایی از سطح کره بوسیله نانوسیالات به کمک دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته است.

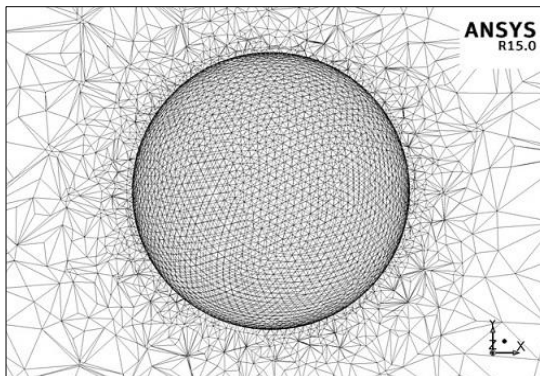
اولین شبیه‌سازی جریان حول کره توسط دینامیک سیالات محاسباتی^۳ بوسیله دالمن و همکاران انجام گرفت [۱۹]. این شبیه‌سازی شامل یک هندسه دو بعدی از دو کره بود، که به روش اجزاء محدود حل شد. با بررسی گردابه بین کره‌ها نشان دادند، که یک ناحیه با کمینه انتقال حرارت بین دو کره وجود دارد. لوید و بوهم یک آرایه خطی شامل هشت کره را در حالت دو بعدی مورد بررسی قرار دادند و تاثیر فاصله بین کره‌ها بر ضریب درگ و انتقال حرارت را بررسی نمودند. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که با افزایش فاصله بین کرات از میزان انتقال حرارت از سطح کرات کاسته می‌شود [۲۰]. درکس و دیکسون یک شبیه‌سازی سه بعدی شامل سه کره را جهت محاسبه ضریب انتقال حرارت از سطح انجام دادند. و این اولین شبیه‌سازی سه بعدی انتقال حرارت از سطوح کروی به حساب می‌آید [۲۱]. لوگتنبرگ و دیکسون شبیه‌سازی انتقال حرارت برای دو آرایه چهار کره‌ای را بوسیله اجزای محدود توسط CFD و برای جریان آرام تا درهم (رینولدز بین ۹ تا ۱۴۵۰) مدل کردند هندسه مورد استفاده آنها شامل ۳۰۷۴۷ سلول از نوع چهار وجهی بود. آنها از مدل $k-\epsilon$ برای مدل‌سازی جریان مغشوش استفاده کردند [۲۲]. منصورزاده و همکاران

³ Computational fluid dynamics (CFD)

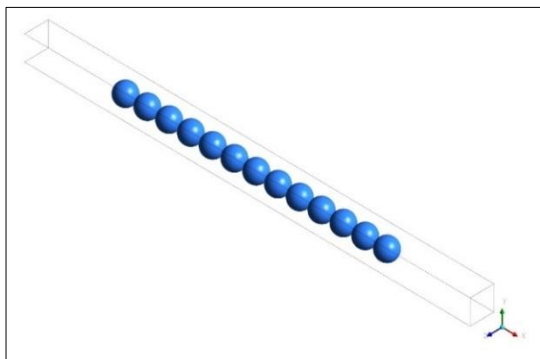
¹ Heat storage tanks

² Quenching

شکل نمایان است. جهت حل از نرم‌افزار انسیس فلونت ۱۵ استفاده شده است. شرایط حل در فلونت به این صورت است که سیال در هنگام عبور از مجرا از روی یک کره با قطر ۰/۰۱ متر عبور می‌کند. این سیال تراکم‌ناپذیر می‌باشد. جریان در خروجی دارای فشار اتمسفریک است. همچنین سرعت سیال در ورودی بسته به میزان رینولدز انتخابی متغیر است. شرایط جریان کاملا پایدار است. دمای سطح کره ثابت و مقدار آن ۴۰۰ درجه کلوین در نظر گرفته شده است. از آنجا که در دماهای پایین‌تر سطح کرات، نتایج قابل تمایز نبودند دمای ۴۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. در این مقاله فقط سهم انتقال حرارت جابجایی اجباری در انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. دمای سیال در ورودی کانال دمای اتاق یعنی ۲۹۳ درجه کلوین است. و با توجه به قطر کم کره و همچنین دمای سیال می‌توان انتظار داشت، که خواص سیال در طول کانال ثابت بماند. همچنین به علت هندسه کره انتظار می‌رود که در سرعت‌های متوسط و بالا بر خلاف سرعت‌های پایین سیال جدایش سیال از سطح کره رخ دهد.



شکل ۲: شمای کلی از کره و شبکه‌های ایجاد شده اطراف آن



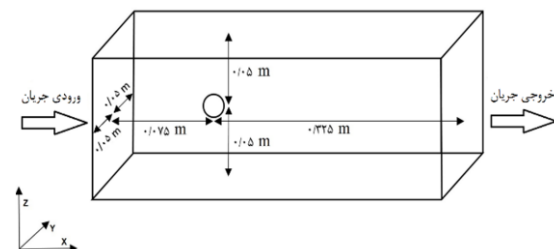
شکل ۳: آرایش و اطلاعات بستر مورد مطالعه

با توجه به شیب بسیار زیاد تغییرات فشار، و حساسیت

محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل‌سازی

از نرم‌افزار گمبیت جهت تولید هندسه و شبکه مورد مطالعه استفاده شده است. جهت مدل‌سازی از کانالی مکعب مستطیل شکل که کره‌ای به قطر یک سانتی‌متر درون آن قرار دارد استفاده شده است. جهت دستیابی به جریان خارجی ابعاد کانال بزرگ‌تر از کره انتخاب شده است تا آنجا که اثرات دیواره کانال بر انتقال حرارت به طور کامل از بین برود. محل قرارگیری کره طوری است که جریان پیش از برخورد با آن کاملا توسعه یافته است. ابعاد کانال و محل قرارگیری کره در کانال در شکل (۱) نشان داده شده است. طول، عرض و ارتفاع کانال به ترتیب (۰.۱×۰.۱×۰.۴ m) می‌باشند. جهت پوشش بهتر سطح کره از شبکه مثلثی استفاده شد و حجم کلی کانال نیز با سلول‌های چهار وجهی و به صورت بی‌سازمان شبکه‌بندی گردید. به دلیل شبیه سازی دیواره باز و اطمینان از عدم اثرات دیواره کانال از شرط مرزی تقارنی^۱ برای دیوارهای جانبی استفاده شده است. هم چنین شرایط در خروجی اتمسفریک فرض شده است. جهت عملیات استقلال حل از شبکه، شبکه‌هایی با تعداد سلول‌های متفاوت تهیه و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شد.



شکل ۱: شمای کلی هندسه مورد استفاده جهت حل CFD

در پایان از شبکه‌ای با تعداد ۷۹۳۸۲۱ سلول جهت حل استفاده گردید. این شبکه دارای پاسخ‌های قابل قبول بوده و دقت آن با شبکه‌های با بیش از یک میلیون سلول اختلاف بسیار کمی دارد. از طرفی به زمان همگرایی کمتری نیازمند است. با توجه به تغییرات بسیار شدید فشار و سرعت و هم چنین دما در نزدیکی سطح، از شبکه با سلول‌های ریزتر در مجاورت سطح کره استفاده شده است. برش‌هایی از شبکه مورد استفاده برای حل در فلونت در شکل (۲) نشان داده شده است. تراکم سلول‌ها در مجاورت سطح کره در این

^۱ symmetry

$$\bar{h} = \frac{Q}{A(T_W - T_\infty)} \quad (3)$$

که در آن، (\bar{h}) ، ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین، Q ، انتقال حرارت کلی از سطح، A ، سطح کل انتقال حرارت، T_∞ ، دمای توده سیال در ورودی و T_W ، دمای سطح کره می‌باشد. از رابطه (۴) جهت محاسبه ناسلت میانگین استفاده می‌شود.

$$Nu = \frac{\bar{h}D_p}{K} \quad (4)$$

جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی بستر از یک رابطه متداول که جهت محاسبه ناسلت در بسترهای پر شده تصادفی ارائه شده استفاده شده است رومکس و همکاران با اعمال تغییراتی در این رابطه و با تبدیل آن به رابطه (۵) از آن جهت اعتبارسنجی بستر ساختاریافته مورد استفاده در این مطالعه استفاده نمودند.

