



شبیه سازی CFD جداکننده دوفازی آب و نفت و بررسی کاهش محدوده محاسباتی آن با استفاده از خط تقارن هندسه جداکننده

محمد دهقان یکه باغی^۱، مهدی کریمی^{۲*}

^۱ دانشگاه فردوسی مشهد، MD9713@yahoo.com

^۲ دانشگاه فردوسی مشهد، mehdikarimi@um.ac.ir

چکیده

خروجی چاه های نفت به طور معمول شامل سه فاز آب، نفت و گاز هستند. جداسازی این سه فاز در صنایع نفت و پتروشیمی فرآیند بسیار مهمی می باشد. از این رو طراحی جداکننده های فازی که جداسازی سه یا دو فاز را انجام می دهند، مورد اهمیت واقع می شود. عملکرد جداکننده ها معمولاً به وسیله میانگین زمان اقامت سنجیده می شود. از سوی دیگر کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی و نرم افزارهای مرتبط با آن با قدرتمندتر شدن سیستم های محاسباتی در طراحی سیستم های مهندسی افزایش یافته است. به همین دلیل در این پژوهش عملکرد یک جداکننده آب و نفت با استفاده از نرم افزار انسیس-فلوئنت به روش دینامیک سیالات محاسباتی بررسی می گردد. در این بررسی از میانگین زمان اقامت برای مقایسه شبیه سازی ها استفاده شده است. از جداکننده دوفازی آزمایشگاهی موجود در مقالات گذشته برای صحت سنجی شبیه سازی استفاده گردید. سپس تاثیر نصف کردن محدوده محاسباتی از خط تقارن آن بررسی می شود. این بررسی به این دلیل اهمیت دارد که در برخی از جداکننده ها ممکن است جریان به صورت مستقیم نبوده و به صورت چرخشی باشد که در این صورت نصف کردن محدوده محاسباتی ممکن است باعث ایجاد خطای زیادی بشود. مزیت نصف کردن محدوده محاسباتی باعث کاهش هزینه محاسباتی می شود که در مبحث دینامیک سیالات محاسباتی بسیار مهم می باشد.

کلمات کلیدی: جداکننده چندفازی، شبیه سازی CFD، جداکننده آب و نفت، میانگین زمان اقامت

The 16th National Conference
21/07/2022-(Mazandaran)
Kome elmavaran danesh
R.S. Institute
Article Code: NCCSE -90029

Indexing Accepted Articles in *Civilica*





۱. مقدمه

جداکننده‌ها وسایلی هستند که بعد از چاه‌های نفتی استفاده می‌شوند تا مواد خروجی از چاه‌های نفتی را به فازهای خالص تبدیل کنند. جداکننده‌ها معمولاً اولین وسایلی هستند که در پالایشگاه‌های شیمیایی استفاده می‌شوند و عملکرد غیر صحیح آن‌ها می‌تواند باعث صدمه به تجهیزات دیگر بشود. بر همین اساس گذارش شده است که جداکننده‌ها بر تمامی تجهیزات موجود در واحدهای شیمیایی تاثیر دارند [۱]. به همین دلیل طراحی مناسب جداکننده در واحدهای شیمیایی دارای اهمیت است.

