تعیین بازه بهینه کسر حجمی نانوسیال در یک لوله اواپراتور به روش اویلری– لاگرانژی

عطیه فرخ[۱،*]، میراعلم مهدی[۲]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۰
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۵

واژگان کلیدی:
اواپراتور،
اویلری-لاگرانژی،
نانوسیال.

چکیده

افزودن نانوذرات به سیال پایه پیامدهای نامطلوبی از جمله افت فشار بیشتر نسبت به سیال پایه را به همراه دارد که منجر به افزایش کار پمپ می‌شود که از نظر اقتصادی به صرفه نمی‌باشد. برای بهبود راندمان باید به دنبال بازه مناسبی از کسر حجمی ذرات باشیم تا با افزودن این مقدار به سیال پایه میزان افزایش انتقال حرارت بیشتر از افزایش افت فشار باشد. در این مطالعه با معرفی نسبت معیار ارزیابی عملکرد PEC این بازه مناسب کسر حجمی برای چند نوع ذره منفرد و ذره ترکیبی در قسمتی از یک لوله اواپراتور به روش محاسبات عددی و رویکرد اویلری-لاگرانژی تعیین شده است. نتایج نشان داد استفاده از نانوذره ترکیبی در بازه درصد حجمی کمتر از ۱ درصد بازخورد بهتری نسبت به نانوسیال با ذرات تک جنس دارد. برای نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ Co این بازه درصد حجمی بهینه برابر با بین ۰/۰۱ تا ۰/۲ درصد و برای آب-اتیلن گلیکول/ CuO برابر با ۰/۰۱ تا ۰/۱۴ و برای نانوذره ترکیبی آب-اتیلن گلیکول/ TiO_2+Al_2O_3 برابر ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ ، برای آب-اتیلن گلیکول/ Al_2O_3 تا مقدار ۰/۰۳ درصد حجمی است. نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ SiO_2 همواره نسبت PEC نانوسیال و سیال کمتر از ۱ دارد و از این نظر استفاده از آن در مبدل حرارتی به صرفه نمی‌باشد.

۱-مقدمه

نانوسیالات یکی از روش‌های افزایش انتقال حرارت هستند [۱،۲]. هدف استفاده از این سیالات نوین شامل: کاهش سطح انتقال حرارت، در نتیجه کاهش مصرف مواد و انرژی لازم برای ساخت مبدل‌های حرارتی است. با این حال، برای این که نانوسیال‌ها کاربردهای عملی پیدا کنند، باید چندین مشکل حل شود. اولین و مهمترین آن ارائه روش‌های دقیق و قابل اعتماد به مهندسان برای محاسبه ضرایب انتقال حرارت و عوامل اصطکاک است. مشکل دوم، خواص ترموفیزیکی نانوسیالات است که تعیین آن آسان نیست [۳، ۴]. سومین مشکلی که تاکنون کاربرد عملی نانوسیال ها را متوقف کرده است، پایداری آنها است [۵، ۶]. با توجه به هزینه‌های تحقیقات تجربی و زمان طولانی طراحی و ساخت پایه‌های اندازه گیری و همچنین اندازه گیری‌های خسته کننده، روش‌های عددی یک رویکرد ضروری است. که امکان ارزیابی سریع و دقیق فناوری‌های جدید را فراهم می کند. با این حال، باید به خاطر داشت که هر کار عددی باید به صورت تجربی یا در صورت امکان با یک راه حل تحلیلی تأیید شود. دو رویکرد اصلی در مدل‌سازی جریان‌های نانوسیال وجود دارد، [۷-۱۱]. مدل اول، تک‌فاز؛ با توجه به اندازه نانوذرات (مشابه ابعاد مولکول های مایع)، فرض بر این است که مخلوط حاصل، مایعی همگن را تشکیل می دهد که خواص آن ناشی از خواص مایع پایه و ذرات جامد است. از این رو، از روش های کلاسیک مکانیک پیوسته برای حل مجموعه معادلات حاکم استفاده می شود. مدل دوم، رویکرد دوفاز، یک نانوسیال به عنوان مخلوط

[۱] * پست الکترونیک: atie.farrokh@yahoo.com- M.mahdi@sru.ac.ir

۱.کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی

UNCORRECTED PROOF

جامد-مایع دو فاز درمان می‌شود. مطالعاتی با این روش‌ها در زمینه شبیه‌سازی عددی نانوسیال انجام شده است که در ادامه به چند مورد اشاره می‌شود. بورتز و همکاران [۱۲] یک شبیه‌سازی عددی جریان نانوسیال آشفته در یک لوله با شار حرارتی یکنواخت در دیواره را با استفاده از رویکرد تک فازی با مدل آشفتگی SST k-ω انجام داد. مشخص شد که عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. با این حال، ضریب اصطکاک و توان پمپ نیز افزایش می یابد. کریستیاوان و همکاران [۱۳] از رویکرد اویلری برای مطالعه جریان‌های آرام و متلاطم نانوسیال در یک لوله یکنواخت گرم شده استفاده کرد. برای جریان آشفته، از مدل آشفتگی k-ε استفاده شد. مشخص شد که ضریب انتقال حرارت نانوسیال به طور قابل توجهی در مقایسه با مایع پایه در هر دو جریان آرام و آشفته افزایش می‌یابد. با توجه به این مطالعه رویکرد اویلری باید برای نانوسیالات با کسر حجمی بالاتر اعمال شود. سجاد و همکاران [۱۴] جریان آرام نانوسیال را در یک لوله گرم شده یکنواخت را با استفاده از مدل تک فاز با خواص وابسته به دما مورد مطالعه قرار داد. مشخص شد که افزایش ضریب انتقال حرارت محلی در ناحیه ورودی بیشتر است. علاوه بر این، افزودن نانوذرات منجر به افزایش میانگین ضریب انتقال حرارت می‌شود، اما با افزایش کسر حجمی با افت فشار بالاتر روبه رو می‌شود. مینه آ و همکاران [۱۵] با استفاده از چهار مدل تک فاز و دو مدل مخلوط، یک مطالعه بین مقایسه ای بر روی جریان آرام سه بعدی نانوسیال ها در لوله گرم شده یکنواخت انجام داد. مشخص شد که روش عددی، نتایجی بیشتر از نتایج تجربی پیش‌بینی می‌کنند و رویکرد دو فازی برای شبیه‌سازی رفتار نانوسیال مناسب‌تر است. اونیوریکا و آیکپونموابا [۱۶] یک مدل مخلوط را برای مطالعه جریان آرام نانوسیال ها در داخل یک لوله یکنواخت گرم شده به کار بردند. نانوسیال با خواص ثابت آزمایش شده در نظر گرفته شد. مشخص شد که HTC با افزایش کسر حجمی ذرات افزایش می‌یابد. جمالی و طغرایی [۱۷] با استفاده از رویکرد تک فازی، انتقال از جریان آرام به جریان آشفته نانوسیال را در یک لوله هم‌دما مطالعه کردند. اثر قطر نانوذرات، کسر حجمی ذرات و نوع نانوذرات مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که افزودن نانوذرات بر شروع انتقال تأثیری ندارد. فادودون و همکاران [۱۸] جریان متلاطم نانوسیالات را در یک لوله یکنواخت گرم شده با استفاده از رویکرد تک فاز مطالعه کردند. مدل آشفتگی k-ε با خواص وابسته به دما نانوسیال اعمال شد. افزایش انتقال حرارت با افزایش همزمان افت فشار برای افزایش کسر حجمی ذرات مشاهده شد. سعید و الدلیمی [۱۹] رویکرد تک‌فازی و چهار مجموعه مختلف از خواص ترموفیزیکی را برای مطالعه جریان آرام یک نانوسیال در یک لوله یکنواخت گرم شده به کار بردند. مشخص شد که هر دو مدل وابسته به دما و مستقل از دما خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌ها می‌توانند به درستی رفتار نانوسیال‌ها را در طول جریان آرام شبیه‌سازی کنند. اوریبه و همکاران [۲۰] جریان‌های آرام و آشفته سه بعدی نانوسیال را در یک لوله یکنواخت گرم شده با استفاده از رویکرد تک فاز بررسی کردند. مشخص شد که ضریب انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد، در حالی که ضخامت مرز حرارتی با افزایش کسر حجمی کاهش می‌یابد. بیان شد که نیازی به اعمال مدل های دو فازی برای توصیف رفتار نانوسیال نیست. تاسکسن و همکاران [۲۱] تأثیر هندسه کانال (دایره، مربع، مثلث و مستطیل) را بر رفتار ترمو هیدرولیکی نانوسیال در طول جریان آرام مورد مطالعه قرار داد. یک مدل تک فاز با خواص وابسته به دما اعمال شد. افزایش انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی مشاهده شد و سطح مقطع دایره‌ای نسبت به سایر هندسه‌ها برتری داشت. ییلدیز و آکتورک [۲۲] از یک رویکرد تک فازی برای مطالعه جریان آشفته سه بعدی یک نانوسیال در داخل یک لوله یکنواخت گرم شده استفاده کردند. مدل استاندارد تلاطم k-ε با خواص وابسته به دما اعمال شد. افزایش قابل توجهی درعدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت ثبت شد. با این حال، ضریب اصطکاک به طور قابل توجهی با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد. بسیاری از محققان به نیاز به تشدید تحقیقات در مورد خواص ترموفیزیکی نانوسیالات اشاره می کنند، در این زمینه، باید محدودیت‌های تحقیقات تجربی را در نظر داشت [۲۳].