$$Nu = (2.7 \pm 0.5)Re_H^{0.5}Pr^{0.3} \quad (5)$$

$$\varepsilon = 0.4, 30 < Re < 3 \times 10^3, Pr \geq 1$$

که در آن Re_H ، رینولدز تعریف شده بر اساس قطر هیدرولیکی می‌باشد:

$$Re_H = \frac{\rho v_i d_H}{\mu} \quad (6)$$

که در آن:

$$d_H = \frac{4\varepsilon}{6(1-\varepsilon) + \left(\frac{4}{n}\right)} d_p \quad (7)$$

v_i سرعت موثر سیال در بستر پر شده است که از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$v_i = \frac{v}{\varepsilon} \quad (8)$$

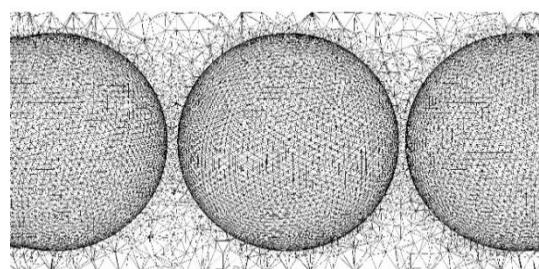
همچنین از رابطه (۹) که توسط همین محققان و منحصراً برای بستر پر شده مورد استفاده در این مطالعه ارائه شده است استفاده گردیده است.

$$Nu = (2.27 \pm 0.62) + (0.67 \pm 0.2)Re_D^{0.661 \pm 0.038}Pr^{0.33} \quad (9)$$

از آن جهت که دما در طول بستر دچار تغییر و افزایش می‌شود لذا محاسبه و تنظیم دمای مرجع در بسترها متفاوت بوده و از میانگین دمای ورودی و خروجی توده سیال از ده سانتی‌متر ابتدایی بستر استفاده شده است از

سرعت به گرادین فشار، از تابع دیواره غیرتعادلی^۱ برای حل معادلات در نزدیکی سطح کره استفاده شده است. جهت مدل سازی بسترهای پر شده منظم از یک بستر باریک با تخلخل ۰/۴۸ و پارامتر $N=1$ استفاده شده است. نحوه آرایش و اطلاعات مربوط به این بستر در شکل (۳) نشان داده شده است.

قطر کرات و شرایط مرزی در مورد بسترهای ساختاریافته (CSP) مورد مطالعه کاملاً مانند مرحله قبل است بجز دیواره‌های جانبی کانال که آدیاباتیک فرض شده است. نیجومیسلند و دیکسون نشان دادند که هندسه‌های بستر پر شده دارای نقطه تماس ذره - ذره و ذره - دیواره قادر به پیش‌بینی دقیق خصوصیات جریان و انتقال حرارت الی الخصوص در جریان توربولانسی نمی‌باشند. بنابراین کرات پس از قرار گرفتن در محل خود، به اندازه ۹۹٪ مقدار واقعی کوچک شده‌اند. این فاصله خطایی در محاسبات بوجود نخواهد آورد. فاصله در نظر گرفته شده و تراکم سلول‌ها در نزدیکی سطح در شکل (۴) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۴: شمایی از فاصله بین کره‌ها و شبکه‌های ایجاد شده اطراف سطح

جهت اعتبارسنجی شبیه‌سازی انتقال حرارت از سطح کره از رابطه رانز و مارشال (۱) که معتبرترین رابطه نیمه تجربی می‌باشد، استفاده می‌شود [۲۹]. این رابطه به صورت (۱) تعریف می‌گردد.

$$Nu = 2.0 + 0.66Re_D^{0.5}Pr^{0.33} \quad (1)$$

$$1 < Re_D < 10^5, 0.6 < Pr < 380$$

دیگر رابطه معتبر و مورد استفاده رابطه ویتاکر (۲)

$$Nu = 2.0 + (0.4Re_D^{0.5} + 0.06Re_D^{0.67})Pr^{0.4} \quad (2)$$

$$3.5 < Re < 7.6 \times 10^4, 0.7 < Pr < 380$$

می‌باشد [۳۰].

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین توسط نرم افزار از رابطه (۳) استفاده می‌شود.

¹ Non-Equilibrium wall function

[۱۰].

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np} \quad (11)$$

برای اندازه‌گیری ظرفیت حرارتی ویژه مانند دانسیته با در نظر گرفتن سوسپانسیون به صورت دو فازی از رابطه (۱۲) استفاده می‌شود [۱].

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_{bf} + \phi(\rho C_p)_{np} \quad (12)$$

از رابطه انیشتین برای محاسبه‌ی ویسکوزیته نانوسیالات استفاده می‌شود [۱۱].

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 - 2.5\phi) \quad (13)$$

خواص نانوذرات فلزی مورد استفاده در این مطالعه با قطر ۴۵ نانومتر در جدول ۱ نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

جهت شبیه‌سازی از مدل laminar و چندین مدل جریان آشفته^۱ (Standard k-ε, RNG k-ε, Realizable k-ε و Standard k-ω) استفاده شده است. جهت محاسبه خطا از پارامتر مربع تفاضلات^۲ با رابطه (۱۴)، استفاده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{نقاط مدل} - \text{نقاط واقعی})^2}{\sum_{i=1}^n (\text{میانگین نقاط واقعی} - \text{نقاط واقعی})^2} \quad (14)$$

بستر با طول بیش از ده سانتی‌متر و تعداد کرات بیشتر از ده عدد استفاده شده است تا بتوان از اثرات انتهایی چشم پوشی کرد. نکته قابل توجه دیگر استفاده از یک فایل udf جهت محاسبه تغییرات خواص سیالات در طول بسترهای مورد استفاده در این مطالعه است. اگرچه به دلیل طول کوتاه بستر خطای قابل توجهی ایجاد نمی‌شود (در بیشترین مقدار ۰/۰۰۹۸۶٪).

در ابتدا شبیه‌سازی انتقال حرارت برای آب خالص انجام شد. و سپس نانوسیالات مختلف (شامل نانو ذرات فلزی مختلف محلول در سیال پایه آب) که شامل نانوذرات مس ۰/۵ حجمی، نقره ۰/۵ حجمی و اکسید آلومینیوم با غلظت های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ حجمی انجام شده است. جهت محاسبه خواص نانوسیالات از روابط (۶) تا (۹) که از متداول‌ترین روابط می‌باشند استفاده گردیده است.

از رابطه‌ی ماکسول جهت محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات استفاده می‌شود [۹]:

$$K_{nf} = \frac{K_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{np} - K_{bf})\phi}{K_{np} + 2K_{bf} - (K_{np} - K_{bf})\phi} K_{bf} \quad (10)$$

که در آن K_{np} ، k_{bf} ، K_{bf} و ϕ به ترتیب ضرایب هدایت گرمایی سیال پایه، نانوذرات، نانوسیال و درصد حجمی سوسپانسیون می‌باشند.

رابطه (۱۱) برای محاسبه دانسیته نانوسیالات می‌باشد

جدول ۱: خواص فیزیکی سیال پایه و نانو ذرات مورد استفاده در دمای ۲۹۸ کلوین

ماده	ρ (kgm ⁻³)	C_p (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	K (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	$\mu \times 10^{-4}$ (kgm ⁻¹ s ⁻¹)
H2O	۹۹۷/۱	۴۱۷۹	۰/۶۱۳	۸/۹۱
Al2O3	۳۹۷۰	۷۵۶	۴۰	-
Cu	۸۹۳۳	۳۸۵	۴۰۱	-
Ag	۱۰۵۰۰	۲۳۵	۴۲۹	-

جدول ۲: دقت بدست آمده با مدل‌های مختلف در مقایسه با رابطه رانز و مارشال (۱)