دینامیک سیالات محاسباتی که به اختصار CFD^۱ گفته می‌شود به طور معمول برای بهینه کردن تجهیزات وجود در فرآیندهای شیمیایی مانند جداکننده‌ها، دستگاه‌های تبادل حرارتی، سیستم‌های احتراقی و ... استفاده می‌شود [۲]. محققان زیادی در مورد جداکننده‌های چندفازی با استفاده از CFD تحقیق به عمل آورده‌اند. اما در مورد میانگین زمان اقامت و استفاده از آن برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی تحقیقات کمی انجام شده است [۳]. در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی CFD جداکننده آزمایشگاهی موجود در مقاله مرجع بررسی شده است. این جداکننده ۲/۵ متر طول و ۰/۶ متر قطر دارد و یک جداکننده آزمایشگاهی با مقیاس ۱ به ۵ از جداکننده صنعتی موجود در دریای شمال می‌باشد [۴]. جداکننده‌ها در تحقیقات پیشین اکثراً به صورت سه بعدی و با هندسه کامل شبیه‌سازی شده‌اند [۱، ۳، ۵-۹]. از این رو پس از صحت‌سنجی تاثیر نصف شدن محدوده محاسباتی از خط تقارن بر نتایج شبیه‌سازی بررسی می‌شود. این موضوع از این جهت دارای اهمیت است که با کاهش اندازه محدوده محاسباتی، هزینه‌های محاسباتی کاهش یافته و از طرفی با کاهش هزینه محاسباتی برای حالت پایه شبیه‌سازی، می‌توان با افزودن معادلات و اتصال آن به مدل چندفازی پایه مدل دقیق‌تری ارائه داد در حالی که هزینه محاسباتی نسبت به حالت پایه کاهش یافته است.

در ادامه به مروری بر برخی از تحقیقاتی که در مورد جداکننده‌های چندفازی با استفاده از شبیه‌سازی CFD شده است، می‌پردازیم:

تحقیق هانسن و همکاران (۱۹۹۱) را می‌توان به عنوان اولین مطالعه بر جداکننده‌ها با استفاده از علم CFD دانست. آن‌ها کد کامپیوتری تحت عنوان "شبیه ساز جریان برای جداکننده‌ها (FLOSS)" برای شبیه‌سازی جریان در جداکننده‌ها طراحی کردند. آن‌ها یک مکعب شفاف را برای راستی آزمایی نتایج به دست آمده از کد کامپیوتری تهیه کردند. در نهایت نتایج کد کامپیوتری از لحاظ پروفایل سرعت و زمان ماند تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت [۱۰]. در ادامه تحقیق قبلی هانسن و همکاران (۱۹۹۳) نتایج کد کامپیوتری CFD خود (FLOSS) را برای جداکننده سه فازی صنعتی ارائه کردند. در ۴ سال پس از نصب جداکننده برخی مشکلات عملیاتی مانند ایجاد امولسیون و ناتوانی در کنترل سطح آب هنگام افزایش تولید آب، در این جداکننده ایجاد می‌شد. هانسن و همکاران اصلاحاتی را در جداکننده بر اساس پیش بینی‌های CFD مبنی بر ایجاد جریان‌های چرخشی بین دو بفل پیشنهاد کردند. پس از آزمون جداکننده اصلاح شده، مشکل کنترل سطح آب رفع شد. همچنین کیفیت نفت تولیدی افزایش یافت [۲].

فرانکوویچ و لی (۲۰۰۲) با استفاده از شبیه‌سازی CFD بر روی جداکننده‌های دو و سه فازی میدان نفتی مطالعاتی انجام دادند. آن‌ها اثر پیکربندی نازل ورودی، توزیع کننده‌های جریان، صفحات سوراخ‌دار و نازل خروجی را در دو حالت پایا و گذرا مورد مطالعه قرار دادند [۱۱]. لو و همکاران (۲۰۰۷) تاثیر صفحات سوراخ‌دار بر بهبود عملکرد جداسازی جداکننده‌های FWKO^۲ بررسی کردند. نتایج خطوط سرعت با استفاده از شبیه‌سازی CFD نشان می‌دهد که نصب بفل‌هایی از نوع

