بررسی افزایش نرخ انتقال حرارت سمت پوسته در مبدل حرارتی پوسته و لوله حاوی نانوسیال آب/ آلومینا با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

پویا شاه محمدی[۱]، حسین بیکی[۲،*]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه مهندسی فناوریهای نوین، خراسان رضوی، قوچان، ایران

[۲]استادیار دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه مهندسی فناوریهای نوین، خراسان رضوی، قوچان، ایران

دریافت: ۹۳/۶/۲۶ پذیرش: ۹۴/۳/۲۷

چکیده

در پژوهش حاضر به شبیه‌سازی سه‌بعدی یک مبدل‌حرارتی پوسته و لوله تحت جریان آشفته با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته شده است. سیال سمت پوسته ابتدا آب خالص و در مرحله بعد نانوسیال آب/ آلومینا در نظر گرفته شد. سپس عملکرد مبدل حرارتی، در دو حالت با یکدیگر مقایسه گردید. در هر مبدل حدودا ۱۱۰۰۰۰۰سلول وجود دارد. برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی و رئولوژیکی نانوسیال مذکور از زبان برنامه نویسی C در سربرگ تابع تعریف کاربر[۱] استفاده شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که استفاده از نانوسیال مطابق انتظار، باعث افزایش نرخ انتقال حرارت به میزان ۹٪ و کاهش سرعت در سمت پوسته، در مقایسه با سیال پایه آب خالص می‌شوند. همچنین یک مدل تئوری و دو مدل تجربی برای تخمین ویسکوزیته نانوسیال با یکدیگر مقایسه گردیدند. نتایج نشان دادند در غلظت های پایین نانوذرات، سه مدل بر یکدیگر منطبق هستند.

کلمات کلیدی: نانو سیال، مبدل حرارتی پوسته و لوله، دینامیک سیالات محاسباتی

مقدمه

امروزه به دلیل هزینه‌های بالای انرژی و افزایش آلودگی‌های زیست محیطی، بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع به ضرورتی اجتناب ناپذیر تبدیل شده است. یکی از پرمصرف‌ترین تجهیزاتی که در صنایع شیمیایی به صورت مستقیم با انرژی سروکار دارند، مبدل‌های حرارتی می‌باشند. پس از پیدایش نانوسیالات، بهبود خواص حرارتی سیالات در مبدل‌های حرارتی، به منظور افزایش نرخ انتقال‌حرارت، کاهش زمان انتقال

* hossein.beiki@gmail.com

[1]User define function (UDF)

حرارت، کاهش ابعاد مبدل و همچنین کاهش مصرف انرژی و به طبع آن کاهش هزینه ها مورد توجه قرار گرفت. تاکنون مطالعات بسیاری در رابطه با خواص حرارتی نانوسیالات صورت گرفته است؛ اما اغلب این مطالعات مبنای آزمایشگاهی دارند و تاکنون هیچ یک از این مطالعات به‌صورت عددی و محاسباتی برای بررسی انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله حاوی نانوسیال تحت شرایط آشفته انجام نشده است.

فرج الهی و همکاران [۱] یک آنالیز آزمایشگاهی برای مطالعه انتقال حرارت نانوسیال در یک مبدل پوسته و لوله تحت جریان آشفته انجام دادند. نتایج نشان می‌داد که در یک عدد پکلت معین، ویژگی‌های انتقال حرارت نانوسیال آب/ دی‌اکسید تیتانیوم بالاتر از نانوسیال آب/ $\gamma - Al_2O_3$ می باشد در حالی که نانوسیال آب/ $\gamma - Al_2O_3$ دارای رفتار انتقال حرارت بهتری در غلظت نانوذرات بالاتر می‌باشند.

حق‌شناس‌فرد و همکاران انتقال حرارت نانوسیال اکسید روی در آب را در مبدل حرارتی دو لوله ای و مبدل حرارتی صفحه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایشات آن‌ها بهبود انتقال حرارت را هنگام استفاده از نانوسیال نشان می‌داد[۲].

لطفی و همکاران افزایش انتقال حرارت نانوسیال نانولوله‌های کربنی چند دیواره در آب را، در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله افقی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که انتقال حرارت در حضور نانولوله‌های کربنی چند دیواره در مقایسه باسیال پایه افزایش یافته است[۳].

ام. الیاس و همکاران[1] مطالعاتی را روی نانوذرات با اشکال مختلف روی ضریب کلی انتقال حرارت، آنتروپی تولیدی و نرخ انتقال حرارت در مبدل حرارتی پوسته و لوله به صورت آزمایشگاهی انجام دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد که نانوذرات به شکل استوانه بهترین میزان عملکرد را از خود نشان می‌دهند [۴].

اوزدن[2] و همکارش به شبیه سازی یک مبدل حرارتی پوسته و لوله کوچک، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، برای سیال آب پرداختند. آن‌ها همچنین اثر فاصله بین بافل ها و برش بافل‌ها را نیز بررسی نمودند و مدل های موجود آشفتگی را نیز مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که از میان مدل‌های اغتشاش موجود، مدل $k - \varepsilon$ نتایج دقیق‌تری را از خود نشان می‌دهد [۵].