و ویتاکر (۲) برای سیال آب در دمای ۲۹۳ کلوین

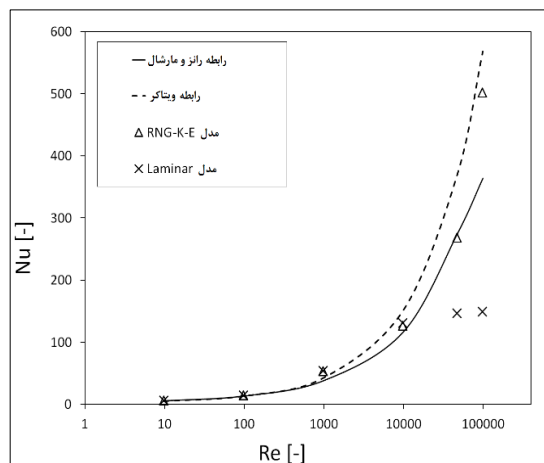
مدل	دقت مدل (R^2) نسبت به رابطه (۱)	دقت مدل (R^2) نسبت به رابطه (۲)
Realizable k-ε	۰/۷۴۳۱	۰/۸۱۹
Standard k-ε	۰/۸۲۹۸	۰/۸۸۰۱
RNG k-ε	۰/۸۸۶۳	۰/۹۷۰۳۶
laminar	۰/۴۴۳۸	۰/۴۴۶۹
Standard k-ω	۰/۵۴۲۲	۰/۵۴۳۱

^۲ R Square

^۱ RANS

از این پارامتر جهت محاسبه خطای آماری نقاط گسسته استفاده می‌گردد. هر چه میزان این پارامتر به عدد یک نزدیک‌تر باشد بیان‌گر دقت بالاتر محاسبات خواهد بود. دقت حل با مدل‌های مختلف برای سیال پایه را می‌توان در جدول ۲ مشاهده نمود.

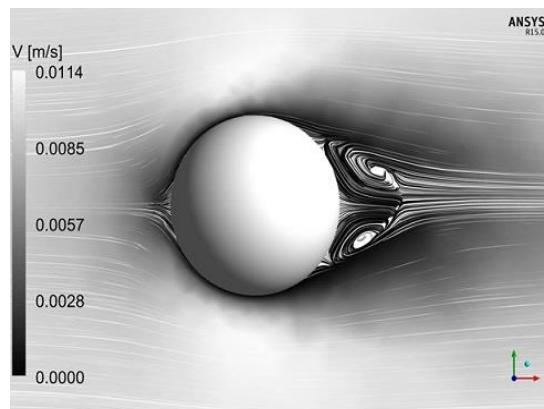
اعتبارسنجی حل برای سیال آب انجام گرفته و نتایج در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: مقایسه نتایج CFD با روابط معتبر

(رینولدز ۱۱۱/۹) در شکل (۶) قابل مشاهده است.

تغییرات ناسلت روی سطح کره در شکل (۷) و تغییرات فشار حول کره در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۶) پیداست جریان آزاد سیال در نقطه سکون^۱ جلویی یعنی نقطه ابتدای برخورد سیال با سطح به حالت سکون در می‌آید. و فشار به بیشینه مقدار خود می‌رسد (شکل (۸)). پس از این نقطه و با افزایش X فشار به تدریج کاهش یافته و لایه مرزی تحت اثر گرادیان فشار مطلوب ($dp/dx < 0$) رشد می‌کند. تا اینکه فشار به کمینه مقدار خود می‌رسد (در شکل (۸) این اتفاق تقریباً در زاویه ۹۰ درجه رخ داده است) رشد لایه مرزی در پشت کره علی‌رغم گرادیان فشار نامطلوب ادامه دارد. تا این‌که در نقطه جدایش^۲ گرادیان سرعت روی سطح کره به مقدار صفر رسیده، تحت اثر فشار معکوس جدایش سیال از سطح رخ می‌دهد و سیال به صورت چرخشی از سطح جدا می‌شود (شکل (۶)). همان‌گونه که در شکل (۶) پیداست چرخش جریان تقریباً در زاویه بین ۱۴۰ تا ۱۵۰ درجه رخ داده است.



شکل ۶: بردارهای سرعت جریان سیال حول کره

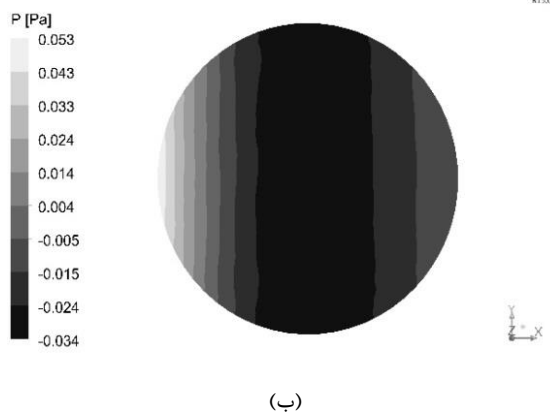
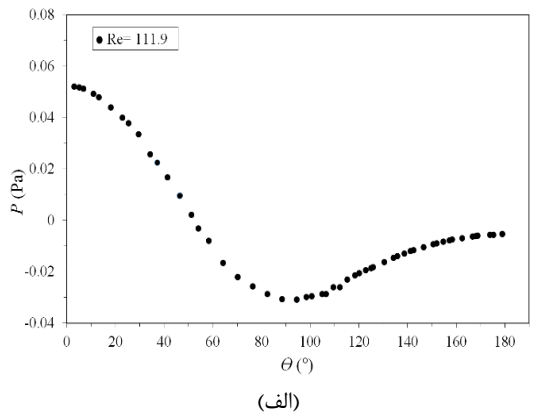
در شکل (۷) نمودار تغییرات ناسلت با زاویه برخورد نشان داده شده است در این شکل کمینه مقدار عدد ناسلت در زاویه ۱۴۵ درجه مشاهده می‌شود یعنی در جایی که جدایش سیال از سطح رخ داده است و به عبارتی کمینه ضریب انتقال حرارت جابجایی وجود دارد. این زاویه با نقطه ایجاد چرخش ذکر شده در شکل (۶) مطابقت دارد. بیشینه مقدار عدد ناسلت در ابتدای برخورد و در نقطه سکون جلویی یعنی دقیقاً در نقطه برخورد سیال با سطح کره رخ داده است. این نقطه کمینه مقدار سرعت و بیشینه مقدار

از میان این مدل‌ها بهترین پاسخ مربوط به مدل RNG k-ε می‌باشد. البته در سرعت‌های پایین و پیش از اغتشاش جریان (رینولدزهای کمتر از ۲۰۰۰۰) مدل جریان آرام نیز دارای دقت قابل قبول است. (برای سیال آب تا رینولدز ۱۰۰۰۰ دقت حل، $R^2 = 0.9388$ است). اما پس از گذر از این مقدار با توجه به اغتشاش جریان، مدل جریان آرام به دلیل در نظر نگرفتن سهم تلاطم دارای پیش‌بینی‌هایی کمتر از مقادیر واقعی می‌باشد. در کل میزان خطای مدل RNG k-ε در رینولدزهای پایین نیز به نسبت کمتر

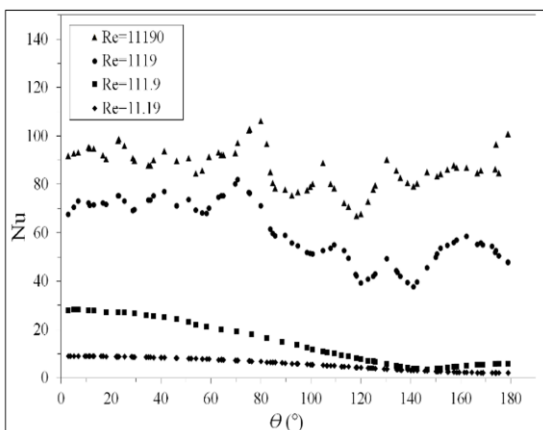
² separation point flow

¹ stagnation point flow

جریان خزشی^۱ (استوکس^۲) باشد، این نقطه مینیمم وجود نخواهد داشت. این نکته در نمودارهای موجود در شکل (۹) که مقایسه تغییرات ناسلت با زاویه را برای چهار رینولدز مورد مطالعه نمایش می‌دهد، کاملاً قابل ملاحظه است.



