

مدل سازی فرایند جداسازی قطره‌های نفت خام امولسیون از پساب واحد نمک زدایی

محمد رضا طلاقت*، پیام پرواس، رضا ارجمند مزیدی

بخش مهندسی شیمی، نفت و گاز دانشگاه صنعتی شیراز

چکیده: نفت خام متشکل از آلودگی‌های گوناگون آب نمک، گاز و رسوب است که باید در واحد نمک‌زدایی جداسازی شوند. در ادامه جداسازی، پساب تولیدی واحد نمک‌زدایی نیز باید از قطره‌های نفت تصفیه شود. در این پژوهش یک مدل ریاضی برای جداسازی قطره‌های تعلیقی نفت از پساب واحد نمک‌زدایی ارائه شده است. در نتیجه موازنه جمعیت، یک معادله غیرخطی هاپربولیکی انتگرالی دیفرانسیلی به دست آمد و جمله انتگرال‌های موازنه جمعیت آن با استفاده از روش Fixed-pivot ساده شدند. معادله‌های جزئی (PDE) به دست آمده با استفاده از روش خط (Method of line) به یک دسته معادله‌های معمولی (ODE) تبدیل شدند. این دسته معادله‌های (ODE) با استفاده از روش عددی اختلاف محدود و به کمک نرم افزار MATLAB حل شدند. پروفیل توزیع حجمی قطره‌های نفت، میانگین قطر قطره‌ها، میزان جداسازی نفت در طول ارتفاع سامانه در زمان‌های گوناگون بررسی و ثبت شدند که نتیجه‌ها نشان داد میزان درصد حجمی نفت در پایین مخزن نسبت به بالای آن ۴۰٪ کاهش یافته است. نتیجه‌های به دست آمده از مدل‌سازی برای تعلیق‌های نفت در آب با داده‌های آزمایشگاهی موجود در منابع مقایسه شدند. در این پژوهش همچنین تأثیر پارامتر گرانروی و چگالی بر افزایش جداسازی فاز پراکنده و میانگین قطر قطره‌ها نیز بررسی شدند. شایان ذکر است که در این بررسی ضریب‌های تنظیم پذیر موجود در معادله‌ها با توجه به برنامه بهینه‌سازی DE تنظیم شد. نتیجه‌ها نشان داد که با کاهش چگالی و گرانروی نفت خام، اندازه متوسط قطره‌های نفت تا حدود ۲۰٪ بزرگ‌تر می‌شوند و در نتیجه میزان جداسازی افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: واحد نمک‌زدایی، جداسازی، تعلیق آب در نفت، روش خط، روش محور ثابت، جداسازی ثقیلی ناپیوسته.

KEYWORDS: Desalination unit, Isolation, Oil in water emulsion, Line method, Fixed pivot method, Batch gravity separation.

مقدمه

میزان ممکن برسند تا از بروز مشکلات جلوگیری شود. در بین ناخالصی‌ها، وجود نمک در نفت خام می‌تواند سبب خوردگی شدید شود. ترکیب نمک محلول در نفت خام به‌طور معمول به صورت سدیم کلرید و نمک‌های منیزیم و کلسیم است. با گرم نمودن نفت

همواره نفت خام استخراج شده از چاه با ناخالصی‌های گوناگونی از جمله گل، ذره‌های جامد، آب، نمک، املاح، مقدارهای اندکی از فلزهای وانادیوم، نیکل، مس، کادمیوم، سرب و آرسنیک همراه است. این ناخالصی‌ها می‌بایست پیش از ورود به پالایشگاه به کم‌ترین

* عهده‌دار مکاتبات

+Email: talaghat@sutech.ac.ir

شناوری^{۱۰} قرار می‌گیرند که حاصل برآیند همه این نیروها توسط قانون استوکس بیان شده و سرعت ته نشینی قطره‌های آب در نفت طبق معادله (۱) بیان می‌شود. در واقع اختلاف بین چگالی نفت و آب باعث جدا شدن این دو فاز از یکدیگر می‌شود.

$$w = \frac{(\rho_c - \rho_d)d^2g}{18\mu_c} \quad (1)$$

در معادله (۱)، w سرعت ته نشینی، ρ_c چگالی فاز پیوسته، ρ_d چگالی فاز پراکنده، d قطر قطره‌های فاز پراکنده، g شتاب گرانش زمین و μ_c گرانشی فاز پیوسته است. این معادله نشان می‌دهد که سرعت ته نشینی با افزایش قطر ذره‌ها، کاهش گرانشی فاز نفت و افزایش اختلاف دانسیته آب و نفت افزایش می‌یابد. به همین دلیل است که با به هم پیوستن ذره‌های ریز آب به هم و تشکیل قطره‌های بزرگ‌تر، آب سریع‌تر و آسان‌تر ته نشین می‌شود. این عمل را ائتلاف^{۱۱} گویند.

با پیشرفت علم، امروزه از روش‌های نوین استفاده از غشاهای امواج میکروویو^{۱۲} و فراصوت^{۱۳} برای فرایند نمک‌زدایی استفاده می‌شود. نیروی فراصوت وارد بر تعلیق به دلیل تفاوت سرعت صوت درون دو سیال و اختلاف دانسیته دو فاز باعث جداسازی قطره‌ها از سیال همراه می‌شود. امواج میکروویو پیوند الکتریکی دوگانه آب و نفت را می‌شکنند در نتیجه قطره‌های آب می‌توانند آزادانه ته نشین شوند که این امر به جداسازی بهتر آب و نفت کمک می‌کند [۵].

روش‌های سنتی نمک‌زدایی از نفت خام برای نفت‌های سبک و متوسط با API بیش‌تر از ۳۰ مناسب هستند. به‌طور معمول نمک‌زدایی از نفت‌های سنگین در صنعت با استفاده از دستگاه نمک‌زدایی الکترواستاتیکی صورت می‌گیرد. نمای کلی از واحد بهره‌برداری و نمک‌زدایی الکترواستاتیکی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این فرایند نخست نفت خام وارد مخزن‌های گاززدایی شده و طی چندین مرحله، گاز از نفت جدا می‌شود. تعداد مخزن‌های مورد استفاده متناسب با میزان گاز همراه نفت و فشار گاز ورودی خواهد بود. نفت خروجی از مخزن گاززدایی وارد مخزن ائتلاف کننده شده و با ایجاد زمان ماند کافی، آب آزاد از نفت جدا می‌شود. با افزایش زمان ماند در این مخزن میزان جداسازی افزایش می‌یابد. ساختمان داخلی این مخزن به گونه‌ای است که به نفت خام اجازه می‌دهد

خام، مخلوطی از ترکیب‌های کلرید، سولفات‌ها و کربنات‌های جامد بر جای می‌ماند و نمک‌های حل شده در نفت کلرید، هیدروژن آزاد می‌کنند. وجود حتی مقدار اندکی کلریدریک، خاصیت خوردندگی ترکیب‌های گوگردی را افزایش می‌دهد. وجود مقدار زیاد آب نمک در نفت موجب بروز مشکلات بزرگ و خسارت‌های مالی سنگین و مکرر می‌شود [۱۹-۱]. آب نمک موجود در نفت خام بر اساس قطر قطره‌های پراکنده در آن به سه دسته آب آزاد، آب تعلیق شده و آب حل شده تقسیم می‌شود. قطره‌های درشت آب که به صورت آزاد در نفت پراکنده‌اند، در مدت زمانی کم‌تر از پنج دقیقه در ته ظرف ته‌نشین می‌شوند. بخشی از آب نیز به صورت قطره‌های ریز تعلیق در نفت معلق می‌ماند و هیچ‌گاه خودبه‌خود ته‌نشین نمی‌شود. هر چه قطره‌ها ریزتر باشند جدا کردن آن‌ها از نفت خام مشکل‌تر است. آب حل شده در نفت نیز ته‌نشین نمی‌شود و در عمل تنها راه جداسازی آن، پایین آوردن درجه گرما است. حلالیت آب در نفت تا حد زیادی تابع درجه گرما و نوع هیدروکربن‌های موجود در نفت خام است [۲]. تعلیق آب در نفت خام ممکن است در هر یک از مرحله‌های تولید نفت و صنایع فرایندی به‌وجود آید؛ و به وسیله طیف وسیعی از مواد طبیعی موجود در نفت یا عامل‌های گوناگون، پایدار بماند. پایداری تعلیق‌ها وابسته به عامل‌های گوناگونی مانند اندازه قطره‌ها، اختلاف دانسیته فاز پیوسته و فاز پراکنده، گرانشی، غلظت مواد تعلیق‌کننده و تعلیق‌شکن، نسبت حجم فازها و دما است [۳]. روش‌های نمک‌زدایی از نفت خام به دسته‌های زیر تقسیم‌بندی می‌شود [۴].

۱- روش جداسازی به روش ته نشینی ثقلی^۱

۲- روش جداسازی به روش شیمیایی^۲

۳- روش جداسازی به روش گرمایی^۳

۴- روش جداسازی به روش مکانیکی^۴

۵- روش جداسازی به روش الکتریکی^۵

ته نشینی ثقلی معمولاً در مخزن‌های ته نشین کننده^۶، مخزن‌های جدا کننده آب آزاد^۷ و یا در مخزن‌های شستشو^۸ صورت می‌گیرد [۳]. قطره‌های آب نمک وقتی درون فاز پیوسته نفت حرکت می‌کنند، تحت تأثیر سه نیروی وزن، دراگ^۹ و نیروی