اختری و همکاران به مطالعه عددی و آزمایشگاهی نانوسیال آب/ $\alpha - Al_2O_3$ در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای و مبدل حرارتی پوسته و لوله تحت شرایط آرام پرداختند. آن‌ها همچنین اثر پارامترهای مهم نظیر دبی جریان سرد و گرم، دمای نانوسیال و غلظت نانوذرات را نیز بررسی نمودند [۶].

تمامی مطالعات انجام شده در این زمینه نشان می دهند که استفاده از نانوذرات باعث بهبود خواص حرارتی سیال پایه می شوند و همچنین میزان انتقال حرارت در مبدل‌ها را به دلیل افزایش هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت، افزایش می‌دهند. در مطالعه حاضر به بررسی و مقایسه میزان انتقال حرارت سمت پوسته در مبدل حرارتی پوسته و لوله حاوی نانوسیال آب/ Al_2O_3 و سیال پایه آب با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی تحت شرایط آشفته پرداخته‌ایم. برای این منظور از مبدل حرارتی پوسته و لوله موجود در مرجع

[1] M.Elias&et al.
[2] Ozden

[۵] استفاده شده است. مرحله پردازش نیز با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت نسخه ۱۴/۵ انجام گرفته است. جدول ۱ اطلاعات هندسی مبدل حرارتی پوسته و لوله را نمایش می دهد.

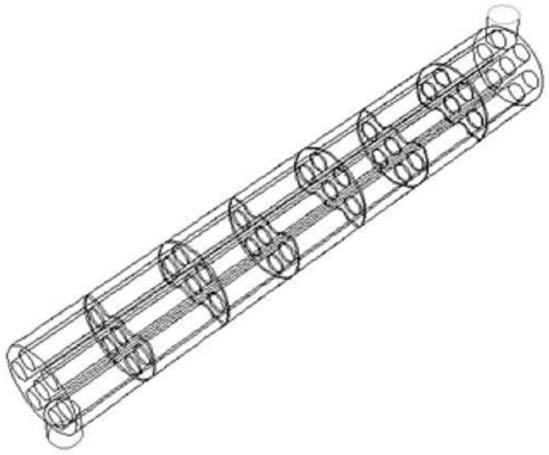
جدول۱. ابعاد مبدل مورد بررسی

پارامتر	مقدار	واحد
قطر پوسته	۹۰	mm
قطر خارجی لوله‌ها	۲۰	mm
فاصله بین لوله ها و آرایش لوله ها	۳۰، مثلثی	mm
طول مبدل	۶۰۰	mm
تعداد لوله‌ها	۷	-
درصد برش بافل‌ها	%۲۵	-
فاصله مرکزی بافل‌ها	۸۶	mm
تعداد بافل‌ها	۶	-

مدل‌سازی

رسم هندسه و شبکه بندی

هندسه مبدل حرارتی با استفاده از نرم افزار گمبیت ورژن ۲.۲.۳۰ به صورت سه بعدی رسم و شبکه بندی شده است تا تمامی اطلاعات در همه ابعاد قابل بررسی باشند و مسئله به واقعیت نزدیک‌تر باشد. برای شبکه بندی حجمی مبدل حرارتی، شبکه های چهار وجهی ترکیبی برای سمت پوسته و شش وجهی برای سمت لوله‌ها استفاده شده است. در هر مبدل حدود ۱۱۰۰۰۰۰ سلول وجود دارد. مبدل حرارتی مورد نظر در این پژوهش از جنس آلومینیوم بوده و دارای جریان متقابل می باشد. شکل ۱ هندسه رسم شده در نرم افزار گمبیت را نمایش می دهد.



شکل ۱. هندسه رسم شده در نرم افزار گمبیت

فرضیات مسئله

فرضیات در نظر گرفته شده برای حل این مسئله عبارتند از:

- جریان سیال و انتقال حرارت آشفته و پایا می‌باشند.
- از اثر نشتی بین لوله‌ها و بافل‌ها و همچنین بافل‌ها و پوسته صرف‌نظر می‌کنیم.
- مبدل حرارتی به خوبی عایق شده و هیچ تبادل حرارتی با محیط اطراف خود ندارد.

شرایط مرزی

شرایط مرزی براساس نیاز مدل در دینامیک سیالات محاسباتی تعیین می‌شود. جدول ۲ شرایط مرزی به‌کار گرفته شده را شرح می‌دهد.

جدول ۲. شرایط مرزی مورد استفاده در حل مسئله

	نوع شرایط مرزی	پوسته (سیال سرد)	لوله (گرم)	واحد
ورودی	جریان جرمی ورودی	۱	۰/۵	Kg/s
خروجی	فشار خروجی	۱۰۱/۳۲۵	۱۰۱/۳۲۵	KPa
	بدون لغزش	عایق	کوپل	-
دیواره	ضخامت دیوار	-	۰/۰۰۱	m
دما	دمای ورودی	۳۶۳	۲۹۶	

برای محاسبه افت فشار خروجی جریان سمت پوسته از شرط مرزی فشار خروجی صفر استفاده گردید و برای شرایط مرزی ورودی نیز شرط مرزی دبی جرمی ورودی به‌کارگرفته شد.

