

شبیه‌سازی عددی عملکرد مخزن اسکیمر موجود در یک واحد نمک‌زدایی برای جانمایی مناسب دیواره‌های حایل

شیمای خرمی^۱ و عزیز عظیمی^{۲*}

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۱۰

تاریخ دریافت: ۹۴/۳/۲

چکیده

مقدار کاهش آلودگی نفتی از پساب در اسکیمرها تابع ابعاد هندسی و نحوه جانمایی دیواره‌های حایل درون سیستم است. یک دستگاه مخزن اسکیمر به قطر ۸ متر و ارتفاع ۱۰ متر در یک واحد نمک‌زدایی موجود است که به علت عدم طراحی صحیح مخزن و تجهیزات درون آن در بدو راه‌اندازی عمل‌کردی نامناسب داشته و از سرویس خارج شده است. با توجه به وجود مخزن، برای اصلاح عمل‌کرد آن باید ابعاد آن به‌عنوان شرایط ثابت یا محدودیت مسئله لحاظ شوند و صرفاً با جانمایی تجهیزات داخلی مشکل حل شود. در این مطالعه با استفاده از هندسه مخازن موجود با عمل‌کرد مطلوب و تشابه‌سازی هندسی، آرایش دیواره حایل اسکیمر چندضلعی بررسی شده استخراج شد. سپس شبیه‌سازی عددی میدان جریان دوفازی سه‌بعدی آشفته درون مخزن مذکور با استفاده از یک روش اویلرین-لاگرانژی در نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است. برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی جریان درون مخزن، مقدار فشار در نازل ورودی بررسی و مشاهده می‌شود که این مقدار با فشار هیدرواستاتیکی هم‌خوانی دارد. نتایج نشان می‌دهند که طراحی جدید مخزن اسکیمر در ایجاد تغییرات در این مخزن، اعم از نحوه چینش دیواره حایل، ابعاد آن و تغییر قطر نازل خروجی آب، مناسب است و به افزایش حضور ذرات نفت و همچنین افزایش مسیر ذرات نفت به سمت خروجی آب منجر شده است. بنابراین در عمل با نصب دیواره‌های حایل چندضلعی به مخزن اسکیمر موجود و تغییر قطر لوله خروجی آب می‌توان از این مخزن استفاده کرد.

کلمات کلیدی: زمان حضور ذرات نفت، مخزن اسکیمر، دیواره حایل چندضلعی، شبیه‌سازی عددی، روش DPM.

مقدمه

توجه به تزریق پساب به چاه باید آن را تا حد مجاز که آسیبی به محیط زیست وارد نشود تصفیه کرد. کارخانه نمک‌زدایی از دو قسمت کلی جداسازی آب‌نمک از نفت خام و تصفیه پساب آلوده به نفت تشکیل شده است. در مرحله تصفیه پساب آلوده به

عملیات نمک‌زدایی از نفت خام در میادین نفتی به تولید پساب‌های آلوده به نفت منجر می‌شود و با

بهینه‌سازی الگوی جریان و راندمان جداسازی نفت موجود در پساب، بررسی کردند [۵]. برای دستیابی به طراحی مناسب، شبیه‌سازی در دو حالت پایا و گذرا انجام شد.

کلاس و همکاران [۶] و ابوعمرو و اسپرینگر [۷]، بهینه‌سازی عددی و تجربی سیستم جداسازی نفت درون دریا را بررسی و سیستم کف‌گیری نفت دریایی بدون استفاده از قطعات متحرک را مطالعه کردند. سانتوس و همکاران [۸]، راندمان مخازن پیش‌شناوری^۴ برای افزایش دبی تزریق آب در چاه را با استفاده از شبیه‌سازی عددی جریان درون سه مخزن با ابعاد یکسان بدون/ با تجهیزات داخلی مقایسه کردند. ژائو و شی شبیه‌سازی عددی فرآیند جداسازی نفت از آب را در تفکیک‌کننده دیسکی با استفاده از نرم‌افزار فلونت مطالعه کردند [۸]. نتایج شبیه‌سازی عددی آنها نشان دادند که شرایط اولیه تأثیری اندک بر جداسازی نفت از آب دارند. در مخزن تفکیک‌گر محورهای متقارن بودند، لذا مدل محاسباتی ساده‌تر در نظر گرفته شد و مدل محورهای چرخان دوبعدی به جای ساختار سه‌بعدی به کار رفتند. اسپالر و اسپالر نیز تأثیر نوعی دیواره حایل با دو سطح نصب‌شده روی دیوارهای مخزن را بررسی کردند [۹].

برخی از محققان همانند فلپس، راماجو، خارس، حسین، آلمیدا و همکاران مطالعاتی عددی و آزمایشگاهی را درباره تأثیر فناوری تجهیزات داخلی مخزن اسکیم بر تصفیه پساب انجام دادند و تأثیرات برخی از متغیرهای جریان مانند دبی جریان ورودی را بر عمل‌کرد مخزن بررسی کردند و نشان دادند که با طراحی و نصب تجهیزات داخلی جدید با راندمان بالا در مخزن می‌توان متغیرهای عمل‌کردی مخزن را اعم از دبی جریان و ظرفیت تصفیه مخزن افزایش داد [۱۰-۱۴].

نفت، بسته به شرایط و مشخصات پساب و محل دفع پساب تصفیه‌شده، تجهیزات و فناوری‌هایی متفاوت وجود دارند و می‌بایست قبل از دفع، این پساب را تا اندازه‌ای تصفیه کرد تا مقدار نفت آن تا حد مجاز و استاندارد محیط زیست کاهش یابد. به‌طور کلی تصفیه پساب به چهار روش ثقلی، شناورسازی، هیدروسیکلون و فیلتراسیون انجام می‌شود. هنگامی که مقداری قابل‌توجه نفت به‌راحتی به سطح آزاد سیال بیاید (نفت آزاد)، جداسازی ثقلی روشی مناسب است. ساده‌ترین تجهیزات تصفیه پساب به‌روش ثقلی اسکیمرها هستند که در اثر نیروی ثقلی و به هم چسبیدن ذرات نفت، نفت را از آب جدا می‌کنند [۱].

کلاس و ابوعمرو مقالاتی را درباره طراحی جدید اسکیمر نفت نصب‌شده در دریا و مفهومی جدید برای طراحی SOS^۱ ارائه کردند [۲ و ۳]. در مطالعات آنها، شبیه‌سازی عددی سیستم کف‌گیری^۲ نفت برای بازه‌ای وسیع از شرایط عملیاتی انجام شد. هدف اصلی این مطالعه بهبود طراحی برای افزایش راندمان و توانایی عمل‌کرد سیستم جدایش نفت بود. شبیه‌سازی عددی جریان درون مخزن اسکیمر حاوی پره قابل‌تنظیم و کف‌گیر نفت خام با استفاده از کوپل معادلات ناویر-استوکس متوسط‌گیری‌شده رینولدز و مدل VOF انجام و در نهایت اطلاعاتی ارزشمند درباره محدودیت‌های سیستم کف‌گیری نفت ارائه شد.