^۱ - Computational Fluids Dynamic

^۲ Free water knockout



صفحات سوراخ‌دار با شکستن جریان‌های چرخشی و تبدیل شدن آنها به جریان‌های چرخشی کوچک باعث بهبود توزیع جریان می‌شود. این بفل‌ها باعث افزایش زمان اقامت^۳ آب و نفت می‌شوند [۷]. هدف اصلی تحقیقات کفلاس و مارگاریس (۲۰۰۸) ارزیابی پیش‌بینی روش CFD برای یک هندسه ثابت جداکننده، در شرایط عملیاتی مختلف بود. ارزیابی جداکننده بر اساس بازده و افت فشار در طول مسیر آب صورت گرفت. در این تحقیق از مدل مخلوط نرم‌افزار FLUENT6 استفاده شد [۱۲]. پوراحمدی لاله و همکاران (۲۰۱۰) با دو رویکرد مختلف اقدام به شبیه‌سازی CFD کردند. اولین رویکرد شبیه‌سازی فقط با استفاده از مدل چند فازی DPM و رویکرد دوم شبیه‌سازی با استفاده ترکیب مدل‌های چند فازی VOF-DPM بود [۸]. پوراحمدی لاله و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از CFD و مدل VOF-DPM معیارهایی برای طراحی بهتر جداکننده‌های تولید نفت ارائه کردند [۱۳]. خروآ و همکاران (۲۰۱۲) بر روی جداکننده سه فاز افقی در میدان باب، ابوظبی، رفتار جریان داخلی و تاثیر اجزاء داخلی جداکننده بر الگوی جریان را بررسی کردند [۶]. احمد و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از CFD به مقایسه مدل طراحی جداکننده سه فاز آرنولدو استوارت با مدل سرچک و مانری پرداختند [۵]. آچریا و کاسیمیرو (۲۰۲۰) میانگین زمان اقامت در جداکننده دو فاز آب و نفت سفید را با استفاده از شبیه‌سازی CFD بررسی کردند [۳].

۲. مدل‌سازی

در دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) معادلات دیفرانسیلی حاکم بر سیال در یک حوزه محاسباتی گسسته می‌شود تا سیستمی از معادلات جبری در ابعاد مختلف هندسی و زمان به وجود بیاید. معادلات دیفرانسیلی به روش‌های گوناگون عددی مانند اختلاف محدود یا حجم محدود می‌تواند گسسته شود [۹]

معادله بقای جرم (پیوستگی):

معادله بقای جرم از موازنه کلی نرخ خالص جریان جرم ورودی به المان سیال برابر با نرخ افزایش جرم در المان سیال به دست می‌آید. معادله بقای جرم (پیوستگی) برای سیالات تراکم‌پذیر و غیر تراکم‌پذیر به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

که در آن ρ چگالی سیال و \vec{u} بردار سرعت سیال می‌باشد.

معادلات اندازه حرکت:

معادلات حرکت برای سیالات نیوتونی در روابط ۲ تا ۴ شرح داده شده است. این روابط به معادلات ناویر-استوکس مشهور است که توسط دو دانشمند به همین نام‌ها به طور مستقل در قرن نوزدهم به دست آمده است. معادلات ناویر-استوکس برای رژیم جریانی آشفته در زیر شرح داده شده است:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \vec{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla \cdot (\nabla U) + \left[\frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'^2}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{u'w'}) \right] \quad (2)$$

³ Residence Time



$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla \cdot (\nabla V) + \left[\frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{v'^2}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{v'w'}) \right] = \frac{\partial \rho V}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \vec{U}) \quad (3)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla \cdot (\nabla W) + \left[\frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'w'}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{v'w'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{w'^2}) \right] = \frac{\partial \rho W}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho W \vec{U}) \quad (4)$$

در این معادلات W, v, u به ترتیب سرعت در جهت Z, Y, X می‌باشند. μ نیز بیانگر ویسکوزیته می‌باشد. w', v', u' ترم‌های نوسانی سرعت در رژیم آشفته هستند.

در این شبیه‌سازی از مدل آشفته $k - \epsilon$ استفاده شده است:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

در این معادلات G_k نشان دهنده انرژی جنبشی آشفته به دلیل اختلافات سرعت میانگین، G_b تولید انرژی جنبشی آشفته به دلیل بویانسی و Y_m نشان دهنده سهم نوسان در تلاطم تراکم‌پذیر در نرخ اتلاف کلی می‌باشد. $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ مقادیر ثابت و $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ عدد پراشتل برای k, ϵ می‌باشند.

برای مدل‌سازی جریان چندفازی از مدل VOF استفاده شده است. این مدل در تحقیقات بسیاری برای جداکننده‌های چندفازی استفاده شده است. این مدل برای محاسبه کسر حجمی از رابطه زیر استفاده می‌کند.