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مدل مذکور که توسط نرم افزار انسیس فلوئنت، در دامنه هندسه، روی شبکه ها حل می‌گردند در ادامه توضیح داده شده اند.

مدل اغتشاش

از آن‌جایی که جریان مورد استفاده مغشوش می‌باشد برای بیان این آشفتگی باید از مدل‌های آشفتگی استفاده نمود. متاسفانه مدل مغشوشی که بتواند برای تمام حالت‌ها و مسائل مختلف به کار رود، وجود ندارد و انتخاب مدل مغشوش به ملاحظاتی مانند فیزیک جریان، تجربیات حاصله از شبیه‌سازی برای مسائل خاص، میزان دقت مورد نیاز، قدرت منابع محاسباتی (قدرت کامپیوتر) و زمان موجود برای انجام محاسبات، وابسته می باشد البته برای انتخاب یک مدل مغشوش مناسب باید توانایی‌ها و محدودیت‌های تمام مدل‌ها و حالت‌ها شناخته شوند [۷]. در این پژوهش برای مدلسازی، از سه معادله اغتشاش$k-\varepsilon$Standard, RNG و Realizable استفاده شده است. ساده ترین مدل‌های اغتشاش که نسبتا کامل هستند، مدل‌های دو معادله‌ای می‌باشند. چون حل دو معادله انتقال به صورت جداگانه باعث می شود که سرعت اغتشاش و طول مشخصه

به صورت مجزا تعیین شوند. مدل $k-\varepsilon$ در این گروه از مدل‌های اغتشاش قرار دارد و جزء یکی از قدرتمندترین مدل‌های اغتشاش برای مسائل مهندسی محسوب می‌شود. قدرتمندی، اقتصادی بودن محاسبات و داشتن دقت قابل قبول در محدوده وسیعی از جریان های مغشوش باعث محبوبیت این مدل در مسائل صنعتی و انتقال حرارت شده است. مدل $k-\varepsilon$ یک مدل نیمه تجربی است و معادلات آن بر اساس مشاهدات تجربی و ملاحظات پدیده‌شناسی به وجود آمده‌اند و برای مدل‌سازی مبدل‌های حرارتی بسیار مناسب می‌باشند [۸]. رحمن[1] [۹]، در رساله خود به شبیه‌سازی یک مبدل حرارتی پوسته و لوله پرداخت و نتایج به‌دست آمده را با نتایج آزمایشگاهی مورد تطبیق قرار داد. وی دریافت که نزدیک‌ترین اطلاعات به‌دست آمده از شبیه‌سازی به اطلاعات تجربی در طرف پوسته، با معادله اغتشاش مدل کا- اپسیلن به‌دست آمده است.

معادله ۱ مربوط به k و معادله ۲ مربوط به ε می‌باشد.

(۱) $\frac{\acute{\epsilon}}{\partial}$

(۲) $\frac{\acute{\epsilon}}{\partial}$

ویسکوزیته گردابه‌ها نیز از معادله ۳ محاسبه می‌گردد.

(۳) μ

معادله پیوستگی

معادله بقای جرم یا پیوستگی از اهمیت بنیادی برخوردار است و برای جریان سیال پایا و آشفته به‌صورت زیر خواهد بود [۵ و ۱۰].

(۴) ∇

معادله مومنتوم

این معادله از موازنه نیرو بر یک المان از جریان به‌دست می‌آید و بر مبنای قانون دوم نیوتون استوار است. این معادله برای سیالات نیوتونی به صورت معادلات ۵، ۶ و ۷ در سه بعد نوشته می‌شود [۵ و ۱۰].

در جهت x:

$$\nabla.\left(\rho u\vec{V}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \qquad (۵)$$

در جهت y:

[1] Rehman

$$\nabla.\left(\rho v\vec{V}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho g \qquad (۶)$$

در جهت z:

$$\nabla.\left(\rho w\vec{V}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \qquad (۷)$$

معادله انرژی

این معادله از نوشتن موازنه انرژی حول یک سیستم به‌دست می‌آید [۵ و۱۰]:

$$\nabla.\left(\rho e\vec{V}\right) = -p\nabla.\vec{V} + \nabla.\left(k\nabla T\right) + q + \varphi \qquad (۸)$$

سایر شرایط انتخاب شده جهت مدل‌سازی

برای گسسته‌سازی در مدل مذکور، از طرح گسسته‌سازی مرتبه دوم برای معادلات انرژی و مومنتوم، و برای سایر معادلات از طرح گسسته‌سازی مرتبه اول استفاده شده است. معیارهای همگرایی برای معادلات مومنتوم، K و ε، 10^{-6}و برای معادله پیوستگی و انرژی 10^{-7} در نظر گرفته شد.