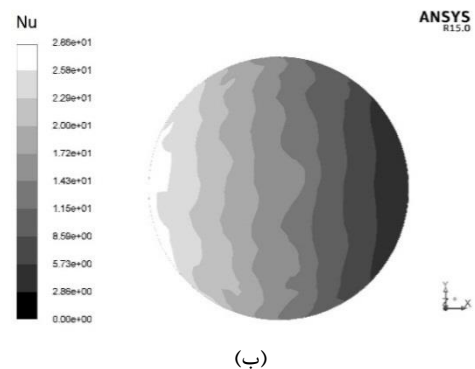
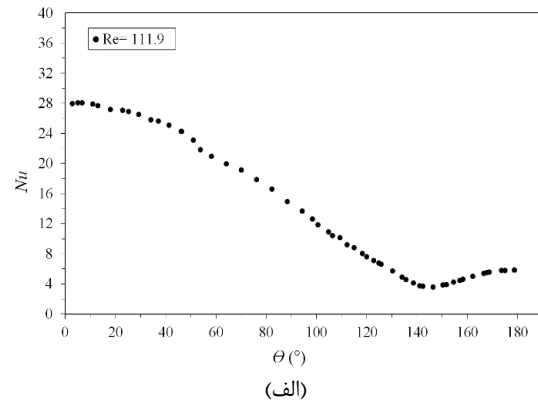
شکل ۸: الف) تغییرات فشار با زاویه برخورد جریان ب) کانتورهای فشار روی سطح کره



شکل ۹: مقایسه کلی برای تغییرات ناسلت با زاویه برخورد برای رینولدزهای مورد مطالعه

فشار و در نتیجه بیشینه مقدار چسبندگی سیال به سطح را داراست (ضریب انتقال حرارت جابجایی از سطح تابع چسبندگی سیال به سطح می‌باشد). این مشاهدات با آنچه در تئوری‌ها و آثار پیشین وجود دارد قابل انطباق است [۳۳-۳۵].

مقایسه کلی برای تغییرات ناسلت با زاویه برخورد برای رینولدزهای مورد مطالعه در شکل (۹) نمایش داده شده است.



شکل ۷: الف) تغییرات ناسلت با زاویه برخورد جریان ب) کانتورهای ناسلت روی سطح کره

وقتی که سرعت جریان آزاد خیلی پایین است ($Re < 4$) سیال به طور کامل دور کره پیچیده می‌شود، و جریان سیال در پشت کره به هم رسیده و دوباره به صورت توده راه خود را ادامه می‌دهد. اما زمانی که سرعت جریان آزاد زیاد است، جریان دیگر نمی‌تواند به سطح بچسبد و از سطح جدا می‌شود. جدایش سیال از سطح با کاهش ضریب انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه شار انتقال حرارت از سطح همراه است. بنابراین نمودار ناسلت بر حسب زاویه دارای یک نقطه مینیمم خواهد بود، که تقریباً بین نقطه جدایش تا پایان رشد لایه مرزی رخ خواهد داد. این در حالی است که اگر

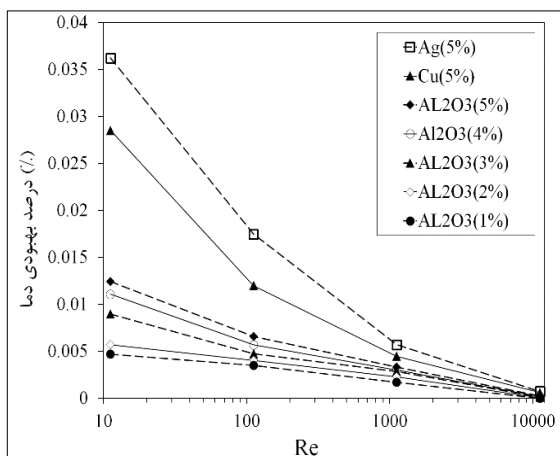
² Stokes flow

¹ creeping flow

جدول ۳: نتایج بدست آمده برای عدد ناسلت و دمای خروجی سیال عبوری از روی کره برای نانو سیالات مختلف

				Re	
۱۱۱۹۰	۱۱۱۹	۱۱۱/۹	۱۱/۱۹	ناسلت میانگین	H ₂ O
۱۲۶/۶۴۷	۵۸/۹۰۵	۱۴/۹۵۷	۵/۸۸۸	دمای خروجی	
۲۹۸/۰۰۴۴	۲۹۸/۰۲۱	۲۹۸/۰۶	۲۹۸/۲۷۴	ناسلت میانگین	Al ₂ O ₃ (/۱)
۱۲۶/۳۰۷	۵۷/۷۱	۱۴/۵۲۵	۵/۸۱۹	دمای خروجی	
۲۹۸/۰۰۴۴	۲۹۸/۰۲۶	۲۹۸/۰۷۰۴	۲۹۸/۲۸۸	ناسلت میانگین	Al ₂ O ₃ (/۲)
۱۲۶/۱۷	۵۷/۵۲	۱۴/۴۹۷	۵/۷۸	دمای خروجی	
۲۹۸/۰۰۴۶	۲۹۸/۰۲۷۸	۲۹۸/۰۷۲	۲۹۸/۲۹۱	ناسلت میانگین	Al ₂ O ₃ (/۳)
۱۲۵/۹۴	۵۷/۲۱	۱۴/۲۳۲	۵/۷۱۶	دمای خروجی	
۲۹۸/۰۰۴۸	۲۹۸/۰۲۹۵	۲۹۸/۰۷۴۱	۲۹۸/۳۰۰۴	ناسلت میانگین	Al ₂ O ₃ (/۴)
۱۲۵/۶۹۱	۵۶/۹۲۵	۱۴/۰۶۱	۵/۶۷۹	دمای خروجی	
۲۹۸/۰۰۵	۲۹۸/۰۲۹۹	۲۹۸/۰۷۶۹	۲۹۸/۳۰۷	ناسلت میانگین	Al ₂ O ₃ (/۵)
۱۲۵/۴۱	۵۵/۴۴	۱۳/۸۵۴	۵/۶۱۸	دمای خروجی	
۲۹۸/۰۰۵۱	۲۹۸/۰۳۰۹	۲۹۸/۰۷۹۶	۲۹۸/۳۱۱	ناسلت میانگین	Cu (/۵)
۱۲۴/۱۵۱	۴۷/۲۶۵	۱۲/۸۹۵	۵/۳۶۴۸	دمای خروجی	
۲۹۸/۰۰۶۲	۲۹۸/۰۳۴۳	۲۹۸/۰۹۵۷	۲۹۸/۳۵۹	ناسلت میانگین	Ag (/۵)
۱۲۳/۷	۴۶/۴۰۱	۱۲/۶۱۲	۵/۲۸۵	دمای خروجی	
۲۹۸/۰۰۶۶	۲۹۸/۰۲۸	۲۹۸/۱۲۸	۲۹۸/۳۸۲	ناسلت میانگین	
				دمای خروجی	

افزایش دمای ایجاد شده در خروجی جریان برای سیالات متفاوت در رینولدزهای مختلف در شکل (۱۱) آمده است. با افزایش رینولدز، افزایش دمای ایجاد شده در خروجی کاهش یافته است و تأثیر استفاده از نانو سیالات کمتر به چشم می‌آید. درصد بهبود دمایی به نسبت سیال پایه برحسب غلظت نانوذرات برای رینولدزهای متفاوت در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۰: درصد بهبودی دمای ایجاد شده توسط نانوسیالات در خروجی

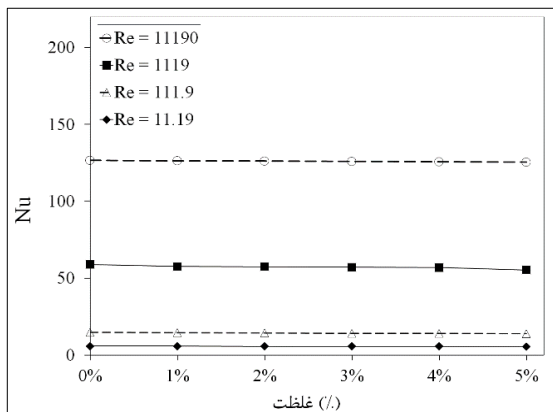
تغییرات ناسلت برحسب غلظت در شکل (۱۳) آمده است. کاهش ناسلت با غلظت بسیار کم می‌باشد. به گونه‌ای که نمودار تغییرات ناسلت با غلظت تقریباً افقی به نظر می‌رسد

با توجه به توضیحات در مورد رژیم جریان، نحوه حرکت سیال حول کره، همچنین تغییر پارامترهای فشار و سرعت و ارتباط آن با نرخ انتقال حرارت و مقایسه این توضیحات با نتایج حاصل از حل CFD و تطابق آنها، اعتبار سنجی برای حل به طور کامل انجام شده و می‌توان به پاسخ‌های بدست آمده از حل CFD برای دیگر سیالات اتکاء نمود. نتایج حاصل برای مقادیر ناسلت و دمای خروجی از کانال برای نانوسیالات ذکر شده که توسط حل با CFD حاصل شده است، را می‌توان در جدول ۳ ملاحظه کرد. دمای ورودی تمامی سیالات ۲۹۸ درجه کلوین می‌باشد.

