

مطالعه آزمایشگاهی جداسازی آب از نفت خام به کمک تعلیق شکن و مدل سازی فرایند با تصحیح تابع فرکانس بر خورد در معادله موازنه جمعیت

نگین روشن^۱، ستار قادر^{۱*}، محمدرضا رحیم پور^۲

۱- کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده مهندسی شیمی

۲- شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی شیمی

فصلنامه علمی - پژوهشی بین رشته‌ای

سال اول، شماره ۲، نسخه ۱،

زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۸۰-۶۷

چکیده

هدف اصلی پژوهش حاضر، ارائه نتایج آزمایشگاهی و مدلی نظری است که اثر مواد تعلیق شکن در شکسته شدن امولسیون آب در نفت را نشان دهند. به عبارتی گروهی از مواد فعال سطحی در نظر گرفته شده است و نحوه عملکرد آن‌ها به عنوان ماده تعلیق شکن در شکستن امولسیون نفت خام توسط آزمایش بطری بررسی شده است. به همین منظور، با استفاده از شباهت رفتار مواد فعال سطحی در جذب شدن بین دو فاز آب و نفت با فرایند جذب سطحی مولکول‌های گاز بر روی سطح جامد، رابطه‌ای استخراج شده است. این رابطه بر اساس خطوط هم‌دمای جذب لانگمیر، کشش بین سطحی دو فاز آب و نفت در امولسیون را به غلظت تعلیق شکن مرتبط کرده است. سپس بر اساس مدل استخراج شده، تابع فرکانس برخورد قطرات در معادلات موازنه جمعیت تصحیح شده است؛ به نحوی که تأثیر مواد تعلیق شکن در به هم چسبیدن قطرات آب لحاظ شود. با توجه به این که مدل توسعه داده شده دارای تعدادی متغیر قابل تنظیم است که برای محاسبه آن‌ها نیاز به داده‌های تجربی وجود دارد، گروهی از مواد فعال سطحی در نظر گرفته شده است و نحوه عملکرد آن‌ها به عنوان ماده تعلیق شکن در شکستن امولسیون نفت خام توسط آزمایش بطری، مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج تجربی بازده جداسازی آب از نفت خام با نتایج حاصل از شبیه‌سازی به وسیله معادله موازنه جمعیت، حاکی از این است که مدل توسعه داده شده، به خوبی، مقادیر داده‌های آزمایشگاهی را در غلظت‌های مختلف پیش‌بینی می‌کند.

واژه‌های کلیدی

هم‌دمای لانگمیر
کشش بین سطحی
تعلیق شکن
فرکانس برخورد
معادله موازنه جمعیت

*مسئول مکاتبات:

Sattarghader@yahoo.com

۱ مقدمه

یکی از مشکلات عمده صنعت نفت، به وجود آمدن امولسیون آب در نفت در مراحل مختلف فراوری نفت است. نفت خام استخراج شده از مخازن، همواره شامل ناخالصی‌هایی مانند آب نمک و گل و لای است. از دیدگاه ترمودینامیکی، اگرچه نفت و آب دو مایع امتزاج‌ناپذیرند اما، تنش برشی که در حین عملیات تولید و بهره‌برداری بر روی مخلوط آن‌ها اعمال می‌شود و همچنین، وجود مواد فعال سطحی طبیعی از قبیل آسفالتین، رزین و واکس در سطح مشترک دو فاز، موجب پایداری امولسیون آب در نفت می‌شوند [۱]. از آنجایی که حضور آب و نمک باعث خوردگی مخازن و رسوب در تانک‌ها و خطوط لوله و غیرفعال شدن کاتالیزورها می‌شود، باید غلظت نمک تا مقدار مشخصی کاهش داده شود. روش‌های مختلفی برای شکستن امولسیون آب در نفت وجود دارد که از جمله آن می‌توان جداسازی شیمیایی، جداسازی الکتریکی، جداسازی تحت تأثیر نیروی جاذبه و جداسازی به وسیله عملیات حرارتی را نام برد [۲]. یکی از روش‌های مرسوم شکستن امولسیون آب در نفت، افزودن مواد تعلیق‌شکن (Demulsifier) شیمیایی است. تعلیق‌شکن‌ها ترکیباتی با سطوح فعال هستند که در سطح مشترک آب و نفت جذب شده، رفتار رئولوژیکی فیلم مایع موجود در سطح مشترک را تغییر می‌دهند. فرایند جداسازی آب شامل سه مرحله ناپایداریسازی امولسیون، به هم چسبیدگی و ته‌نشینی قطرات آب است. در مرحله اول، لایه فیلم سختی که قطرات آب را در بر گرفته است بایستی تخریب شود و مایع تخلیه شود. با شکسته شدن فیلم مایع، قطرات آب به یکدیگر نزدیک شده، شدت برخورد و در نتیجه منعقد شدن آن‌ها افزایش می‌یابد، به طوری که با گذشت زمان مانند کافی قطرات آب ته‌نشین شده، از فاز نفت جدا می‌شوند [۳ و ۴]. تاکنون پژوهش‌های آزمایشگاهی بسیاری در رابطه با تأثیر مواد تعلیق‌شکن بر افزایش بازده جداسازی آب از نفت انجام گرفته است، با این وجود مقالات محدودی در زمینه مدل‌سازی اثر این مواد در فرایند نمک‌زدایی،

ارائه شده است. در واقع بیشترین نقش مواد تعلیق‌شکن در کاهش کشش بین سطحی دو فاز آب و نفت است. این پدیده را می‌توان با نظریه وینزور (Winsor) توضیح داد که رفتار سامانه آب، نفت و ماده فعال سطحی را به وسیله نمودار سه‌تایی نشان می‌دهد. چنانچه در چنین سامانه‌ای، میزان پیوستگی ماده فعال سطحی به هر دو فاز آب و نفت یکسان باشد، شرایط بهینه‌ای ایجاد می‌شود که منجر به حداقل شدن کشش بین سطحی و حداکثر شدن میزان جداسازی می‌شود. گلدزال (Goldszal) و همکاران تأثیر میزان نمک آب، نوع نفت خام و غلظت ماده تعلیق‌شکن بر بازده جداسازی آب از نفت را مورد بررسی قرار دادند و با اندازه‌گیری کشش سطحی به این نتیجه رسیدند که میزان جذب سطحی مواد تعلیق‌شکن در سطح مشترک دو فاز و بازده جدا شدن آب با یکدیگر ارتباط دارند [۵]. عطا (Atta) و همکاران دسته‌جدیدی از مواد تعلیق‌شکن را برای شکستن امولسیون آب در نفت خام سنتز کردند و با ارزیابی فعالیت سطحی این مواد به این نتیجه رسیدند که با افزایش غلظت مواد تعلیق‌شکن، کشش بین سطحی کاهش می‌یابد که منجر به افزایش بازده جدا شدن آب می‌شود [۶]. الصباغ (Al-Sabagh) و همکاران گروهی از مواد تعلیق‌شکن را سنتز کردند و تأثیر این مواد در بازده جداسازی، شدت به هم چسبیدگی قطرات و نیز رفتار رئولوژی و ترمودینامیکی بین سطحی آن‌ها را مورد آزمایش قرار دادند [۷]. کدار (Kedar) و بگوات (Bhagwat) تأثیر انواع مواد قطبی در سر ماده فعال سطحی با دنباله آب‌گریز مشخص را بر شکست امولسیون نفت خام و شدت جداسازی آب در دماهای مختلف، بررسی کردند. همچنین، انرژی فعال‌سازی را برای ناپایداریسازی امولسیون محاسبه کردند. نتایج نشان می‌داد که با افزایش دما و غلظت ماده فعال سطحی، انرژی فعال‌سازی برای ناپایداریسازی امولسیون کاهش یافته، شدت جداسازی افزایش می‌یابد. همچنین، با مطالعه کشش بین سطحی دو فاز دریافتند که با کاهش کشش بین سطحی به کمترین مقدار خود،

