*شبیه سازی CFD انتقال حرارت نانوسیال TiO2/Water با کسر حجمی های مختلف در میکروکانال با سطح مقطع Hexagonal*

*سجاد رسام1، حامد صداقت زادگان اصفهانی1*

1. *1 دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)*

تاریخ دریافت: 1400/09/12 تاریخ پذیرش: 1400/10/13

**چکیده**

*اهمیت و نقش انتقال حرارت در علوم مهندسی در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. تلاش های زیادی برای ساخت دستگاه ها یا انجام روش هایی صورت گرفته که صرفه جویی در مصرف سوخت، انرژی و مواد اولیه از مهم ترین اهداف آنها به شمار می رود. افزایش انتقال حرارت همیشه یکی از مسئل مهم و مورد بحث در صنعت بوده است. این افزایش انتقال حرارت در اکثر کاربرد های سرمایشی وگرمایشی، مخصوصا در ابعاد کوچک، اخیرا پر اهمیت است. روش های زیادی در مورد افزایش انتقال**حرارت در این کاربردهای سرمایشی و گرمایشی وجود دارد. برای افزایش انتقال حرارتف می توان از تغییرات هندسه جریان، شرایط مرزی و افزایش هدایت حرارتی سیال استفاده کرد. به خاطر محدودیت های هندسه**جریان و شرایط مرزی، بهترین گزینه برای محققان افزایش هدایت حرارتی سیال می باشد به همین علت این روش به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته شده است. نانو سیالات با مخلوط کردن یک سیال پایه و نانو ذرات فلزی و یا غیر فلزی تعریف می شوند. رسانش گرمایی نانو ذرات معمولا از سیال پایه که در آن قرار می گیرند بیشتر است و اندازه های ذرات معلق در آن معمولا کمتر از 100 نانومتر هستند. در این مقاله سعی شده است تا با بیان مفهوم فرآیندهای بهبود انتقال حرارتی به عنوان یک استراتژی برای شبیه سازی دقیق تر مسائل پیچیده از لحاظ مقیاس های مختلف مکانی و زمانی، برخی از روش های توانمند در شبیه سازی فرآیندها، همراه با*

**واژگان کلیدی:** *بهبود انتقال حرارت، میکروکانال، نانوسیال، شبیه سازی CFD*

**مقدمه**

*اهمیت و نقش انتقال حرارت در علوم مهندسی در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. تلاش های زیادی برای ساخت دستگاه ها یا انجام روش هایی صورت گرفته که صرفه جویی در مصرف سوخت، انرژی و مواد اولیه از مهم ترین اهداف آنها به شمار می رود. نانو سیالات برای اولین بار توسط چوی با مخلوط کردن یک سیال پایه و نانو ذرات فلزی و یا غیر فلزی طراحی شد. نانو ذرات رسانش گرمایی شان معمولا از سیال پایه که در آن قرار می گیرند بیشتر است و اندازه های ذرات معلق در آن معمولا کمتر از 100 نانومتر هستند. ایستمان و همکاران آزمایش هایی را برای ارزیابی عملکرد نانو سیال در جریان مغشوش انجام داده اند که ضریب انتقال حرارت جابه جایی برای نانوسیال آب-اکسید مس با کسر حجمی 0.9 درصد نسبت به آب خالص 15 درصد افزایش داشته است]1, 2.[*