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{U}_q) \right] = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (7)$$

میانگین زمان اقامت:

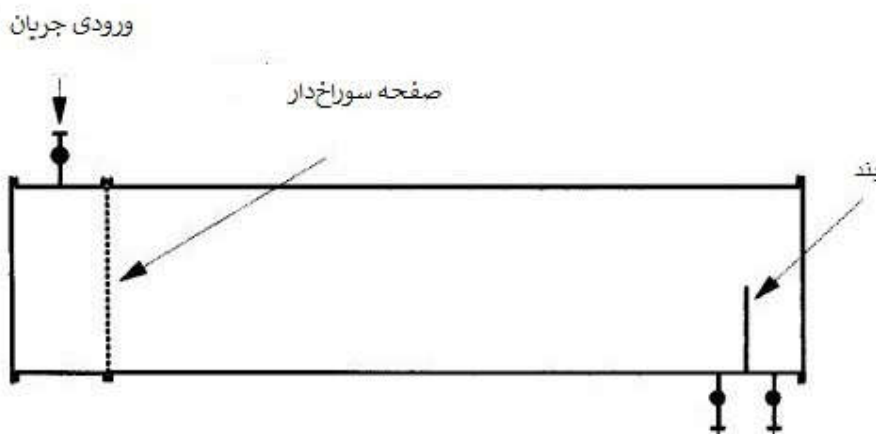
با استفاده از منحنی غلظت ردیاب بر حسب زمان و رابطه ۸ می‌توان میانگین زمان اقامت را محاسبه کرد:

$$MRT = \frac{1}{C_{max}} \int_0^{C_{max}} t \, dC \quad (8)$$

که در آن C_{max} بیشترین غلظت ردیاب و t زمان است.

۳. شبیه‌سازی

شبیه‌سازی با استفاده از ANSYS FLUEN 2019 R3 انجام شده است. از مدل چند فازی VOF و مدل آشفتگی $k - \epsilon$ برای شبیه‌سازی جداکننده استفاده شده است. هندسه جداکننده در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱- هندسه جداکننده [۴]

قطر جداکننده ۰/۶ متر و طول آن ۲/۵ متر است. فاصله صفحه سوراخ‌دار از ابتدای جداکننده ۳۰ سانتی‌متر و بند^۴ دقیقاً میان خروجی آب و نفت می‌باشد. صفحه سوراخ‌دار با استفاده از محیط متخلخل در شبیه‌سازی لحاظ شده است. جریان دوفازی ورودی برابر با $\frac{Kg}{m^3}$ می‌باشد. مشخصات سیالات ورودی را می‌توانید در جدول ۱ مشاهده کنید.

جدول ۱- مشخصات سیالات ورودی به جداکننده [۳]

سیال	آب	نفت
چگالی $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$	۹۹۸	۸۲۷
گرانروی $[mPa.s]$	۱/۰۰۳	۵/۹۰۵