(۱) Settling coalescing

(۳) Thermal coalescing

(۵) Electrical coalescing

(۷) Free water knockouts-FWKO

(۹) Drage

(۱۱) Coalescence

(۱۳) Ultrasonic

(۲) Chemical coalescing

(۶) Mechanical coalescing

(۶) Settlers

(۸) Gun Barrels

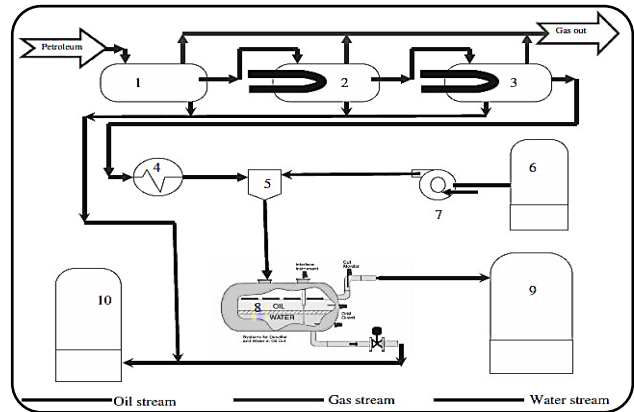
(۱۰) Buoyancy

(۱۲) Microwave

قرار گیرد تا میزان نفت آن بنا به محل دفع تا حد مجاز و استاندارد محیط زیست کاهش یابد و از طرفی ذره‌های جامد معلق نیز باید پیش از تزریق از پساب جدا شوند. شایان ذکر است که پساب پالایشگاه‌های نفت دارای نفت به صورت آزاد و تعلیق است. برتری‌ها و معایب روش‌های جداسازی نفت از آب در جدول ۱ آورده شده است. تاکنون پژوهش‌های زیادی بر روی فرایند نمک‌زدایی صورت گرفته است. تمرکز بسیاری از این پژوهش‌ها بر روی روش‌های آزمایشگاهی جداسازی است. تمرکز برخی از پژوهش‌ها نیز بر مدل سازی اختلاط آب و نفت و عملیات جداسازی آب و نفت در حضور و یا نبود میدان الکتریکی و بررسی آزمایشگاهی جداسازی است. آلپاوس^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۳ میلادی پدیده اختلاط آب و نفت را در یک مخزن همزن دار به عنوان یک سامانه تعلیق منظم مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها سامانه را با استفاده از مدل موازنه جمعیت و در نظر گرفتن نرخ شکست و به هم پیوستگی قطره‌ها مدل سازی کردند و اندازه قطره‌ها و توزیع آن‌ها را به دست آوردند [۸]. همچنین اثر شدت اختلاط و نوع رژیم جریان را بر رفتار سامانه مطالعه نمودند.

هاکانسون^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۹ میلادی تشکیل تعلیق را در یک همگن کننده فشار بالا^۴ به صورت دینامیکی مورد مطالعه قرار دادند [۷]. آن‌ها با استفاده از معادله موازنه جمعیت، شکست، به هم چسبیدن و جذب درشت مولکول‌های تعلیق کننده^۵ را بررسی نمودند. آن‌ها در مطالعه خود فرض کردند جذب و به هم چسبیدن ذره‌ها توسط سرعت برخورد پایدارکننده‌های درشت مولکولی کنترل می‌شود و مدل بر اساس انتقال همرفتی و نفوذی در جریان آشفته است.

میتره^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۴ میلادی شکست و به هم چسبیدن قطره‌های آب موجود در نفت را هنگام عبور سیال از درون تجهیزاتی مانند شیر مدل سازی کردند [۱۰]. قطره‌های مورد مطالعه در آزمایش و مدل سازی آن‌ها در محدوده ۰/۱ تا ۱۰۰ میکرومتر بود. در این پژوهش معادله موازنه جمعیت به کمک روش کلاس‌ها گسسته‌سازی شد. آن‌ها درستی مدل ارایه شده را به کمک نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش‌های مربوط به عبور تعلیق از یک مجرا مورد ارزیابی قرار دادند. پارامتر قطر متوسط محاسبه شده در مدل سازی آن‌ها در حدود ۸٪ با داده‌های تجربی اختلاف داشت که نشان دهنده کارایی مدل نوشته شده است. شایان ذکر است که مدل آن‌ها ۴ پارامتر تنظیم پذیر داشت.



شکل ۱ - نمودار جریان فرایند نمک‌زدایی (۱- مخزن گاززدایی، ۲- مخزن ته نشینی ثقی، ۳- مخزن نوسان گیر، ۴- مبدل گرمایی، ۵- محل تزریق آب شیرین، ۶- مخزن آب شیرین، ۷- پمپ تزریق آب شیرین، ۸- نمک‌زدای الکترواستاتیک، ۹- مخزن ذخیره پساب و ۱۰- مخزن ذخیره نفت فراورشی شده [۵]

حدود ۲۴ ساعت (بسته به میزان نفت خام) در داخل مخزن بچرخد و زمان کافی برای ته نشین شدن قطره‌های آب مهیا شود. در بسیاری از تجهیزات با گرما دادن به نفت خام و اضافه کردن مواد تعلیق شکن، سرعت جداسازی را افزایش می‌دهند. نفت خامی که از این مخزن خارج می‌شود حدود ۰/۵ تا ۲ درصد آب همراه دارد؛ این مقدار آب وابسته به شرایط فرایند متغیر است. فشار نفت خروجی مخزن ائتلاف کننده، توسط تلمبه تقویت شده و وارد مخزن نوسان گیر^۱ می‌شود. در مخزن نوسان گیر، نوسان‌های شدت جریان گرفته شده و جریان ورودی به مرحله بعد یکنواخت می‌شود. سپس نفت پمپ شده و وارد مبدل‌های گرمایی می‌شود. پس از گرم شدن، جریان نفت به ورودی ائتلاف کننده‌های الکتریکی وارد می‌شود. در این بخش مقداری آب شیرین و ماده تعلیق شکن به جریان نفت خام تزریق می‌شود. با ترکیب نفت خام آب‌زدایی شده و آب تازه، غلظت نمک در آب موجود در نفت کاهش می‌یابد. در مخزن نمک‌زدای الکترواستاتیک، آخرین ذره‌های پراکنده آب نمک در نفت ته نشین و تخلیه می‌شوند. استفاده از میدان الکتریکی و تعلیق شکن سرعت ته نشین شدن قطره‌های آب را افزایش می‌دهد [۷-۴].

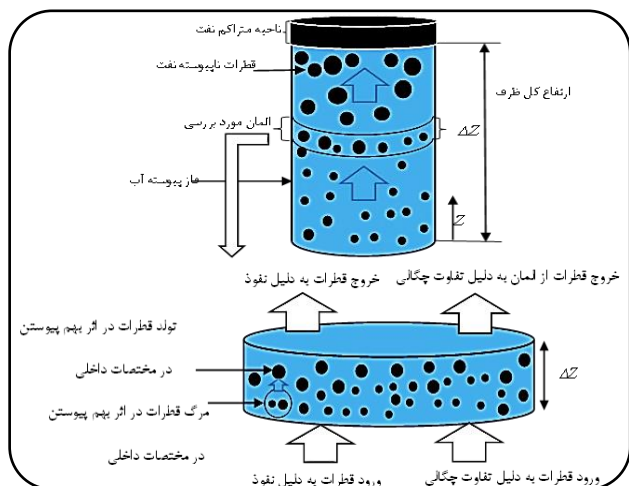
یکی از مشکل‌های واحدهای نمک‌زدایی از نفت خام، تولید پساب‌های آلوده به نفت است. به طور کلی می‌توان گفت که پساب خروجی از واحد نمک‌زدایی می‌بایست پیش از دفع تا اندازه‌ای مورد تصفیه

(۱) Surge tank
(۳) Håkansson
(۵) Emulsifier

(۲) Alopaeus
(۹) High pressure homogenization
(۶) Mitre

جدول ۱ - برتری‌ها و معایب روش‌های تصفیه پساب [۹-۱۰]

فرایند	برتری‌ها	معایب
جداسازی ثقلی	اقتصادی است و سادگی بهره برداری دارد.	الف- محدودیت بازدهی در موقعیت‌های حساس، ب- حذف کم و یا عدم حذف نفت، ج- محدودیت حذف نفت تعلیقی
زیستی	حذف نفت محلول	الف- مستعد به هم خوردن، ب- نیاز به پیش تصفیه
امواج مایکروویو	گرم کردن فقط تعلیق آب در مخلوط آب و نفت به صورت انتخابی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی	ایمن نبودن سامانه‌های موجود برای استفاده از امواج مایکروویو در مقیاس صنعتی
امواج فراصوت	کاهش استفاده از ماده تعلیق شکن شیمیایی و جلوگیری از دفع این مواد به محیط زیست	عدم استفاده در مقیاس صنعتی تاکنون
غشا	هزینه پایین و جداسازی فیزیکی آسان‌تر نسبت به الکترواستاتیک	گرفتگی مسیر عبور غشاها به وسیله آلودگی‌های موجود در نفت خام



شکل ۲ - طرح شمایی و المان مورد بررسی تعلیق قطره‌های نفت در آب

در المان ارایه شده سامانه مورد بررسی قطره‌های نفت هستند و موازنه‌های نوشته شده فقط برای قطره‌های نفت است. در سامانه بالا موازنه حرکت قطره‌های نفت در توده سیال آب در جهت ارتفاع از معادله زیر استفاده می‌شود.

$$\dot{N}_z - \dot{N}_{z+\Delta z} = -\frac{dN_z}{dz} = -\frac{d(wn)}{dz} \quad (2)$$

$$\dot{J}_z - \dot{J}_{z+\Delta z} = -\frac{dJ_z}{dz} = -\frac{d}{dz}(-D_z \frac{dn}{dz}) \quad (3)$$

که در این عبارت w سرعت بالا رفتن قطره‌ها و N و J هر دو فلاکس تعداد و D_z ضریب نفوذ انتقال جرم در جهت z و n چگالی تعداد قطره‌های نفت است. با توجه به عبارت به دست آمده برای حرکت قطره‌های نفت در آب موازنه جرم به صورت معادله (۴) به دست می‌آید [۱۳، ۱۴]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial(wn)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial n}{\partial z} \right) - v_f n \delta(z - z_{int}) + \theta \quad (4)$$

(۱) Zhang

ژانگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۶ میلادی [۱۱] تعلیق نفت در آب را تهیه کردند و تأثیر تعلیق شکن‌های گوناگون و غلظت آن‌ها را در جداسازی قطره‌های نفت از آب بررسی کردند. همچنین تأثیر درصد نمک موجود در آب را در جداسازی بررسی کردند. نموداری از توزیع اندازه قطره‌های نفت معلق در آب را در زمان‌های گوناگون ارایه کردند.