ان دوی و همکاران یک مدل ریاضی به منظور پیش‌بینی عملکرد انرژی سیستم‌های تبرید با استفاده از نانوسیالات برای کاربرد در کارخانه‌های تبرید را توسعه داد. مدل بر اساس ترکیبی از روش اثربخشی-تعداد واحدهای انتقال و انتقال حرارت کلاسیک و همبستگی هیدرودینامیکی سیال است. مزیت عملی استفاده از نانوسیال ها از طریق یک رویکرد انرژی جهانی با استفاده از معیار ارزیابی عملکرد (PEC) ارزیابی شد که نرخ جریان گرمای منتقل شده را با

UNCORRECTED PROOF

قدرت پمپاژ مورد نیاز در سیستم تبرید مقایسه می‌کند. شبیه‌سازی‌ها برای یک مبدل حرارتی لوله‌ای در رژیم‌های آرام و آشفته، برای انواع مختلف نانوذرات و طیف وسیعی از کسر حجمی انجام شد.[۲۴]

محمد همت [۲۵] در مطالعه‌ای هدایت حرارتی نانوسیال TiO2 مبتنی بر آب اتیلن گلیکول توسط شبکه عصبی مصنوعی مدل‌سازی کرد. برای این منظور، هدایت حرارتی نانوسیال با کسر حجمی ۰/۲-۱٪ در دمای ۳۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد جمع آوری کرد. این داده‌ها توسط دو نوع شبکه‌های عصبی مصنوعی رایج مدل‌سازی شد و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. یکی از این شبکه‌ها پرسپترون چند لایه و دیگری تقریب پایه شعاعی بود. در نهایت یک رابطه تجربی برای محاسبه هدایت حرارتی این نانوسیال پیشنهاد شد و نتایج با نتایج شبکه عصبی پایه شعاعی مقایسه شد. وی با این مقایسه نشان داد که شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی داده‌های تجربی نانوسیال‌ها بسیار قدرتمند هستند و می‌توانند الگوهای این داده‌ها را با دقت بالایی دنبال کنند.

وی در مطالعه‌ای دیگر[۲۶]، ویسکوزیته دینامیکی نانولوبریکانت MWCNT(%40)-SiO_2(%60)/5W50 به صورت تجربی مورد بررسی قرار داد. بررسی رفتار رئولوژیکی نانوسیال در برابر تنش برشی نشان داد که نانوسیال دارای رفتار غیرنیوتنی است. همچنین در مطالعه دیگری[۲۷]، اثرات دما، کسر حجمی جامد و نرخ برش بر ویسکوزیته نانولوبریکانت هیبریدی ZnO-MWCNT/10w40 به صورت تجربی مورد بررسی قرار داد. یک همبستگی جدید از نظر دما و غلظت پیشنهاد شد. با استفاده از این همبستگی می‌توان ویسکوزیته نانوسیال هیبریدی را پیش بینی کرد. همچنین در مطالعه دیگر [۲۸] برای بررسی خواص نانوسیال از دو مدل RSM و MLP استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل MLP برای این پیش‌بینی بهتر از RSM است. مشخص شد که سرعت افزایش ویسکوزیته با افزودن نانوذرات تا ۳/۵ برابر مقدار سیال پایه می‌رسد.

در این مطالعه به بررسی اثرات افزودن ذرات به سیال پایه بر افت فشار و انتقال حرارت در لوله یک مبدل حرارتی پرداخته شده‌است. هندسه در نظر گرفته شده در این قسمت، قسمتی از لوله اواپراتور است که نانوسیال از داخل لوله می‌گذرد و مبرد در اطراف آن در حال تغییر فاز است.

در این شبیه‌سازی موارد زیر به عنوان مفروضات در نظر گرفته شده‌است:

۱. از آنجایی که این مطالعه به زمینه چیلر می‌پردازد، مورد بررسی شده درباره یک نانوسیال است که در داخل یک لوله مستقیم اواپراتور در حالی که مبرد در خارج از لوله می‌گذرد، جریان دارد. مشخصات هندسی اواپراتور در قسمت بعد آورده خواهد شد.
۲. مبردی که در خارج جریان دارد در حال تبخیر است، بنابراین گرمای ویژه آن بی‌نهایت است و دارای دمای ثابتی است.
۳. فرض می‌شود که نانوذرات دارای قطر و شکل یکسان هستند و دارای سرعتی برابر با سرعت سیال پایه هستند. سیال پایه و نانوذرات در تعادل حرارتی هستند.
۴. خواص حرارتی و فیزیکی وابسته به دما در دمای توده گرفته شده است.
۵. نانو سیالات و مبرد در جریان مخالف جریان دارند.
۶. عدد رینولدز در تست های شبیه سازی اعمال می شود.

۲-معادلات

معادلات فاز پیوسته

معادله پیوستگی

اصل بقای جرم، یک اصل اساسی است که در مکانیک سیالات از آن استفاده می‌شود. طبق این اصل جرم نه تولید می‌شود و نه از بین می‌رود، که به عنوان معادله پیوستگی برای سیالات تراکم ناپذیر با رابطه ۱ تعریف می‌شود: [۲۹]

$$div(\rho\vec{V}) = 0 \qquad (۱)$$

معادله مومنتوم

تنها با داشتن معادله پیوستگی نمی‌توان مکانیک سیالات را مشخص نمود و نیاز به بیان اصل بقا اندازه حرکت یا قانون دوم نیوتون وجود دارد. حاصل ضرب سرعت در جرم را همان اصل اندازه حرکت نامیده می شود. قانون دوم نیوتون برآیند نیروهایی که بر یک جسم اثر می‌کند را برابر با تغییرات خالص مومنتوم می‌داند.

UNCORRECTED PROOF

$$\rho\frac{\partial\vec{V}}{\partial t}+div\left(\rho\vec{V}\vec{V}\right)= -gradP+\mu\left(\nabla^2\vec{V}\right)+S_v \quad (۲)$$

معادله انرژی

$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}+div\left(\rho\vec{V}C_pT\right)= k(\nabla^2T)+S_h \quad (۳)$$

که در آن V، P، T و t به ترتیب بردار سرعت، فشار، دما و زمان هستند. علاوه بر این، μ، ρ، C_p و k به ترتیب ویسکوزیته، چگالی، ظرفیت گرمایی و هدایت حرارتی برای آب به عنوان فاز پیوسته هستند. توجه داشته باشید که S_v و S_h به ترتیب عبارت‌های ترم چشمه تکانه و انرژی ذرات با سیال هستند. این اصطلاحات به صورت رابطه ۴ و ۵ تعریف می‌شوند: [۳۰]

$$S_v=\sum_{np}-\frac{m_p}{\delta V}\frac{dV_p}{dt} \quad (۴)$$

$$S_h=\sum_{np}-\frac{m_p}{\delta V}c_p\frac{dT_p}{dt} \quad (۵)$$

در صورتی که t زمان است و V_p و T_p سرعت و دما نانوذرات هستند. علاوه بر این، m_p، np و δV به ترتیب جرم نانوذرات، تعداد ذرات درون یک حجم سلول و حجم سلول هستند.

معادلات فاز گسسته

معادله تعادل نیرو برای یک ذره معلق در سیال برای محاسبه مسیر ذرات استفاده می شود. نیروهای برهمکنش بین سیال و ذرات شامل نیروهای درگ، براونی و ترموفورتیک است. نیروهای براونی و ترموفورتیک در اثر برخورد تصادفی مولکول های سیال به ذرات معلق ایجاد می شوند. توجه داشته باشید که نیروی گرانش برای نانوذرات بسیار کم است، مخصوصاً در مورد فعلی که قطر ذرات برابر با (nm) ۱۰ است. برای (nm) ۵۰ بزرگتر، نیروی گرانش ممکن است تأثیر کمی داشته باشد. بنابراین این نیرو در محاسبات در نظر گرفته نمی‌شود. معادله حرکت یک فاز ذره در رابطه ۶ و ۷ آورده شده است: [۳۱]

$$\frac{dX_p}{dt}=V_p \quad (۶)$$

$$\frac{dV_p}{dt}=F_D\left(V_f-V_p\right)+f_B+f_{th} \quad (۷)$$

که در آن زیرنویس های "f" و "p" به ترتیب بیانگر سیال و ذره هستند. اولین عبارت در سمت راست معادله (۷) نیروی پسا است. در اینجا از نیروی کشش استوکس کانینگهام استفاده شده است. بر این اساس،[۳۰]

$$F_D=\frac{18\mu_f}{d^2\rho_pC_c} \quad (۸)$$

که در آن C_c تصحیح کانینگهام است که با رابطه ۹ تعریف می‌شود:

$$C_c=1+\frac{2\lambda}{d}\left[1.257+0.4e^{-(1.1d/2\lambda)}\right] \quad (۹)$$

که λ مسیر آزاد میانگین سیال است. نیروی ترموفورتیک در رابطه ۱۰ بیان شده است:

$$f_{th}=\frac{36\mu^2C_s}{\rho_f\rho_pd_p^2(1+3C_mKn)}\times\frac{\left(k_f/k_p+C_t+Kn\right)}{\left(1+2k_f/k_p+2C_tKn\right)}\frac{\nabla T}{T} \quad (۱۰)$$

که در آن k_f ، k_p و Kn به ترتیب رسانایی حرارتی سیال و نانو ذره و عدد نادسن هستند. همچنین $C_m=1.14$ ، $C_t=2.18$ و $C_s=1.17$.