علی‌زاده داخل و رحیمی شبیه‌سازی عددی یک‌نواخت‌سازی سیال در مخازن ذخیره نفت خام با ظرفیت 19000 m^3 را بررسی کردند [۴]. زمان یک‌نواخت‌سازی دو لایه نفت خام با استفاده از نتایج شبیه‌سازی (به‌کارگیری مدل MRF^۳ و مدل آشفتگی K-ε-RNG) به دست آمد که نتایج شبیه‌سازی تطابقی خوب با داده‌های عملیاتی داشتند. لی و فرانکیویچ طراحی مخزن اسکیمر با قطر بزرگ را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، برای

1. Seaway Independent Oil Skimming System

2. Skim

3. Multiple Reference Frame

4. Pre-Flotation

تجهیزات داخلی مشکل حل گردد. به این منظور، با استفاده از هندسه مخازن موجود با عمل کرد مطلوب و تشابه‌سازی هندسی، آرایش دیواره‌های حایل اسکیمبر بررسی شده استخراج شده‌اند و سپس شبکه‌المان‌ها تولید و شبیه‌سازی عددی میدان جریان دوفاز سه‌بعدی آشفته درون مخزن، به‌ترتیب با استفاده از نرم‌افزارهای گمبیت و فلونت، انجام شده‌است. در ادامه، شبکه دامنه محاسباتی برای اطمینان از تعداد المان‌های مناسب برای شبیه‌سازی عمل کرد مخزن، مطالعه شده‌است. برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی مخزن اسکیمبر مطالعه‌شده، مقادیر غلظت نفت در نازل خروجی نفت و فشار نازل ورودی مخزن بررسی شده‌اند. در نهایت با توجه به نتایج شبیه‌سازی مخزن، عملکرد آن بررسی شده‌است.

معادلات حاکم و شرایط مرزی

برای شبیه‌سازی عددی فرآیندهای مهندسی باید ابتدا معادلات حاکم بر جریان و شرایط مرزی مربوطه شناسایی و سپس با استفاده از یک الگوریتم عددی مناسب گسسته‌سازی و حل شوند.

معادلات حاکم

در مسئله حاضر، رفتار حاکم بر جریان سه‌بعدی تراکم‌ناپذیر یک سیال نیوتنی با معادلات ناویر-استوکس بیان می‌شود. جریان درون مخزن اسکیمبر بررسی شده آشفته است [۱۲] که می‌توان با محاسبه عدد رینولدز در نازل ورودی آب-نفت این موضوع را اثبات کرد. با توجه به دبی جریان و سطح مقطع نازل ورودی، مقدار عدد رینولدز به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi\mu D} = \frac{4 \times 71.255}{\pi \times 0.001 \times 0.2} = 452266.62$$

همان‌طور که دیده می‌شود رژیم حاکم بر جریان در مخزن اسکیمبر آشفته است؛ بنابراین معادلات حاکم بر مساله را می‌توان به صورت روابط (۱) و (۲) نوشت.

نی و کیو مطالعاتی عددی و آزمایشگاهی درباره عمل کرد هیدرودینامیکی تاور^۱ خلاء نصب‌شده در مخزن اسکیمبر نفت داشتند [۱۵] و فرآیند تصفیه پساب با جریان سه‌فازی شامل نفت، آب و هوا را با استفاده از روش CFD شبیه‌سازی کردند. مدل VOF برای شبیه‌سازی سطح مشترک در حال حرکت بین فازهای سیال استفاده شد. ایسمیرلیان و ایوانجلیستا بهینه‌سازی و طراحی مخازن اسکیمبر را، با هدف بررسی تاثیر تجهیزات داخلی نصب‌شده و نازل‌های ورودی و خروجی بر عمل کرد مخزن، با استفاده از نرم‌افزار فلونت بررسی کردند [۱۶]. در سال ۲۰۱۵ بهین و عظیمی در مقاله‌ای به تحلیل آزمایشگاهی و عددی تاثیر سطح آب بر راندمان مخازن تصفیه پساب پرداختند [۱۷]. در این مطالعه، شبیه‌سازی عددی دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از مدل VOF برای نشان دادن جابه‌جایی سطح مشترک دو سیال در مخزن تصفیه پساب انجام شد. آنها شبیه‌سازی را برای سطوح مختلف آب انجام دادند و ارتفاعی مناسب از آب نسبت به قطر را به دست آوردند. با وجود انجام مطالعات بسیار درباره تحلیل عددی مخازن اسکیمبر با ابعاد و تجهیزات داخلی متفاوت، شبیه‌سازی عددی مخزن اسکیمبر با ابعاد منحصربه‌فرد (قطر ۸ m و ارتفاع ۱۰ m) تاکنون انجام نشده‌است. طراحی مجدد مخزن اسکیمبر با ابعاد ثابت برای افزایش حضور ذرات نفت خام و طراحی جانمایی مناسب دیواره‌های حایل به شکل چندضلعی، که در پژوهش‌های پیشین با دیواره‌های حایل افقی، عمودی و حلقوی انجام شده بود، نیز از ویژگی‌های این تحقیق است.

در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی عمل کرد یک مخزن اسکیمبر به قطر ۸ m و ارتفاع ۱۰ m در یک واحد نمک‌زدایی، به‌علت عدم طراحی و عمل کرد نامناسب، با استفاده از ابزارهای عددی انجام شده‌است. با توجه به موجود این مخزن، در این شبیه‌سازی باید ابعاد مخزن به‌عنوان شرایط ثابت مسئله لحاظ شوند و صرفاً با جانمایی

نفت به‌صورت دبی جرمی آب و نفت در نظر گرفته شده‌است:

$$\dot{m}_{\text{water inlet}} = ۷۱.۲۰ \text{ } \dot{m}_{\text{oil inlet}} = ۰.۰۵۱۶۴ \text{ } \quad (۳)$$

در نازل‌های خروجی آب و نفت، شرط مرزی فشار خروجی معادل با فشار عمل‌کردی مخزن داده شده‌است:

$$P_{\text{oil outlet}} = ۱ \text{ } P_{\text{water outlet}} = ۱ \text{ } \quad (۴)$$

تمام دیواره‌های موجود در دامنه محاسباتی به‌صورت شرط عدم‌لغزش در نظر گرفته شده‌اند:

$$u = v = w = 0 \quad (۵)$$

سطح بالای مخزن به‌عنوان سطح آزاد با تنش‌های برشی صفر مدل شده‌است:

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0 \quad (۶)$$

سیال آب و نفت، تراکم‌ناپذیر با خواص ترموفیزیکی ثابت در نظر گرفته شده‌اند که در جدول ۱ این خواص آرایه شده‌اند.

مدل‌سازی جریان دوفازی

فرآیندهای بسیار زیادی در طبیعت و صنعت شامل جریان‌های چندفازی‌اند. شبیه‌سازی جریان چندفازی جزء یکی از پیچیده‌ترین مسائل موجود در دینامیک سیالات محاسباتی است. به‌طور کلی دو مدل اوپلرین- اوپلرین و اوپلرین- لاگرانژین برای شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی وجود دارند.

در روش اوپلرین- اوپلرین، جزء حجمی هر فاز به‌صورت تابعی پیوسته از زمان و مکان در نظر گرفته می‌شود. در مدل اوپلرین- لاگرانژین فاز پیوسته به‌صورت اوپلرین در نظر گرفته می‌شود و اثرات حضور فاز گسسته (ذرات) به‌صورت لاگرانژی لحاظ می‌شوند و با حل معادلات دیفرانسیل معمولی به دست می‌آیند.

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (۱)$$

$$u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (۲)$$

در معادله (۲)، تنش‌های رینولدز، $u'_i u'_j$ (اثرات آشفتگی در جریان)، باید مدل شوند. به این منظور، با توجه به مزایای زیر از مدل آشفتگی دومعادله‌ای k-ε-RNG برای تحلیل جریان فوق استفاده شده‌است [۱۸ و ۱۰]:

- این مدل یک ترم بیش از مدل استاندارد دارد که باعث بهبود دقت نتایج در پیش‌بینی نواحی چرخشی در جریان آشفته، جریان با کرنش سریع^۱ و جریان روی سطوح با انحنا زیاد^۲ می‌شود؛

- عدد پرناتل آشفته مقداری ثابت نیست؛
- برخلاف مدل استاندارد، علاوه بر داشتن کارایی مناسب برای جریان‌های با اعداد رینولدز بالا، برای سیال در جریان‌های با اعداد رینولدز پایین (مثلاً جریان نزدیک دیوار) نیز رفتاری مناسب‌تر را پیش‌بینی می‌کند؛

- به‌طور کلی برای جریان‌های با لایه برشی نازک و کاملاً توسعه‌یافته، با جدایی و چرخش مجدد و ثانویه مناسب است.