*راندمان تجهیزات انتقال حرارت به تغییرات فلاکس حرارتی ایجاد شده در آنها بستگی دارد. سیالات حامل انرژی همچون آب، مایعات معدنی- روغن ها و اتیلن گلایکول نقش حیاتی در بسیاری از فرآیند های صنعتی همچون تولید نیرو، فرآیند های شیمیایی، فرآیند های گرمایشی و سرمایشی و دیگر کاربردها در مقیاس میکرومتری است. خواص پایین انتقال حرارت این سیالات اولین مانع تاثیر گذار در بهبود راندمان مبدل های حرارتی به شمار می رود به همین دلیل تمرکز روی بهبود این خواص ضروری به نظر می رسید. در این حین با توجه به اینکه مبدل حرارتی به عنوان یکی از اساسی ترین وسایلی هستند که جریانی از انرژی حرارتی را بین دو یا چند سیال در دما های مختلف برقرار کنند و وظیفه تبادل حرارت را به عهده دارند در صنایع تولید برق، صنایع فرآیندی، صنایع شیمیایی و غذایی، تجهیزات الکترونیکی، صنایع تولیدی، تهویه مطبوع، سرمایش و کاربرد های فضایی استفاده می شوند[3]. در این میان با بهره گیری از علم نانوتکنولوژی که مربوط به استفاده از نانوذرات با خواص حرارتی بسیار بالا در سیالات پایه دارای خواص حرارتی پایین تر، که محصول آن نیز سوسپانسیونی با خواص حرارتی بالاتر از سیال اولیه است می توان به راهی مناسب جهت غلبه بر مشکل راندمان پایین تجهیزات انتقال حرارت ناشی از خواص حرارتی پایین سیالات پایه خالص حامل انرژی دست یافت[4]. تحقیقات تئوری و تجربی بسیاری در این زمینه نیز صورت گرفته است که با بهره برداری از هدایت بسیار بالای ذرات جامد حدودا ده برابر بیشتر از سیالات رایج در انتقال حرارت نانو سیال ها بسیار بهتر از سیال پایه می باشد به علاوه اینکه افت فشار نیز در نانو سیالات وجود ندارد یا بسیار ناچیز است. مهم ترین دلایل بهبود انتقال حرارت در نانو سیالات، نانوذرات معلق هدایت حرارتی سیال را افزایش می دهندف حرکت های بسیار زیاد نانوذرات باعث افزایش آشفتگی سیال و در نتیجه افزایش تبادل حرارتی می شود[5, 6].*

***استفاده از فناوری نانو در مبدل های حرارتی***

***امروزه فناوری افزایش انتقال حرارت گسترش یافته است و انتقال انرژی گرمایی در بسیاری از واحد های صنعتی و شیمیایی از مهم ترین بخش های عملیات شیمیایی محسوب می شود. کاربرد وسیع انتقال حرارت در صنایع گوناگون سبب گردیده است که افزایش راندمان دستگاه های حرارتی در اولویت طراحان واحد های صنعتی قرار گیرد. کاربرد اصول انتقال حرارت در طراحی تجهیزات برای مقاصد خاص مهندسی اهمیت بسیار زیادی دارد و هدف از به کار گیری آن، تلاش برای رسیدن به هدف توسعه ی تولید برای سود دهی اقتصادی است که نهایتا مسائل اقتصادی نقش اصلی را در طراحی و انتخاب تجهیزات دارند. مبدل های حرارتی وسایلی هستند که امکان انتقال انرژی گرمایی بین دو یا چند سیال در دماهای مختلف را فراهم میکنند]7[***

***افزایش انتقال حرارت همیشه یکی از مسئل مهم و مورد بحث در صنعت بوده است. این افزایش انتقال حرارت در اکثر کاربرد های سرمایشی وگرمایشی، مخصوصا در ابعاد کوچک، اخیرا پر***

***اهمیت است. روش های زیادی در مورد افزایش انتقال حرارت در این کاربردهای سرمایشی و گرمایشی وجود دارد. برای افزایش انتقال حرارتف می توان از تغییرات هندسه جریان، شرایط مرزی و افزایش هدایت حرارتی سیال استفاده کرد. به خاطر محدودیت های هندسه جریان و شرایط مرزی، بهترین گزینه برای محققان افزایش هدایت حرارتی سیال می باشد به همین علت این روش به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته شده است[8]. سیالات معمولی که در انتقال حرارت مورد استفاده قرار می گیرند از قبیل آب، اتیلن گلایکول و روغن موتور دارای هدایت حرارتی پایین می باشند. در مقابل فلزات و اکسید آن ها دارای هدایت حرارتی بیشتری نسبت به این سیالات می بشاند. بنابراین یک راه برای افزایش هدایت حرارتی سیالات مورد استفاده در انتقال حرارت، اضافه کردن ذرات فلزی و اکسید آن ها در این سیالات می باشد. ایده ی قرار دادن ذرات کوچک درون سیال برای افزایش هدایت حرارتی برای اولین بار توسط ماکسول ارائه شده است. مدل هدایت حرارتی سیال که به وسیله ماکسول ارائه شده است برای سیالاتی که محتوی ذراتی با اندازه میکرومتر و بزرگتر می باشند موثر است[1, 7 ].***