سطحی در نظر گرفته شده است که دو ماده از این ترکیبات، تاکنون در صنعت نفت در زمینه جداسازی آب از امولسیون نفت خام به کار گرفته نشده‌اند. در بخش اول، نحوه عملکرد این ترکیبات به عنوان ماده تعلیق‌شکن در شکستن امولسیون آب در نفت از طریق روش آزمایش بطری مورد بررسی قرار می‌گیرد. (۲) در بخش دوم، مدلی مناسب بر اساس هم‌دمای جذب لانگمیر ارائه شده است که اثر جذب سطحی مواد تعلیق‌شکن بر کاهش کشش بین سطحی دو فاز آب و نفت در غلظت‌های مختلف را پیش‌بینی می‌کند. (۳) در قسمت سوم، معادله توسعه داده شده کشش بین سطحی در تابع فرکانس برخورد (Collision Frequency Function) در معادله موازنه جمعیت به کار گرفته می‌شود و با تصحیح این معادله، توزیع اندازه قطرات با گذر زمان در امولسیون آب در نفت حاوی مواد تعلیق‌شکن، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲ تجربی

نفت مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها، از حوزه نفتی سروستان در ایران تهیه شده است. مواد فعال سطحی ان-ان دی متیل دودسیل آمین ان-اکسید (۳۰٪ در آب) (DDAO) (N,N- Dimethyldodecylamine N-oxide solu-tion)، پلی اکسی اتیلن (۱۰) تری دسیل اتر (Poly- $C_{13}E_{10}$) (oxyethylene (10) tridecyl ether) و تولوئن از شرکت سیگما آلدریچ و اتانول از شرکت مرک تهیه شده‌اند. درجه خلوص تولوئن و اتانول ۹۹/۹٪ است.

۱-۲ مشخصات نفت خام

مقدار آب اولیه درون امولسیون نفت خام توسط سانتریفیوژ Eppendorf 5810R با سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه طبق روش ASTM D-4007 اندازه‌گیری شد که در جدول ۱ همراه با سایر خصوصیات نفت خام، گزارش داده شده است.

۲-۲ آزمایش بطری

دو ماده فعال سطحی DDAO و $C_{13}E_{10}$ به صورت تجاری تهیه شده و نحوه عملکرد آن‌ها به عنوان تعلیق‌شکن در شکستن امولسیون آب در نفت، توسط

بازده جداسازی آب به بیشترین مقدار خود می‌رسد [۸]. میا (Mya) و همکاران با بررسی تأثیر دما، زمان تماس و سرعت سانتریفیوژ بر شدت جداسازی به این نتیجه رسیدند که استفاده از ۲۰۰ ppm ماده تعلیق‌شکن و همچنین به کارگیری سانتریفیوژ با سرعت ۱۲۰۰ دور بر دقیقه در مدت زمان ۴۵ دقیقه، می‌تواند منجر به جداسازی کامل آب از نفت خام شود [۹]. گریمز (Grimes) و همکاران مدلی ریاضی بر اساس معادله موازنه جمعیت (Population Balance Equation) به منظور شبیه‌سازی فرایند جداسازی در ته‌نشین‌کننده ثقلی ناپیوسته ارائه دادند. آن‌ها تأثیر خصوصیات بالک، سطح مشترک دو فاز آب و نفت و تعلیق‌شکن را بر روی متوسط چگالی تعداد قطرات آب مورد مطالعه قرار دادند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که شدت به هم چسبیدن قطرات آب و جدا شدن فاز ناپیوسته وابسته به درجه پراکنندگی قطرات است [۱۰ و ۱۱].