در معادله (۱۱)، نیروی براونی به صورت داده شده است،

$$f_B=\varsigma\sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}} \quad (۱۱)$$

در اینجا ، ς اعداد تصادفی گاوسی مستقل با میانگین صفر و واریانس واحد است. در رابطه (۳-۱) S_0 شدت طیفی نیروی براونی است که به صورت رابطه ۱۲ ارزیابی می شود:

$$S_0=\frac{216\upsilon K_BT}{\pi^2\rho_fd_p^2\left(\frac{\rho_p}{\rho_f}\right)^2C_c} \quad (۱۲)$$

در اینجا T ، υ و K_B به ترتیب دمای مطلق سیال، ویسکوزیته سینماتیکی و ثابت بولتزمن است و برابر با $K_B=1.38\times10e-23\ J\ K^{-1}$ می باشد.

۳- مدل‌سازی و شرایط مرزی

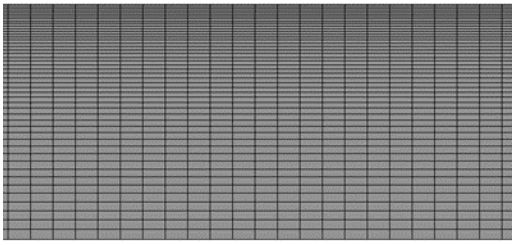
UNCORRECTED PROOF

در این مطالعه هندسه یک لوله است که مشخصات آن در جدول **۱** نشان داده شده است. همان طور که در شکل **۱** مشاهده می‌شود به منظور کاهش حجم و زمان محاسبات با حفظ دقت کافی لوله به صورت تقارن محوری مدل‌سازی شده است.

جدول ۱- ابعاد هندسه مدل

مشخصات لوله مسی	
قطر لوله	۰/۰۰۴ (m)
طول لوله	۰/۵ (m)
ضخامت لوله	۰/۰۰۱ (m)

مدل‌سازی میدان به صورت دو بعدی انجام شده شبکه‌بندی آن به صورت سازمان یافته مستطیلی انجام گرفته است. با نزدیک شدن به دیواره لوله سلول‌ها ریزتر و کوچک شده‌است. از مش لایه مرزی برای دیواره لوله استفاده شده است و y^+ کمتر از ۱ است. در شکل ۱ می‌توان شبکه بندی انجام شده را مشاهده کرد.



شکل ۱- شبکه بندی ریزشونده به سمت دیواره لوله

استقلال از شبکه بررسی شد. برای بررسی استقلال از شبکه برای سه مش افت فشار در رینولدز ۴۰۰۰ برای نانوسیال (اتیلن گلیکول-آلمینیوم اکسید ۴ درصد) در جدول ۲ آورده شده‌است. مش انتخابی برای حل با ۲۷۰۱۸ گره و ۲۵۵۰۰ المان می‌باشد.

جدول ۲- استقلال از شبکه

	تعداد گره	افت فشار تجربی	افت فشار شبیه‌سازی	درصد خطا
۱	۶۷۴۵	۱۳۲۱۲۲۰/۱۴۴	۱۳۶۱۴۵۲	٪ ۴/۵۵
۲	۲۷۰۱۸	۱۳۲۱۲۲۰/۱۴۴	۱۳۷۲۹۰۰	٪ ۳/۹۱
۳	۹۹۴۸۷	۱۳۲۱۲۲۰/۱۴۴	۱۳۷۲۲۴۱	٪ ۳/۸۶

معادلات با دقت مرتبه دوم و با رویکرد اویلری-لاگرانژی حل شدند. جریان به صورت پایا و در حالت دو بعدی شبیه‌سازی شده است. از مدل آشفتگی *SST k-ω* برای مدل‌سازی آشفتگی جریان استفاده شده است. مساله با استفاده از نرم افزار فلوئنت شبیه‌سازی شده است. برای همگرایی جریان نانوسیال، سیال پایه یا همان اتیلن گلیکول به صورت پایا و ذرات را به صورت گذرا شبیه سازی شده است. برای صرفه جویی در زمان و محاسبات به دلیل تقارن هندسه در راستای لوله، مساله به صورت تقارن محور بررسی شده است. برای حل معادلات فشار حالت استاندارد به کار گرفته شد و معادلات فشار و سرعت کوپل شدند. مسأله به صورت دو راهه مدلسازی شده و معادلات مومنتوم و انرژی با مرتبه دوم حل شده‌اند. از بین نیروهای موجود در روش اویلری- لاگرانژی نیروی جرم مجازی و گرادیان فشار و گزینه کوپلینگ توربولانس دو طرفه[1] در حل اثر داده شد. برای نیروی پسا مدل کروی استفاده گردید. شرط مرزی اعمال شده در جدول ۳ آورده شده است. دمای ورودی نانوسیال در ۲۰- درجه سانتی گراد و دمای اواپراتور ۳۰- درجه سانتی گراد ثابت در نظر گفته شد. عدد رینولدز ۴۰۰۰ در رژیم آشفته مورد آزمایش قرار گرفت. چندین نوع از نانوذرات (Al_2O_3، $TiO_2+Al_2O_3$، SiO_2، Co و CuO) شبیه سازی شدند. جدول **۴** خواص حرارتی-فیزیکی نانوذرات انتخابی را نشان می‌دهد. مخلوط اتیلن گلیکول / آب (EG 50/50) به عنوان سیال پایه انتخاب شد. خواص ترموفیزیکی سیال پایه به دما بستگی دارد و از

[1] Two-Way Turbulence Coupling

UNCORRECTED PROOF

معادلات چند جمله‌ای ارائه شده در جدول **۵** که در بازه دماهای بین ۲۵- تا ۱۰ درجه سانتی گراد معتبر است، به دست آمده است.

جدول ۳- شرایط مرزی اعمال شده برای ورودی، خروجی و دیواره

	متغییر	مقدار	واحد
شرط مرزی ورودی	T	253	k
	Re	4000	
	قطر ذره	10	nm
	بازه کسر حجمی	0.01- 0.4	
شرط مرزی خروجی	$\bar{P}$	0	Pa
شرط مرزی دیواره	$\bar{u}$	(0 0 0)	m/s
	T	243	k

جدول ۴- خواص ترموفیزیکی نانوذرات [۳۳].

نوع ماده	چگالی Kg m^{-3}	ضریب حرارت ویژه J kg^{-1} K^{-1}	رسانش گرمایی W m^{-1} K^{-1}
Al_2o_3	۳۹۷۰	۷۶۵	۳۶
SiO_2	۲۲۰۰	۷۴۰	۱/۴
TiO_2	۴۱۵۷	۷۱۰	۸/۴
CuO	۶۳۱۵	۵۳۲	۱۷/۷
Co	۸۸۶۵	۴۲۱	۱۰۰

چندین مدل در مطالعات برای تخمین خواص ترموفیزیکی مختلف نانوسیالات پیشنهاد شده است. اما باید توجه داشت که هیچ اتفاق نظری در مورد این مدل‌های توسعه‌یافته خاص وجود ندارد، همانطور که برای مثال در بررسی منتشر شده توسط مرشد و همکاران مشاهده می‌شود[۳۲].

بنابراین، به عنوان اولین تقریب، مدل‌های کلی که صحت آن‌ها ثابت شده است، برای بررسی نظری و محاسبه سرعت و تزریق ذرات به کمک آن‌ها، انتخاب شدند.

چگالی

$$\rho_{nf} = (1-\varphi_v)\rho_{bf} + \varphi_v\rho_p \qquad (۱۳)$$

جدول ۵- معادلات خواص ترموفیزیکی مخلوط اتیلن گلیکول / آب (EG 50/50) به عنوان سیال پایه. [۳۴]

خواص ترموفیزیکی	معادلات
چگالی Kg m^{-3}	$\rho_{bf} = 1.08\times10^{-6}T^3 - 2.46\times10^{-3}T^2 - 3.38\times10^{-1}T + 1081$
ضریب حرارت ویژه J kg^{-1} K^{-1}	$cp_{bf} = 6.81\times10^{-5}T^3 - 1.34\times10^{-3}T^2 - 3.88\times10^{-1}T + 3204$
رسانش گرمایی W m^{-1} K^{-1}	$k_{bf} = -7.15\times10^{-8}T^3 - 2.61\times10^{-6}T^2 + 8.98\times10^{-4}T + 0.36$
ویسکوزیته دینامیکی Pa s	$\mu_{bf} = 1.46\times10^{-8}T^4 - 1.70\times10^{-7}T^3 + 8.58\times10^{-6}T^2 - 3.43\times10^{-4}T + 1081$

که در آن φ_v درصد حجمی نانوذره، ρ_{bf} چگالی سیال پایه و ρ_p چگالی ذره است. این معادله توسط واجیها و همکاران در سال ۲۰۰۹ با مقادیر تجربی برای چندین نوع ذره و درصد حجمی اعتبارسنجی شده است.[۳۵]

ضریب انتقال حرارت ویژه

$$Cp_{nf} = \frac{(1-\varphi_v)\rho_{bf}Cp_{bf} + \varphi_v\rho_p Cp_p}{\rho_{nf}} \qquad (۱۴)$$

که در آن به ترتیب Cp_p و Cp_{bf} ضریب گرمایی ویژه نانوذره و سیال پایه هستند. این معادله توسط مرشد در سال ۲۰۱۱ با مقادیر تجربی برای چندین نوع ذره و درصد حجمی اعتبارسنجی شده است [۳۶].