***محققان تاثیرات دما، اندازه نانوذرات و نسبت حجمی نانوذرات را روی هدایت حرارتی نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم بررسی کردند. آنها نتایج به دست آمده را با حل عددی مقایسه کرده و ارتباط معنی داری را نیز بین هدایت حرارتی نانو سیال و دما، اندازه نانو ذرات و نسبت حجمی نانوذرات ارائه دادند. مسودا و همکاران و نیز خوان و لی نشان دادند که با افزودن 1-5 درصد حجمی نانوذرات معلق هدایت حرارتی تا بیش از 20% افزایش میابد. ایسمن و همکاران در آزمایشگاه ملی آرگون با یک سری آزمایشات ساده نشان دادند که میتوان با به کار بردن 5 درصد حجمی نانو ذره در سیال پایه آب به افزایش 60 درصدی در هدایت حرارتی رسید. کیهانی و همکاران به بررسی انتقال حرارت جابه جایی و افت فشار نانوسیال آّب-آلومینا و تیتانیوم –آب در محدوده ی گسترده ای از غلظت 0.1 تا 2 درصد در سیال پایه آّب درون لوله مستقیم با شار حرارتی ثابت پرداختند. نتایج وی نشان دهنده افزایش 26 درصدی برای آب –آلومینا و افزایش 8 درصدی برای تیتانیوم-آب با غلظت 2 درصد است. کیم و همکاران انتقال حرارت جابه جایی نانوسیال آلومینا و کربنی در رژیم های جریان آشفته و آرام درون یک لوله تحت شار حرارتی ثابت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نیز افزایش قابل ملاحظه ای انتقال حرارت جابه جایی نسبت به سیال پایه را نشان می دهد. آنها همچنین نشان دادند که افزایش انتقال حرارت جا به جایی نانوسیال بسیار بیشتر از درصد افزایش هدایت حرارتی این سیالات است[4].***

***فرضیات و مدلسازی***

***2-1 فرضیات مسئله***

***1- از انتقال حرارت تشعشعی صرف نظر شده است.***

***2- حالت پایا در نظر گرفته شده است.***

***3- مشخصات فیزیکی سیال ثابت در نظر گرفته شده است.***

***4- جریان تراکم ناپذیر و سیالف نیوتونی است و انتقال حرارت ویسکوز در نظر گرفته شده است.***

***5- فقط انتقال حرارت اجباری در نظر گرفته شده است.***

***6- نانو ذرات اندازه و شکل یکسان دارند.***

***7- جریان آب و نانوسیال به صورت دو فازی در نظر گرفته شده است.***

***8-هندسه شکل به صورت سه بعدی وارد نرم افزار فلوئنت شده است.***

***2-2 مدل سازی جریان و انتقال حرارت نانو سیال***

***در این پژوهش جریان مدل k-ε اساندارد و معادلات این پژوهش ساده ترین مدلی های اغتشاشی بوده که نسبتا کامل هستند که مدلی دو معادله ای هستند چون حل دو معادله انتقال به صورت جداگانه باعث می شود که سرعت اغتشاش و طول مشخصه به صورت مجزا تعیین شوند. مدل k-ε استاندارد در این گروه از مدل های اغتشاشی قرار دارد و جزء یکی از قدرتمند ترین مدل های مغشوش برای مسائل مهندسی محسوب می شود.. مدل k-ε استاندار مدل نیمه تجربی است و معادلات آن بر اساس مشاهدات تجربی و ملاحظات پدیده شناسی به وجود آمده اند در حل عددی از مدل k-ε استاندارد در این پروژه استفاده شده است زیرا هم حجم CPU مورد نیاز آن در دسترس و مناسب است و هم دقت و سرعت انجام محاسبات آن قابل قبول است[3]. لذا در ادامه این تحقیق و معادلات و توضیحات مربوط به این مدل***