به دلیل این‌که خواص ترموفیزیکی نانوسیال با دما تغییر می‌کند، برای بهتر شدن نتایج با استفاده از زبان برنامه نویسی C برای ویسکوزیته، دانسیته و ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیال، توابع زیر به‌عنوان تابع ورودی کاربر در نرم افزار تعریف شده‌اند. برای تعیین ویسکوزیته نانوسیال، به دلیل تاثیر مستقیم روی افت فشار از سه مدل انیشتین [۱۱]، ونگ و همکاران [۱۲] و بونجیورنو [۱۳] استفاده شده است و نتایج حاصل از افت فشار حاصل از سه مدل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است که مدل انیشتین دارای مبنای تئوری بوده اما دو مدل دیگر دارای مبنای تجربی و آزمایشگاهی می باشند و مخصوص نانوسیال آب/ آلومینا ارائه شده‌اند.

مدل تئوری انیشتین[۱]:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}\left(1 + 2.5\Phi\right) \qquad (۹)$$

مدل تجربی ونگ و همکاران[۲]:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}\left(1 + 7.3\Phi + 123\Phi^2\right) \qquad (۱۰)$$

مدل تجربی بونجیورنو[۳]:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}\left(1 + 39.115\Phi + 533.9\Phi^2\right) \qquad (۱۱)$$

[1] Einstein
[2] Wang
[3] Buongiorno

دانسیته نانوسیال نیز از از معادله زیر محاسبه می‌گردد [۱۴]:

ρ (۱۲)

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت از رابطه یو و چوئی[1] استفاده شده است که β در آن برابر ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود [۱۵].

k (۱۳)

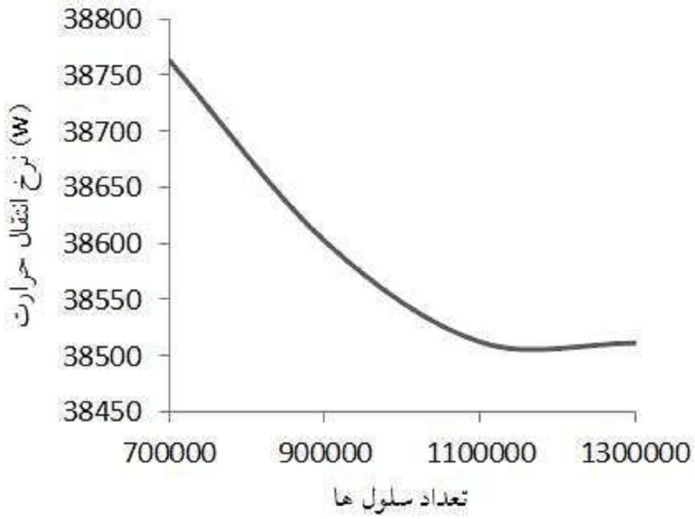
برای محاسبه ظرفیت حرارتی نانوسیال نیز از رابطه ژوآن و روتزل[2] [۱۶] استفاده شده است.

C (۱۴)

نانو سیال مورد استفاده در مقاله حاضر آب/ Al_2O_3 یک در صد حجمی می‌باشد.

بحث و نتیجه گیری

برای یافتن تعداد سلول‌های بهینه جهت دقیق‌تر و کوتاه‌تر شدن محاسبات، در مرحله اول، تعداد شبکه‌های بهینه را می‌یابیم. شکل ۲، نرخ انتقال حرارت به‌دست آمده در تعداد متفاوت سلول‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲. بررسی استقلال از مش

[1] Yu &Choei
[2] Xuan &Roetzel

شکل ۲ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سلول ها از ۷۰۰۰۰۰ به ۱۱۰۰۰۰۰، میزان نرخ انتقال حرارت تغییر می‌نماید، اما از تعداد سلول ۱۱۰۰۰۰۰ به بعد، میزان تغییرات نرخ انتقال حرارت بسیار ناچیز می‌باشد و باعث افزایش زمان و حجم محاسبات می‌گردد. بنابراین تعداد سلول های بهینه در این مبدل، برابر ۱۱۰۰۰۰۰ سلول می‌باشد.

جهت اعتبارسنجی شبکه‌بندی و نتایج به‌دست آمده از نرم افزار، ضریب کلی انتقال حرارت را با استفاده از روش کرن[1] [۱۷] به‌دست آورده و با ضریب کلی انتقال حرارت بدست آمده از نرم افزار مقایسه می‌نماییم.