برای مدل‌سازی فیزیکی مسئله در حال بررسی، با توجه به این که خصوصیات سیال شامل چگالی و ضریب لزجت دینامیکی در بدترین حالت، یعنی زمستان، در نظر گرفته شده‌اند، از تاثیرات دما صرف‌نظر شده‌است.

شرایط مرزی و مشخصات ترموفیزیکی

برای حل معادلات حاکم بر مسئله، شرایط مرزی مناسب با فیزیک مسئله را باید تعیین کرد. به‌طور کلی شرایط مرزی برای حل جریان سیال در این مطالعه برای مرزهای ورودی، خروجی و دیوارها تخصیص می‌یابند. در این مطالعه سیال ورودی مخلوط آب- نفت (با غلظت بسیار پایین نفت) است که نازل ورودی آن را به درون اسکیمر هدایت می‌کند. شرط مرزی برای نازل ورودی آب-

1. Rapidly Strained
2. High Streamline Curvature

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی مسئله.

مقدار	مورد
$\rho_{water} = 1169.5$	چگالی آب شور همراه با نفت (kg/m^3)
$\mu_{water} = 0.001003$	ضریب لزجت دینامیکی آب (kg/(m.sec))
$\rho_{oil} = 849$	چگالی نفت (kg/m^3)
$\mu_{oil} = 0.01015$	ضریب لزجت دینامیکی نفت (kg/(m.sec))

مجازی (\vec{F}_V) و بالابری (\vec{F}_L) هستند [۷]:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_G + \vec{F}_V + \vec{F}_L \quad (7)$$

نیروی پسا

نیروی پسا به علت سرعت نسبی فاز پیوسته و فاز گسسته ایجاد و با توجه به ضریب پسا بیان می‌شود [۷]:

$$\vec{F}_D = \frac{18\mu}{\rho_s d_p} \frac{d\vec{u}_p}{dt} \quad (8)$$

Re عدد رینولدز نسبی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho_s d_p |\vec{u}_p - \vec{u}_s|}{\mu} \quad (9)$$

C_D نیز از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۹]:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (10)$$

a_1 ، a_2 ، a_3 ، ثوابتی هستند که برای ذرات کروی در بازه‌ای وسیع از اعداد رینولدز به کار می‌روند. در این مطالعه، مقادیر این ضرایب براساس رابطه مورسی و الکساندر محاسبه شده‌اند [۲۰]:

$$5000 < Re < 10000$$

$$a_1 = 0.66, a_2 = -0.546, a_3 = 57.87 \times 10^{-4}$$

$$10000 < Re < 50000$$

$$a_1 = 0.5191, a_2 = -1.662, a_3 = 5.4167 \times 10^{-4}$$

نیروی وزن

اصولاً نیروی وزن ذره از لحاظ بزرگی پس از نیروی پسا قرار دارد. این نیرو با توجه به چگالی ذره می‌تواند تاثیر بسیار زیادی بر حرکت ذره داشته باشد [۲۱]:

$$\vec{F}_G = \frac{(\rho_p - \rho) \vec{g}}{\rho_p} \quad (11)$$

با توجه پایین بودن نسبت جزء حجمی نفت نسبت به آب، در این مطالعه می‌توان جریان را به دو فاز پیوسته و گسسته تقسیم‌بندی و از مدل اوپلرین- لاگرانژیین نسخه فاز پخش‌شده (DPM) ^۱ استفاده کرد.

مدل DPM

در این روش، فازهای پیوسته (آب) و گسسته (نفت) به ترتیب به صورت اوپلری و لاگرانژی در میدان جریان مدل‌سازی می‌شوند. در این حالت آب به صورت یک محیط پیوسته در نظر گرفته و رفتار آن با حل معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس تعیین می‌شود. فاز گسسته شامل ذرات پراکنده کروی نفت است که در فاز پیوسته (آب) پخش شده‌اند. مشخصات فاز پخش‌شده با تعقیب ذرات در میدان جریان محاسبه شده معلوم می‌شود. فاز پخش‌شده می‌تواند با فاز پیوسته تبادل ممنتم، جرم و انرژی داشته باشد. فرض اساسی در به‌کارگیری این مدل این است که فاز گسسته می‌تواند بار جرمی بالا ($\dot{m}_{particle} > \dot{m}_{fluid}$)، اما کسر حجمی کم داشته باشد؛ بنابراین برای استفاده از این مدل، فاز گسسته باید به مقدار کافی رقیق (کسر حجمی کم‌تر از ۱۰-۱۲٪) باشد که در این پروژه این فرض برقرار و کسر حجمی حدود ۰/۰۷۲٪ است. معادله حرکت یک ذره کروی در داخل یک سیال پیوسته از برابری برآیند نیروهای وارد بر ذره و تغییرات ممنتم آن به دست می‌آید. در این تحقیق، با توجه به شرایط عمل‌کردی و ابعاد ذره، نیروهای تاثیرگذار بر حرکت ذره شامل نیروهای پسا (\vec{F}_D)، وزن یا شناوری (\vec{F}_G)، جرم

نیروی جرم مجازی

هرگاه در میدان جریان قطرات نفت نسبت به سیال آب شتاب بگیرند و $\rho > \rho_p$ شود، بخشی از سیال نیز به‌عنوان دیواره شتاب می‌گیرد. این نیروی اضافی نیروی جرم مجازی است که از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۱]:

$$\bar{F}_B = C_v \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (\bar{V} - \bar{V}_p) \quad (12)$$

ضریب C_v به هندسه ذره وابسته است که برای مطالعه حاضر مقدار آن ۰/۵ است.

$$\bar{F}_L = \frac{C_L \rho d_{ij}^2}{\rho_s d_s} \frac{\rho d_{ij}}{(d_{ik} d_{kl})^{0.75}} (\bar{V} - \bar{V}_s) \quad (13)$$

ضریب C_L نیروی بالابری با مقدار ۲/۵۹۴ است. نیروی بالابری با افزایش قطر ذرات افزایش می‌یابد و در حرکت چرخشی و نزدیک دیوار نیز مهم است.

در شبیه‌سازی جریان دوفازی با رویکرد DPM، می‌بایست علاوه‌بر تعیین شرایط مرزی فاز پیوسته، شرایط مرزی فاز گسسته مشخص گردند. با توجه به اطلاعات موجود در مقالات، برای شرایط مرزی فاز پخش‌شده (قطرات نفت) در خروجی‌ها شرط فرار^۱ و در دیواره‌ها شرط بازتاب^۲ با ضرایب عمودی و برشی ۰/۵ و ۰/۷۵ لحاظ و برای سطح بالایی شرط تله^۳ در نظر گرفته شده است [۱۴].