***آورده خواهد شد معادلات با فرضیات گفته شده و انتخاب مدل اغتشاشی مناسب به صورت معادلات 1 تا 6 خواهد بود[2, 9]:***

***(1)***

***(∇ ⃗∙V ⃗)=0***

***(2)***

***(3)***

***(4)***

***(5)***

***(6)***

***محاسبه چگالی، ضریب انبساط حرارتی و گرمای ویژه نانو سیال ها آسان بوده و می توان آن را بر اساس قوانین اساسی مخلوط ها به دست آورد که مطابقت خوبی با داده های تجربی دارد و میتوان از رابطه زیر برای محاسبه گرمای ویژه نانوسیال نیز آسان است. و از رابطه زیر به دست می آید[2]:***

***(7)***

***(8)***

***گرانروی اندازه‌ی مقاومت یک سیال در برابر تغییر شکل ناشی از تنش های طولی یا تنش های برشی می باشد. به علت ساختار سوسپانسیونی نانو سیالات گرانروی اهمیت ویژه ای در***

***طراحی سیستم های نانوسیالی بازی میکند به طوری که اثرات مستقیم آن بر افت فشار در جریان های جابه جایی بسیار مشهود است. بنابراین برای استفاده از نانوسیالات در کاربرد های عملی، مقدار افزایش گرانروی نانوسیالات نسبت به سیال پایه آن باید به طور کامل مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد تعداد ار آمایشگاهی کمی بر روی ویسکوزیته نانو سیال انجام شده است و مدل در دسترس معینی برای پیش بینی ویسکوزیته نانو سیال وجود ندارد مدل اینستین اغلب برای پیش بینی ویسکوزیته سیال های دو فازی با غلطت کم، معمولا کمتر از 1% مورد استفاده قرار می گیرد. معادله ویسکوزیته نانو سیالات را نیز می توان با استفاده از معادلات موجود برای مخلوط ها به دست آورد که به صورت معادله زیر است این معادله توسط رینکمن ارائه شده است[3].***

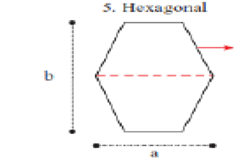
***(9)***

***درحال حاضر هیچ مدل تئوری دقیقی برای محاسبه هدایت گرمایی وجود ندارد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از تحقیقات بسیار زیاد مشخص شده است که هدایت گرمایی نانو سیال ها به عوامل زیادی همچون هدایت گرمایی، سیال پایه، هدایت گرمایی ذرات نانو، غلظت نانوسیال و شکل نانو ذرات و دما بستگی دارد. برای مخلوط های مایع-جامد(دوفازی) مطالعات زیادی بر اساس مدل ماکسول انجام شده است. مدل ماکسول برای محاسبه هدایت گرمایی مخلوط جامد- مایع با اندازه ذره بسیار کوچک و برای غلظت های کم مطابقت خوبی با داده های آزمایشگاهی دارد. این معادله به صورت زیر می باشد[2]:***

***(10)***

***3-2- مش بندی***

***همان طور که در صورت سوال عنوان شده است شکل مورد بررسی در این قسمت شش ضلعی منتظم می باشد اطلاعات داده شده در صورت زیر به شکل 1 زیر است[10]:***

******

***شکل 1: شماتیک سطح مقطع میکروکانال***

***در شکل 1، متر و متر می باشد[9] بعد از مش زنی خطوط حجم کلی را مش می زنیم. مش مورد استفاده برای این حجم دارای 10000 المان از نوع Hex می باشد.***