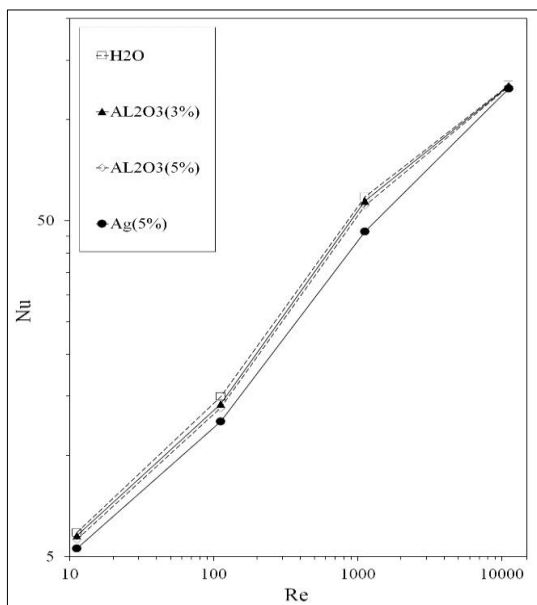
با توجه به بالاتر بودن دمای سطح کره نسبت به سیال ورودی به طبع پس از برخورد سیال به سطح کره و گذر از روی آن شاهد مقداری افزایش دما در خروجی سیال خواهیم بود. مقادیر دمای خروجی در جدول ۳ برای هر سیال در ستونی با همین عنوان قابل ملاحظه است. درصد بهبود دمای ایجاد شده در خروجی به دلیل استفاده از نانوسیالات مختلف به جای آب خالص با رینولدز در شکل (۱۰) آمده است. جهت محاسبه درصد بهبودی از رابطه (۱۵) استفاده شده است.

$$= \text{درصد بهبود دمایی} = \frac{\text{دمای خروجی سیال پایه} - \text{دمای خروجی نانوسیال}}{\text{دمای خروجی سیال پایه}} \times 100 \quad (15)$$

معلق در سیال پایه بر میزان انتقال حرارت افزوده شده است. که با توجه به فاکتورهای موثر بر میزان انتقال حرارت این امر بدیهی به نظر می‌رسد. چرا که نانو ذرات به میزان زیادی باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی در سیال شده، و بر میزان چسبندگی سیال به سطح نیز می‌افزایند. در نتیجه توانایی سیال جهت دور کردن حرارت از سطح کره افزایش یافته و به تبع آن شار انتقال حرارت کلی از سطح افزایش خواهد یافت.



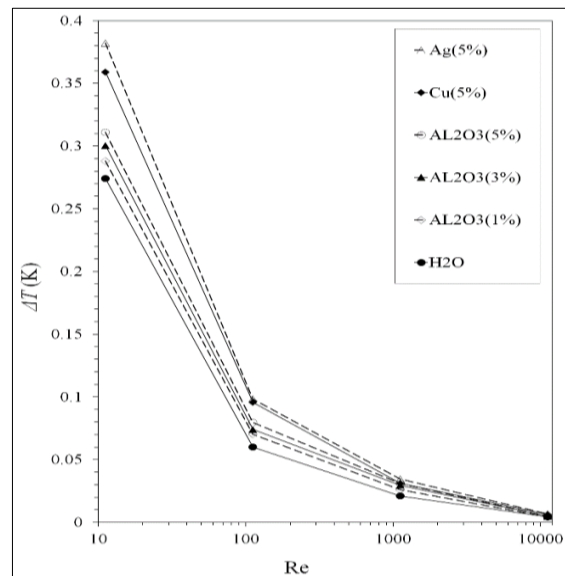
شکل ۱۳: تغییرات ناسلت بر حسب غلظت



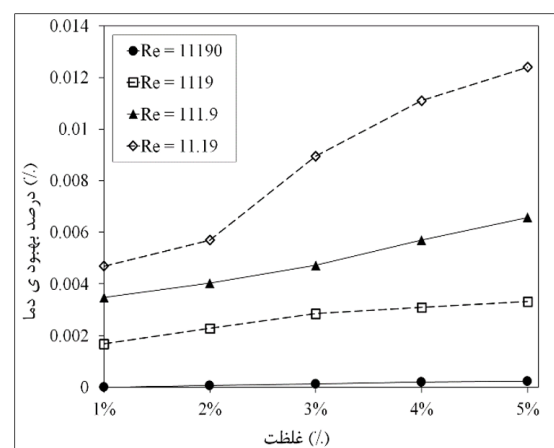
شکل ۱۴: تغییرات ناسلت بر حسب رینولدز

همچنین، تاثیر بیشتر نانو سیالات مس و نقره به نسبت اکسید آلومینیوم است (جدول ۳ و شکل‌های (۱۰) و (۱۱)). که این امر نیز به دلیل خاصیت ضریب هدایت حرارتی بیشتر نانوسیالات شامل نانو ذرات مس و نقره به نسبت اکسید آلومینیوم رخ داده است. البته ضریب انتقال حرارت هدایتی تنها فاکتور موثر بر نرخ انتقال حرارت در انتقال

(شکل (۱۳)). و شیب منفی نمودار به چشم نمی‌آید. مقادیر تغییرات ناسلت با غلظت در جدول ۳ موجود می‌باشد این مقادیر با افزایش غلظت کاهش می‌یابند. ضریب انتقال حرارت جابجایی تابع سطح انتقال حرارت می‌باشد و به دلیل سطح بسیار کوچک کره مورد مطالعه تغییرات ناسلت با غلظت نانوسیال زیاد به چشم نمی‌آید. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش سطح انتقال تغییرات ناسلت هم بیشتر گردد. که در مورد بستر مورد مطالعه تایید می‌گردد.



شکل ۱۱: افزایش دمای ایجاد شده در خروجی در رینولدزهای متفاوت



شکل ۱۲: درصد بهبود دمایی بر حسب غلظت حجمی نانوذرات تغییرات ناسلت بر حسب رینولدز در شکل (۱۴) نشان داده شده است. کاهش ناسلت با افزایش غلظت در یک رینولدز ثابت در این نمودار مشهودتر است. با توجه به نتایج موجود در جدول ۳ و نمودارهای موجود در شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲)، مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت نانو ذرات

همچنین کاهش آن با استفاده از نانوسیالات شامل نانوذرات با ضریب هدایت بالاتر در یک رینولدز مشخص هستیم. دلیل آن را می‌توان با یک قاعده غیر کلی در تعریف عدد ناسلت جستجو نمود. همان‌گونه که می‌دانیم عدد ناسلت را می‌توان به صورت نسبت انتقال حرارت جابجایی به انتقال حرارت هدایتی در سیال در نظر گرفت. بنابراین با توجه بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی درسیالات با غلظت بیشتر و ذرات هادی تر ناسلت دچار کاهش خواهد شد. اما قطعی ترین بحث در این رابطه را می‌توان با توجه به رابطه رانز و مارشال، انجام داد در این رابطه ناسلت میانگین تابع مقادیر اعداد بدون بعد رینولدز و پرنتل است. بنابراین ناسلت در یک رینولدز ثابت تنها تابع عدد بدون بعد پرنتل خواهد بود. در نتیجه با توجه به تعریف عدد پرنتل و مقادیر محاسبه شده آن برای سیالات مختلف در جدول ۴ می‌توان دلیل کاهش ناسلت با افزایش غلظت و یا جنس سیالات مختلف در این نمودارها را توجیه نمود. (پرنتل این سوسپانسیون‌ها با افزایش غلظت و ذرات هادی تر کاهش می‌یابد).

از مدل $k-\epsilon$ جهت اعتبارسنجی بسترها نیز استفاده گردیده است. میزان خطای دیگر مدل‌ها در شبیه‌سازی انتقال حرارت در این بسترها از مرحله قبل بیشتر است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی این بسترها برای آب با دمای ورودی 298°K در شکل (۱۵) آمده است.