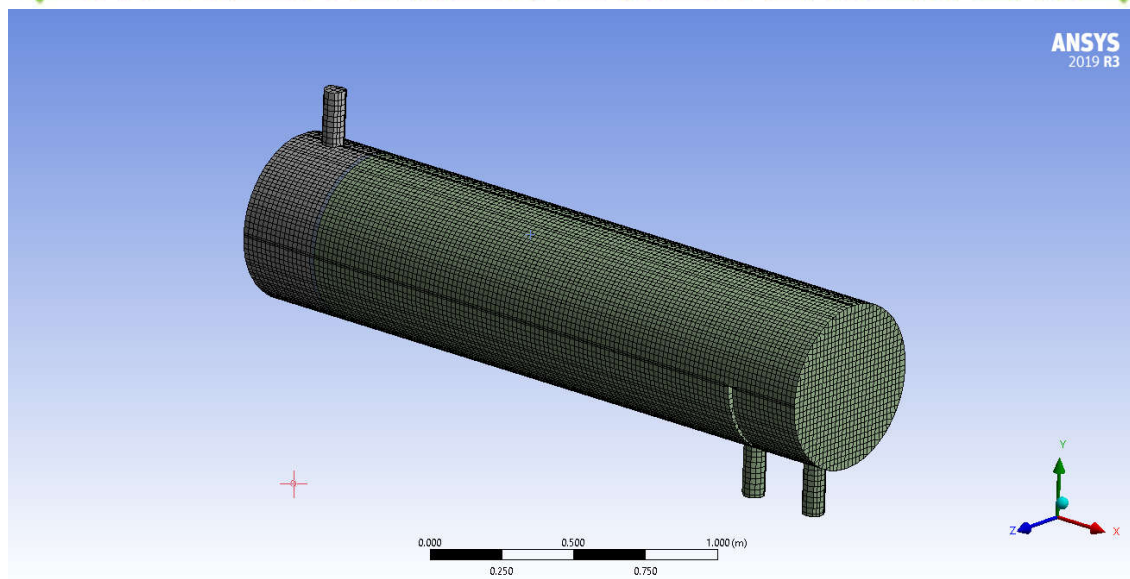
۴. نتایج

شبکه با استفاده از نرم افزار ANSYS Meshing ایجاد شده است. شبکه ایجاد شده در شکل ۲ قابل مشاهده است. کیفیت شبکه ایجاد شده با استفاده از معیار کیفیت متعماد^۵ و کیفیت چولگی^۶ بررسی شد که میانگین آن برای معیار متعامد برابر با ۰/۹۷ و برای معیار کیفیت چولگی برابر با ۰/۰۰۷ بود. بهتر است بدانیم که نتیجه این معیارها برای یک شبکه معین در محدوده ۰ تا ۱ می‌باشند و برای کیفیت متعامد هر چه به عدد ۱ و برای کیفیت چولگی هر چه به عدد ۰ نزدیک‌تر باشد، شبکه کیفیت بهتری دارد. از این رو شبکه ایجاد کیفیت بسیار خوبی دارد.