***4-2- شبیه سازی جریان دو فازی در فلوئنت***

***برای به دست آوردن سرعت با استفاده از اعداد بدون بعد رینولذر و ویژگی های فیزیکی آب( و ) سرعت های مورد بررسی در این بازه از اعداد رینولدز به صورت جدول 1 می باشد همچنین برای به دست آوردن ضریب توربولنسی و یا Turbolence intensity از رابطه 11 استفاده می شود که نتایج در جدول 1 ارایه شده است.***

***(11)***

***جدول 1: محاسبه ی سرعت ورودی به کانال در اعداد رینولدز مختلف***

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***Re*** | ***Velocity(m/s)*** | ***Tur-In(%)*** | ***Re*** | ***Velocity(m/s)*** | ***Tur-In(%)*** |
| ***3000*** | ***2.67094*** | ***5.88138*** | ***10000*** | ***8.9031*** | ***5.05964*** |
| ***4000*** | ***3.561256*** | ***5.6736*** | ***11000*** | ***9.7934*** | ***4.9997*** |
| ***5000*** | ***4.45151*** | ***5.517581*** | ***12000*** | ***10.6837*** | ***4.9456*** |
| ***6000*** | ***5.34188*** | ***5.3932*** | ***13000*** | ***11.574*** | ***4.9864*** |
| ***7000*** | ***6.2322*** | ***5.29*** | ***14000*** | ***12.4644*** | ***4.851*** |
| ***8000*** | ***7.1225*** | ***5.2027*** | ***15000*** | ***13.3547*** | ***4.8098*** |
| ***9000*** | ***8/0128*** | ***5.126*** |  |  |  |

***خواص فیزیکی نانوذره در جدول 2 زیر ارائه شده است[11]:***

***جدول 2 : خصوصیات فیزیکی نانوذره TiO2***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ***رسانندگی گرمایی*** | ***ظرفیت گرمایی ویژه*** | ***قطر متوسط (nm)*** | ***چگالی*** |
| ***8.4*** | ***710*** | ***20*** | ***4157*** |

***از آنجا که ویسکوزیته برای مواد جامد تعریف نشده است اما نانوذرات با سیال در حال حرکت هستند بنابراین برای آن ها نیز ویسکوزیته تعریف شده و از رابطه 12 محاسبه می شود[3]:***

***(12)***

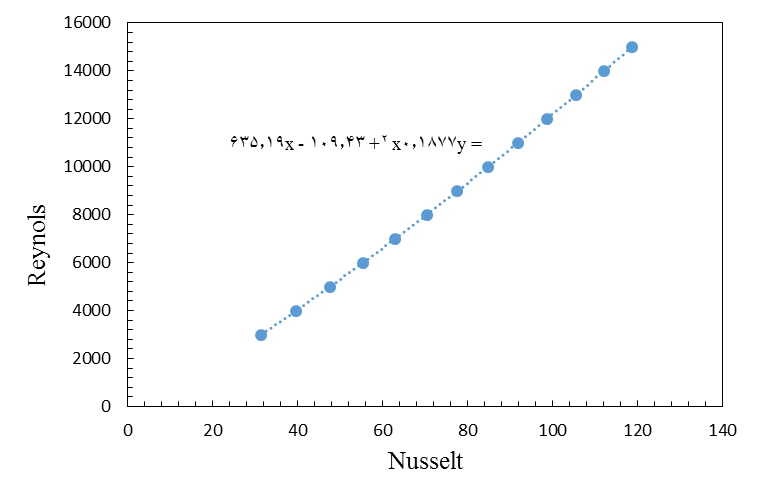
***نتایج***

***نتایج حاصل از شبیه سازی عبارت اند از دمای میانگین دیواره، دمای بالک، ضریب انتقال حرارت جابه جایی که با محاسبه ی ضریب انتقال حرارت رسانش نانوسیال و طبق روابط حاکم بر انتقال حرارت میتوان عدد بی بعد ناسلت را محاسبه کرد. در جداول 3-5 این نتایج ذکر شده است. همچنین ناسلت حاصل از شبیه سازی با ناسلت نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده که میزان خطای کمتر از 5 درصد صحت شبیه سازی را نتیجه می دهد.***