با توجه به شکل (۱۵) نتایج CFD تطابق بهتری با روابط رومکس و همکاران که اختصاصاً برای همین بستر ساختار یافته پیشنهاد شده است، دارد. و با نتایج حاصل از رابطه بسترهای تصادفی فاصله بیشتری دارد. به علت افت فشار و اغتشاش بیشتر در بسترهای تصادفی انتقال حرارت در بسترهای تصادفی بیشتر است و این رابطه هم مقادیر بالاتری پیش بینی می‌کند.

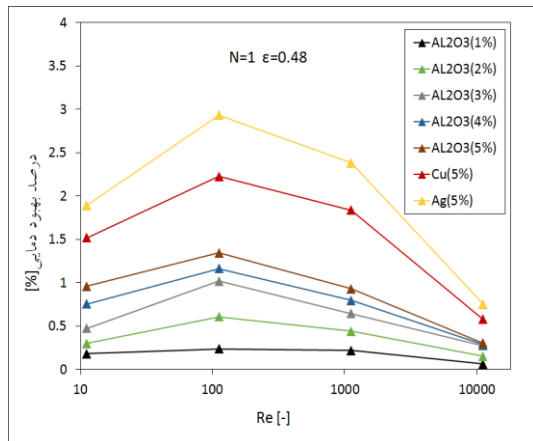
درصد بهبود دمای حاصل‌شده به دلیل استفاده از نانوسیالات مختلف در مقایسه با آب خالص بر حسب رینولدز برای بستر شماره ۱ در شکل (۱۶) آمده است.

حرارت با مکانیسم جابجایی نمی‌باشد و علاوه بر آنها مقادیر ظرفیت حرارتی، ویسکوزیته و چگالی نیز با توجه به روابط و معادلات انتقال حرارت بر نرخ انتقال حرارت نقش دارند. اما در این موارد به دلیل ویسکوزیته برابر برای غلظت‌های یکسان نانوذرات و تفاوت اندک میان چگالی‌ها و ظرفیت حرارتی ما بین این سه نانوسیال می‌توان این اثر را بیشتر به تفاوت میان ضرایب هدایت حرارتی منسوب نمود. البته با توجه به نمودار تغییرات عدد ناسلت می‌توان این اثر را بهتر و بیشتر تجزیه و تحلیل نمود (با توجه به این نکته که کاهش عدد ناسلت به نوعی معادل با افزایش نرخ انتقال حرارت هدایتی در سیستم است). این موضوع در پاراگراف بعد به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در سرعت‌های بالا، تاثیر جنس و افزایش غلظت نانوذرات معلق بر نرخ انتقال حرارت کمتر به چشم می‌آید. این امر در نمودارهای موجود در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) با نزدیک‌تر شدن انتهای نمودارها در سرعت‌های بالا به چشم می‌آید (نقطه پایانی متعلق به رینولدز ۱۱۱۹۰ را در این نمودارها ملاحظه نمایید) و در شکل (۱۰) با افقی شدن نمودار مربوط به رینولدز ۱۱۱۹۰ قابل درک است. این در حالی است که در سرعت‌های پایین اثر افزایش غلظت و تفاوت جنس نانوذرات کاملاً به چشم می‌آید. در مورد توضیح وقوع این امر می‌توان به غالب بودن مکانیسم انتقال حرارت جابجایی در سرعت‌های بالاتر اشاره نمود چرا که هر چه میزان ضریب انتقال حرارت جابجایی در سرعت‌های بالاتر (به دلیل سرعت بیشتر و اغتشاش بالاتر) بیشتر باشد، نقش انتقال حرارت با مکانیسم هدایتی که به گونه‌ای با مکانیسم نفوذ حرارت انجام می‌شود به نسبت مکانیسم انتقال حرارت جابجایی کمتر به چشم خواهد آمد. و به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در رینولدزهای پایین فارغ از غلظت و جنس نانو ذرات، اثر بهبود انتقال حرارت با نانوسیالات بیشتر به چشم می‌آید تا در رینولدزهای بالا. با توجه به شکل‌های (۱۳) و (۱۴) شاهد کاهش ناسلت با افزایش غلظت نانوسیالات و

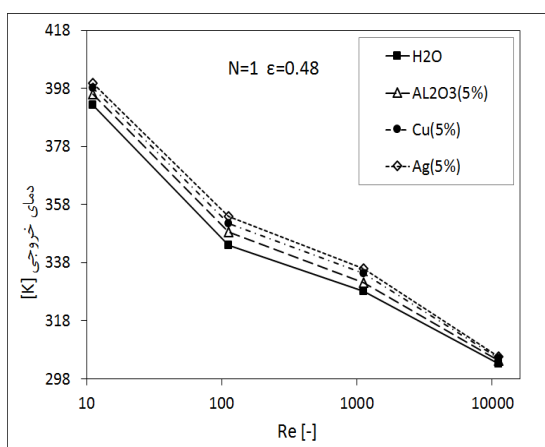
جدول ۴: اعداد پرنتل مربوط به سیالات مورد استفاده

Pr عدد پرنتل							
Ag (/۵)	Cu (/۵)	Al ₂ O ₃ (/۵)	Al ₂ O ₃ (/۴)	Al ₂ O ₃ (/۳)	Al ₂ O ₃ (/۲)	Al ₂ O ₃ (/۱)	H ₂ O
۳/۹۱۷	۴/۱۸۷	۵/۰۹۸	۵/۲۷۶	۵/۴۶	۵/۶۵	۵/۸۵۹	۶/۰۷

داشت. این در حالی است که در انتقال حرارت از کره منفرد به دلیل کم بودن سطح انتقال حرارت هر چه سرعت عبور سیال از روی سطح کمتر باشد استفاده از نانوسیال به دلیل ضریب هدایت بالاتر تاثیر بیشتری داشته و نتایج بهتری رخ خواهد داد. و درصد بهبودی بیشتری را شاهد خواهیم بود. دمای سیال در خروجی جریان برای سیالات متفاوت در رینولدزهای مختلف برای بستر مورد مطالعه در شکل (۱۵) آمده است.

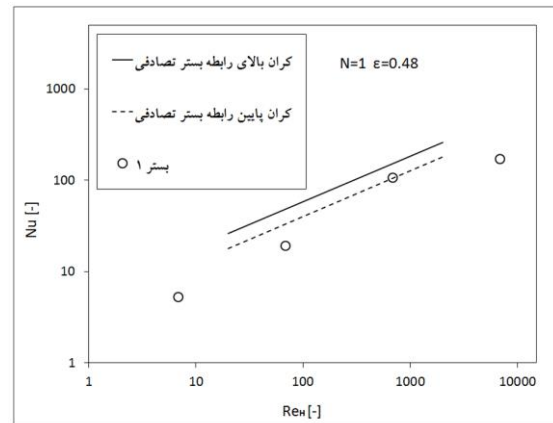


شکل ۱۶: درصد بهبود دمای حاصل در خروجی کانال

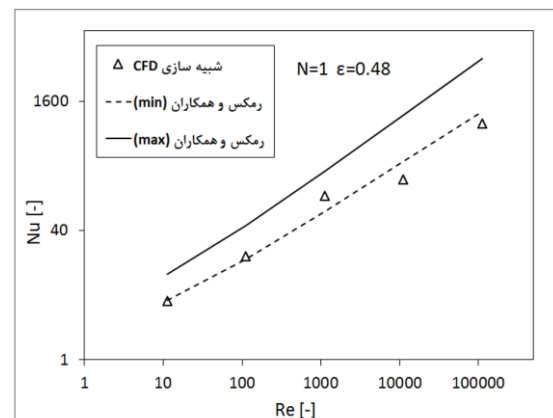


شکل ۱۷: دمای سیالات خروجی از بستر مورد مطالعه

در شکل (۱۷) نیز مانند انتقال حرارت از کره منفرد با افزایش غلظت و نیز استفاده از نانوسیالات شامل نانوذرات هادی تر افزایش انتقال حرارت قابل مشاهده است و نیز در رینولدزهای بالاتر میزان اثر نانو سیالات کاهش میابد و انتهای نمودارها به هم نزدیک می شود. دلایل مانند آنچه در مورد انتقال حرارت از کره منفرد گفته شد می باشد. و البته نکته ذکر شده در پاراگراف قبل نیز با فاصله گرفتن نمودارها از یکدیگر در رینولدزهای بینابینی قابل رؤیت است. درصد بهبود دمایی به نسبت سیال پایه بر حسب غلظت نانوذرات