⁴ Weir

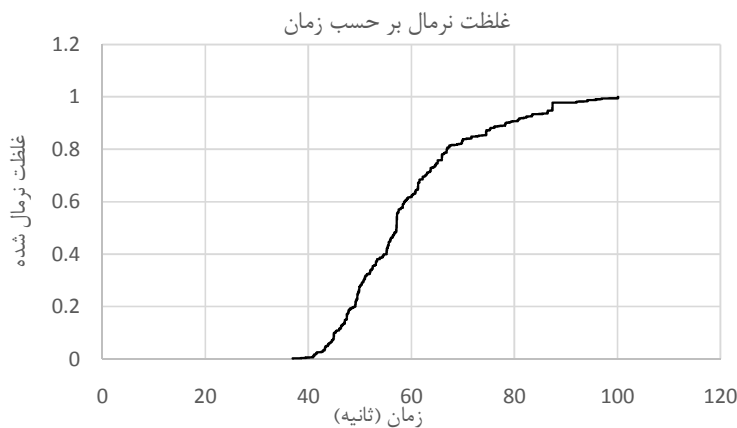
⁵ - Orthogonal Quality

⁶ - Skewness Quality



شکل ۲- شبکه ایجاد شده

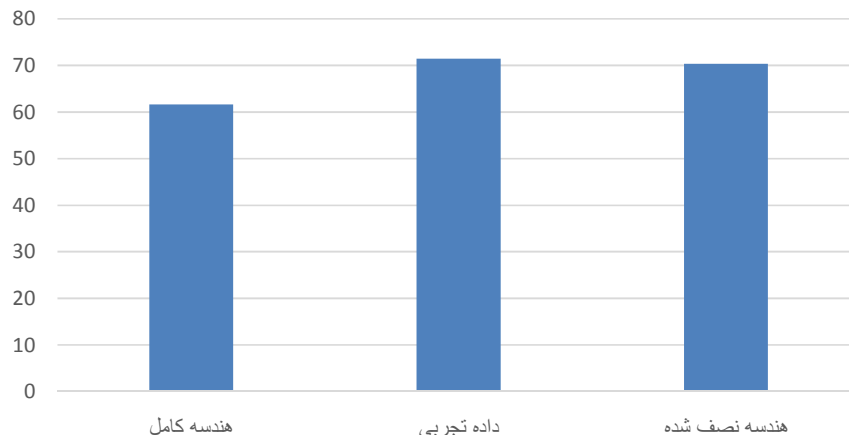
پس از ایجاد شبکه مناسب اولین گام مقایسه نتیجه به دست آمده از شبیه سازی با نتایج واقعی می باشد. برای این کار از معیار میانگین زمان اقامت استفاده شده است. برای اندازه گیری میانگین زمان اقامت ذرات در زمان صفر به جداکننده وارد شده و غلظت خروجی ذرات در طول زمان اندازه گیری می گردد. پاسخ نرمال غلظت شبیه سازی با هندسه کامل بر حسب زمان در شکل ۳ مشاهده می شود. با استفاده از این داده ها و رابطه ۷ میانگین زمان اقامت محاسبه می شود. جهت محاسبه میانگین زمان اقامت در هندسه نصف شده نیز از همین روش استفاده می شود. میانگین زمان اقامت در شبیه سازی هندسه کامل، هندسه نصف شده و داده واقعی را در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳- غلظت نرمال بر حسب زمان