الگوریتم و حل عددی معادلات حاکم

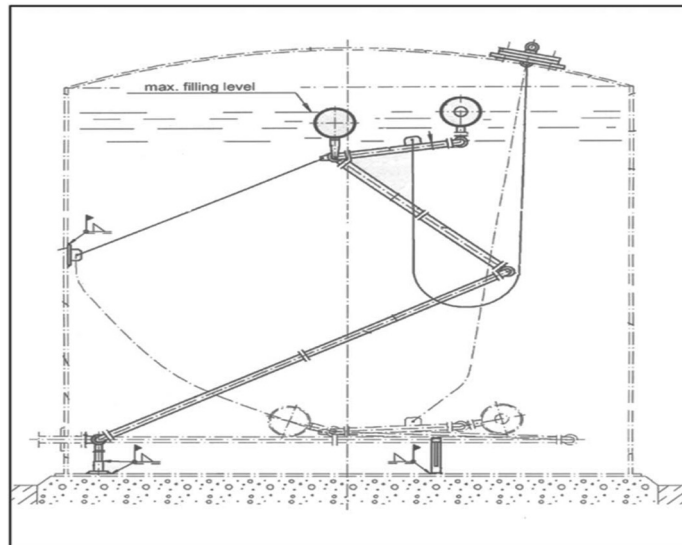
برای حل معادلات حاکم بر مسئله، باید روش عددی مناسبی انتخاب شود. برای این منظور از روش بالادستی، با دقت مرتبه دو در نرم‌افزار فلونت استفاده شده است. محاسبات تا دقت 10^{-5} برای تمام متغیرها انجام شده‌اند. برای کوپل معادلات سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل با کوپل معادلات (حل هم‌زمان) استفاده شده است. چرا که برای مسائلی که نیروی شناوری در آنها مهم است پیشنهاد می‌شود که برای بهبود روند هم‌گرایی، معادلات هم‌زمان حل شوند. هم‌چنین به‌علت پیچیدگی‌های هندسی و فیزیکی موجود، مسئله شبه‌پایا در نظر گرفته شده است. در

این تکنیک مسائل دائم به‌صورت شبه‌دائم و گام زمانی مشخص حل می‌شوند تا روند هم‌گرایی بهبود یابد. در این مطالعه، الگوریتم شبیه‌سازی عددی مسئله بدین صورت انجام شده که ابتدا جریان آب به‌صورت پیوسته و تک‌فاز حل و سپس حضور ذرات نفت به‌صورت فاز پخش‌شده در روش DPM در نظر گرفته شده‌اند.

مدل‌سازی هندسی و تولید شبکه

برای تصفیه پساب و افزایش خلوص آب در یک مخزن اسکیمر باید به قطرات نفت فرصت داد تا روی سطح آب شناور و از آب جدا شوند. مقدار و کیفیت فرآیند جداسازی در مخازن به زمان حضور ذرات وابسته بوده و این مشخصه تابعی از هندسه سیستم است. برای افزایش زمان حضور ذرات و هدایت جریان در مخازن اسکیمر معمولاً از دیواره‌های حایل استفاده می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، هدف از انجام این مطالعه شبیه‌سازی و بررسی عددی عمل کرد یک مخزن اسکیمر واحد نمک‌زدایی با قطر ۸ m و ارتفاع ۱۰ m و طراحی جانمایی مطلوب دیواره‌های حایل آن است. مخزن اولیه در دسترس که قبلاً طراحی شده است (شکل ۱)، به‌علت طراحی نامناسب تجهیزات داخلی، در زمان راه‌اندازی کارایی و عمل‌کردی مطلوب نداشته و نمی‌تواند غلظت مجاز نفت همراه آب در خروجی را فراهم کند. در واقع پساب خروجی از نازل آب به‌علت کوتاه بودن مسیر حرکت ذرات نفت، شامل ذرات نسبتاً درشت نفت بود و عمل‌کرد آن تایید نشد و در نظر است در هندسه مخزن تغییراتی اعمال شوند تا عمل‌کرد آن بهبود یابد. به این منظور، از یک هندسه مخزن اسکیمر موجود با عمل‌کرد مطلوب با قطر ۱۰ m و ارتفاع ۵ m و دیواره‌های حایل با ابعاد مشخص به‌عنوان معیار استفاده و به کمک تشابه‌سازی هندسی، آرایش دیواره‌های حایل در مخزن اسکیمر در حال مطالعه با دیواره‌های حایل متفاوت و به‌صورت چندضلعی استخراج شد.

1. Escape
2. Reflect
3. Trap



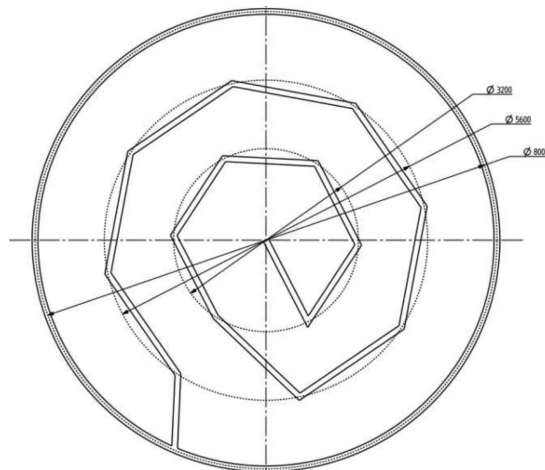
شکل ۱ شمتیک مخزن اسکیمر در واحد نمک‌زدایی، قبل از تغییرات.

مخزن را در ۸/۶ m (در حالت طراحی) نگه داشت، قطر جدید نازل خروجی آب با استفاده از معادله برنولی محاسبه شده است:

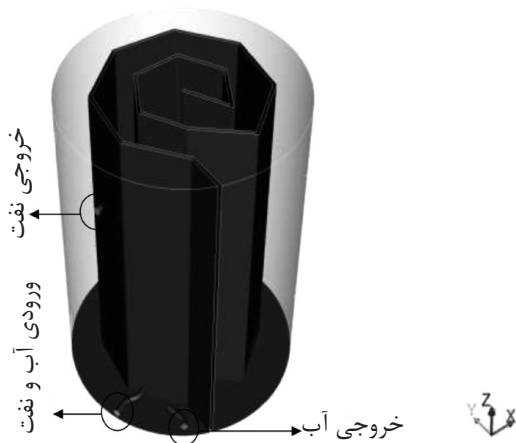
$$\frac{z_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + \sum \tau \frac{z_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + \sum h_f + \sum h_m \Rightarrow \frac{z_2^2}{2g} \sqrt{\frac{2(\sum h_f + \sum h_m)g}{1+K}} = \frac{K}{J} \quad (14)$$

اندیس ۱ نشان‌دهنده موقعیت سطح آزاد سیال در مخزن در ارتفاع ۸/۶ m و اندیس ۲ نشان‌دهنده موقعیت نازل خروجی آب است. با توجه به دبی ورودی آب-نفت، قطر استاندارد ۸۰ mm برای نازل خروجی آب به دست آمده است. ضمناً قطر خروجی نازل نفت براساس طراحی مخزن (بدون تغییر) در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ مشخصات هندسی مخزن اسکیمر مطالعه شده ارایه شده‌اند. در قدم بعدی برای شبیه‌سازی عددی، پس از تولید هندسه، گسسته‌سازی هندسی یا همان المان‌های منظور شبکه در نرم‌افزار گمبیت نسخه ۲ تولید شده است. یکی از چالش‌های اصلی شبیه‌سازی فرآیندهای مهندسی در هندسه‌های پیچیده، تولید شبکه با کیفیت مناسب است. کیفیت شبکه‌بندی و تعداد المان‌های دامنه محاسباتی بر دقت محاسبات موثر است.