ضریب انتقال حرارت رسانایی

$$k_{nf} = k_{bf}\times\left[\frac{k_p + (n-1)k_{bf} - \cdots}{k_p + (n-1)k_{bf} + \varphi_v(k_{bf}-k_p)}\right]\left[\frac{\ldots - (n-1)\varphi_v(k_{bf}-k_p)}{k_p + (n-1)k_{bf} + \varphi_v(k_{bf}-k_p)}\right] \qquad (۱۵)$$

UNCORRECTED PROOF

اندازه گیری و پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت رسانایی نانوسیالات بسیار مورد توجه محققین بوده که در مطالعه‌ی مرشد و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۳۲] گزارشی از آن آورده شده است. مکس ول [۳۷] در سال ۱۸۸۱ مدلی برای نانوسیال با درصدحجمی کم و با ذرات کروی با سایز یکسان معرفی کرد. همیلتن و کروسر در سال ۱۹۶۲ این مدل را برای ذرات غیر کروی با تعریف فاکتور شکل $n = 3/\psi$ گسترش دادند. که برای این مطالعه مقدار ψ برابر با ۱ است. k_p ضریب رسانایی گرمایی ذره و k_{bf} ضریب رسانایی گرمایی سیال پایه است.[۳۸ و ۳۹]

ویسکوزیته دینامیکی

$$\mu_{nf} = \mu \times \left(\begin{array}{l} 1 + 2.5\varphi_v + 10.05\varphi_v^2 \\ +0.00273exp(16.6\varphi_v) \end{array}\right) \quad (۱۶)$$

شبیه سازی و حل عددی

کارایی یک مبدل حرارتی با جریان مخالف با رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود:[۲۴]

$$E = \frac{1 - \exp\left(-NTU(1 - C_r)\right)}{1 - C_r \exp\left(-NTU(1 - C_r)\right)} \quad (۱۷)$$

و C_r نسبت بین حداقل و حداکثر ظرفیت حرارتی است.

با توجه به اینکه مبرد در خارج از لوله در حال تبخیر است، Cr = 0، بنابراین، کارایی به صورت رابطه ۱۸ ساده می‌شود:

$$E = \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{h,i} - T_{c,i}} \quad (۱۸)$$

ضریب انتقال حرارت کلی U را می‌توان با استفاده از رویکرد ε-NTU به صورت رابطه ۱۹ بدست آورد:

$$NTU = \frac{UA}{\dot{m}\, Cp} \quad (۱۹)$$

که در آن A سطح انتقال حرارت است.

با صرف نظر از مقاومت در برابر رسوب و تماس، ضریب انتقال حرارت کلی با معادله ۲۰ به مقاومت حرارتی کل مربوط می‌شود:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + R_w + \frac{1}{h_e} \quad (۲۰)$$

که در آن مقاومت حرارتی دیواره لوله R_w به شرح معادله ۲۱ است:

$$R_w = \frac{d_i}{2k_w} \ln \frac{d_e}{d_i} \quad (۲۱)$$

که در آن d_i و d_e به ترتیب قطر داخلی و خارجی لوله داخلی هستند و k_w رسانایی حرارتی داخلی لوله است.

هدف از مدل‌سازی این قسمت، شبیه‌سازی عملکرد حرارتی یک نانوسیال در جریان یک مبدل حرارتی در یک کارخانه تبرید بود. از آنجایی که انتقال حرارت و هیدرودینامیک (افت فشار) بحرانی ترین عوامل هستند، می‌توان آن‌ها را از طریق یک رویکرد انرژی جهانی با استفاده از معیار ارزیابی عملکرد (PEC) مقایسه کرد. این معیار به عنوان نسبت جریان گرما به توان پمپاژ مورد نیاز در سیستم تعریف می‌شود: [۴۰]

$$PEC = \frac{\dot{m}Cp(T_o - T_i)}{\dot{v}\Delta P} \quad (۲۲)$$

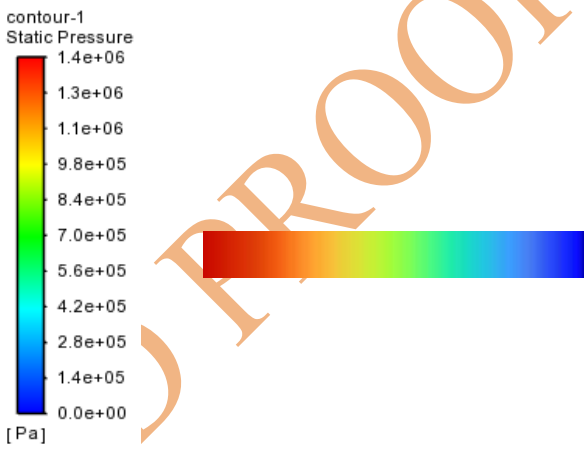
که در آن $\dot{m}$ دبی جرمی، $\dot{v}$ دبی حجمی، T_i و T_o به ترتیب دماهای ورودی و خروجی و ΔP افت فشار است. این رویکرد مزایای عملی استفاده از نانوسیال‌ها را با در نظر گرفتن نسبت تعادل انرژی مرتبط با افزایش انتقال حرارت و تلفات توان پمپاژ در اواپراتور تبرید ارزیابی می‌کند. نسبت PEC بالاتر از ۱ نشان می‌دهد که افزایش انتقال حرارت با وجود اتلاف انرژی مفید است. فرم‌های معادل قبلاً برای مقایسه عملکردهای هیدرودینامیکی و انتقال حرارت نانوسیالات اعمال شده است.

۴- نتایج وبحث

ابتدا مساله برای سیال پایه مخلوط اتیلن گلیکول / آب (EG 50/50) بدون ذرات شبیه سازی شده و نتایج افت فشار و h برای رینولدز ۴۰۰۰ به دست آمده است. سپس نانوذرات Al_2O_3، TiO_2+Al_2O_3، SiO_2، Co و CuO در بازه درصد حجمی ۱ تا ۴۰ درصد به منظور بررسی و تعیین مقدار بهینه به سیال پایه افزوده می شود.

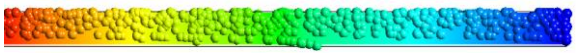
UNCORRECTED PROOF

در شکل **۲** توزیع فشاردر راستای x لوله برای کسر حجمی ۰/۰۲ آلمینیوم اکسید در رینولدز ۴۰۰۰ نشان داده شده‌است. که با استفاده از این شکل می‌توان دریافت که بیشترین مقدار فشار حدود ۱۴۰۰ کیلوپاسکال در ورودی است. و کمترین مقدار فشار صفر در خروجی است. در شکل **۳** مسیر ذرات در طول لوله بر حسب فشار قابل مشاهده است.



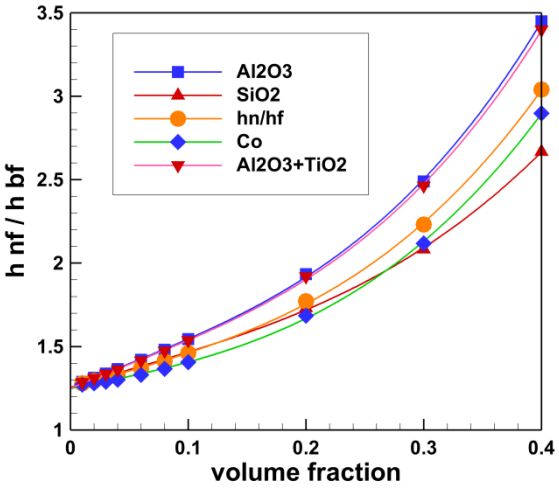
شکل ۲- توزیع فشار در راستای x برای کسر حجمی ۰/۰۲ آلمینیوم اکسید در رینولدز ۴۰۰۰

در شکل **۳** مسیر ذره بر حسب فشار نشان داده شده است. همان طور که از شکل مشخص است در طول لوله فشار کاهش یافته است.



شکل ۳- مسیر ذرات برحسب فشار در راستای x

در شکل **۴** می توان نسبت h نانوسیال بر سیال پایه را برحسب درصد حجمی برای رینولدز ۴۰۰۰ مشاهده کرد. برای تمامی ذرات با افزایش درصد حجمی این نسبت افزایش می یابد. این افزایش برای بازه ۰/۱ درصد حجمی به طور تقریبی برای همه یکسان است اما با افزایش درصد حجمی تفاوت چشمگیری بین شیب افزایشی نسبت h مخصوصا برای ذرات Al_2O_3، $TiO_2+Al_2O_3$ مشاهده می‌شود.



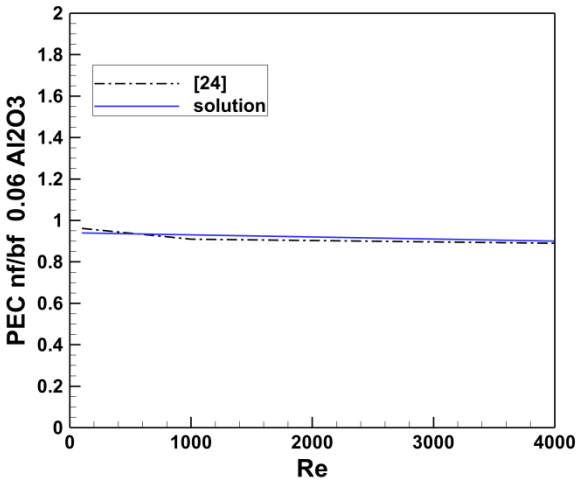
شکل ۴- نمودار نسبت ضریب انتقال حرارت نانوسیال به ضریب انتقال حرارت سیال پایه برحسب درصد حجمی نانوذره برای رینولدز ۴۰۰۰ برای ذرات Al_2O_3، $TiO_2+Al_2O_3$، SiO_2، Co و CuO

در شکل **۵** نسبت PEC نانوسیال به سیال پایه را برای ذره Al_2O_3 با درصد حجمی ۶ درصد برای رینولدز ۱۰۰ تا ۴۰۰۰ مشاهده می شود. به منظور اعتبار سنجی مدل‌سازی این قسمت، مقادیر مربوط به شبیه سازی با مقادیر تجربی مقایسه شد. همان طور که از شکل می‌توان دریافت، مقدار نسبت PEC نانوسیال به سیال پایه در هر سه رژیم آرام، انتقالی و گذرا یک روند تقریبا خطی دارد.