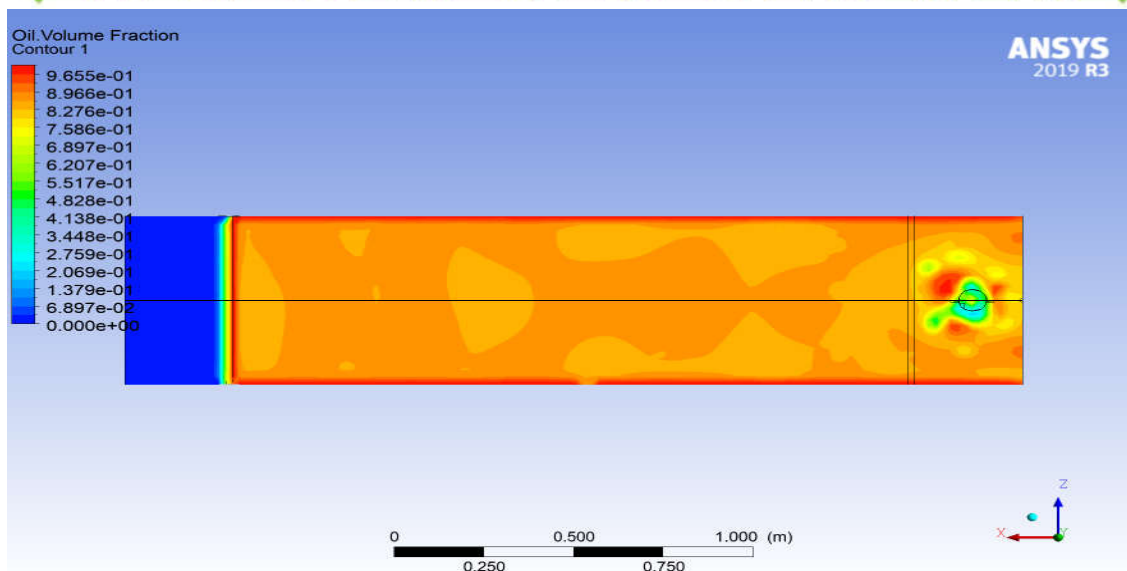
میانگین زمان اقامت



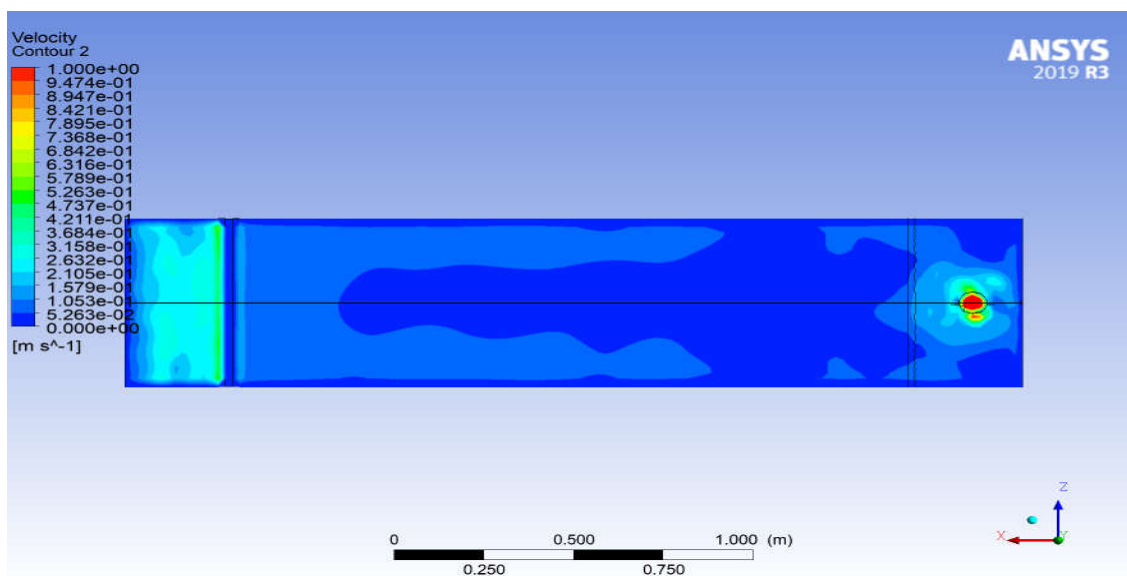
شکل ۴- مقایسه میانگین زمان اقامت شبیه‌سازی و تجربی

خطای داده‌های شبیه‌سازی هندسه کامل نسبت به داده‌های تجربی حدود ۱۳٪ می‌باشد. این مقدار خطا و بیشتر برای مدل VOF در مطالعات پیشین نیز ارائه شده است [۱۴، ۱۵]. همچنین خطای زمانی که هندسه از خط تقارن آن نصف شده نسبت به هندسه کامل ۱۲٪ و نسبت به داده‌های آزمایشگاهی ۱۱/۵٪ می‌باشد. با توجه به مقدار خطا و اینکه زمان اجرای هر تکرار از ۰/۳۵ ثانیه به ۰/۱۸ ثانیه، کاهش پیدا کرده است، استفاده از هندسه نصف شده جهت شبیه‌سازی این جداکننده دوفازی منطقی به نظر می‌رسد.

اختلاف نتایج شبیه‌سازی هندسه کامل و هندسه نصف شده را می‌توان به متقارن نبودن برخی از پارامترها نسبت به خط تقارن در جداکننده نسبت داد. از جمله این پارامترها می‌توان به کسر حجمی اشاره کرد. همانطور که در شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد در برخی از نقاط جداکننده کسر حجمی نفت نسبت به خط تقارن هندسی، تقارن ندارد. شکل ۵ نشان دهنده کسر حجمی نفت از نمای بالا در صفحه مرکزی جداکننده می‌باشد. ورودی جداکننده در سمت راست شکل ۵ قرار دارد. دیگر پارامتری که می‌توان نسبت به قرینه نبودن آن در ورودی اطمینان پیدا کرد، سرعت است. با متقارن در نظر گرفتن هندسه، پروفایل سرعت از ابتدای ورود متقارن در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که پروفایل سرعت در ابتدای جداکننده متقارن نمی‌باشد. پروفایل سرعت در ادامه جداکننده را می‌توان متقارن فرض کرد. این عدم تقارن به دلیل وجود گردابه‌هایی است که در اثر ورود جریان به مایع موجود در جداکننده ایجاد شده اند. پروفایل سرعت در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۵- کانتور کسر حجمی نفت