(الف)

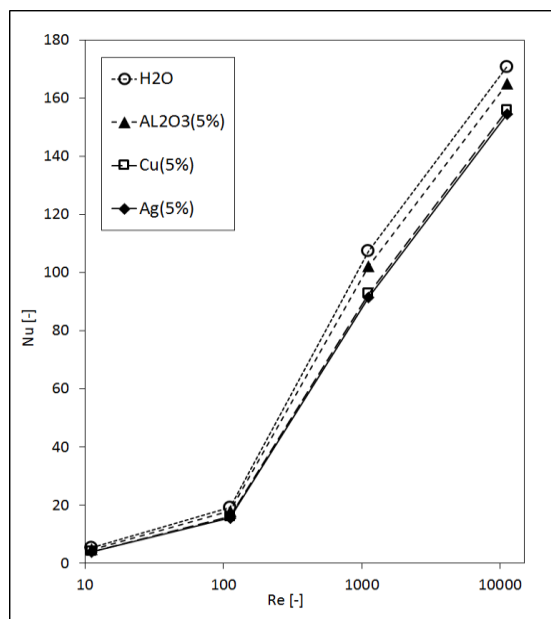


(ب)

شکل ۱۵: مقایسه نتایج CFD با روابط معتبر برای بستر مورد مطالعه (الف) رابطه (۵) بسترهای تصادفی. (ب) رابطه (۹) رومکس و همکاران

با توجه به شکل (۱۶) و مقایسه آن با نتایج بدست آمده برای کره منفرد (جدول ۳ و شکل (۱۰)) یک تفاوت در روند تغییرات درصد بهبود با رینولدز مشاهده می شود با توجه به شکل (۱۰) نمودار درصد بهبودی با رینولدز در کره منفرد کاملاً نزولی است و این در حالی است که در مورد نتایج بستر مورد مطالعه، یک ماکزیمم در نمودار مشاهده می شود. این تفاوت به دلیل طول بیشتر انتقال حرارت در بسترها رخ داده است. در بسترها به دلیل تعداد بیشتر کرات با دمای ثابت، سطح انتقال حرارت موثر بیشتر بوده و به طبع در سرعت های پایین زمان تماس سیال با سطح کرات بیشتر است و انتقال حرارت بیشتری رخ خواهد داد و در نتیجه در رینولدزهای خیلی کم دمای سیال فارغ از جنس و غلظت نانوذرات در خروجی تقریباً به دمای سطح کرات نزدیک می شود و نوع سیال در میزان بهبود دمایی تأثیر کمتری خواهد داشت. بنابر این یک حد بهینه سرعت وجود خواهد

نانوذرات و هم‌چنین استفاده از ذرات هادی‌تر کاهش می‌یابد. دلیل این امر مانند آنچه در مورد نتایج کره منفرد گفته شد می‌باشد.



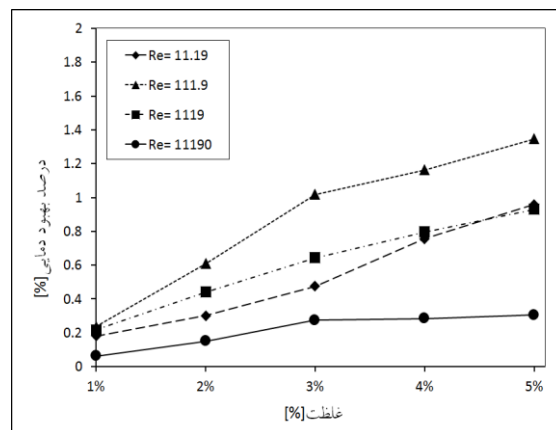
شکل ۲۰: تغییرات ناسلت با رینولدز برای بستر مورد مطالعه

۴- نتیجه‌گیری

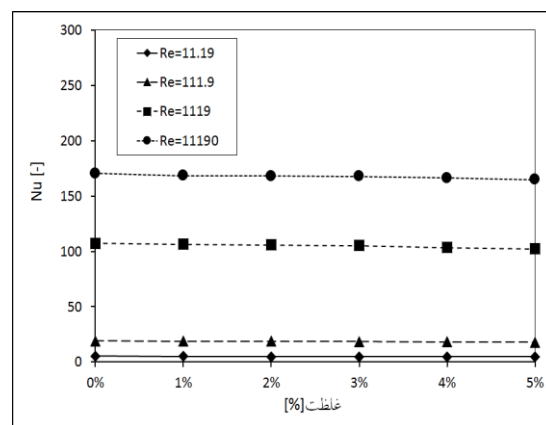
در این پژوهش انتقال حرارت از سطوح کروی توسط دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شد و توانایی نرم افزار فلونت جهت مدل‌سازی این موارد، مورد بررسی قرار گرفت و پس از اعتبارسنجی حل، انتقال حرارت از این سطوح توسط نانوسیالات مختلف مطالعه و بررسی گردید. با توجه به نتایج حاصل از حل توسط نرم‌افزار فلونت می‌توان به این نتیجه دست یافت که

- نرم‌افزار مذکور توانایی پیش‌گویی نتایج انتقال حرارت از سطوح کروی را دارا می‌باشد البته این توانایی در رینولدزهای پایین‌تر بسیار بیشتر است.
- استفاده از نانوسیالات فارغ از جنس و غلظت نانوذرات می‌تواند باعث بهبود انتقال حرارت از این سطوح گردد.
- غلظت بالاتر (و نه بیشتر از حد مجاز) این سیالات می‌تواند باعث بهبود انتقال حرارت گردد.
- استفاده از نانوسیالات محتوی نانوذرات با ضریب هدایت حرارت بالاتر تأثیر بیشتری در انتقال حرارت از این سطوح دارد.
- استفاده از نانوسیال در سرعت‌های ورودی پایین دارای ضریب تأثیر بیشتری است.

برای رینولدزهای متفاوت برای بستر مورد مطالعه در شکل (۱۸) نشان داده شده است.



شکل ۱۸: درصد بهبود دمای حاصل با تغییرات غلظت



شکل ۱۹: تغییرات ناسلت با غلظت برای بستر مورد مطالعه

در این شکل نیز مانند شکل (۱۲) روند افزایشی انتقال حرارت با غلظت نانو ذرات و هم‌چنین کاهش نرخ انتقال حرارت با افزایش رینولدز قابل ملاحظه است تنها استثناء مربوط به رینولدز ابتدایی ($Re = 11/19$) می‌باشد، که شرح آن در هنگام توضیح شکل (۱۶) آمده است و بر خلاف کره منفرد در این رینولدز ورودی در غلظت‌های پایین درصد بهبود نه تنها بیشترین مقدار را دارا نیست بلکه از مقادیر بدست آمده از دو رینولدز میانی نیز کمتر می‌باشد. اما با افزایش غلظت بر میزان بهبود دمایی در این رینولدز افزوده شده و در غلظت پایانی از مقادیر بدست آمده برای $Re = 11/19$ نیز پیشی می‌گیرد.

تغییرات ناسلت برحسب غلظت برای بستر مورد مطالعه در شکل (۱۹) نشان داده شده است. تغییرات ناسلت بر حسب رینولدز برای بستر مورد مطالعه در شکل (۲۰) نشان داده شده است. در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) نیز مانند آنچه در کره منفرد رخ داد مقدار ناسلت در یک رینولدز با افزایش غلظت

۵- فهرست علائم

A	سطح کل انتقال حرارت (m^2)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($Jkg^{-1} K^{-1}$)
D_p	قطر کره (m)
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
K	ضریب انتقال حرارت هدایتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
Nu	ناسلت
P	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Pr	عدد پرانتل
Q	انتقال حرارت کلی از سطح (W)
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
T_w	دمای سطح کره (K)
T_∞	دمای توده سیال (K)
ϕ	غلظت (/)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
	علائم یونانی
np	نانو ذره
nf	نانو سیال
nb	سیال پایه

– در سرعت‌های بالا استفاده از این سیالات تأثیر کمتری خواهد داشت و از یک رینولدز به بعد عملاً بی‌تأثیر خواهد بود.