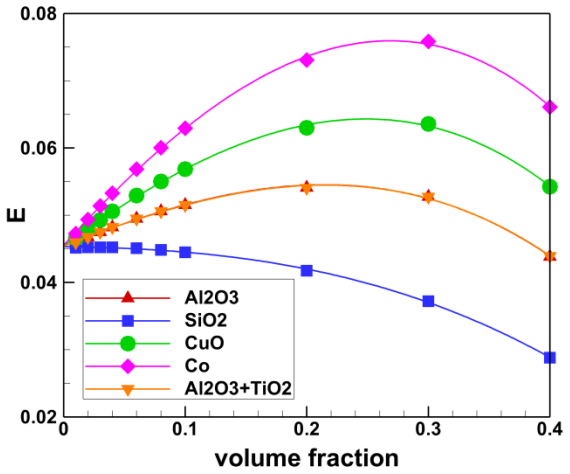
در شکل **۶** مقادیر مربوط به E را بر حسب درصد حجمی برای پنج نانوسیال نام برده در رینولدز ۴۰۰۰ (جریان آشفته) می‌توان مشاهده کرد. مقدار کارایی برای همه نانوسیالات انتخابی به جز آب-اتیلن گلیکول/ SiO_2 با افزایش درصد حجمی تا مقدار ماکزیمی افزایش یافته سپس کاهش می‌یابد. برای نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ Co ماکزیمم مقدار کارایی برای درصد حجمی ۰/۳ درصد است و در بین ذرات بررسی شده بیشترین مقدار کارایی را دارد. بعد از آن بیشترین مقدار برای آب-اتیلن گلیکول/ CuO است که شیب افزایش مقدار کارایی بر حسب درصد حجمی برای آن کاهش یافته و میتوان در بازه محدود درصد حجمی بین ۰/۲۵ الی ۰/۲۹ بیشترین مقدار کارایی را

UNCORRECTED PROOF

دانست. بعد از آن نمودار نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/Al_2O_3 قرار گرفته است که در آن شیب افزایش E کاهش یافته و بازه مقدار درصد حجمی مخصوص به کارایی ماکزیمم بیشتر است، به طوری که در بازه ۰/۱۹ الی ۰/۲۹ بیشترین مقدار کارایی را دارد. در آخر نمودار مربوط به نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/SiO_2 است که روندی متفاوت به نسبت چهار نانوسیال دیگر دارد. ابتدا با افزایش در صد حجمی تا ۰/۸ روندی ثابت دارد و سپس با افزایش درصد حجمی مقدار کارایی کاهش می‌یابد.

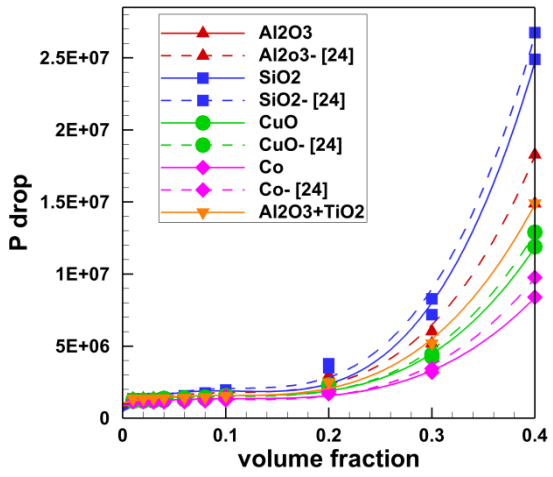


شکل ۵- نمودار نسبت PEC نانوسیال به سیال پایه بر حسب رینولدز برای ذره Al_2O_3 با درصد حجمی ۶ [۲۴]



شکل ۶- کارایی اواپراتور برحسب درصد حجمی نانوذره برای رینولدز ۴۰۰۰ برای ذرات Al_2O_3، TiO_2+Al_2O_3، SiO_2، Co و CuO

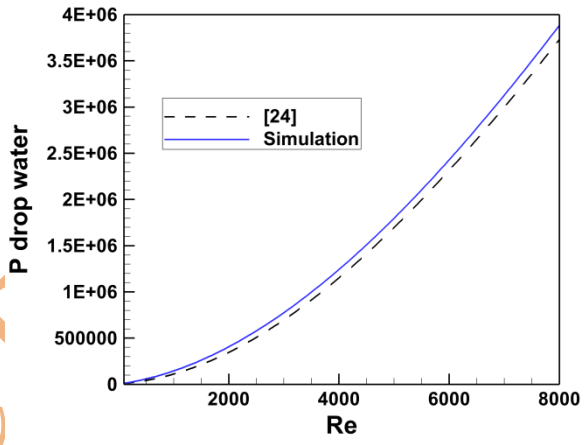
افزایش مقدار E بر حسب درصد حجمی برای دمای ورودی ثابت سیال و مبرد به معنی کاهش دمای خروجی سیال با افزاش درصدحجمی نانوذره و افزایش انتقال حرارت در اواپراتور با هندسه یکسان است. اما افزایش ناوذرات در کنار فایده بهبود انتقال حرارت سبب افزایش افت فشار نیز می‌شود، که می‌توان آن را در شکل **۷** که مقدار افت فشار برای پنج نانوسیال مورد بررسی برحسب درصد حجمی برای رینولدز ۴۰۰۰ نشان داده شده است، دریافت کرد. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با مقادیر تئوری حاصل از رابطه اعتبار سنجی شده و بیشترین خطای آن مربوط به نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ Al_2O_3 است که برای درصد حجمی ۰/۴ با مقدار ۱۹ درصد است. بیشترین افت فشار مربوط به آب-اتیلن گلیکول/ SiO_2 است. نکته‌ای که می‌توان از نمودار دریافت کرد یکسان بودن اندازه افت فشار تا درصد حجمی ۰/۶ برای پنج ذره مورد بررسی است. بعد از درصد حجمی ۰/۱ به تدریج با افزایش درصد حجمی مقدار افت فشار افزایش یافته به طوری که شیب این افزایش در بازه ۰/۳ تا ۰/۴ برای تمامی ذرات به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد.



شکل ۷- افت فشار نانوسیال برحسب درصد حجمی نانوذره برای رینولدز ۴۰۰۰ برای ذرات Al_2O_3، TiO_2+Al_2O_3، SiO_2، Co و CuO [۲۴]

در شکل ۸ میزان افت فشار برای سیال پایه بر حسب رینولدز نشان داده شده است. اعتبار سنجی نتایج حاصل از شبیه سازی با مقادیر تجربی انجام شده و بیشترین خطای آن برای رینولدز ۸۰۰۰ برابر با ۴ درصد است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز مقدار افت فشار در داخل لوله افزایش می‌یابد.

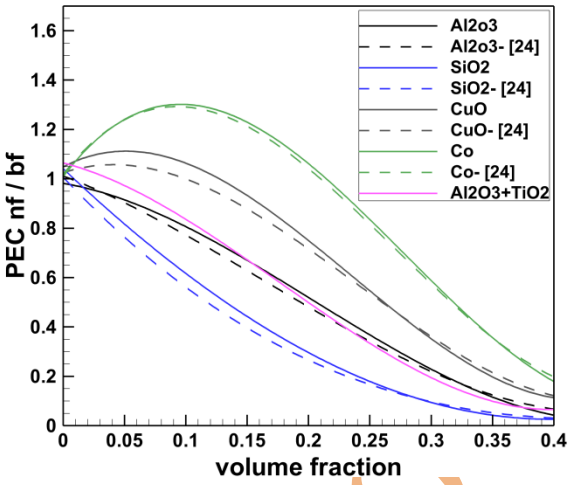
برای مقایسه افزایش انتقال حرارت ناشی از افزودن نانوذرات به سیال پایه و افزایش کار پمپ جهت جبران افزایش افت فشار ناشی از آن عبارت PEC تعریف می‌شود که نسبت انتقال حرارت به توان پمپ مورد نیاز است.