شکل ۶- کانتور سرعت



۵. نتیجه گیری

هدف این پژوهش بررسی اثر نصف کردن محدوده محاسباتی جداکننده دوفازی آب و نفت بر خطای شبیه‌سازی بود. خطای شبیه‌سازی هندسه نصف شده نسبت به هندسه کامل و داده‌های تجربی بر اساس میانگین زمان اقامت که یک عامل مهم در بررسی عملکرد جداکننده‌ها می‌باشد محاسبه شد. نتایج نشان داد که داده‌های شبیه‌سازی حالت هندسه نصف شده تطابق نسبتاً خوبی با داده‌های تجربی دارند. همچنین خطای آن نسبت به شبیه‌سازی با هندسه کامل کم می‌باشد که با توجه به کاهش قابل توجه زمان اجرای هر مرحله تکرار در شبیه‌سازی، شبیه‌سازی با هندسه نصف شده منطقی به نظر می‌رسد. این پژوهش گامی است برای پژوهش‌های بعدی تا از نصف کردن هندسه و کاهش زمان اجرای شبیه‌سازی استفاده شود و دیگر بررسی‌ها بر میانگین زمان اقامت جداکننده دوفازی انجام گردد.

مراجع

1. Pourahmadi Laleh, A., W.Y. Svrcek, and W. Monnery, Computational fluid dynamics-based study of an oilfield separator--Part I: a realistic simulation. *Oil and Gas Facilities*, 2012. **1**(06): p. 57-68.
2. Laleh, A.P., W.Y. Svrcek, and W.D. Monnery, Design and CFD studies of multiphase separators—a review. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2012. **90**(6): p. 1547-1561.
3. Acharya, T. and L. Casimiro, Evaluation of flow characteristics in an onshore horizontal separator using computational fluid dynamics. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2020. **5**(3): p. 261-268.
4. Simmons, M., J. Wilson, and B. Azzopardi, Interpretation of the flow characteristics of a primary oil-water separator from the residence time distribution. *Chemical Engineering Research and Design*, 2002. **80**(5): p. 471-481.
5. Ahmed, T., F. Hamad, and P.A. Russell. The Use of CFD Simulations to Compare and Evaluate Different Sizing Algorithms for Three-Phase Separators. in *OTC Brasil*. 2017. OnePetro.
6. Kharoua, N., L. Khezzar, and H. Saadawi. Application of CFD to debottleneck production separators in a major oil field in the Middle East. in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2012. OnePetro.
7. Lu, Y., et al. Effect of internal baffles on volumetric utilization of an FWKO--A CFD evaluation. in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2007. OnePetro.
8. Pourahmadi Laleh, A., W.Y. Svrcek, and W.D. Monnery, Computational fluid dynamics simulation of pilot-plant-scale two-phase separators. *Chemical engineering & technology*, 2011. **34**(2): p. 296-306.
9. SMITH, J.A., Three Dimensional CFD Simulation of Gas-Liquid Separation in a Two-Phase Separator with a Vane Pack Mist Eliminator, in Department of Mechanical Engineering. 2018, THE UNIVERSITY OF TEXAS AT SAN ANTONIO.
10. Hansen, E., et al. Numerical Simulation of Fluid Flow Behavior Inside, and Redesign of a Field Separator. in *Proc*. 1993.
11. Frankiewicz, T. and C.-M. Lee. Using computational fluid dynamics (CFD) simulation to model fluid motion in process vessels on fixed and floating platforms. in *SPE Annual Technical Conference And Exhibition*. 2002. OnePetro.
12. Kefalas, P.I. and D.P. Margaris, Numerical Analysis of Fluid Flow in a Compact Phase Separator. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2008. **2**(1).
13. Pourahmadi Laleh, A., W.Y. Svrcek, and W.D. Monnery, Design criteria for oilfield separators improved by computational fluid dynamics. *Chemical engineering & technology*, 2012. **35**(2): p. 323-333.
14. Ahmed, T., et al., Experimental analysis and computational-fluid-dynamics modeling of pilot-scale three-phase separators. *SPE Production & Operations*, 2019. **34**(04): p. 805-819.
15. Ghaffarkhah, A., M.A. Shahrabi, and M.K. Moraveji, 3D computational-fluid-dynamics modeling of horizontal three-phase separators: an approach for estimating the optimal dimensions. *SPE Production & Operations*, 2018. **33**(04): p. 879-895.