جدول ۳. مقایسه ضریب کلی انتقال حرارت بدست آمده از نرم افزار و روش کرن

٪اختلاف ضریب انتقال حرارت بین دو روش	ضریب کلی انتقال حرارت با استفاده از روش کرن	ضریب کلی انتقال حرارت با استفاده از فلوئنت	سیال عامل	معادله اغتشاش
٪۲/۷	۲۳۹۷	۲۴۶۳	آب	Standard
٪۲/۲	۲۳۹۷	۲۴۵۲	آب	RNG
٪۱/۶۸	۲۳۹۷	۲۴۳۸	آب	Realizable

بنابراین همان‌گونه که از جدول ۳ مشخص است، محدوده خطای ضریب انتقال حرارت در محدوده قابل قبولی می‌باشد. بنابراین شبکه‌بندی هندسه ایجاد شده فاقد نقص بوده و می‌توان نتیجه گرفت که نتایج موجود در جدول ۴ با خطای قابل قبولی صحیح می باشد. نتیجه دیگری که از جدول ۳ می توان دریافت، تطابق بهتر نتایج مدل کا- اپسیلن Realizable با روش کرن، نسبت به دو مدل دیگر می باشد.

در جدول زیر، نتایج حاصل از نرم افزار انسیس فلوئنت برای مدل کا- اپسیلن Realizable نشان داده شده است.

جدول ۴. نتایج حاصله از نرم افزار

شار انتقال حرارت $[W]$	دمای خروجی سمت پوسته $[^{\circ}K]$	دمای خروجی سمت لوله $[^{\circ}K]$	سیال عامل	تعداد بافل
۳۸۴۰۱	۳۵۳/۸۳	۲۹۸/۶۳	آب	۶
۴۲۲۰۱	۳۵۲/۶۰	۲۹۸/۹۱	آب/ آلومینا	۶

همان‌گونه که از نتایج مشخص است افزودن مقدار کمی نانوذره آلومینا (۱٪ حجمی) به سیال پایه آب، باعث افزایش چشمگیری در نرخ انتقال حرارت می‌شود که در صنعت به لحاظ کاهش آلودگی و هزینه ها مطلوب می‌باشد. افزایش در شار انتقال حرارتی به دلیل افزایش نانوذرات آلومینا به سیال پایه می‌باشد.

[1] Kern method

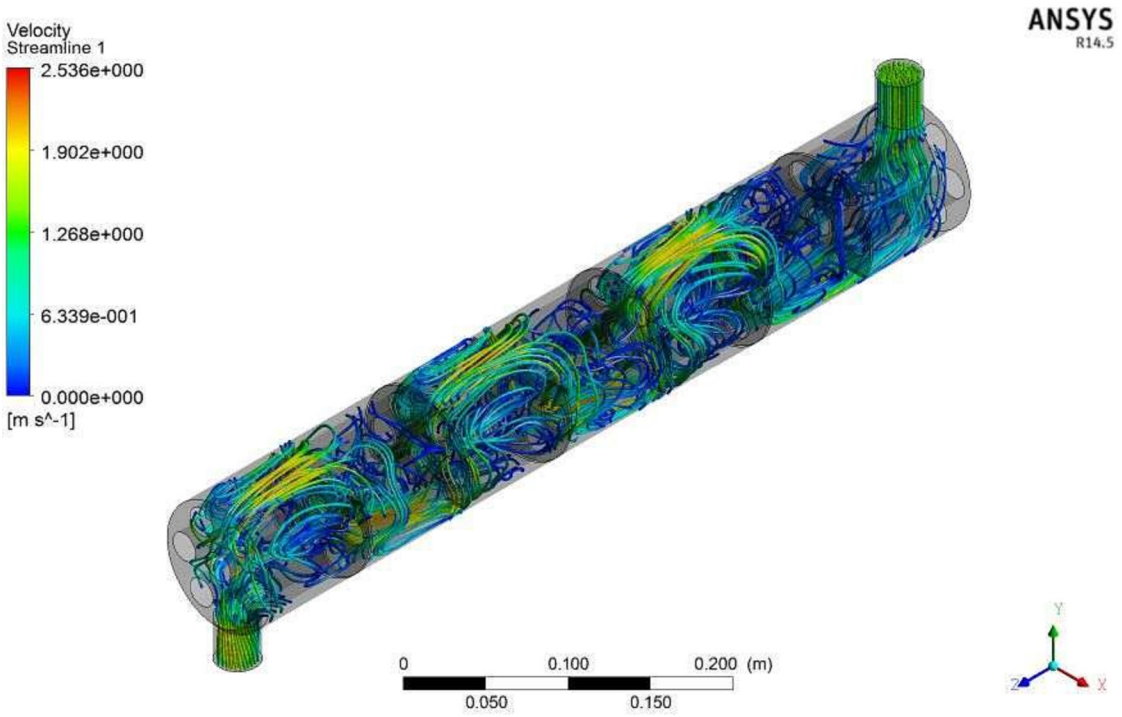
همان‌گونه که در قبل نیز اشاره شد برای تعیین افت فشار نانوسیال، از سه مدل تخمین ویسکوزیته انیشتین، ونگ و همکاران و بونجیورنو استفاده شده است. جدول ۵ نتایج حاصل از سه مدل، جهت تخمین افت فشار سمت پوسته را نشان می‌دهد.