شکل ۸- افت فشار سیال پایه برحسب عددرینولدز و مقایسه با مقدار تجربی [۲۴]

اگر نسبت این عبارت را برای نانوسیال و سیال پایه بدست آوریم می‌توان دریافت با افزایش چه مقدار ذره می‌توان مقدار مناسب و بهینه‌ای داشت به طوری که افزایش انتقال حرارت ناشی از افزودن نانوذره بر افت فشار و افزایش عملکرد پمپ غلبه کند. مقدار مساوی با یک این نسبت گویای برابری نتیجه نهایی مقایسه قدرت افت فشار و انتقال حرارت نانوسیال و سیال پایه است. مقدار بزرگتر از یک این نسبت نشان دهنده غلبه بهبود کارکرد حرارتی بر کار پمپ اواپراتور در صورت استفاده از نانوسیال است. مقدار کمتر از یک آن نشان دهنده غلبه افت فشار و به تبع آن افزایش کار پمپ خواهد بود که مطلوب نیست. در شکل ۹ بیشترین مقدار نسبت PEC نانوسیال به سیال پایه برای نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ Co است. که مقدار بیشینه آن برابر با ۱/۳ برای درصد حجمی ۰/۱ است و روند آن ابتدا صعودی و بعد از درصد حجمی ۰/۱ با افزایش ذرات بیشتر به سیال پایه، افت فشار بیشتر می‌شود و از نظر کار پمپ به نسبت انتقال حرارتی که دارد به صرفه نیست. بعد از آن آب-اتیلن گلیکول/ CuO با مقدار بیشنه ۱/۱ برای کسر حجمی ۰/۰۸ در رتبه دوم قرار گرفته است، به طوری که تا کسر حجمی مذکور با شیب بسیار کمتری از آب-اتیلن گلیکول/ Co با افزایش بیشتر ذره، افزایش می‌یابد و بعد از آن در کسر حجمی ۰/۴ مقدار نسبت به مقدار کمینه خود یعنی ۰/۱ می‌رسد. بعد از آن نانوسیال ترکیبی آب-اتیلن گلیکول/ TiO_2+Al_2O_3 در جایگاه سوم قرار می‌گیرد و در بازه کسر حجمی صفر تا ۰/۰۹ دارای مقدار نسبت بیشتری از نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ Al_2O_3 است که می‌تواند دلیل خوبی برای استفاده از نانوذرات ترکیبی باشد. ولی در کسر حجمی بالاتر نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ Al_2O_3 دارای مقدار نسبت بیشتری به مقدار نوع ترکیبی است (اما به دلیل بحث رسوب گذاری در عمل از این بازه درصد حجمی استفاده نمی‌شود). آب-اتیلن گلیکول/ TiO_2+Al_2O_3 در روند خود به مقدار بیشینه نسبت با مقدار ۱/۱ در کسر حجمی ۰/۰۱ می رسد و بعد از آن روندی نزولی دارد و در کسر حجمی ۰/۰۴ مقدار آن برابر ۱ می‌شود و بعد از آن با افزایش کسر حجمی مقدار نسبت کاهش می‌یابد. برای نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ Al_2O_3 تا درصد حجمی ۳ درصد نسبت PEC نانوسیال به سیال پایه دارای مقدار تقریبا ثابت نزدیک ۱ بوده و بعد از آن روند نزولی خود را آغاز می‌کند. آخرین نمودار مربوط به نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/SiO_2 است که بر خلاف سایر نانوسیال‌ها از ابتدا روندی نزولی دارد و بر این اساس استفاده از آن در مبدل حرارتی که هدف افزایش حرارت جهت افزایش انتقال حرارت است توصیه نمی‌شود، زیرا با افزایش افت فشار و افزایش کار پمپ، انتقال حرارت دلخواهی را تامین نمی‌کند.

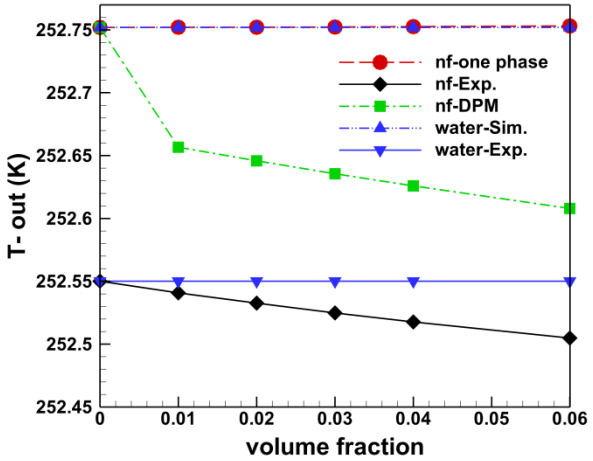
UNCORRECTED PROOF



شکل ۹- نسبت PEC_{bf}/ PEC_{nf} برحسب درصد حجمی نانوذره برای ذرات Al_2O_3، TiO_2+Al_2O_3، SiO_2، Co و CuO [۲۴]

در شکل ۱۰ مقایسه‌ای بین نتایج دمای خروجی برای آب و نانوسیال با دو روش تک‌فاز و اویلری-لاگرانژی با مقادیر تجربی صورت گرفته است. همان طور که از شکل مشخص با به کار گیری روش اویلری-لاگرانژی درصد خطای حاصل برای دمای خروجی نانوسیال نصف شده است و روند آن با افزایش کسر حجمی کاملا مشابه نمونه تجربی می‌باشد. در روش تک‌فاز مشاهده می‌شود که با افزایش کسر حجمی دمای خروجی تغییر چندانی نداشته در صورتی که با افزایش کسر حجمی ذره، دمای خروجی اواپراتور کاهش می‌یابد. بنابراین روش تک‌فاز در این بررسی روش مناسبی نمی‌باشد و دارای درصد خطای زیادی است.

در ادامه به منظور کاهش درصد خطا داده های حاصل از شبیه‌سازی حاصل از فلوئنت برای بازه عدد رینولدز بین ۱۰۰ تا ۴۰۰۰ به ازای کسر حجمی صفر الی ۰/۰۸ برای سیال و نانوسیالات نام برده شده در این مطالعه از روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است.

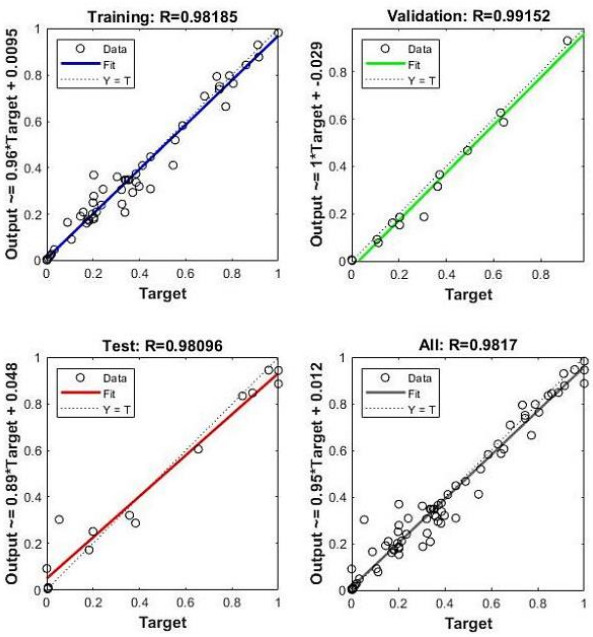


شکل ۱۰- نمودار مقایسه دمای خروجی برای آب و نانوسیال با دو روش تک‌فاز و اویلری-لاگرانژی با مقادیر تجربی [۲۴]

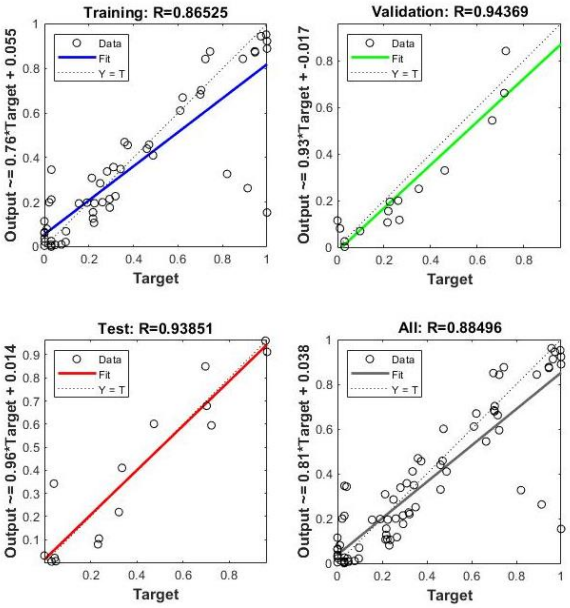
سپس با استفاده از روش بهینه سازی گرگ خاکستری برای هر نانوسیال بهترین کسرحجمی و عدد رینولدز که به ازای افزودن ذرات پایه کمترین افت فشار و بیشترین نسبت PEC را داشته باشد مشخص گردید.

برای نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ Al_2O_3 همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود معادلاتی بر حسب داده‌های شبیه‌سازی فلوئنت توسط شبکه عصبی مصنوعی در سه مرحله آموزش و یادگیری و تست ارائه شده است که با استفاده از شکل ۱۲ می‌توان از درصد خطای کم عملکرد حاضر اطمینان حاصل کرد. و به طور نمونه‌های دیگر از روند شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون و عملکرد شبکه به ترتیب برای آب-اتیلن گلیکول/ CO و آب-اتیلن گلیکول/ CuO را در شکل‌های ۱۳ الی ۱۶ نیز می‌توان مشاهده نمود.