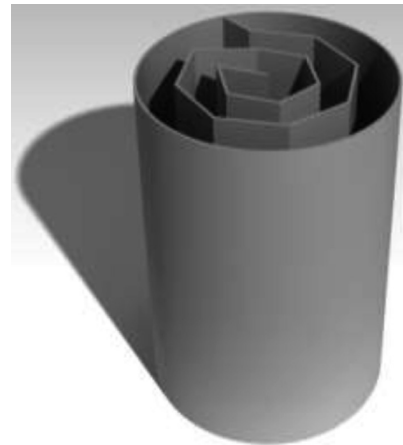
به‌علت پیچیدگی‌های هندسی، هندسه مخزن در نرم‌افزار کتیا تولید شده است. در شکل‌های ۲ و ۳ هندسه‌های ایجاد شده از دیواره‌های حایل چندضلعی حاصل از تشابه‌سازی در نرم‌افزار کتیا از نماهای مختلف نشان داده شده‌اند. شایان ذکر است در شبیه‌سازی عددی عمل‌کرد مخزن اسکیمر، ضخامت دیواره‌ها و لوله‌ها در نظر گرفته نشده‌اند. در شکل ۴ محل قرارگیری نازل‌های ورودی آب-نفت و خروجی‌های آب و نفت نشان داده شده‌اند. جریان از راه نازل و لوله ورودی به مخزن وارد و پس از عبور از دیواره حایل، که موجب افزایش زمان حضور ذرات و شناور شدن قطرات نفت روی آب می‌شود، از نازل‌های خروجی نفت و آب تخلیه می‌شود. با توجه به وجود مخزن، ارتفاع نازل‌ها را باید شرط ثابت مسئله در نظر گرفت. محل قرارگیری نازل خروجی آب و قطر آن تأثیر بسیار بر کیفیت تصفیه پساب دارد. در این حال، با توجه به ثابت بودن محل قرارگیری نازل‌ها، باید قطر نازل خروجی آب را برای داشتن ارتفاع سطح آزاد مخزن تغییر داد. مخزن اسکیمر مطالعه شده برای دبی جریان ورودی ۷۱/۲۵ m/s طراحی شده است. هم‌چنین همان‌طور که گفته شد، ارتفاع این مخزن ۱۰ m و قطر آن ۸ m است. برای این که بتوان ارتفاع سطح آزاد سیال در



شکل ۲ نمای بالا از مخزن اسکیمر و دیواره‌های حایل.



شکل ۴ محل قرارگیری نازل‌های ورودی و خروجی.



شکل ۳ هندسه سه‌بعدی مخزن اسکیمر.

جدول ۲ مشخصات هندسی مسئله.

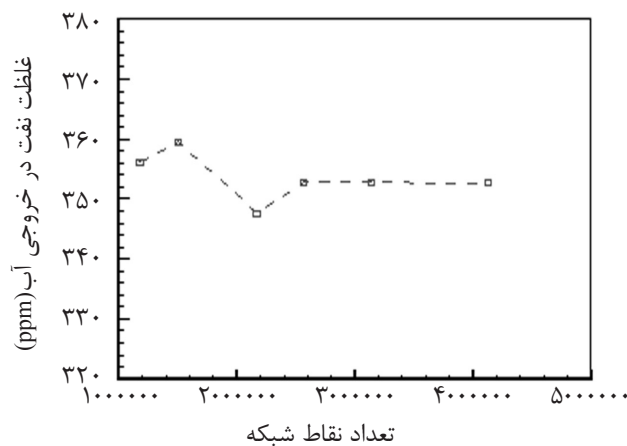
مقدار	مورد
$H=1000$	ارتفاع مخزن (mm)
$H_{free-Surface}=8600$	ارتفاع سطح آزاد آب (mm)
$D=8000$	قطر مخزن (mm)
$D_{feed}=200$	قطر لوله تغذیه نفت و آب (mm)
$D_{oil}=60$	قطر داخلی نازل خروجی نفت (mm)
$D_{water}=80$	قطر داخلی نازل خروجی آب (mm)
$h_{water}=442.5$	فاصله عمودی نازل خروجی آب از کف مخزن (mm)
$h_{oil}=8347.5$	فاصله عمودی نازل خروجی نفت از کف مخزن (mm)
۵۰	قطر ذرات نفت (μm)

به روش عددی و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در نرم افزار فلوئنت شبیه سازی شده است. برای شبیه سازی از روش حجم محدود در نرم افزار انسیس فلوئنت نسخه ۱۴/۵ استفاده شده است. برای کوپلینگ میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل و کوپل استفاده شده و تمام ترم های موجود در معادله ناویر-استوکس با استفاده از دقت مرتبه دوم گسسته سازی شده اند. با توجه به این که غلظت نفت ورودی بسیار پایین تر از آب است، برای شبیه سازی جریان دوفازی از روی کرد DPM استفاده شده است. در این روی کرد ابتدا فاز پیوسته به صورت اویلری حل و سپس، با حل معادلات لاگرانژ برای فاز پخش شده (قطرات نفت)، مسیر حرکت قطرات محاسبه شد. با توجه به این که در مدل سازی جریان دوفازی با روی کرد DPM، محل و مسیر حرکت ذرات ارتباط مستقیم با میدان سرعت حل شده دارد، در این بخش ابتدا میدان جریان، فشار و خطوط سرعت جریان سیال پیوسته ارائه می شوند. در شکل ۸ الف خطوط هم تراز فشار در صفحه میانی xz نشان داده شده اند.

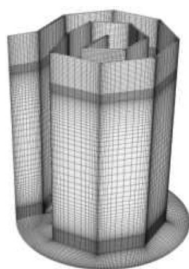
کیفیت شبکه بندی و تعداد المان های دامنه محاسباتی بر دقت محاسبات موثر است. در این مطالعه از شبکه بندی سازمان یافته برای گسسته سازی هندسی استفاده شده است. در نواحی کنار مرزهای جامد و هم چنین نواحی دارای گرادیان های محلی بالا از شبکه ای با المان های بیشتر استفاده شده است. برای داشتن نتایجی با دقت مناسب، باید استقلال نتایج حاصل از شبیه سازی را از تعداد شبکه المان ها بررسی کرد (شکل ۵). در نهایت شبکه بندی مخزن با ۳۱۳۹۵۷۵ نقطه در نظر گرفته شده که شبکه مورد نظر برای نقاط مختلف مخزن در شکل ۶ نشان داده شده و برای فهم بهتر چگونگی تولید شبکه نیز نحوه شبکه بندی قسمت دیواره های حایل و کف مخزن در شکل ۷ ارائه شده است.

نتایج عددی

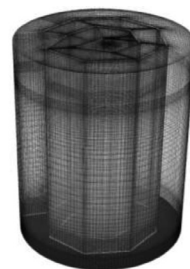
در این مطالعه میدان سیال دوفازی آب و نفت در یک مخزن اسکیمر با دیواره های حایل چندضلعی



شکل ۵ بررسی استقلال نتایج شبیه سازی از شبکه المان ها.



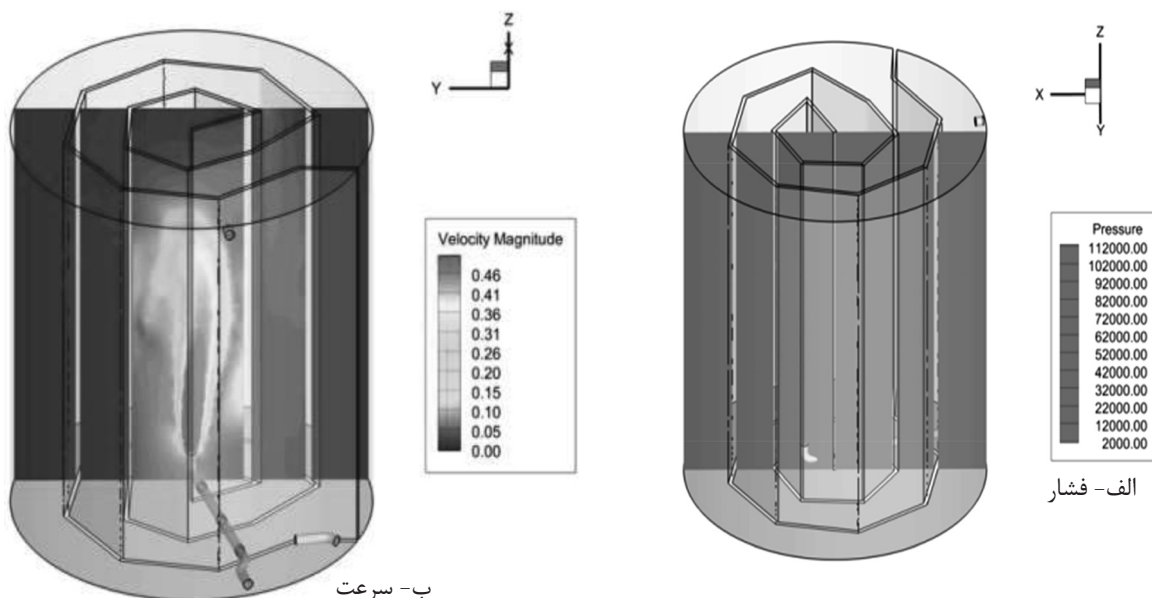
شکل ۷ شبکه بندی دیواره های حایل و کف مخزن.