مدل سازی سامانه ناپیوسته پساب با استفاده از معادله موازنه جمعیت

طرح شمایی المان مورد بررسی سامانه مورد مطالعه به صورت شکل ۲ است. در این شکل قطره‌های معلق نفت موجود در پساب واحد نمک‌زدایی در حال بالا آمدن هستند. لازم به ذکر است که در فرایند مورد مطالعه، فاز پیوسته آن آب و فاز پراکنده آن قطره‌های نفت است. برای بررسی سامانه و پیش‌بینی کلی رفتار قطره‌های نفت موجود در آب باید المانی از دستگاه مورد بررسی قرار گیرد و به کل سامانه تعمیم داده شود. دستگاه مورد بررسی از کف ظرف تا سطح مشترک آب و نفت است. با توجه به توضیحات انجام شده برای بررسی موازنه جرم، دو نوع مختصات برای این سامانه مورد مطالعه تعریف شده است. مختصات اول، مختصات خارجی است که با توجه به سامانه مورد بررسی، مختصات آن استوانه‌ای است و چون در جهت r و θ تغییرات ثابت فرض می‌شود، تنها موازنه جرم برای المان مورد بررسی در جهت z نوشته می‌شود. مختصات دوم، مختصات داخلی است. منظور از مختصات داخلی، ویژگی‌های قطره‌های نفت مورد بررسی است. از ویژگی‌های قطره‌ها می‌توان به قطر، حجم و غلظت اشاره نمود. در مختصات خارجی یکی از عامل‌های تغییرات، تعداد قطره‌های المان مورد بررسی و سرعت بالا رفتن قطره‌های نفت در اثر اختلاف چگالی فاز پراکنده و فاز پیوسته است. یکی دیگر از عامل‌های تغییر قطره‌ها در المان، نفوذ در جهت ارتفاع سیال است.

چگونگی حرکت قطره‌های نفت در فاز پیوسته آب مورد بررسی قرار می‌گیرد. برخورد قطره‌های نفت طی دو فرایند ته نشینی دیفرانسیلی و حرکت براونی صورت می‌پذیرد. برای محاسبه β از معادله‌های (۱۰) و (۱۱) استفاده می‌شود. در نتیجه مقدار کلی β طی دو فرایند ته نشینی دیفرانسیلی و حرکت براونی از معادله (۱۲) استفاده می‌شود.

$$\beta(\text{differential settling}) = \frac{\pi}{4}(d_i + d_j)^2 |w_i - w_j| \quad (10)$$

$$\beta(\text{Brownian motion}) = \frac{2kT}{\mu_c} \left(\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_j} \right) (d_i + d_j) \quad (11)$$

$$\beta(i, j) = \beta_{\text{differential settling}}(i, j) + \beta_{\text{Brownian motion}}(i, j) \quad (12)$$

در معادله‌های بالا، i و j نشان‌دهنده اندیس کلاس‌های گوناگون است. d قطر قطره‌های نفت معلق، k ثابت بولتزمن، T دما، μ گرانیوی، ρ چگالی و g شتاب جاذبه است. سرعت به هم پیوستگی قطره‌ها در فصل مشترک آب و نفت با v_f نشان داده شده است. با توجه به مطالعه‌های انجام شده همانند با مدل ارائه شده در این پژوهش، جیلانی و هارتلند، v_f را توسط معادله (۱۳) تعریف نمودند [۱۵].

$$v_f = k_3 \frac{\Delta h}{\Delta z} \quad (13)$$

در این معادله، Δh ارتفاع سطح متراکم شده قطره‌های نفت است. Δz ارتفاع یک المان حجمی در مختصات فضایی است و k_3 ضریب تنظیم پذیر است. در واقع سرعت به هم پیوستگی قطره‌ها را تابع خطی از ارتفاع سطح متراکم در نظر گرفته شده است که در طول زمان ارتفاع به علت به هم پیوستگی قطره‌ها افزایش می‌یابد.

حل معادله‌های حاکم

برای حل معادله‌های دیفرانسیلی انتگرالی به دست آمده در معادله (۴)، با استفاده از روش کلاس‌ها گسسته‌سازی می‌شود سپس معادله‌های به دست آمده با استفاده روش خط ۵ به معادله‌های دیفرانسیل معمولی تبدیل می‌شوند.

گسسته‌سازی معادله‌های موازنه جمعیت

برای ساده سازی و باز کردن انتگرال‌های به دست آمده در مختصات داخلی موجود در معادله اصلی مدل، از روش Fixed Pivot استفاده شده است. معادله باز شده مدل به صورت معادله‌های (۱۴) و (۱۵)

در معادله بالا z_{int} ارتفاع سطح مشترک آب و نفت است. شرایط مرزی معادله‌ی (۴) توسط معادله (۵) بیان می‌شود.

$$z = 0 \quad wn = D_z \frac{dn}{dz}; \quad z = H \quad \frac{dn}{dz} = 0 \quad (5)$$

آخرین جمله در معادله (۴) پدیده انعقاد بین سطحی است. این ترم نشان‌دهنده فاز آب جدا شده در کف ظرف است.

ترم منبع θ مربوط به مختصات داخلی سامانه است که از موازنه جرم به دست می‌آید. به هم پیوستن^۲ فرایندی است که دو ذره یا قطره با هم ترکیب شده و یک قطره یا ذره بزرگ‌تر تولید می‌کنند. در نتیجه این پدیده، تعداد کل قطره‌ها کاهش می‌یابد. عبارت به هم پیوستن شامل دو مفهوم تولد^۳ و مرگ^۴ است که به ترتیب به وسیله معادله (۶) و (۷) بیان می‌شوند:

$$v_{\text{birth}} = \frac{1}{2} \int_0^v \beta(v', v - v') n(v - v', z, t) n(v', z, t) dv' \quad (6)$$

$$v_{\text{death}} = \int_0^\infty \beta(v', v) n(v, z, t) n(v', z, t) dv' \quad (7)$$

ترم خالص تولد و مرگ توسط معادله (۸) به دست می‌آید

$$\theta_{\text{agg.}} = \frac{1}{2} \int_0^v \beta(v', v - v') n(v - v', z, t) n(v', z, t) dv' - \int_0^\infty \beta(v', v) n(v, z, t) n(v', z, t) dv' \quad (8)$$

معادله‌های بالا، v' حجم یک قطره است که به قطره دیگری به حجم $v - v'$ متصل می‌شود. این برخورد منجر به تشکیل قطره‌ای با حجم v می‌شود. مقدار ضریب $1/2$ برای جلوگیری از شمارش دو مرتبه برخوردها است. β فرکانس برخورد قطره‌ها است. فرکانس برخورد $\int_0^v \beta(v', v - v')$ بیان کننده تعداد برخوردهایی است که منجر به چسبیدن قطره‌های v' و $v - v'$ می‌شود. مقدار این ضریب به رژیم جریان سیستم بستگی دارد. با توجه به رژیم جریان، توابع متعددی برای محاسبه فرکانس برخورد ارائه می‌شود. w_i سرعت بالا رفتن قطره‌های نفت به واسطه اختلاف چگالی فاز پراکنده و پیوسته است که از قانون استوک پیروی می‌کند و طبق معادله (۹) به دست می‌آید.

$$w_1(\text{stoke's law}) = k_1 \frac{(\rho_c - \rho_d) d_i^2 g}{18\mu_c} \quad (9)$$

در معادله (۹)، k_1 ثابت تنظیم پذیر برای بازده بالا رفتن است. β فرکانس برخورد بین قطره‌ها برای شکل گیری قطره جدید و از بین رفتن قطره‌های کوچک است. برای به دست آوردن مقدار درون β

(۱) Source term

(۳) Birth

(۵) Method of Line

(۲) Coalescence

(۴) Death

تعریف می‌شوند. در زمان اولیه توزیع اندازه‌های قطره‌ها برای همه المان‌ها به صورت همگن فرض می‌شود.

$$z = 0; \frac{dN_{i,j}}{dz} = 0 \quad (20)$$

$$z = H; w_i N_{i,j} = D_z \frac{dN_{i,j}}{dz} \quad (21)$$

شرایط مرزی موجود در المان اول و آخر به صورت زیر فرض می‌شود. در المان آخر میزان نفوذ و نرخ بالا رفتن قطره‌ها با هم برابر در نظر گرفته می‌شود و در المان اول فلاکس محوری نفوذ قطره‌ها در جهت ارتفاع صفر در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی به روش تفاضل مرکزی گسسته می‌شوند و در حل معادله‌ها استفاده می‌شوند.

$$z = 0 \rightarrow \frac{N_{i,j+1} - N_{i,j-1}}{2\Delta z} = 0 \rightarrow N_{i,j+1} = N_{i,j-1} \quad (22)$$

با توجه به شرط مرزی دوم جملات وابسته به ارتفاع در معادله اصلی (۴) حذف می‌شوند. در نتیجه معادله (۴) برای المان آخر به ارتفاع z وابسته نیست و تغییرهای دانسیته تعداد نسبت به ارتفاع در المان آخر در نظر گرفته نمی‌شود. شرط مرزی اول برای المان اول استفاده می‌شود. با جایگذاری معادله‌های (۲۱) و (۲۲) به طور کلی معادله‌ها برای المان اول، المان‌های وسط و المان آخر به ترتیب به صورت معادله (۲۳) تا (۲۴) به دست می‌آید.

$$\frac{dN_{i,j}}{dt} = D_z \frac{2N_{i,j+1} - 2N_{i,j}}{(\Delta z)^2} + \theta_{i,j}; i = 1, 2, \dots, i; j = 1 \quad (23)$$

$$\frac{dN_{i,j}}{dt} = -\frac{w_i N_{i,j+1} - w_{i,j-1}}{2\Delta z} + D_z \frac{N_{i,j+1} - 2N_{i,j} + N_{i,j-1}}{(\Delta z)^2} + \theta_{i,j}; i = 1, 2, \dots, i; j = 2, \dots, N_z \quad (24)$$

$$\frac{dN_{i,j}}{dt} = \theta_{i,j} - v_f N_{i,j}; i = 1, 2, \dots, i; j = N_z \quad (25)$$

همان گونه که دیده می‌شود تابع دیراک فقط برای المان آخر ظاهر شده است و برای المان‌های دیگر مقدار آن صفر است و تأثیری در حل مسئله ندارد. N_z تعداد المان‌ها در جهت ارتفاع است. فلوجارت حل معادله‌های (۲۲) تا (۲۴) در شکل ۳ نشان داده شده است. در فلوجارت ارایه شده V_{min} ، d_{min} و d_{max} و n_0 به ترتیب حجم کوچک‌ترین قطره، قطر کوچک‌ترین قطره، قطر بزرگ‌ترین قطره تا انتهای فرایند و توزیع اندازه اولیه قطره‌ها هستند.