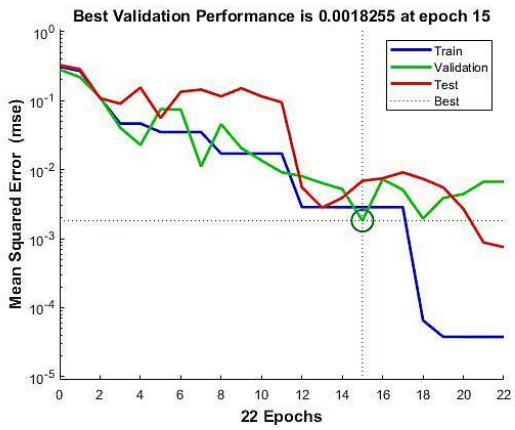
UNCORRECTED PROOF



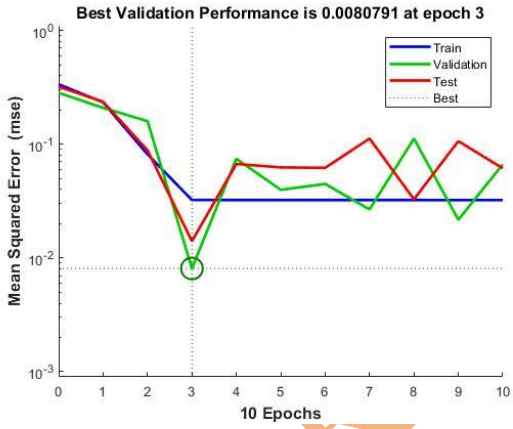
شکل ۱۱- نمودار رگرسیون آموزشی برای نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ Al_2O_3



شکل ۱۳- نمودار رگرسیون آموزشی برای نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ CO

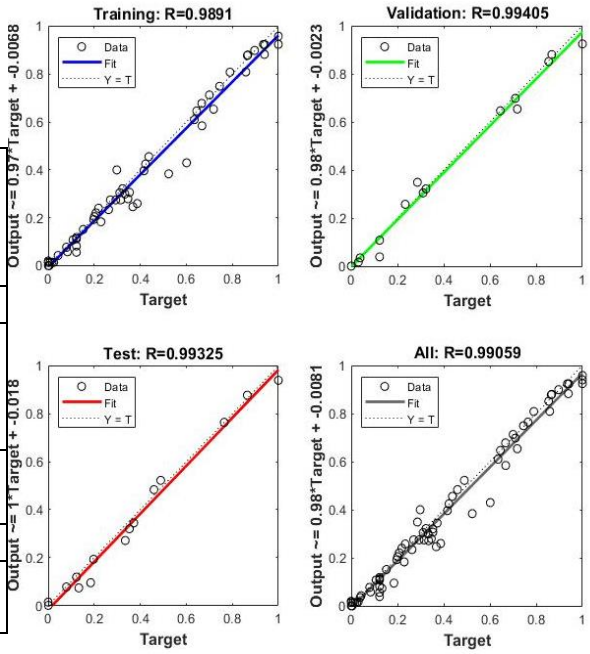


شکل ۱۲- نمودار عملکرد شبکه عصبی برای داده‌های نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ Al_2O_3

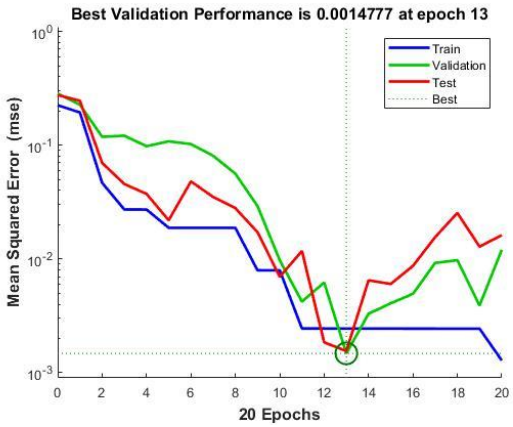


شکل ۱۴- نمودار عملکرد شبکه عصبی برای داده‌های نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ CO

UNCORRECTED



شکل ۱۵- نمودار رگرسیون آموزشی برای نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ CuO



شکل ۱۶- نمودار عملکرد شبکه عصبی برای داده‌های نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ CuO

با استفاده از داده های حاصل از شبکه عصبی توسط روش بهینه سازی گرگ خاکستری دریافت کرد که به ازای کدام کسر حجمی و رینولدز ورودی بیشترین نسبت PEC و مقدار E و کمترین افت فشار را داریم که برای هر ذره در جدول ۶ می‌توان مشاهده نمود:

جدول ۶- کسر حجمی و افت فشاری که منجر به کارکرد بهینه افزودن ذرات نانو به سیال پایه می شود.

نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/	Al_2O_3	Al2O3 +TiO2	Co	CuO	SiO_2
Re	1684.9	1326.5	4000	3180	108
کسر حجمی (%)	0.03	0.025	0.08	0.06	0.00016
ΔP $(\times 10^5)$	2.5	1.9	4.6	4.1	0.12
PEC	1.26	1.14	2.2	1.8	0.63
E	0.036	0.029	0.10	0.07	0.0069

همان طور که از نتایج نشان داده شده در جدول مشاهده می‌شود برای داشتن بیشترین مقدار نسبت PEC که برابر با ۲/۲ است باید از ذره CO در رینولدز ۴۰۰۰ و کسر حجمی ۰/۰۸ استفاده کرد. و بعد از آن از ذره CuO که دارای نسبت PEC برابر با ۱/۸ است با کسر حجمی ۰/۰۶ در رینولدز ۳۱۸۰ استفاده کرد. به دلیل داشتن نسبت PEC کمتر از یک حتی در حالت بهینه استفاده از ذره SiO_2 پیشنهاد نمی‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

اضافه کردن نانوذره به سیال پایه باعث افت فشار بیشتر جریان داخل لوله اواپراتور می‌شود که به تبع آن کار پمپ اواپراتور بیشتر شده و از نظر اقتصادی به صرفه نمی‌باشد. اما استفاده از ذره در بهبود خواص حرارتی سیال بسیار اثر گذار است و همان طور که در مطالعه قبل عنوان شد باعث افزایش عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت می‌شود. بنابراین از نظر مهندسی نیاز به یک نقطه یا بازه بهینه احساس می‌شود که در آن این بهبود انتقال حرارت بر افت فشار غلبه کند و استفاده از نانوذرات را به صرفه کند. با تعریف نسبت PEC می توان به آن مقدار بهینه دست یافت. در این مطالعه برای پنج نانوذره Al_2O_3، TiO_2+Al_2O_3،

UNCORRECTED

SiO_2، Co و CuO با سیال پایه آب-اتیلن گلیکول این بررسی انجام شده که یکی از آن‌ها نانوذره ترکیبی $TiO_2+Al_2O_3$ است که نتایج نشان داد استفاده از این ترکیب در بازه درصد حجمی کمتر از ۱ درصد بازخورد بهتری نسبت به نانوسیال با ذرات تک جنس دارد. برای نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ Co این بازه درصد حجمی بهینه برابر با بین ۰/۰۱ تا ۰/۲ درصد و برای آب-اتیلن گلیکول/ CuO برابر با ۰/۰۱ تا ۰/۱۴ و برای نانوذره ترکیبی آب-اتیلن گلیکول/ $TiO_2+Al_2O_3$ برابر ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ ، برای آب-اتیلن گلیکول/ Al_2O_3 تا مقدار ۰/۰۳ درصد حجمی است. نانوسیال آب-اتیلن گلیکول/ SiO_2 همواره نسبت PEC نانوسیال و سیال کمتر از ۱ دارد و از این نظر استفاده از آن در مبدل حرارتی به صرفه نمی‌باشد.

برای حالت بهینه، برای داشتن بیشترین مقدار نسبت PEC که برابر با ۲/۲ است باید از ذره CO در رینولدز ۴۰۰۰ و کسر حجمی ۰/۰۸ استفاده کرد.

مراجع

[1] Webb, R.L. Principles of Enhanced Heat Transfer; John Wiley&Sons, Inc.: New York, NY, USA, 1994.

[2] Mousa, M.H.; Miljkovic, N.; Nawaz, K. Review of heat transfer enhancement techniques for single phase flows. Renew. Sust.Energ. Rev. 2021, 137, 110566.

[3] Gupta, M.; Singh, V.; Kumar, R.; Said, Z. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications.
Renew. Sust. Energ. Rev. 2017, 74, 638–670.

[4] Angayarkanni, S.A.; Philip, J. Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments. Adv. Colloid Interface Sci. 2015,
225, 146–176.

[5] Ilyas, S.U.; Pendyala, R.; Marneni, N. Stability of nanofluids. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering. In Engineer-ing Applications of Nanotechnology. From Energy to Drug Delivery; Korada, V.S., Hamid, N.H.B., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017. Available online: https://www.springerprofessional.de/engineering-applications-of-nanotechnology/11992454 (accessed on 1 July 2022).

[6] Abdullah, M.; Malik, S.R.; Iqbal, M.H.; Sajid, M.M.; Shad, N.A.; Hussain, S.Z.; Razzaq, W.; Javed,Y.Sedimentation and stabilization of nano-fluids with dispersant. Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp. 2018, 554, 86–92.

[7] Kamyar, A.; Saidur, R.; Hasanuzzaman, M. Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) for nanofluids. Int. J. Heat Mass
Transf. 2012, 55, 4104–4115.

[8] Kumar, S.; Chakrabarti, S. A Review: Enhancement of Heat Transfer with Nanofluids. Int. J. Eng. Res. Technol. 2014, 3, 549–557.

[9] Kakaç, S.; Pramuanjaroenkij, A. Single-phase and two-phase treatments of convective heat transfer enhancement with nanofluids-A state-of-the-art review. Int. J. Therm. Sci. 2016, 100, 75–97.

[10] Mahian, O.; Kolsi, L.; Amani, M.; Estellé, P.; Ahmadi, G.; Kleinstreuer, C.; Marshall, J.S.; Siavashi, M.; Taylor, R.A.;Niazmad, H.; et al. Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-Part I: Fundamentals and theory. Phys.Rep.2019, 790, 1–48.