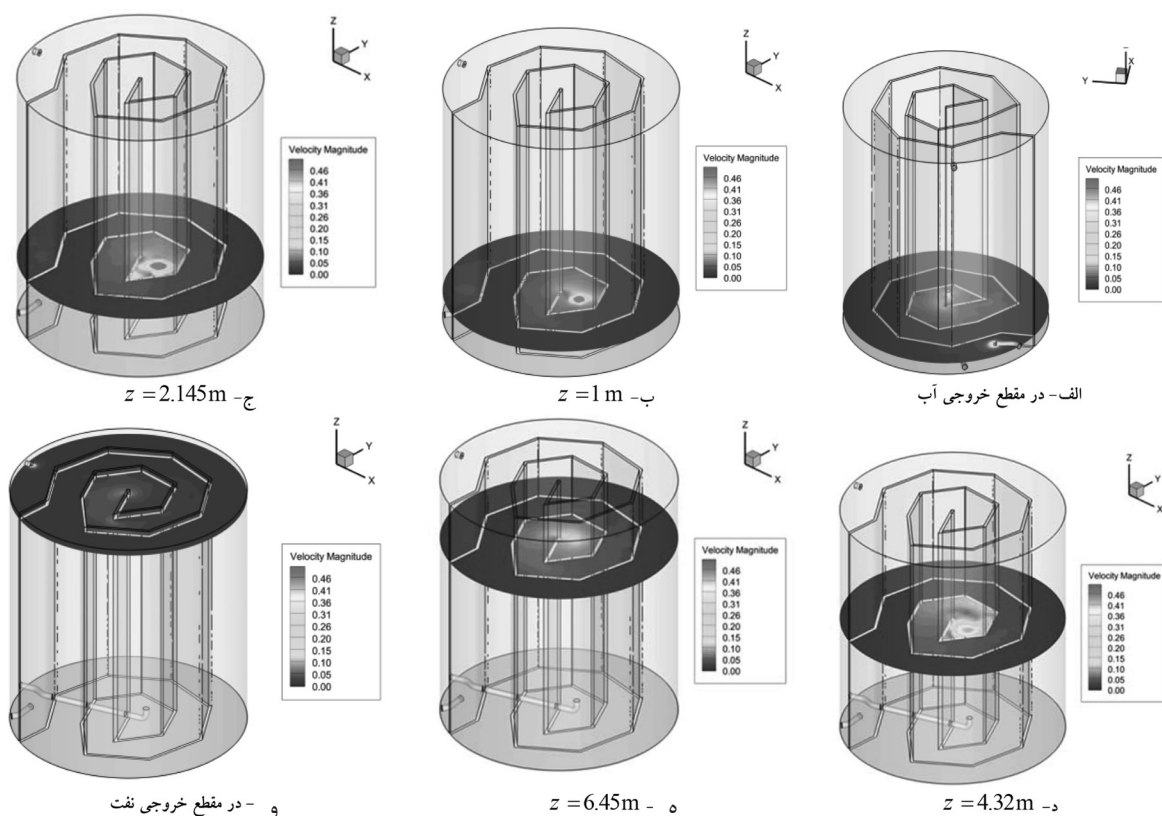
شکل ۶ شبکه بندی دامنه محاسباتی.

تقسیم‌بندی می‌شوند. به‌طور کلی اسکیمرها یا صفحات حایل ندارند و یا دارای صفحه‌های حایل عمودی، افقی یا حلقوی‌اند. با وجود این صفحات، جریان سیال در حالت پایا، به‌جای یک مسیر کوتاه، یک مسیر طولانی‌تر را تا رسیدن به نازل خروجی آب طی می‌کند و باعث افزایش زمان حضور ذرات می‌شود. جریان با رسیدن به نازل‌های خروجی، به‌دلیل قطر کوچک نازل‌ها، شتاب می‌گیرد و با سرعت از آنها خارج می‌شود (شکل‌های ۹ الف و ۹ و). در شکل ۱۰ خطوط جریان در دامنه محاسباتی نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشخص است سیال خروجی از نازل ورودی در یک مسیر دایره‌ای می‌چرخد. همچنین به‌علت حضور نواحی چرخشی در سیستم و وجود نواحی کم‌فشار موضعی خطوط جریان انحنا و پیچیدگی‌های بسیار زیادی دارند. با عبور جریان از دیواره‌های حلقوی و به‌دلیل اثرات لایه مرزی ایجادشده روی آن، آرایش جریان کاملاً منطبق بر دیواره‌هاست (شکل ۱۰ ب). نکته بارز دیگر در شکل این است که جریان با رسیدن به نازل‌های خروجی، به قدر کافی شتاب می‌گیرد و از آنها خارج می‌شود.

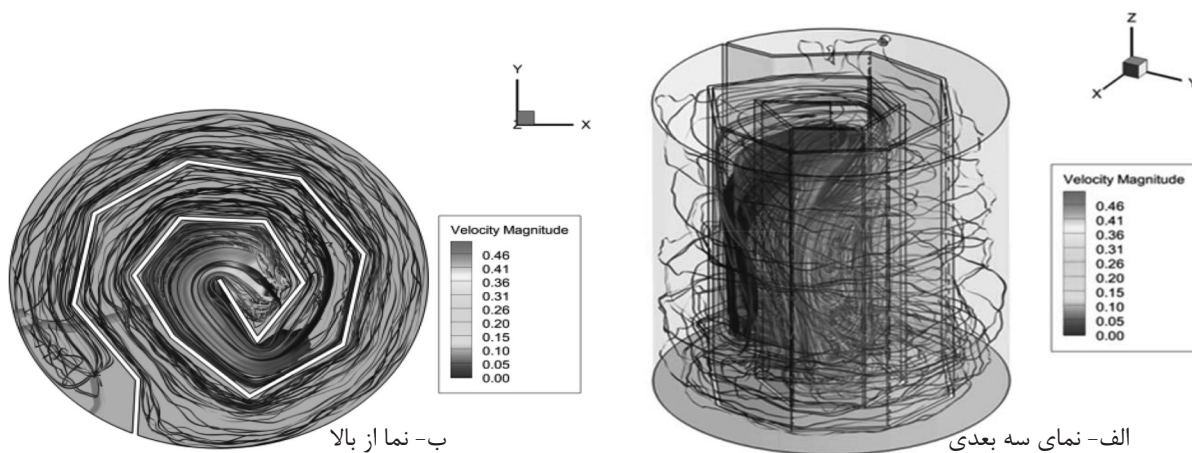
با توجه به حضور اثرات گرانش و شرایط هیدرواستاتیک در مدل‌سازی، فشار استاتیکی سیال با رفتن به سمت کف مخزن افزایش می‌یابد که پدیده‌ای کاملاً فیزیکی و قابل‌پیش‌بینی است. در شکل ۸ ب خطوط هم‌تراز سرعت در صفحه xz نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل، جریان ورودی با دبی و هد مشخص به‌صورت جت^۱ وارد دامنه محاسباتی می‌شود و در نتیجه دو ناحیه چرخشی اصلی در مخزن ایجاد می‌شوند. همچنین مشخص است که اثرات جریان ورودی با افزایش ارتفاع از کف کاهش می‌یابد. در شکل ۹ خطوط هم‌تراز سرعت در مقاطع (خروجی آب، $z=1\text{m}$ ، $z=2.145\text{m}$ ، $z=4.32\text{m}$ ، $z=6.45\text{m}$) و خروجی نفت نشان داده شده‌اند. با توجه به خطوط هم‌تراز سرعت نشان داده‌شده، بیش‌ترین سرعت در محل نازل ورودی ایجاد می‌شود. جریان آب ورودی به‌علت حضور دیواره‌های حایل در یک مسیر دایره‌ای حرکت می‌کند. وجود این دیواره‌ها باعث افزایش زمان حضور ذرات می‌شود و در حقیقت ذرات فرصت می‌یابند روی سطح آب شناور و از مخزن خارج شوند. با افزایش ارتفاع از کف مخزن، مقدار سرعت کاهش می‌یابد. همان‌طور که در بخش‌های قبل گفته شد، مخازن اسکیمر براساس هندسه