نتیجه‌ها و بحث

ارزیابی مدل سازی

برای بررسی صحت مدل ارایه شده از داده‌های ورودی و نمودار توزیع قطره‌های آب در نفت کانه‌ها و همکاران استفاده شده است [۱۶].

ارایه می‌شود. در واقع یک معادله دیفرانسیلی انتگرالی، به دسته‌ای از معادله‌های دیفرانسیلی به تعداد I (تعداد کلاس‌ها)، تبدیل می‌شود. در این معادله توزیع تعداد قطره‌های هر کلاس با n_i نمایش داده شده است.

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = -\frac{\partial(w_i N_i)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial N_i}{\partial z} \right) - v_f N_i \delta(z - z_{int}) + \theta_i \quad (14)$$

$$\theta_i = \sum_{\substack{j \geq k \\ x_{i-1} \leq x \leq x_{i+1}}} (1 - \frac{1}{2} \delta_{j,k}) \eta_i(x) \beta_{j,k} N_j N_k - \sum_{j=1}^I \beta_{i,j} N_j N_i, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (15)$$

معادله ارایه شده در بالا معادله به هم پیوستگی دو به دو قطره‌ها را نشان می‌دهد. در این معادله η_i تابعی از حجم‌ها است که توزیع میان کلاس‌های حجمی گوناگون را طبق معادله (۱۶) تعریف می‌نماید.

$$\eta_i(x) = \begin{cases} \frac{x_{i+1}-x}{x_{i+1}-x_i}, & x_i \leq x < x_{i+1} \\ \frac{x-x_{i-1}}{x_i-x_{i-1}}, & x_{i-1} \leq x < x_i \end{cases} \quad (16)$$

روش خط برای حل معادله‌های جزئی

در این روش معادله‌های جزئی موجود در جهت ارتفاع به روش تفاضل محدود (مرکزی) باز می‌شود و تغییرات نسبت به زمان به صورت دیفرانسیلی باقی می‌ماند در واقع معادله‌های دیفرانسیل جزئی (۴) که به تعداد کلاس‌های موجود است، هر کدام به دسته‌ای از معادله‌ها تبدیل می‌شود و همه دسته معادله‌ها با در نظر گرفتن شرایط مرزی با هم حل می‌شوند. جمله‌های معادله (۴) به روش مرکزی تفاضل محدود گسسته می‌شوند و به صورت معادله‌های (۱۷) و (۱۸) نوشته می‌شوند. با جایگذاری معادله‌های (۱۷) و (۱۸) در معادله (۴) با استفاده از روش خط، معادله (۱۹) به دست می‌آید.

$$\frac{\partial w_i N_{i,j}}{\partial z} = \frac{w_i N_{i,j+1} - w_{i,j-1}}{2\Delta z}; i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, N_z \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial N_{i,j}}{\partial z} \right) = D_z \frac{N_{i,j+1} - 2N_{i,j} + N_{i,j-1}}{(\Delta z)^2}; i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, N_z \quad (18)$$

$$\frac{dN_{i,j}}{dt} = -\frac{w_i N_{i,j+1} - w_{i,j-1}}{2\Delta z} + D_z \frac{N_{i,j+1} - 2N_{i,j} + N_{i,j-1}}{(\Delta z)^2} + \theta_{i,j} - v_f N_{i,j} \delta(z - z_{int.}); i = 1, 2, \dots, i; j = 1, 2, \dots, N_z \quad (19)$$

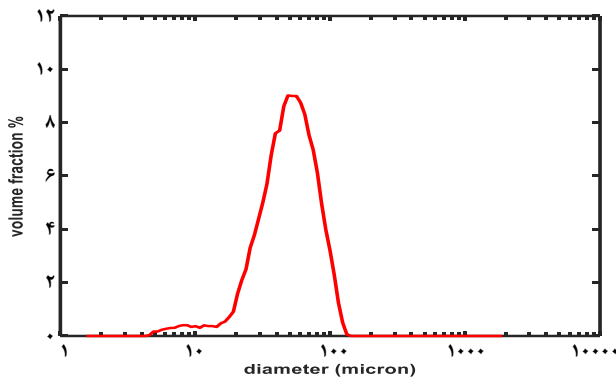
در معادله‌های بالا از روش تفاضل مرکزی برای باز کردن دیفرانسیل‌ها در جهت ارتفاع استفاده شده است [۱۵]. اندیس اول نشان‌دهنده شمارنده کلاس و اندیس دوم شمارنده المان است. مقدار w برای المان‌ها ثابت و برای کلاس‌ها متفاوت است. شرایط مرزی و اولیه برای حل معادله (۱۹) به صورت معادله‌های (۲۰) و (۲۱)

جدول ۲ - مشخصه‌ها و ویژگی‌های نفت خام [۱۶]

ویژگی	مقدار
API	۲۲/۸
گرانروی (cp)	۲۴۶/۴ در دمای ۳۸ درجه سلسیوس ۱۳۴ در دمای ۵۰ درجه سلسیوس ۹۲/۲ در دمای ۵۰ درجه سلسیوس
دما (K)	۲۹۸
حجم اولیه تعلیق (cm ³)	۴۲۰
کسر حجمی آب (%)	۴۲

جدول ۳ - پارامترهای عددی مورد استفاده در حل مدل

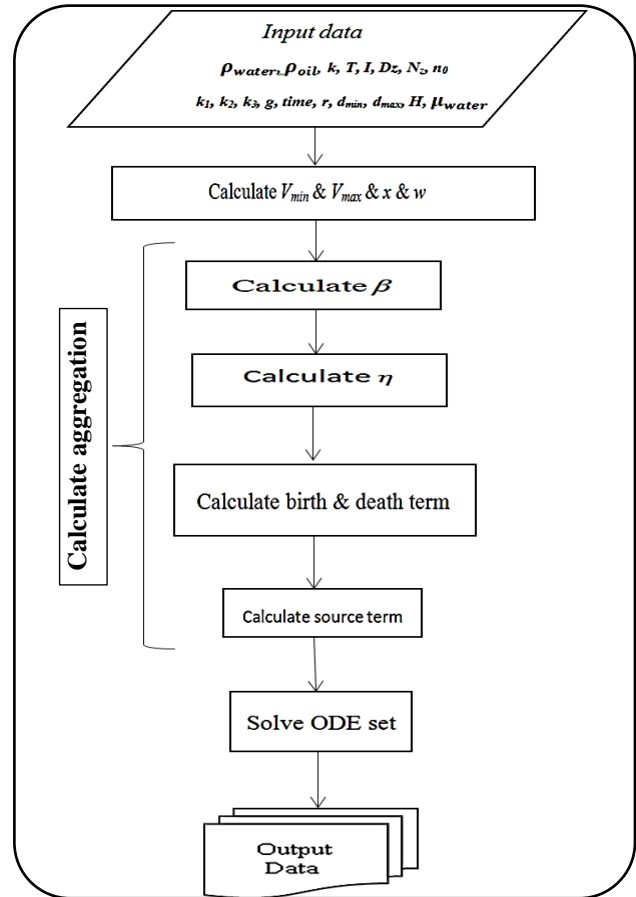
پارامتر	مقدار
تعداد المان‌های در راستای محوری Z	N _z = ۴
تعداد کلاس‌های حجمی قطره‌های آب در مختصات داخلی	i = ۱۰۰
قدر نسبت تصاعد هندسی	r = ۱/۲۴
فاصله زمانی (min)	Δt = ۱
قطر داخلی لوله آزمایش (cm)	۸/۸
ارتفاع لوله آزمایش (cm)	۶/۹
ضریب نفوذ (cm ² /s) [۱۶]	D _z = ۱۰ ^{-۴}
ثابت بولتزمن ($\frac{gcm^2}{s^2k}$)	K = ۱/۳۸ × ۱۰ ^{-۱۶}



شکل ۴ - کسر حجمی قطره‌های تعلیقی آب اولیه در نفت خام [۳۲]

آمده است. مقدارهای بهینه ضریب‌های تنظیم پذیر موجود در معادله‌ها توسط بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم DE به دست آمده‌اند. با داشتن اندازه درصد حجمی قطره‌های تجربی در هر کلاس‌های و محاسبه اندازه درصد حجمی قطره‌های تئوری در کلاس‌های گوناگون و با استفاده از تعریف تابع هدف که در معادله (۲۶) ارایه شده است، پارامترهای بهینه ضریب‌های تنظیم پذیر به دست آمده‌اند.

$$Objective\ Function = \sum_{i=1}^{N\ of\ Classes} \frac{|V(\%)_{exp} - V(\%)_{Cal}|}{V(\%)_{exp}} \times 100 \quad (26)$$

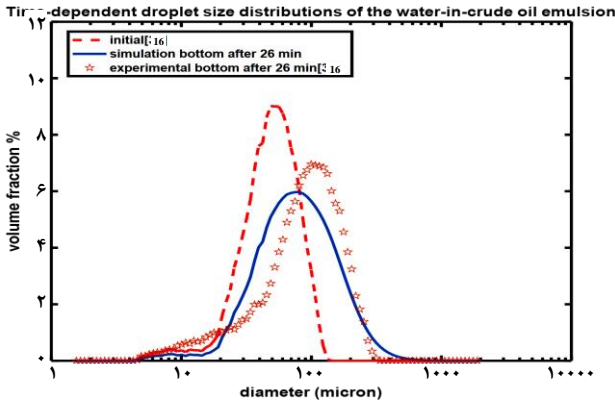


شکل ۳ - فلوچارت حل مدل

طبق گزارش ارایه شده در این پژوهش برای ساخت تعلیق آب در نفت، نفت خام به شدت همزده شده تا همگن شود. مقدار مشخصی از آب به صورت مرحله به مرحله به نفت اضافه شده و برای مخلوط شدن کامل آب، با دست تکان داده شده است. در نتیجه پیش تعلیق با حجم کلی ۳۰۰ میلی‌لیتر به دست آمده است. در مرحله دوم، این مخلوط با استفاده از تجهیزات تعلیق کننده انتخاب شده، یکدست شد. شرایط مخلوط کردن از قبیل فرکانس همزن و زمان همگن سازی حدوداً ۱۸۰۰۰ دور در دقیقه برای Ultra-Turrax، ۶۰۰۰ دور در دقیقه برای همزن مکانیکی تعیین شده است. زمان همگن شدن ۵ دقیقه تعیین شده است. سرانجام، مقدار مشخصی از یک امولسیور در نمونه تعلیق برای پایداری بهتر نمونه استفاده شده است [۱۶]. توزیع قطره‌های اولیه ورودی در سامانه در شکل (۴) نشان داده شده است. این شکل درصد کسر حجمی قطره‌های آب تعلیقی معلق در نفت را نشان می‌دهد. در ادامه مشخصه‌های نمونه نفت خام مورد مطالعه در جدول ۲ آورده شده است. همچنین پارامترهای عددی مورد استفاده در حل معادله‌های مدل سازی تعلیق آب در نفت در جدول‌های ۳ و ۴