اسپنس (Espenes) مدلی ریاضی بر اساس معادله موازنه جمعیت برای شبیه‌سازی فرایند جداسازی امولسیون در جداکننده ناپیوسته ارائه داد و تأثیر نوع و غلظت دو تعلیق‌شکن مختلف را در به هم چسبیدن و ته‌نشینی قطرات آب، مورد بررسی قرار داد [۱۲].

با وجود پژوهش‌های گسترده آزمایشگاهی در رابطه با تأثیر مواد تعلیق‌شکن بر افزایش بازده جداسازی آب از نفت خام، کمبود پژوهش در زمینه مدل‌سازی اثر این مواد در فرایند نمک‌زدایی، بسیار محسوس است. بنابراین، در این پژوهش سعی شده است با در نظر گرفتن نحوه تأثیر مواد تعلیق‌شکن بر رفتار رئولوژی سطح مشترک دو فاز آب و نفت، مدلی نظری ارائه شود که تأثیر غلظت مواد تعلیق‌شکن بر شدت به هم چسبیدگی قطرات آب و افزایش بازده جداسازی را در نظر گیرد. همچنین، با توجه به این که روابط موجود برای محاسبه ضریب به هم چسبیدگی قطرات در معادله موازنه جمعیت، بدون در نظر گرفتن اثر ماده تعلیق‌شکن بسط داده شده‌اند، این معادله تصحیح شده است. این پژوهش شامل سه بخش است: (۱) تعدادی مواد فعال

جدول ۱- خصوصیات نفت خام

خصوصیات نفت خام	
مواد اشباع (درصد وزنی)	۵۰
آسفالتین (درصد وزنی)	۴
رزین (درصد وزنی)	۸
آروماتیک (درصد وزنی)	۳۸
درجه API	۳۲/۲۲
چگالی (kg/m ³)	۸۴۶/۲
ویسکوزیته (mPa s)	۵/۶۳
مقدار آب اولیه (v/v)	۰/۷۷

به منظور انجام آزمایش بطری، نفت خام با آب مخلوط شده و با استفاده از همزن مکانیکی Mtops MS280D- SET با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه، امولسیون ۱۰٪ و ۲۰٪ حجمی آب در نفت تولید شد. همچنین، به منظور بررسی میزان پایداری امولسیون تولید شده، نمونه‌ای از امولسیون آب در نفت به مدت یک روز در آون با دمای ۶۰ قرار داده شد و مشاهده شد که جداسازی آب انجام نمی‌گیرد. محدوده اندازه قطرات آب درون امولسیون توسط میکروسکوپ نوری نیکن تعیین شد و قطرات با قطرهای مختلف در محدوده ۱-۶۰ میکرومتر در امولسیون مشاهده شدند. در شکل ۱ تصویر امولسیون ۲۰٪ آب در نفت قبل از انجام آزمایش بطری که توسط میکروسکوپ نوری گرفته شده است، مشاهده می‌شود.

۲-۳ آزمایش کشش سطحی

کشش بین سطحی دو فاز آب و نفت با روش قطره آویزان (Pendant Drop) و با استفاده از دستگاه تعیین کشش سطحی Kruss DSA-100 در حضور تعلیق شکن‌های انتخاب شده، در محدوده غلظت‌های مختلف اندازه‌گیری شد.

آزمایش‌های مرسوم بطری مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳]. همچنین نتایج مربوط به تعلیق شکن HEOD-TS که توسط عطا و همکاران [۱۴]، سنتز شده است، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. خصوصیات این ماده در جدول ۲ گزارش شده است. همچنین، نوع مواد فعال سطحی مورد استفاده و ساختار شیمیایی آن‌ها، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- خصوصیات تعلیق شکن سنتز شده HEOD-TS

ماده	Cac (mM)	γ_{cac} (mN/m)	π_{cac} (mN/m)	$\frac{-\partial\gamma}{\partial \ln c}$	$\Gamma_{max} \times 10^9$ (mol/cm ²)	A_{min} (nm ² /molecule)	RSN (mL)	T _K °C
HEOD-TS	۰/۶۴	۳۳/۷۸	۳۸	۷/۶۲	۳/۰۷	۰/۵۴	۱۱/۴۰	۴۶/۹۰