شکل ۸ خطوط هم‌تراز در صفحه میانی xz .



شکل ۹ خطوط هم‌تراز سرعت در مقاطع مختلف در صفحه xy .

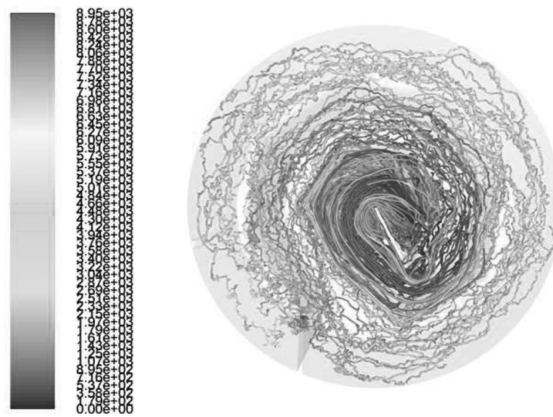


شکل ۱۰ خطوط جریان درون مخزن.

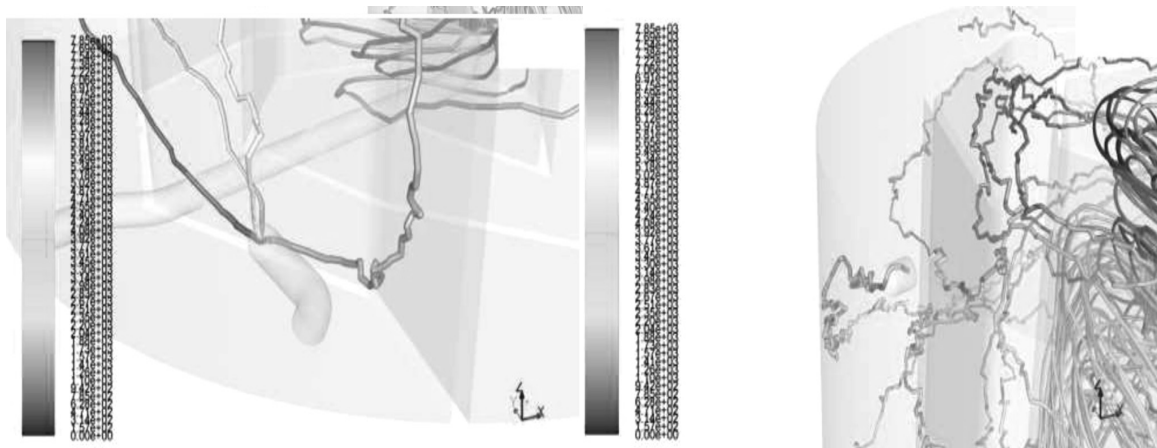
شبیه‌سازی مسیر حرکت ذرات نفت

پس از مدل‌سازی جریان تک‌فازی، معادلات لاگرانژی مربوط به حرکت ذرات نفت حل شده و در نهایت، با توجه به موقعیت و سرعت اولیه ذرات و استفاده از نرم‌افزار فلونت، مسیر حرکت ذرات در هر لحظه محاسبه شده است. در شکل ۱۱ مسیر حرکت ذرات از نمای بالا نشان داده شده است. مشاهده می‌شود

که ذرات از خطوط جریان تبعیت می‌کنند و خطوط جریان تقریباً مشابه مسیر حرکت ذرات‌اند. همچنین ذرات در مخزن در برخی از گردابه‌های محلی به تله می‌افتند و در نتیجه زمان حضور آنها افزایش می‌یابد. در شکل ۱۲ مسیر حرکت ذرات نزدیک نازل‌های خروجی نفت و آب نشان داده شده است.



شکل ۱۱ نمای بالا از مسیر حرکت ذرات.



(ب) نزدیک نازل خروجی آب

(الف) نزدیک نازل خروجی نفت

شکل ۱۲ مسیر حرکت ذرات.

آب از مسیر ورودی نفت- آب تا خروجی نفت شده‌است. در پژوهش‌های پیشین در زمینه ابعاد مناسب مخزن اسکیمر گفته شده که قطر باید دو برابر ارتفاع [۱۰] و ارتفاع سطح آزاد آب ۵۰٪ قطر جداکننده باشد [۱۶]. اما در این مطالعه، با توجه به این که ابعاد مخزن و ارتفاع نصب نازل‌ها ثابت هستند، از هیچ کدام از این نتایج نمی‌توان استفاده کرد و برای بهبود عمل‌کرد مخزن و افزایش زمان حضور، قطری جدید برای نازل خروجی آب طراحی شده‌است تا ارتفاع سطح آزاد آب متناسب با ارتفاع نصب نازل‌ها تامین شود. با این تغییرات، مقدار دبی نفت در نازل‌های ورودی و خروجی و همچنین در سطح آزاد سیال درون مخزن مطابق با جدول ۳ به‌دست آمده‌است.

با توجه به مسیر حرکت ذرات مشخص است که ذرات نفت از نازل‌های خروجی نفت و آب خارج می‌شوند. با این حال مسلماً زمان حضور ذرات نفت بیش از حالتی شده که دیواره‌های حایل وجود نداشته‌اند. در واقع زمان طی کردن مسیر ورودی آب- نفت تا خروجی آب ذرات نفت بیش از زمان طی کردن مسیر ورودی آب- نفت تا خروجی نفت همان ذرات شده‌است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که به‌دلیل حضور دیواره‌های حایل و همچنین ایجاد نواحی چرخشی با فشارهای محلی پایین، جریان سیال هم‌زمان یک مسیر دایره‌ای و روبه‌بالا را می‌پیماید که این مسئله باعث افزایش زمان حضور ذرات در مخزن و طولانی‌تر شدن مسیر ورودی نفت- آب تا خروجی

جدول ۳ مقدار دبی نفت به دست آمده از شبیه سازی حاضر در مقاطع مختلف.

دبی نفت (kg/Sec)			
نازل ورودی	نازل خروجی آب	نازل خروجی نفت	سطح آب مخزن
۰/۰۵۱۶	۰/۰۲۱۵	۰/۰۰۵۵	۰/۰۲۴۵

بررسی صحت نتایج

چون طراحی دیواره حایل مخزن در این مطالعه انجام شده و این تجهیزات هنوز ساخته و نصب نشده اند، اعتبارسنجی عمل کرد مخزن طراحی شده ممکن نیست. با این حال درباره سازگاری فیزیکی می توان گفت که فشار نازل ورودی به مخزن بررسی شده، با توجه به ارتفاع مخزن ۱۰ m گرفته شده از خروجی نرم افزار، ۱/۰۶ barg است که با شرایط هیدرواستاتیکی مخزن مطابقت دارد. از همه مهم تر این که غلظت قطرات نفت در نازل خروجی نفت برای مخزن اسکیمر مطالعه شده در حد مجاز عملیاتی به دست آمد که با مقادیر مربوط به مخازن با کارکرد مناسب در واحد نمک زدایی بررسی شده تقریباً یکسان است؛ بنابراین شبیه سازی به درستی انجام شده است.