جدول ۴ - ضریب‌های تنظیم پذیر موجود در معادله‌ها

مقدار	نوع ضریب
$K_1=0/1$	ضریب تنظیم پذیر ته نشینی طبق قانون استوک
$K_2=0/0.35$	ضریب تنظیم پذیر به هم چسبندگی قطره‌ها
$K_3=2/46 \times 10^{-7}$	ضریب تنظیم پذیر سرعت به هم پیوستگی سطحی قطره‌ها



شکل ۶ - توزیع کسر حجمی قطره‌های آب تعلیقی پس از ته نشینی و به هم چسبندگی قطره‌ها در المان پایین در زمان ۲۶ دقیقه

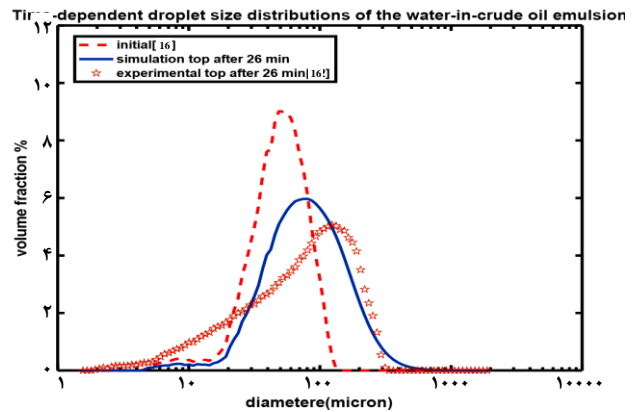
زمان و برخورد قطره‌های آب با یکدیگر طی سازوکارهای ذکر شده قطره‌های کوچک‌تر از بین رفته و قطره‌های بزرگ‌تر به وجود می‌آیند. نمودارهای ارایه شده برای پیش‌بینی المان بالا و پایین سامانه مورد مطالعه در مختصات خارجی z ، تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند و تغییرات در جهت محوری z به صورت نامحسوس است. در حقیقت، برای آن که با استفاده از روش ته نشینی ثقلی قطره‌های آب تعلیقی موجود در نفت خام ته نشین شود به چند ساعت زمان نیاز دارد. در نتیجه برای ارایه بهتر نتیجه‌ها، المان بالا و پایین نمونه در نظر گرفته شده از پارامتر میانگین قطر قطره‌ها استفاده شده است.

میانگین قطر قطره‌های آب در نفت $D_{4,3}$

میانگین قطر قطره‌ها به صورت $D_{4,3}$ نمایش داده می‌شود. افزایش میانگین قطر قطره‌ها نشان می‌دهد که قطره‌ها در طی سازوکارهای برخورد به قطره‌های بزرگ‌تر تبدیل شده‌اند و سازوکارهای برخورد به خوبی دوره برخورد قطره‌ها را پیش‌بینی می‌کنند. برای محاسبه میانگین قطر قطره‌ها از معادله (۲۷) استفاده می‌شود [۱۷]. شکل ۷ میانگین قطر قطره‌ها در المان بالا و پایین سامانه مورد بررسی را نشان می‌دهد.

$$D_{4,3} = \frac{\sum_{i=1}^n (n_i \times d_i^4)}{\sum_{i=1}^n (n_i \times d_i^3)} \quad (27)$$

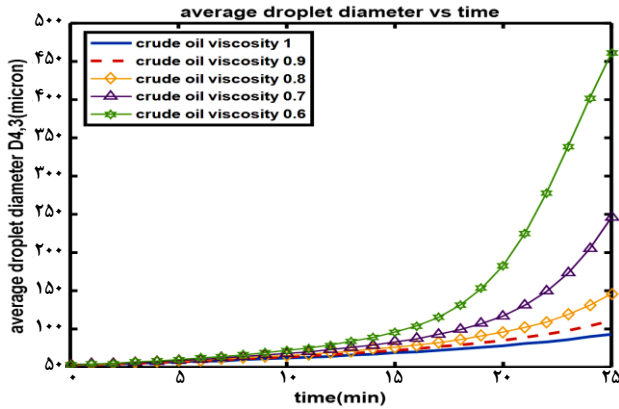
همان‌گونه که مطرح شد تغییرات درصد کسر حجمی قطره‌ها ناچیز است. اما میزان تغییرات تعداد قطره‌های آب در المان بالا و پایین توسط پارامتر میانگین قطر قطره‌ها به خوبی نشان داده شده است، چرا که ته نشینی قطره‌ها طی قانون استوکس و نفوذ در جهت محوری z باعث تغییر تعداد قطره‌های آب در جهت ارتفاع می‌شود که پارامتر $D_{4,3}$ نشان می‌دهد که میانگین قطر قطره‌های آب در پایین



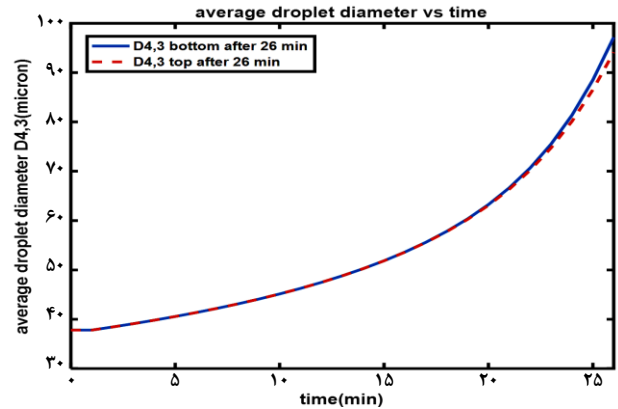
شکل ۵ - توزیع کسر حجمی قطره‌های آب تعلیقی پس از ته نشینی و به هم چسبندگی قطره‌ها در المان بالا در زمان ۲۶ دقیقه

برای بررسی تغییرات و توزیع تعداد قطره‌ها در جهت ارتفاع لوله آزمایش تعداد ۴ المان در نظر گرفته شده است. بدیهی است که افزایش تعداد المان‌ها تا حدی در جهت محوری ارتفاع به بهبود جواب ارایه شده کمک می‌کند و جواب دهی بهتری از مدل ارایه شده به دست می‌آید اما افزایش المان‌های در نظر گرفته شده از سمتی مشکل ساز خواهند شد. به همین دلیل از ۴ المان برای بررسی استفاده شده است. جهت محور z از پایین به بالا است. المان دوم از پایین به عنوان المان پایین و المان سوم به عنوان المان بالا در نظر گرفته شده است. تعداد کلاس‌های در نظر گرفته شده در جدول ۲ ارایه شده است. تعداد کلاس‌ها باید به گونه‌ای باشد که کل بازه حجم قطره‌های آب را در بر بگیرد. همان‌گونه که از شکل ۴ مشخص است بازه حجمی قطره‌ها از قطره‌هایی با قطر ۴ میکرومتر تا ۲۰۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. قدر نسبت تصاعد هندسی r باید به گونه‌ای تعریف شود که تمامی قطره‌های موجود در سامانه در بازه کلاس بندی قطره‌ها قرار گیرند. مدل ارایه شده برای داده‌های ورودی در شکل ۴ برای مدت ۲۶ دقیقه حل شد و نتیجه‌ها را برای دو المان بالا و پایین در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است.

توزیع قطره‌های آب در شکل‌های ۵ و ۶، به روشنی افزایش تعداد قطره‌های آب با قطر بیش‌تر با گذشت زمان در اثر دو سازوکار ته نشینی دیفرانسیلی و حرکت براونی را نشان می‌دهد. با گذشت



شکل ۹ - تغییرات قطر میانگین $D_{4,3}$ برای نمونه مورد مطالعه در گرانی‌های گوناگون در سامانه



شکل ۷ - میانگین قطر قطره‌های تعلیقی آب در نفت در المان بالا و پایین

و همکاران [۱۶] مقایسه شده است. نتیجه‌ها نشان داد که نتیجه‌های به‌دست آمده از مدل با داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد.

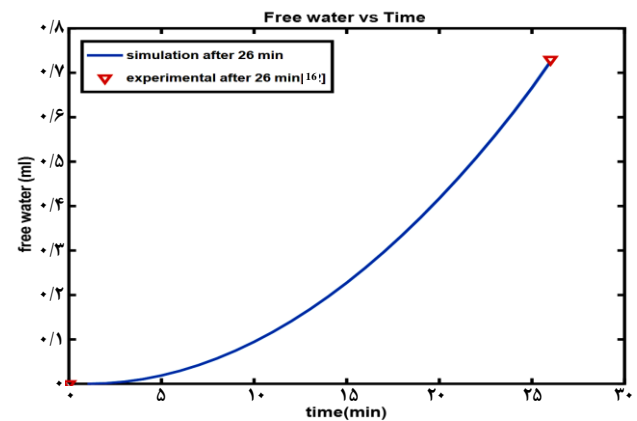
بررسی تأثیر پارامتر گرانی در جداسازی آب از نفت

برای بررسی درستی مدل سازی، مدل ارایه شده در گرانی‌های گوناگون بررسی شد و شکل‌های میانگین قطر قطره‌های $D_{4,3}$ بر حسب زمان در شکل ۹ رسم شده است. در سامانه‌های جداسازی آب از نفت هر چه میزان گرانی نفت مورد مطالعه کم‌تر باشد میزان رشد قطره‌ها و میزان جداسازی بیش‌تر و بهتر است. در شکل ارایه شده نیز هم با کاهش گرانی نفت میزان رشد قطره‌ها در مدت زمان ۲۵ دقیقه بیش‌تر شده است. چرا که در مدل ارایه شده گرانی فاز پیوسته با دو ترم سرعت ته نشینی و تناوب برخورد به دلیل حرکت براونی معادله عکس دارد. به همین دلیل با کاهش گرانی نفت تناوب برخورد قطره‌ها و همچنین سرعت ته نشینی آن‌ها بیش‌تر شده و قطره‌ها رشد بیش‌تر دارند. در نتیجه میانگین قطر قطره‌های آب در نفت افزایش می‌یابد.