جدول ۵. مقایسه افت فشار حاصل از سه مدل

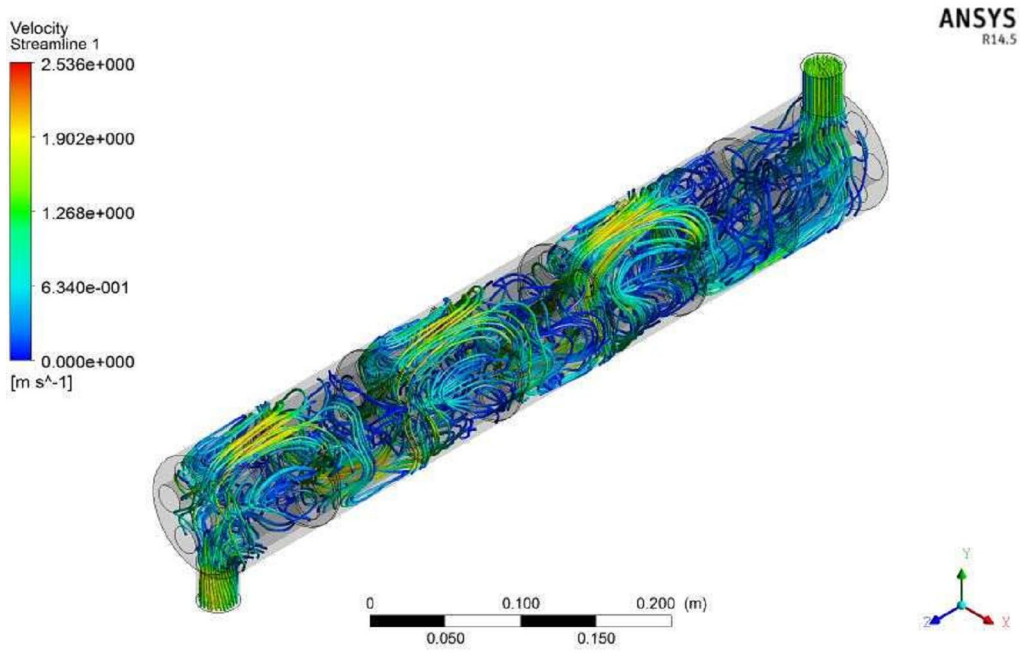
مدل تجربی بونجیورنو (Pa)	مدل تجربی ونگ و همکاران(Pa)	رابطه تئوری انیشتین (Pa)
۴۵۳۴	۴۵۴۰	۴۵۴۱

همان‌گونه که از جدول ۵ نیز مشخص است، سه مدل فوق‌الذکر در غلظت‌های پایین نانوذرات به‌خوبی بر یکدیگر منطبق می باشند. در ادامه نتایج گرافیکی حاصل از نرم افزار برای خطوط جریان سرعت و دمای سمت پوسته نشان داده شده اند.

در شکل‌های ۳ و ۴مقایسه خطوط جریان سرعت برای دو سیال آب و آب/آلومینا نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات آلومینا در سیال پایه آب باعث کاهش سرعت سیال در سمت پوسته می‌شود که دلیل آن، افزایش ویسکوزیته نانوسیال نسبت به سیال پایه می‌باشد. این کاهش به دلیل اندازه نانومتری ذرات، بسیار ناچیز بوده و قابل چشم پوشی می‌باشد.



شکل ۳. خطوط جریان سرعتبرای سیال عامل آب (m/s)