UNCORRECTED PROOF

[11] Mahian, O.; Kolsi, L.; Amani, M.; Estellé, P.; Ahmadi, G.; Kleinstreuer, C.; Marshall, J.S.; aylor, R.A.; Abu-Nada, E.;Rashidi, S.; et al. Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-Part II: Applications. Phys. Rep. 2019,791,1–59.

[12] Boertz, H.; Baars, A.J.; Cie´sli´nski, J.T.; Smolen, S. Numerical Study of Turbulent Flow and Heat Transfer of Nanofluids in Pipes. Heat Transf. Eng. 2018, 39, 241–251.

[13] Kristiawan, B.; Santoso, B.; Wijayanta, A.T.; Aziz, M.; Miyazaki, T. Heat Transfer Enhancement of TiO2/Water Nanofluid at Laminar and Turbulent Flows: A Numerical Approach for Evaluating the Effect of Nanoparticle Loadings. Energies 2018, 11, 1584.

[14] Sajjad, M.; Kamran, M.S.; Shaukat, R.; Zeinelabdeen, M.I.M. Numerical investigation of laminar convective heat transfer of graphene oxide/ethylene glycol-water nanofluids in a horizontal tube. Eng. Sci. Technol. Int. J. 2018, 21, 727–735.

[15] Minea, A.A.; Buonomo, B.; Burggraf, J.; Ercole, D.; Karpaiya, K.R.; Di Pasqua, A.; Sekrani, G.; Steffens, J.; Tibaut, J.; Wichmann, N.; et al. NanoRound: A benchmark study on the numerical approach in nanofluids' simulation. Int. Commun. Heat Mass Transf. 2019, 108, 104292.

[16] Onyiriuka, E.J.; Ikponmwoba, E.A.A. Numerical investigation of mango leaves-water nanofluid under laminar flow regime. Niger. J. Technol. 2019, 38, 348–354.

[17] Jamali, M.; Toghraie, D. Investigation of heat transfer characteristics in the developing and the developed flow of nanofluid inside a tube with different entrances in the transition regime. J. Therm. Anal. Calorim. 2020, 139, 685–699.

[18] Fadodun, O.G.; Amosun, A.A.; Salau, A.O.; Olaloye, D.O.; Ogundeji, J.A.; Ibitoye, F.I.; Balogun, F.A. Numerical investigation and sensitivity analysis of turbulent heat transfer and pressure drop of Al2O3/H2O nanofluid in straight pipe using response surface methodology. Arch. Thermodyn. 2020, 41, 3–30.

[19] Saeed, F.R.; Al-Dulaimi, M.A. Numerical investigation for convective heat transfer of nanofluid laminar flow inside a circular pipe by applying various models. Arch. Thermodyn. 2021, 42, 71–95.

[20] Uribe, S.; Zouli, N.; Cordero, M.E.; Al-Dahhan, M. Development and validation of a mathematical model to predict the thermal behaviour of nanofluids. Heat Mass Transf. 2021, 57, 93–110.

[21] Taskesen, E.; Tekir, M.; Gedik, E.; Arslan, K. Numerical investigation of laminar forced convection and entropy generation of Fe3O4/water nanofluids in different cross-sectioned channel geometries. J. Therm. Eng. 2021, 7, 1752–1767.

[22] Yildiz, M.; Aktürk, A. Numerical Investigation on Heat Transfer and Hydraulic Performance of Al2O3–Water Nanofluid as a Function of Reynolds Number and Flow Velocity. Int. J. Heat Mass Transf. 2021, 11, 535–547.

[23] Zhang, X.; Li, J. A review of uncertainties in the study of heat transfer properties of nanofluids. Heat Mass Transf. 2022, 1–33.

[24] Ndoye, F.T., Schalbart, P., Leducq, D., Alvarez, G., Numerical study of energy performance of nanofluids used in secondary loops of refrigeration systems, International Journal of Refrigeration (2014), doi:10.1016 /j.ijrefrig .2014.10.011.

[25] Mohammad Hemmat Esfe, Designing an artificial neural network using radial basis function (RBF-ANN) to model thermal conductivity of ethylene, 2016.

[26] Mohammad Hemmat Esfe, Ali Akbar Abbasian Arani , An experimental determination and accurate prediction of dynamic viscosity of MWCNT(%40)-SiO2(%60)/5W50 nano-lubricant. The address for the

UNCORRECTED PROOF

corresponding author was captured as affiliation for all authors. Please check if appropriate. Molliq(2017), doi:10.1016/j.molliq.2018.02.095 glycol–water-based TiO2 nanofluids

[27] Mohammad Hemmat Esfe, Hossein Rostamian, Mohammad Reza Sarlak, 2017, A novel study on rheological behavior of ZnO-MWCNT/10w40 nanofluid for automotive engines, Journal of Molecular Liquids 254 (2018) 406–413.

[28] Mohammad Hemmat Esfe , Soheyl Alidoust, Modeling and Precise Prediction of Thermophysical Attributes of Water/EG Blend-Based CNT Nanofluids by NSGA-II Using ANN and RSM, Arabian Journal for Science and Engineering, 2020.

[29] Goutam, S., and Paul, M. C. (2014) Discrete phase approach for nanofluids flow in pipe. In: Second International Conference on Advances In Civil, Structural and Mechanical Engineering- CSM 2014, 16-17 Nov 2014, Birmingham, UK.

[30] R. Deepak Selvakumar, S. Dhinakaran. Heat transfer and particle migration in nanofluid flow around a circular bluff body using a two-way coupled Eulerian-Lagrangian approach. International Journal of Heat and Mass Transfer 115 (2017) 282–293

[31] M. Bovand, S. Rashidi, G. Ahmadi, J.A. Esfahani, Effects of trap and reflect particle boundary conditions on particle transport and convective heat transfer for duct flow-A two-way coupling of EulerianLagrangian Model, Applied Thermal Engineering (2016), doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng .2016.07.124

[32] Murshed, S. M. S., Leong, K. C. and Yang, C.. "Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids – A critical review." Applied Thermal Engineering 28(17–18): 2109-2125. 2018.

[33] Zakaria Lafdaili, Sakina El-Hamdani, Abdelaziz Bendou, Karim Limam, “Numerical study of the turbulent natural convection of nanofluids in a partially heated cubic cavity”, Thermal Science 25(00):57-57, 2021.

[34] Melinder, A. Properties of Secondary Working Fluids for Indirect Systems. Paris, France, International Institute of Refrigeration.2010

[35] Vajjha, R. S., Das, D. K. and Mahagaonkar, B. M. "Density Measurement of Different Nanofluids and Their Comparison With Theory."Petroleum Science and Technology 27(6): 612-624. 2009.

[36] Murshed, S. M. S. , "Determination of effective specific heat of nanofluids." Journal of Experimental Nanoscience 6(5): 539-546, 2011.

[37] Maxwell, J. C. A treatise on Electricity and Magnetism. Oxford,Clarendon Press. 1881.

[38] Hamilton, R. L. and Crosser, O. K.. "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems." I&EC Fund 1(3): 187-191. 1962.

[39] Jung, J.-Y., Cho, C., Lee, W. H. and Kang, Y. T. "Thermal conductivity measurement and characterization of binary nanofluids." International Journal of Heat and Mass Transfer 54(9–10): 1728-1733.2011.

[40] Ferrouillat, S., Bontemps, A., Ribeiro, J.-P., Gruss, J.-A. and Soriano, O. "Hydraulic and heat transfer study of SiO2/water nanofluids in horizontal tubes with imposed wall temperature boundary conditions." *International Journal of Heat and Fluid Flow* 32(2): 424-439. 2011.

UNCORRECTED PROOF

Determining the optimal range of volume fraction of nanofluid in an evaporator tube by Eulerian-Lagrangian method

Atie Farrokh[1], Miralam Mahdi[2]

1. Mechanical Engineering Department, Shahid Rajaee Teacher Training University.
2. Mechanical Engineering Department, Shahid Rajaee Teacher Training University

*Corresponding Author: atie.farrokh@yahoo.com - M.mahdi@sru.ac.ir

ARTICLE INFO

Keywords:
. Evaporator, Eulerian-Lagrangian, nanofluid

ABSTRACT

The addition of nanoparticles to the base fluid has adverse consequences, including a greater pressure drop than the base fluid, which leads to an increase in pump work, which is not economical. To improve the efficiency, we must look for a suitable range of particle volume fraction so that by adding this amount to the base fluid, the increase in heat transfer is greater than the increase in pressure drop. In this study, by introducing the criterion ratio of PEC performance evaluation, this suitable range of volume fraction for several types of individual particles and mixed particles in a part of an evaporator tube has been determined by numerical calculations and Eulerian-Lagrangian approach. The results showed that the use of mixed nanoparticles in the volume percentage range of less than 1% has better feedback than the nanofluid with single type particles. For water-ethylene glycol/Co nanofluid, this optimal volume percentage range is between 0.01 and 0.2 percent, and for water-ethylene glycol/CuO it is 0.01 to 0.14, and for the combined nanoparticle water-ethylene glycol/ Al_2O_3+TiO_2 is equal to 0.01 to 0.04, for water-ethylene glycol/Al_2O_3 up to 0.03 percent by volume. Water-ethylene glycol/SiO_2 nanofluid always has a PEC ratio of nanofluid and fluid less than 1, and from this point of view, its use in heat exchanger is not economical

UNCORRECTED PROOF