شکل ۱۰ تغییرهای مجموع کل حجم قطره‌های آب در سامانه در فاز پیوسته نفت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که اشاره شد کاهش گرانی در دو ترم دوره برخورد در افزایش میزان آب خروجی از سامانه موثر است. یکی به دلیل افزایش تناوب برخورد قطره‌ها و رشد بیش‌تر آن‌ها و دیگری به دلیل افزایش سرعت ته نشینی قطره‌ها موجب افزایش تغییرات حجم قطره‌های آب در نظر گرفته می‌شود و در واقع میزان حجم خروجی آب افزایش می‌یابد.

نتیجه‌های به‌دست آمده از تعلیق نفت در آب

با استفاده از مدل ارایه شده تغییرات توزیع تعداد قطره‌های نفت



شکل ۸ - میزان آب جداسازی شده با استفاده از مدل ارایه شده و داده‌های آزمایشگاهی [۱۶]

نمونه آزمایش به دلیل ترم‌های در نظر گرفته شده در راستای ارتفاع در مدل بزرگ‌تر از میانگین قطر قطره‌ها در بالای نمونه آزمایش است. در پایین لوله آزمایش افزون بر به هم پیوستگی قطره‌ها در مختصات داخلی، قطره‌های بزرگ شده در المان‌های بالا به سبب افزایش حجم و بر مبنای قانون استوکس به سمت پایین حرکت می‌کنند و وارد المان‌های پایین‌تر می‌شوند در نتیجه میانگین قطر قطره‌ها در المان پایین بزرگ‌تر از میانگین قطر قطره‌ها در المان بالا است.

اندازه‌گیری میزان حجم جدا شده آب از نفت

میزان خروجی آب از سامانه مورد بررسی با ترم سرعت به هم چسبیدگی قطره‌ها تعریف شده است. در نتیجه تغییرهای حجم کل قطره‌ها در همه المان‌ها نسبت به حجم کل اولیه، کسری از خروجی آب از المان را نشان می‌دهد. شکل ۸ میزان آب جدا شده از سامانه مورد مطالعه در مدت زمان ۲۶ دقیقه را نشان می‌دهد. در این شکل نتیجه‌های به‌دست آمده از مدل سازی با نتیجه‌های آزمایش شده در کارکن‌ها

جدول ۵ - پارامترهای عددی مورد استفاده در حل معادله‌های مدل‌سازی تعلیق نفت در آب

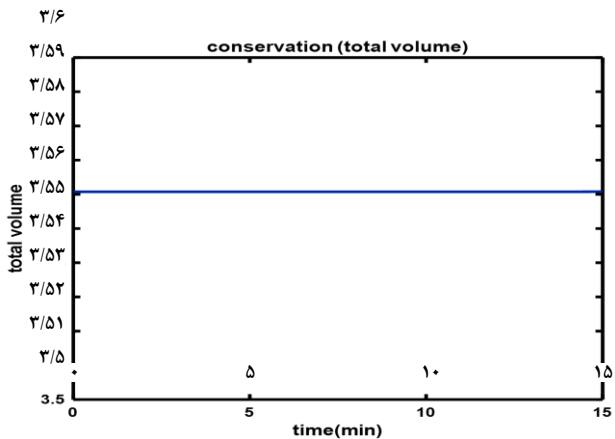
مقدار	پارامتر
$N_z = 15$	تعداد المان‌های در راستای محوری z
$I = 100$	تعداد کلاس‌های حجمی قطره‌های آب در مختصات داخلی
$r = 1/28$	قدر نسبت تصاعد هندسی
$\Delta t = 1$	فاصله زمانی (min)
$4/71$	قطر داخلی لوله آزمایش (cm)
$6/9$	ارتفاع لوله آزمایش (cm)
۱۲۰	حجم کل تعلیق (cm^3)
۲	درصد قطره‌های نفت (%)

جدول ۶ - ضریب‌های تنظیم پذیر موجود در معادله‌ها

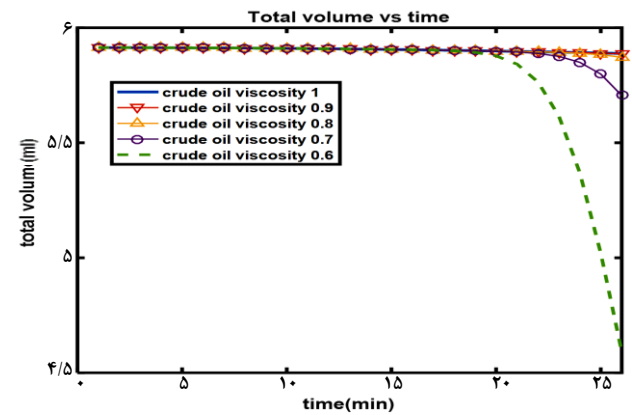
$k_1 = 0.1$	ضریب تنظیم پذیر بالا رفتن طبق قانون استوک
$k_2 = 0.18$	ضریب تنظیم پذیر به هم چسبیدگی قطره‌ها
$k_3 = 0.000086$	ضریب تنظیم پذیر سرعت به هم پیوستگی سطحی قطره‌ها

جدول ۷ - مشخصه‌ها و ویژگی‌های نفت خام [۱۸]

۸۲-۸۶	چگالی در ۱۵۰ درجه سلسیوس (kg/cm^3)
۲۹۸	دما (K)
۲	کسر حجمی نفت (%)



شکل ۱۱ - توزیع حجم کل قطره‌های نفت با فرض عدم جداسازی در سامانه نفت در آب



شکل ۱۰ - تغییرهای مجموع حجم قطره‌ها برای نمونه مورد مطالعه در گرانی‌های گوناگون در سامانه

برای مدل قطره‌های تعلیقی نفت در آب در جدول ۶ ارایه شده‌اند.

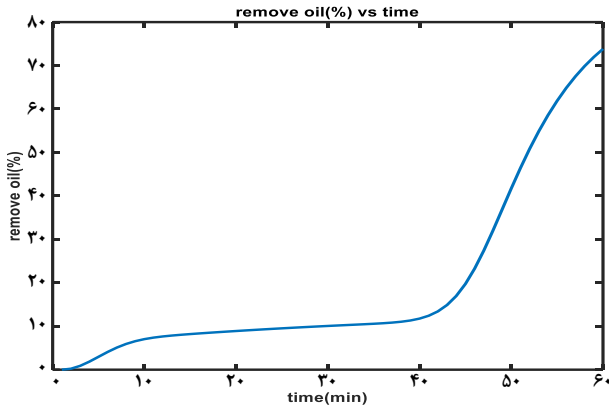
حفظ مجموع حجم قطره‌های نفت در آب

همانند سامانه آب در نفت، برای بررسی صحت مدل نفت در آب با فرض عدم جداسازی نفت از سامانه، نمودار حجم کل قطره‌های نفت که به عنوان نماینده کلاس‌ها در نظر گرفته شده‌اند، در طول زمان در شکل ۱۱ رسم شده است. در واقع ضریب سرعت به هم پیوستگی قطره‌ها، $k_3 = 0$ فرض شده است. تغییرهای حجم کل قطره‌ها با توجه به نمودار، صفر می‌باشد و حجم کل قطره‌ها بدون تغییر می‌ماند.

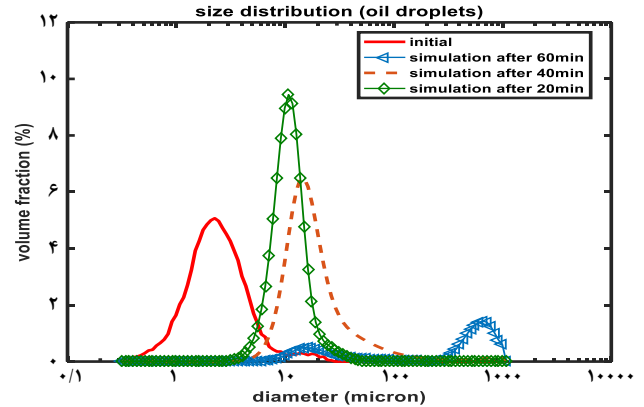
توزیع قطره‌های تعلیقی نفت در آب (فاز پیوسته)

برای بررسی توزیع قطره‌های تعلیقی نفت در آب از سامانه‌های صنعتی تصفیه پساب الگو گرفته شد. زمان ماند در جداسازهای ثقیل واحدهای صنعتی تصفیه پساب حدود ۱ ساعت است. اطلاعات مربوط به جداسازی از حوزه نفتی سروستان تهیه شده است. به همین علت مدل ارایه شده برای مدت زمان ۱ ساعت بررسی شد و شکل توزیع حجمی

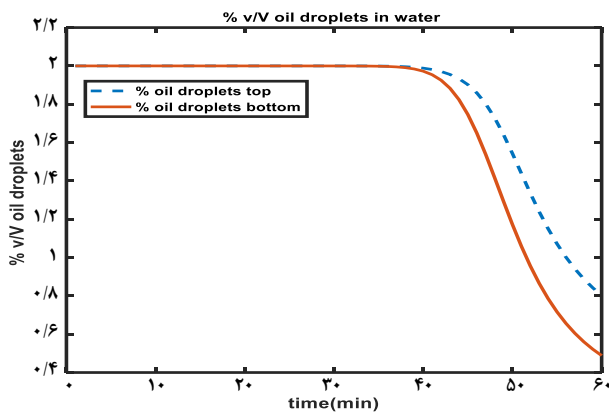
برای یک نمونه تعلیقی آزمایشگاهی نفت در آب که از یک نمونه نفت ایران در تعلیق‌سازی استفاده شده است بررسی شد. پارامترهای عددی مورد استفاده در حل معادله‌های مدل‌سازی برای تعلیق نفت در آب در جدول‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. همچنین مشخصه‌ها و ویژگی‌های قطره‌های تعلیقی نفت خام در جدول ۷ ارایه شده است. توزیع اندازه قطره‌های نفت اولیه از پروژه آزمایشگاهی نصیری و همکاران [۱۸] اقتباس شده است. برای بررسی تغییرات و توزیع تعداد قطره‌ها در جهت ارتفاع سامانه مورد مطالعه، تعداد ۱۵ المان در نظر گرفته شد. جهت محور z از پایین به بالا است که المان هفتم از پایین را المان پایین و المان دوازدهم را المان بالا در نظر گرفته شد. بازه قطره‌های نفت تعلیقی در نمونه بررسی شده ۰/۳ میکرومتر تا ۱۰۸۰ میکرومتر است. پاک و محمودی [۴] اظهار کرده‌اند که در فرایند جداسازی ثقیل، حدود ۸۰ درصد جداسازی قطره‌های نفت از پساب در مدت ۶۰ دقیقه به دست آمده است و در نتیجه همین شرایط به عنوان تابع هدف در محاسبه‌های بهینه‌سازی این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه ضریب‌های تنظیم پذیر k_1 ، k_2 ، k_3