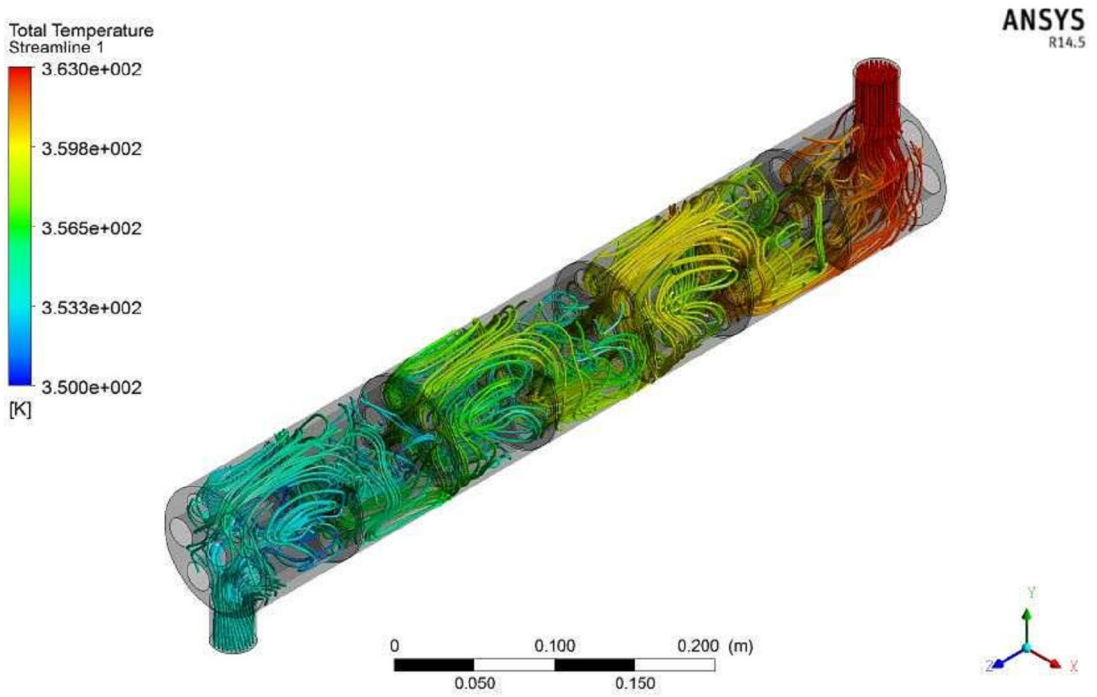


شکل۴. خطوط جریان سرعتبرای سیال عامل آب/ آلومینا (m/s)

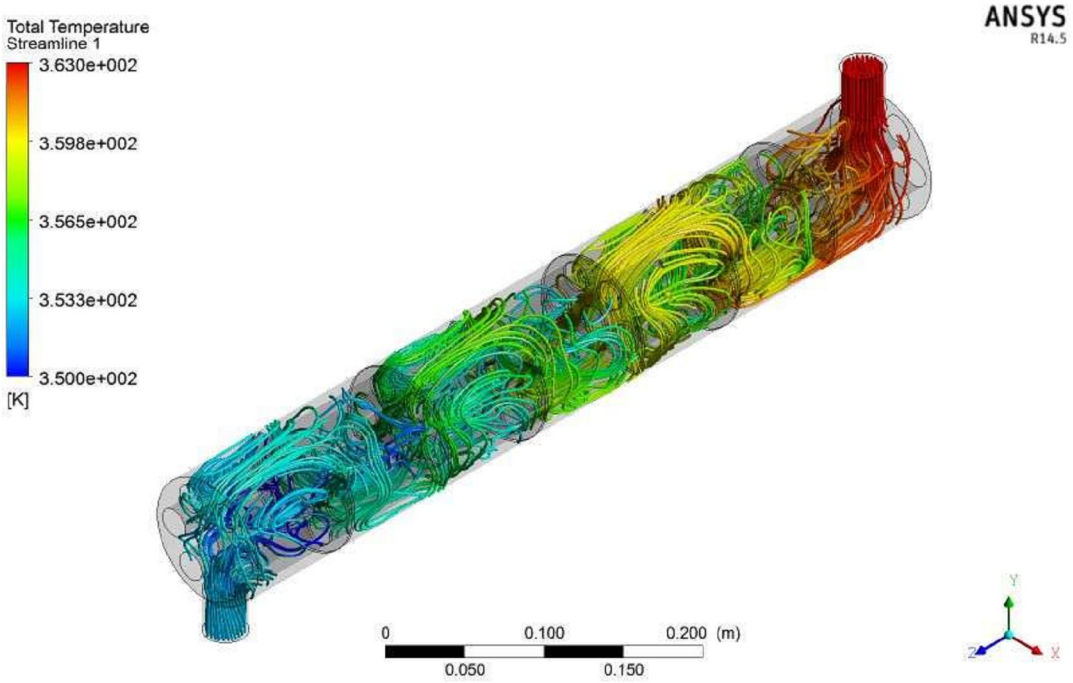
مطابق انتظار افزودن نانوذره به سیال پایه موجب بهبود خواص حرارتی نانوسیال می‌شود و همان‌گونه که از کانتورهای مربوط به دما در شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است، به کارگیری نانوسیال در سمت پوسته باعث کاهش بیش‌تر دمای خروجی سیال سمت پوسته می‌شود. دلیل این امر، افزایش هدایت حرارتی سیال پایه می‌باشد. این درحالی است که افزودن این ذرات، تاثیر چندانی روی افت فشار سمت پوسته ندارند. بنابراین استفاده از نانوسیالات در مبدل‌های حرارتی، از نظر اقتصادی، زیست محیطی و همچنین صرفه‌جویی در انرژی کاملا مقرون به صرفه می‌باشد. همچنین می‌توان ابعاد مبدل مورد نظر را نیز کاهش داد. به عنوان نتیجه‌گیری دیگر از این پژوهش می توان به نقش موثر دینامیک سیالات محاسباتی جهت شناخت بهتر جریان سمت پوسته و همچنین کمک به طراحان جهت طراحی بهینه مبدل‌های حرارتی اشاره نمود.

نتیجه گیری

استفاده از نانوذرات آلومینا در سمت پوسته مبدل حرارتی، موجب افزایش بازده مبدل حرارتی می‌گردد. نتایج نشان دادند که افزودن نانوذرات به سیال پایه در مبدل حرارتی، تاثیر چشمگیری روی ویسکوزیته و افت فشار سمت پوسته ندارند. از طرف دیگر افزایش نانوذرات آلومینا به اندازه ۱٪ حجمی، باعث افزایش نرخ انتقال حرارت به میزان ۹٪ می‌گردد. در میان مدل‌های اغتشاش بررسی شده و با مقایسه نتایج به‌دست آمده از روش کرن و نرم‌افزار، مشخص گردید که مدل اغتشاش کا- اپسیلن Realizable دارای تطابق بیش‌تری با روش کرن می باشد. با بررسی سه مدل تجربی و تئوری انیشتین، ونگ و همکاران و بونجیورنو مشخص شد که در غلظت های پایین نانوذرات، افت فشار محاسبه شده از این مدل ها، تطابق خوبی با یکدیگر دارند.