***1-3-مقدار یک درصد وزنی***

***جدول 3 : نتایج حاصل از شبیه سازی نانوسیال 1% وزنی و بررسی خطا***

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***Re*** | ***Tw*** | ***Tb*** | ***H*** | ***Nu simulation*** | ***Nu exp*** | ***% error*** |  |
| ***3000*** | ***300/3751*** | ***300/0826*** | ***17094/02*** | ***31/38492*** | ***31/14938*** | ***0/007562*** |  |
| ***4000*** | ***300/293*** | ***300/0619*** | ***21635/66*** | ***39/72344*** | ***39/21032*** | ***0/013087*** |  |
| ***5000*** | ***300/2421*** | ***300/0495*** | ***25960/54*** | ***47/66401*** | ***46/8736*** | ***0/016862*** |  |
| ***6000*** | ***300/2068*** | ***300/0413*** | ***30211/48*** | ***55/46881*** | ***54/23421*** | ***0/022764*** |  |
| ***7000*** | ***300/1811*** | ***300/0354*** | ***34317/09*** | ***63/00678*** | ***61/35229*** | ***0/026967*** |  |
| ***8000*** | ***300/1614*** | ***300/031*** | ***38343/56*** | ***70/39945*** | ***68/26912*** | ***0/031205*** |  |
| ***9000*** | ***300/1458*** | ***300/0275*** | ***42265/43*** | ***77/60007*** | ***75/0147*** | ***0/034465*** |  |
| ***10000*** | ***300/1331*** | ***300/0248*** | ***46168/05*** | ***84/76535*** | ***81/61168*** | ***0/038642*** |  |
| ***11000*** | ***300/1225*** | ***300/0225*** | ***50000*** | ***91/80088*** | ***88/07781*** | ***0/04227*** |  |
| ***12000*** | ***300/1136*** | ***300/0207*** | ***53821/31*** | ***98/81688*** | ***94/42725*** | ***0/046487*** |  |
| ***13000*** | ***300/1061*** | ***300/0191*** | ***57471/26*** | ***105/5183*** | ***100/6716*** | ***0/048143*** |  |
| ***14000*** | ***300/0996*** | ***300/0177*** | ***61050/06*** | ***112/089*** | ***106/8205*** | ***0/049321*** |  |
| ***15000*** | ***300/0938*** | ***300/0165*** | ***64683/05*** | ***118/7592*** | ***112/8822*** | ***0/052064*** |  |

******

***شکل 2: نمودار Reynolds-Nusselt در نانوسیال 1% وزنی***

***2-3-مقدار سه درصد وزنی***

**نتیجه گیری**

***با توجه به اهمیت مبدل های حرارتی لوله ای در صنایع با فشار نسبتا بالا متاسفانه به دلیل پایین بودن نرخ انتقال حرارت در مبدل های لوله ای استفاده از این مبدل ها را علی رغم ساختمان ساده و هم چنین تعمیر و نگهداری راحت تر و قابلیت تعویض و افزایش و یا کاهش ظرفیت با محدودیت مواج نموده است لذا در این پروژه تا راهکاری جت افزایش انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال مذکور برای این نوع مبدل حرارتی بررسی گردد به همین منظور نتایج بر حسب به دست آوردن عدد ناسلت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که اضافه کردن نانو سیال به میزان و از هر نوعی سبب بهبود انتقال حرارت در مقایسه با آب***

**منابع و مراجع**

**[1] *بیات، س. ه. زهساز، م. 1396. "تجزیه و تحلیل استاتیکی و دینامیکی سازه شاسی خودرو سنگین".*** [***سومین کنفرانس سراسری دانش و فناوری مهندسی مکانیک و برق ایران***](https://civilica.com/papers/l-8288/)***، موسسه برگزار كننده همايش هاي توسعه محور دانش و فناوري سام ايرانيان.***

[2] S. Heimbs, F. Strobl, P. Middendorf, S. Gardner, B. Eddington, J. Key., 2009. “Crash Simulation of an F1 Racing Car Front Impact Structure”, 7th European LS-DYNA conference.