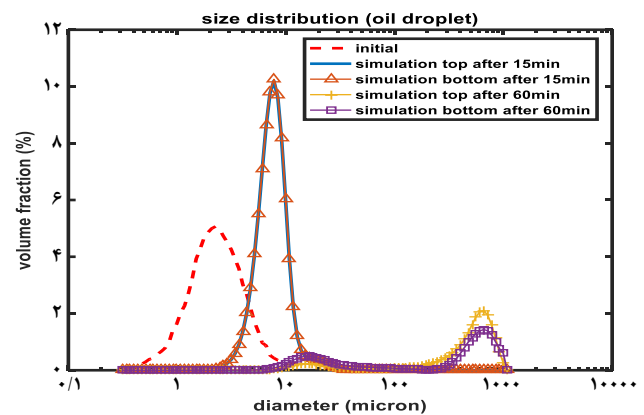
شکل ۱۴ - درصد جداسازی قطره‌های نفت در مدت زمان ۶۰ دقیقه



شکل ۱۲ - توزیع قطره‌های نفت در سامانه مورد مطالعه در زمان جداسازی



شکل ۱۵ - درصد حجمی قطره‌های نفت در دو المان بالا و پایین



شکل ۱۳ - توزیع قطره‌های نفت در دو المان بالا و پایین در دو زمان متفاوت

بالایی سامانه مورد مطالعه به دلیل بالا رفتن قطره‌های نفت، کسر حجمی قطره‌های نفت بیش‌تر از المان‌های پایین سامانه است.

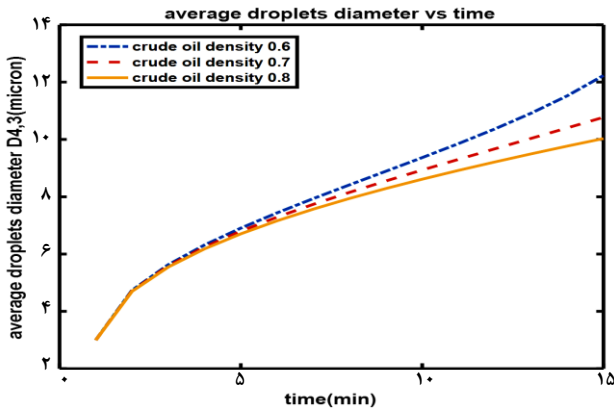
میزان جداسازی قطره‌های نفت از آب

شکل ۱۴ میزان جداسازی قطره‌های نفت از آب را نشان می‌دهد. درصد جداسازی نفت در مدت ۶۰ دقیقه به میزان ۷۲ درصد است که تطابق نسبتاً خوبی با داده‌های صنعتی واحد تصفیه پساب نمک‌زدایی سروسدان دارد.

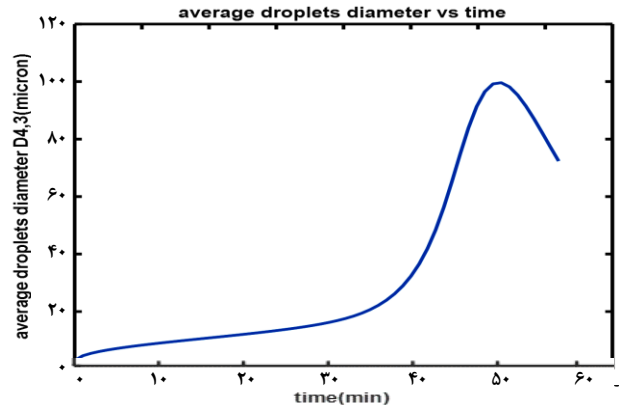
شکل ۱۵ کاهش درصد قطره‌های نفت موجود در آب را در دو المان بالا و پایین نشان می‌دهد. همان‌گونه که روند تغییرها در شکل ۱۵ نشان می‌دهد درصد حجمی قطره‌های نفت در دو المان بالا و پایین به دلیل جداسازی قسمت بیش‌تر نفت در حال کاهش است. میزان کاهش درصد حجمی قطره‌های نفت در پایین سامانه مورد مطالعه افت بیش‌تری نسبت به المان بالایی داشته که امری منطقی است چرا که قطره‌های نفت در اثر به هم پیوستن به سمت بالا حرکت می‌کنند و تجمع قطره‌ها در المان‌های بالا بیش‌تر از پایین است.

قطره‌های نفت در آب در شکل ۱۲ رسم شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۲) دیده می‌شود به دلیل به هم چسبیدن قطره‌ها و بالا رفتن قطره‌های نفت رفته رفته تراکم توزیع حجمی قطره‌های نفت به سمت راست نمودار رفته و به سبب جداسازی قطره‌های نفت از آب در مدت زمان ۶۰ دقیقه قله نمودار متمایل به صفر شده است.

برای مقایسه بهتر جداسازی و توانایی پیش‌بینی مدل ارایه شده در توزیع حجمی قطره‌ها در جهت ارتفاع، شکل ۱۳ توزیع قطره‌های تعلیقی نفت در آب در مدت زمان ۱۵ دقیقه و ۶۰ دقیقه برای المان ۱۲ (بالا) و المان ۷ (پایین) رسم شده است. افت قله نمودارهای ارایه شده به دلیل جداسازی قطره‌های نفت از آب است زیرا با گذشت مدت زمان ۶۰ دقیقه با توجه به داده‌های صنعتی [۴] باید حدود ۸۰ درصد قطره‌های نفت موجود در آب جداسازی شوند. در مدت زمان ۱۵ دقیقه نمودار توزیع حجمی قطره‌های نفت رسم شده تفاوت کسر حجمی نفت در آب را نشان نمی‌دهد ولی نمودار رسم شده برای مدت زمان ۶۰ دقیقه نشان‌دهنده تفاوت توزیع حجمی قطره‌های نفت در بالا و پایین سامانه است. در المان‌های



شکل ۱۷ - میانگین قطر قطره‌ها در چگالی‌های گوناگون نفت خام



شکل ۱۶ - میانگین قطر قطره‌ها در سامانه مورد مطالعه

فرایند جداسازی قطره‌های نفت از پساب واحد نمک‌زدایی و تعلیق‌های

نفت در آب مدل‌سازی شد و نتیجه‌های زیر به‌دست به‌دست آمد:

- نتیجه‌های به‌دست آمده از مدل‌سازی تعلیق آب در نفت با داده‌های آزمایشگاهی روبرتو و همکاران مقایسه شد. نتیجه‌های به‌دست آمده نشان داد که هماهنگی خوبی بین آن‌ها وجود دارد.
- ته‌نشینی ثقلی قطره‌های آب تعلیقی موجود در نفت خام

نیازمند زمان چندین ساعتی برای ته‌نشینی قطره‌ها است

- با گذشت زمان و برخورد قطره‌های آب با یکدیگر طی سازوکارهای ته‌نشینی دیفرانسیلی و حرکت براونی قطره‌های کوچک‌تر از بین رفته و قطره‌های بزرگ‌تر به وجود می‌آیند.

- افزایش میانگین قطر قطره‌ها نشان می‌دهد که قطره‌ها در ربطی سازوکارهای برخورد به قطره‌های بزرگ‌تر تبدیل شده‌اند و سازوکارهای برخورد به‌خوبی دوره برخورد قطره‌ها را پیش‌بینی می‌کنند.

- میانگین قطر قطره‌های آب در پایین نمونه آزمایش به دلیل جمله‌های در نظر گرفته شده در جهت ارتفاع در مدل بزرگ‌تر از میانگین قطر قطره‌ها در بالای نمونه آزمایش است. در پایین لوله آزمایش افزون بر به هم پیوستگی قطره‌ها در مختصات داخلی، قطره‌های بزرگ شده در المان‌های بالا به سبب افزایش حجم و بر مبنای قانون استوکس به سمت پایین حرکت می‌کنند و وارد المان‌های پایین‌تر می‌شوند. در نتیجه میانگین قطر قطره‌ها در المان پایین‌تر از میانگین قطر قطره‌ها در المان بالا است.
- با گذشت زمان، مقدار حجم کل قطره‌های آب موجود در نفت کاهش می‌یابد.

- در سامانه‌های جداسازی آب از نفت هر چه میزان گرانیوی نفت مورد مطالعه کم‌تر باشد میزان رشد قطره‌ها و میزان جداسازی بیش‌تر و بهتر است.

میانگین قطر قطره‌های نفت در آب $D_{4,3}$

شکل ۱۶ میانگین قطر قطره‌های نفت تعلیقی در آب را نشان می‌دهد. با گذشت زمان و به هم چسبیدن قطره‌های نفت میانگین قطر قطره‌ها افزایش می‌یابد ولی با افزایش میزان جداسازی قطره‌های بزرگ‌تر از سامانه خارج شده و میزان میانگین قطر قطره‌ها کاهش می‌یابد. اگر به نمودار شکل ۱۴ دقت شود میزان جداسازی قطره‌های نفت تا مدت زمان ۴۰ دقیقه در حدود ۱۰ درصد حجم نفت است و پس از آن درصد جداسازی با شیب بیشتری افزایش یافته است. در شکل ۱۶ میانگین قطر قطره‌ها تا زمان ۴۰ دقیقه حدود ۲۰ میکرومتر است و پس از گذشت زمان ۴۰ دقیقه با شیب بیشتری میانگین قطر قطره‌ها افزایش یافته است که نشان می‌دهد قطره‌های بزرگ‌تر شده از سامانه خارج می‌شوند و میزان جداسازی به میانگین قطر قطره‌ها وابسته است.