شکل ۵. خطوط جریان دما برای سیال عامل آب $(^{\circ}K)$



شکل ۶. خطوط جریان دما برای سیال عامل آب/ آلومینا $(^{\circ}K)$

فهرست علائم و نشانه ها

Subtitle of bf	سیال پایه
$C_{1\varepsilon}$و$C_{2\varepsilon}$و$C_{3\varepsilon}$	ثوابت معادلات انتقال
ρ	دانسیته
φ	تابع اتلاف
μ	ویسکوزیته دینامیک
G_b	تولید آشفتگی به دلیل خاصیت شناوری
g	شتاب گرانشی
C_p	ظرفیت حرارتی
Q	شار حرارتی
K	انرژی جنبشی حاصل ازنوساناتآشفتگیدر واحد جرم
Subtitle of nf	نانوسیال
Subtitle of np	نانوذرات
xوyوz	مختصات موقعیت
p	فشار
G_k	اغتشاش تولید شده بر اثر گرادیان سرعت
τ	تنش برشی
k	هدایت حرارتی
σ_k	عدد پرانتل آشفتگی برای k
σ_ε	عدد پرانتل آشفتگی برای ε
μ_t	ویسکوزیته آشفتگی
S_kوS_ε	متغیرهای تعریف شده رابطه انتقال
u, v, w	اجزاء سرعت
$\vec{V}$	بردار سرعت
ε	نرخ اتلاف ویسکوزیته
∅	درصد حجمی

مراجع

1. Farajollahi, B., Etemad, S. G., &Hojjat, M. (2010).Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger.*International Journal of Heat and Mass Transfer*, *53*(1), 12-17.
2. Haghshenas, F. M., Talaie, M. R., & Nasr, S. (2011). Numerical and experimental investigation of heat transfer of ZnO/water nanofluid in the concentric tube and plate heat exchangers.*Thermal Science*, *15*(1), 183-194.
3. Amrollahi, A., Rashidi, A. M., Lotfi, R., EmamiMeibodi, M., &Kashefi, K. (2010). Convection heat transfer of functionalized MWNT in aqueous fluids in laminar and turbulent

flow at the entrance region.*International Communications in Heat and Mass Transfer*, *37*(6), 717-723.
4. Elias, M. M., Miqdad, M., Mahbubul, I. M., Saidur, R., Kamalisarvestani, M., Sohel, M. R., ...&Amalina, M. A. (2013). Effect of nanoparticle shape on the heat transfer and thermodynamic performance of a shell and tube heat exchanger.*International Communications in Heat and Mass Transfer*, *44*, 93-99.
5. Ozden, E., &Tari, I. (2010). Shell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger. *Energy Conversion and Management*, *51*(5), 1004-1014.
6. Akhtari, M., Haghshenasfard, M., &Talaie, M. R. (2013). Numerical and Experimental Investigation of Heat Transfer of α-Al2O3/Water Nanofluid in Double Pipe and Shell and Tube Heat Exchangers.*Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, *63*(12), 941-958.
7. FLUENT Incorporated, "Fluent 6.3, User's Guide", Fluent Incorporated, 2008.
۸. امید توحیدی، راهنمای جامع انسیس فلوئنت، انتشارات موسسه فرهنگی هنری دیباگران تهران، آبان ماه ۱۳۹۲
9. Rehman, U. U. (2012). Heat transfer optimization of shell-and-tube heat exchanger through CFD studies.Department of Chemical and Biological EngineeringDivision of Chemical Engineering. Chalmers university of technology.
10. Wylie, E. B., & Streeter, V. L. (1978). Fluid transients.*New York, McGraw-Hill International Book Co., 1978. 401 p.*, *1*.
11. D. A. Drew and S. L. Passman, Theory of Multicomponent Fluids, Springer, Berlin, 1999.
12. Wang, X., Xu, X., Choi, S.U., "Thermal conductivity of nanoparticles-fluid mixture," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, vol. 13, pp. 474–80, 1999.
13. Buongiorno, J., "Convective transport in nanofluids," Journal of Heat Transfer, vol. 128, pp. 240–250, 2006.
14. Das, S. K., Choi, S. U., & Patel, H. E. (2006). Heat transfer in nanofluids—a review.*Heat transfer engineering*, *27*(10), 3-19.
15. Yu, W., & Choi, S. U. S. (2003). The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. *Journal of Nanoparticle Research*, *5*(1-2), 167-171.
16. Xuan, Y., &Roetzel, W. (2000). Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *43*(19), 3701-3707.
17. Kern DQ. Process heat transfer. New York (NY): McGraw-Hill; 1950.