– در مورد کره منفرد استفاده از نانوسیال در سرعت‌های ورودی پایین دارای ضریب تأثیر بیشتری است و این در حالی است که در بسترهای پر شده با سطح انتقال حرارت بیشتر اگر رینولدز ورودی سیال بیش از اندازه پایین باشد از تأثیر استفاده از نانوسیال به میزان قابل توجهی کاسته خواهد شد. و یک حد بهینه رینولدز ورودی جهت استفاده از نانوسیالات در این بسترها موجود است.

– در سرعت‌های بالا استفاده از این سیالات تأثیر کمتری خواهد داشت و از یک رینولدز به بعد عملاً بی‌تأثیر خواهد بود. تعیین مقدار این رینولدز به طول مؤثر انتقال حرارت بستگی خواهد داشت.

– هرچه طول بستر و به عبارتی سطح انتقال حرارت مؤثر بیشتر باشد، بازه رینولدز استفاده از نانوسیالات بزرگ‌تر بوده و استفاده از نانوسیال تا رینولدزهای ورودی بیشتری مؤثر خواهد بود.

۶- مراجع

- [1] Y. Xuan, W. Roetzel, "Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, No. 19, 2000, pp. 3701-3707.
- [2] Y. Xuan, Q. Li, "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids", J. Heat Transfer, Vol. 125, No. 1, 2003, pp. 151-155.
- [3] S.U.S. Choi, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", Proceedings of the 1995 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Francisco, USA, ASME, FED 231/MD 66, 1995, pp. 99-105.
- [4] K.V. Wong, and M.J. Castillo, "Heat Transfer Mechanisms and Clustering in Nanofluids", Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Miami, Coral Gables, FL 33124, USA, 2009.
- [5] Ph. Keblinski, S.R. Phillpot, S.U.S. Choi, and J.A. Eastman, "Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)", International journal of heat and mass transfer, Vol. 45, No. 4, 2002, pp. 855-863.
- [6] X. Zhang, H. Gu, and M. Fujii, "Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 31, No. 6, 2007, pp. 593-599.
- [7] S.U.S. Choi, and J.A. Eastman, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", International mechanical engineering congress and exhibition, San Francisco, CA (United States), 12-17 Nov 1995.
- [8] A.K. Singh, "Thermal Conductivity of Nanofluids", Defense Science Journal, Vol. 58, No. 5, 2008, pp. 600-607.
- [9] J.C. Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism", 1st Edition, Vol. 1, Clarendon Press, Oxford, U.K., 1873, pp. 360-366.

- [10] B.Ch., Pak and Y.I. Cho, "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles", *Experimental Heat Transfer an International Journal*, Vol. 11, No. 2, 1998, pp. 151-170.
- [11] D.A. Drew, and S.L. Passman, "Theory of multicomponent fluids, *Applied Mathematical Sciences*, Vol. 135, 1999.
- [12] S.Sh. Hosseini, A. Shahrjerdi, and Y. Vazifeshenas, "A Review of Relations for Physical Properties of Nanofluids", *Australian Journal of Basic & Applied Sciences*, Vol. 5, No. 10, 2011, pp. 417-435.
- [13] Y. Xuan, and Q. Li, "Heat transfer enhancement of nanofluids", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, No. 1, 2000, pp. 58-64.
- [14] D. Salari, A. Niaei, P. Chitsaz Yazdi, and M. Derakhshani, "CFD flow and heat transfer simulation for empty and packed fixed bed reactor in catalytic cracking of naphtha", *International Journal of Chemical and Biological Engineering*, Vol. 1, No. 1, 2008, pp. 50-53.
- [15] C.G. du Toit, P.G. Rousseau, G.P. Greyvenstein, W.A. Landman, "A systems CFD model of a packed bed high temperature gas-cooled nuclear reactor", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 45, No. 1, 2006, pp. 70-85.
- [16] Y. Hirayama, H. Okada, T. Nakagawa, T.A. Yamamoto, T. Kusunose, T. Numazawa, K. Mastumoto, T. Irie, and E. Nakamura, "Experimental Study of Active Magnetic Regenerator (AMR) Composed of Spherical GdN", *International cryocooler conference, ink, boulder, co.*, 2011.
- [17] H. Peng, H. Dong, and L. Xiang, "Thermal investigation of PCM-based high temperature thermal energy storage in packed bed", *Energy Conversion and Management*, Vol. 81, 2014, pp. 420-427.
- [18] H. Kim, G. DeWitt, T. McKrell, J. Buongiorno, and L. Hu, "On the quenching of steel and zircaloy spheres in water-based nanofluids with alumina, silica and diamond nanoparticles", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 35, No. 5, 2009, pp. 427-438.
- [19] M.T. Dalman, J.H. Merkin, and C. McGreavy, "Fluid flow and heat transfer past two spheres in a cylindrical tube", *Computers & fluids*, Vol. 14, No. 3, 1986, pp. 267-281.
- [20] B. Lloyd, and R. Boehm, "Flow and heat transfer around a linear array of spheres, *Numerical Heat Transfer*", Part A. Applications, Vol. 26, No. 2, 1944, pp. 237-252, 1994.
- [21] O.R. Derkx, and A.G. Dixon, "Determination of the fixed bed wall heat transfer coefficient using computational fluid dynamics, *Numerical Heat Transfer*", Part A. Applications, Vol. 29, No. 8, 1996, pp. 777-794.
- [22] S.A. Logtenberg and A.G. Dixon, "Computational fluid dynamics studies of fixed bed heat transfer", *Chemical Engineering and Processing, Process Intensification*, Vol. 37, No. 1998, pp. 17-21.
- [23] S. Mansoorzadeh, C.C. Pain, C.R.E. De Oliveira, and A.J.H. Goddard, "Finite element simulations of incompressible flow past a heated/cooled sphere", *International journal for numerical methods in fluids*, Vol. 28, No. 6, 1998, pp. 903-915.
- [24] D. Wen, and Y. Ding, "Heat transfer of gas flow through a packed bed". *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, No. 11, 2006, pp. 3532-3542.
- [25] O. Laguerre, S. Ben Amara, G. Alvarez, and D. Flick, "Transient heat transfer by free convection in a packed bed of spheres: Comparison between two modelling approaches and experimental results", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, No. 1, 2008, pp. 14-24.
- [26] S. Ergun, "Fluid flow through packed columns", *Chemical Engineering Progress*, Vol. 48, 1952, pp. 89-94.
- [27] R.K. Reddy, and J.B. Joshi, "CFD modeling of pressure drop and drag coefficient in fixed beds: wall effects", *Particuology*, Vol. 8, No. 1, 2010, pp. 37-43.
- [28] G.S. Rao, K.V. Sharma, S.P. Chary, R.A. Bakar, M.M. Rahman, K. Kadirgama, and M.M. Noor, "Experimental study on heat transfer coefficient and friction factor of Al₂O₃ nanofluid in a packed bed column", *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, Vol. 1, No. 1, 2011, pp. 1-15.
- [29] W.E. Ranz, and W.R. Marshall, "Evaporation from drops", *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 48, No. 3, 1952, pp. 141-146.
- [30] S. Whitaker, "Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles", *AIChE Journal*, Vol. 18, No. 2, 1972, pp. 361-371.
- [31] S.J.P. Romkes, F.M. Dautzenberg, van den C.M. Bleek, H.P.A. Calis, "CFD modelling and experimental validation of particle-to-fluid mass and heat transfer in a packed bed at very low channel to particle diameter ratio", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 96, 2003, pp. 3-13.
- [32] M. Kao, Y. Tsung, H. Tung, Y.M. Ferng, Ch.Ch. Chieng, and M.K. Chyu, "3D measurements and numerical computations of heat transfer coefficients on spheres in an array", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 68, 2013, pp. 110-118.

- [33] Frank P. Incropera, "Fundamentals of heat and mass transfer". John Wiley & Sons, 7 th ed, New York, USA, 2011.
- [34] W.L. McCabe, J.C. Smith, and P. Harriott, "Unit operations of chemical engineering, McGraw-Hill", Vol. 5. New York, USA, 1993.
- [35] J.p. Holman, "Heat Transfer, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering", 10 th ed, New York, USA, 2009.