شکل ۱۷ میانگین قطر قطره‌های نفت را نشان می‌دهد. با کاهش چگالی نفت خام اختلاف بین چگالی آب و نفت بیش‌تر می‌شود و سرعت ته‌نشینی و همچنین تناوب برخورد قطره‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه میزان رشد قطره‌ها با چگالی کم‌تر بیش‌تر است. کاهش چگالی نفت خام موجب افزایش اختلاف چگالی نفت با چگالی آب در قانون استوکس می‌شود در نتیجه سرعت ته‌نشینی قطره‌های تعلیقی افزایش می‌یابد. همچنین کاهش گرانیوی نفت خام در سامانه‌های آب در نفت موجب افزایش تناوب برخورد قطره‌های آب می‌شود و در نتیجه میزان جداسازی آب از نفت افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از معادله موازنه جمعیت در حالت ناپایا،

نمادها

D_z	ضریب نفوذ انتقال جرم در جهت z (cm^2/s)
d	قطر قطره‌های نفت (cm)
g	شتاب جاذبه (m/s^2)
Δh	ارتفاع سطح متراکم شده قطره‌های نفت (m)
k	ثابت بولتزمن ($\frac{\text{gcm}^2}{\text{s}^2\text{k}}$)
k_1	ضریب تنظیم پذیر
k_2	ضریب تنظیم پذیر
k_3	ضریب تنظیم پذیر
n	چگالی تعداد قطره‌های نفت
\dot{N}	فلاکس تعداد و برابر است با $\dot{N} = wn$
J_z	فلاکس تعداد و برابر است با $J_z = -D_z \frac{dn}{dz}$
T	دما (K)
v'	حجم یک قطره (cm^3)
v_f	سرعت به هم پیوستگی قطره‌ها در فصل مشترک آب و نفت (m/s)
w	سرعت بالا رفتن قطره‌ها (m/s)
z_{int}	ارتفاع سطح مشترک آب و نفت (m)
Δz	ارتفاع یک المان حجمی در مختصات فضایی (m)
i	اندیس کلاس‌ها
j	اندیس المان‌های مکان
θ	ترم منبع
β	فرکانس برخورد قطره‌ها
ρ_c	چگالی فاز پیوسته (kg/m^3)
ρ_d	چگالی فاز پراکنده (kg/m^3)
ρ	چگالی (kg/m^3)
μ	گرانروی (cp)

• کاهش گرانروی در دو ترم دوره برخورد در افزایش میزان آب خروجی از سامانه موثر است. یکی به دلیل افزایش تناوب برخورد قطره‌ها و رشد بیش‌تر آن‌ها و دیگری به دلیل افزایش سرعت ته نشینی قطره‌ها موجب افزایش تغییرات حجم قطره‌های آب در نظر گرفته می‌شود و در واقع میزان حجم خروجی آب افزایش می‌یابد.

• تغییرهای حجم کل قطره‌های تعلیق نفت در آب صفر می‌باشد و حجم کل قطره‌ها بدون تغییر می‌ماند.

• در تعلیق نفت در آب، به دلیل به هم چسبیدن قطره‌ها و بالا رفتن قطره‌های نفت رفته رفته تراکم توزیع حجمی قطره‌های نفت به سمت راست نمودار رفته و به سبب جداسازی قطره‌های نفت از آب در مدت زمان ۶۰ دقیقه قله نمودار متمایل به صفر شده است.

• در المان‌های بالایی سامانه تعلیق نفت در آب به دلیل بالا رفتن قطره‌های نفت، کسر حجمی قطره‌های نفت بیش‌تر از المان‌های پایین سامانه است.

• نتیجه‌ها نشان داد که در بررسی تعلیق نفت در آب، درصد جداسازی نفت در مدت ۶۰ دقیقه به میزان ۷۲ درصد است که تطابق نسبت خوبی با داده‌های صنعتی دارد.

• درصد حجمی قطره‌های نفت در دو المان بالا و پایین به دلیل جداسازی قسمت بیش‌تر نفت در حال کاهش است. میزان کاهش درصد حجمی قطره‌های نفت در پایین سامانه مورد مطالعه افت بیش‌تری نسبت به المان بالایی داشته که امری منطقی است چرا که قطره‌های نفت در اثر به هم پیوستن به سمت بالا حرکت می‌کنند و تجمع قطره‌ها در المان‌های بالا بیش‌تر از پایین است.

• بررسی تعلیق نفت در آب نشان داد که میانگین قطر قطره‌های نفت در آب با گذشت زمان و به هم چسبیدن قطره‌های نفت افزایش می‌یابد اما با افزایش میزان جداسازی قطره‌های بزرگ‌تر از سامانه خارج شده و میزان میانگین قطر قطره‌ها کاهش می‌یابد.

• با کاهش چگالی نفت خام اختلاف بین چگالی آب و نفت بیش‌تر می‌شود و سرعت ته نشینی و همچنین تناوب برخورد قطره‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه میزان رشد قطره‌های با چگالی کم‌تر بیش‌تر است.

قدردانی

نویسندگان مقاله از دانشگاه صنعتی شیراز به خاطر در اختیار گذاشتن امکانات اجرای این پژوهش تشکر می‌نمایند.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۱۳

مراجع

- [۱] امانی آ، سلیمانی نظر ع.ر.، مدل‌سازی مونت کارلو در پیش بینی دینامیکی توزیع اندازه قطره‌های تعلیق آب - نفت خام، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴) ۳۷: ۲۳۵ تا ۲۴۶ (۱۳۹۷).
- [2] Salam K., Alade A., Arinkoola A., Opawale A., *Improving the Demulsification Process of Heavy Crude Oil Emulsion through Blending with Diluent*, *Journal of Petroleum Engineering*, **2013**: (2013).
- [3] Manning F.S., Thompson R.E., "Dehydration of Crude Oil, in *Oilfield Processing Volume2: Crude Oil, PennWell*", Tulsa, PennWell Books, 113-143 (1995).
- [4] Pak. A., Mohammadi T., *Wastewater Treatment of Desalting Units.*, *Desalination*, **222(1-3)**: 249-254 (2008).
- [5] Chanamai, R., Coupland, J. N., McClements, D. j., *Effect of Temperature on the Ultrasonic Properties of Oil-in-Water Emulsions*, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.*, **139(2)**: 241-250 (1998).
- [۶] جلاپر م، پیرزاده م، مکبری ع، نصرآبادی م، فرایند نمک‌زدایی نفت خام و اثر آن بر خوردگی بالاسری برج تقطیر (مطالعه موردی)، نخستین همایش مهندسی فرایند در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و انرژی، تهران، ۱ تا ۴ (۱۳۹۲).
- [۷] کشاورز ح، اسفندیاری ن، بررسی روش‌های نمک‌زدایی از نفت خام، سومین همایش ملی نفت و گاز و صنایع وابسته، کرمان، ۱ تا ۷ (۱۳۹۴).
- [6] Alopaeus V., Koskinen J., Keskinen K.I., *Utilization of Population Balances in Simulation of Liquid-Liquid Systems in Mixed Tanks*. *Chemical Engineering Communications*, **190**: 1468-1484 (2003).
- [۹] سعادت ج، پاکیزه م، مروری بر روش‌های تصفیه پساب‌های روغنی با تأکید بر روش‌های غشایی، فرآیند نو، (۵۴) ۱۰: ۵۲ تا ۵۷ (۱۳۹۴).
- [7] Khajehesamedini A., Sadatshojaie A., Parvasi P., Rahimpour M.R., M. Naserimojarad M., *Experimental and Theoretical Study of Crude Oil Pretreatment using Low-Frequency Ultrasonic Waves*, *Ultrason.Sonochem.*, **48**: 383-395 (2018).
- [8] Mitre J.F., Lage P.L., Souza M.A., Silva E., Barca L.F., Moraes A.O., Coutinho R.C., Fonseca E.F., *Droplet Breakage and Coalescence Models for the Flow of Water-in-Oil Emulsions through a Valve-Like Element*. *Chemical Engineering Research and Design*, **92**: 2493-2508 (2014).
- [9] Zhang L., He G., Ye D., Zhan N., Guo, Yongsheng., Fang, Wenjun., *Methacrylated Hyperbranched Polyglycerol as a Novel High-efficient Demulsifier for Oil-in-Water Emulsions*, *Energy Fuels*, **30(11)**: 9939-9946 (2016).
- [10] Sterling M.C., Bonner J.S., Page C.A., Fuller C.B., Ernest A.N.S., Autenrieth R.L., *Modeling Crude Oil Droplet - Sediment Aggregation in Nearshore Waters*, *Environmental Science Technology.*, **38**: 4627-4650 (2004).

- [11] Attarakih M.M., Bart H.J., Faqir N.M., [Numerical Solution of the Spatially Distributed Population Balance Equation Describing the Hydrodynamics of Interacting Liquid-Liquid Dispersion](#), *Chemical Engineering Science.*, **59**: 2567-2585 (2004).
- [12] Jeelani S.A.K., Hartland S., [Effect of Dispersion Properties on the Separation of Batch Liquid-Liquid Dispersions](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **37**: 547-565 (1998).
- [13] Cunha R.E.P., Fortuny M., Dariva C., Santos A.F., [Mathematical Modeling of the Destabilization of Crude Oil Emulsions Using Population Balance Equation](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **47**: 7094-7103 (2008).
- [14] Nopens I., Biggs C.A., De Clercq B., Govoreanu R., Wilén B.M., Lant P., Vanrolleghem P.A., [Modelling the Activated Sludge Flocculation Process Combining Laser Light Diffraction Particle Sizing and Population Balance Modelling \(PBM\)](#), *Water Science and Technology*, **45(6)**: 41-49 (2002).
- [16] Nasiri, H. GH., Mosavian, M. T., Kadkhodae, R., [Demulsification of Gas Oil/Water Emulsion via High-Intensity Ultrasonic Standing Wave](#), *Journal of Dispersion Science and Technology*, **34(4)**: 483-489 (2013).