نواحی چرخشی با فشارهای محلی پایین و پیمایش قطرات نفت در مسیری تقریباً منطبق بر خطوط جریان هستند. علاوه بر آن، با توجه به ثابت بودن موقعیت نازل های خروجی، برای بهبود عمل کرد مخزن و افزایش زمان حضور، قطری جدید برای نازل خروجی آب طراحی شده تا بتواند ارتفاع سطح آزاد آب را متناسب با ارتفاع نصب نازل ها تامین کند. بنابراین با نصب دیواره های حایل چندضلعی در مخزن اسکیمر موجود و تغییر قطر لوله خروجی آب می توان از این مخزن استفاده کرد. از طرف دیگر، برای افزایش کارایی و بازده مخزن، می توان در کارهای آتی دیواره های حایل با هندسه های مختلف و جانمایی های متفاوت برای مخزن مزبور و امکان افزایش ظرفیت تولید آن را بررسی کرد.

علائم و نشانه ها

- C_D : ضریب نیروی پسا
- C_L : ضریب نیروی بالابر
- C_v : ضریب نیروی جرم مجازی
- d_p : قطر ذره (قطرات نفت) (m)
- d_{ij} : تانسور نرخ کرنش
- \vec{F} : بردار نیرو (N)
- g : شتاب ثقل (m/s^2)
- H_L : جمله اتلاف انرژی (m)
- K : ضریب اتلاف انرژی موضعی
- \dot{m} : دبی جرمی (kg/s)
- p : فشار (pa)
- R_e : عدد رینولدز
- t : زمان (s)
- u : مولفه سرعت لحظه ای (m/s)
- u' : مولفه سرعت نوسانی (m/s)

نتیجه گیری

در این مطالعه میدان سیال دوفازی آب و نفت در یک مخزن اسکیمر با دیواره های حایل چندضلعی به روش عددی و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در نرم افزار فلوئنت شبیه سازی شده است. با کاهش قطر نازل خروجی آب و استفاده از دیواره حایل چندضلعی و جانمایی مناسب آن، مخزن اسکیمر برای افزایش مسیر ذرات نفت تا خروجی آب دوباره طراحی شده است. می توان از شبیه سازی نتیجه گرفت که تغییرات مخزن، اعم از نحوه چینش دیواره های حایل و ابعاد آنها، مناسب بوده و باعث افزایش زمان حضور قطرات نفت در مخزن و طولانی شدن مسیر نازل ورودی تا نازل خروجی آب، نسبت به مسیر نازل ورودی تا نازل خروجی نفت، شده اند. خطوط جریان نیز نشان دهنده وجود

ρ : چگالی (kg/m^3)

\vec{V} : بردار سرعت لحظه‌ای (m/s)

x : مختصه مکان (m)

پایین نویس

p : نشان دهنده ذره (قطره نفت)

z, θ, r : نشان دهنده مولفه سرعت مختصات استوانه‌ای

علائم یونانی

μ : لزجت دینامیکی (kg/m.s)

ν : لزجت سینماتیکی (m^2/s)

مراجع

- [1]. Santos F., Fontes C., Aguirre J. and Mvmelo, M., "Efficiency comparison of tanks of pre-flotation using computational fluid dynamics," 20th Int. Cong. Mech. Eng., Brazil, November, 2009.
- [2]. Clauss G. and Abu Amro M., "A new design concept for seaway independent oil skimming," ASME 23rd Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Eng., Vancouver, British Columbia, Canada, pp. 403-410, 2004.
- [3]. Clauss G. and Abu Amro M., "Two and three phase flow computational for the optimization of oil skimmer systems," 3rd Int. Symp. Two Phase Flow Model. Exp., Pisa, Italy, September 2004.
- [4]. Alizadeh Dakhel A. and Rahimi M., "CFD simulation of homogenization in large scale crude oil storage tanks," J. Petroleum Sci. and Eng., Vol. 43, Issue 4, pp. 151-161, August 2004.
- [5]. Lee C. M. and Frankiewicz T., "The design of large diameter skim tanks using computational fluid dynamics (CFD) for maximum oil removal," 15th Annual Produced Water Seminar, Texas, USA, January 2005.
- [6]. Clauss G., Abu Amro M., and Kosleck S., "Numerical and experimental optimization of a seaway independent oil skimming system-SOS," 16th Int. offshore and polar Eng. Conf. & Exhib., San Francisco, California, USA, 2006.
- [7]. Abu Amro M. and Sprenger F., "An Innovative offshore oil skimming system for operation in harsh sea," J. Ship Tech. Research, Vol. 55, Issue 4, pp. 147-156, October 2008.
- [8]. Zhao Z. and Shi B., "Numerical simulation of oil-water separation process in disk separator," Int. Conf. on Remote, Sensing Environ. Transp. Eng., Nanjing, China, 2010.
- [9]. Schaller E. and Schaller E., "Dual surface density baffle for clarifier tank," Patent US7963403, USA, June 2011.
- [10]. Phelps D., Khan R. I., Lee J. M., Andrews P. and Marlowe D., "Fluid modeling helps improve skim tank performance," J. World Oil, Vol. 231, Gulf Publishing Co., Houston, PP. 147-151, 2012.
- [11]. Ramajo D. E., Ravicula M., Macciaro C., Weismann P. and Nigro N. M., "Numerical and experimental evaluation of skimmer tank technologies for gravity separation of oil in produced water," Ind. Appl. (B), Vol. 31, No. 23, pp. 3693-3714, 2012.
- [12]. Kharous L., Khezzer L. and Saadawi H., "Application of CFD to debottleneck production separators in a major oil field in the Middle East," SPE Annual Technical Conf. and Exhibition, Texas, USA, October 2012.
- [13]. Hussein H. A., Abdullah R., Harun S. and Abdulkhaleq M., "Numerical model of baffle location effect on flow pattern in oil and water gravity separator Tanks," J. World Applied Sciences, pp. 1351-1356, 2013.
- [14]. Almeida L., Briggs A., Peralta R. and Ropelato K., "Evaluation of oil removal efficiency at gravitational tanks using CFD," ESSS Conf. & Ansys Users Meeting, 2013.

- [15]. Ni S., Qiu W., Zhang A. and Prior D., "Hydrodynamic simulation and optimization of an oil skimmer," ASME 32nd Int. Conf. Ocean Offshore and Arctic Eng., Nantes, France, Vol. 9, 2013.
- [16]. Ismirlian P. and Evangelista A., "Optimization of the design of a skimmer tank," ESSS Conf. & Ansys Users Meeting, Argentina, 2014.
- [17]. Behin J. and Azimi S., "Experimental and computational analysis on influence of water level on oil-water separator efficiency," J. Sep. Sci. and Tech., Vol. 50, Issue 6, pp. 154-159, 2015.
- [18]. Orszag S. A., Yakho V., Flannery W. S., Boysan F., Choudhury D., Maruzewski J. and Patel B. "Renormalization group modeling and turbulence simulation," Int. Conf. on Near Wall Turb. Flow, Tempe, Arizona, 1993.
- [19]. Morsi S. A. and Alexander A. J., "An investigation of particle trajectory in two phase flow system," J. Fluid Mech., Vol. 55, Issue 2, pp. 193-208, 1972.
- [20]. Ranade V. V., "Computational flow modeling for chemical reactor engineering," Elsevier, Burlington, 2001.
- [21]. "Ansys Fluent Documentation," Version 14.5.