جدول ۳- تعلیق شکن‌های استفاده شده برای توسعه مدل

مواد تعلیق شکن	نوع تعلیق شکن	ساختار شیمیایی
DDAO	آمفوتریک	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_2-\overset{\text{CH}_3}{\underset{\text{O}}{\text{N}}}-\text{CH}_3$
C ₁₃ E ₁₀	پلیمری، غیر یونی	C ₁₃ H ₂₇ (OCH ₂ CH ₂) _n OH
HEOD-TS	مایع یونی سنتز شده	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{17}\text{HN}^+\text{O}_3\text{S}^-\text{C}_6\text{H}_4\text{CH}_3$ [CH ₂ CH ₂ O] ₈ -H

توده امولسیون، ایجاد می شود. می توان از معادله جذب گیبس برای لایه جذب سطحی شده در سطح مشترک، استفاده کرد. معادله جذب سطحی گیبس به شکل زیر است:

$$d\sigma = -\sum_i \Gamma_i d\mu_i \quad (1)$$

رابطه پتانسیل شیمیایی برای ماده فعال سطحی در شرایطی که غلظت در توده کم باشد به شکل زیر است:

$$\mu_1 = \mu_1^0 + K_B T \ln C_1 \quad (2)$$

با جایگذاری این عبارت در معادله جذب سطحی گیبس و صفر در نظر گرفتن غلظت در سطح قطره آب ($\Gamma_w = 0$) رابطه زیر به دست می آید:

$$d\sigma = -K_B T \Gamma_1 d \ln C_1 \quad (3)$$

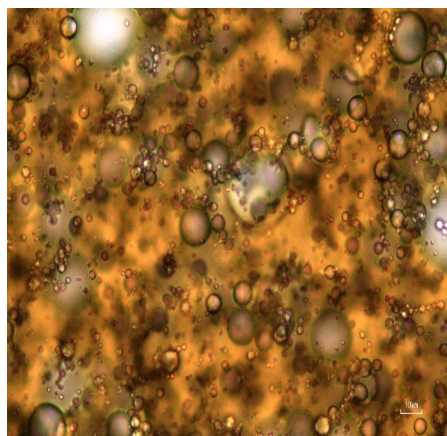
معادله هم‌دمای لانگمیر که غلظت ماده تعلیق شکن در سطح مشترک را به غلظت در توده امولسیون مربوط می‌سازد، به شکل زیر است:

$$\theta = \frac{\Gamma_1}{\Gamma_\infty} = \frac{KC_1}{1 + KC_1} \quad (4)$$

در رابطه بالا θ میزان پوشیده شدن سطح از ماده فعال سطحی را نشان می‌دهد. با انتگرال گیری از معادله (۳) و جایگذاری در معادله هم‌دمای جذب لانگمیر، هم‌دما کشش سطحی متناظر آن به دست می‌آید که کشش بین سطحی دو فاز را به غلظت ماده فعال سطحی در سطح مشترک مربوط می‌سازد.

$$\sigma = \sigma_0 + K_B T \Gamma_\infty \ln \left(1 - \frac{\Gamma_1}{\Gamma_\infty} \right) \quad (5)$$

هم‌دمای لانگمیر نشان می‌دهد که افزایش غلظت ماده تعلیق شکن در توده امولسیون منجر به افزایش جذب سطحی در سطح مشترک و در نتیجه افزایش پوشش سطح می‌شود. با توجه به این که، نقش اصلی مواد تعلیق شکن تغییر رئولوژی سطح مشترک و کاهش کشش



شکل ۱- تصویر امولسیون آب در نفت قبل از انجام آزمایش بطری

۳ نظری

توانایی مواد تعلیق شکن در تخریب لایه فیلم بین سطحی دو فاز، مهم ترین عاملی است که کارایی این ترکیبات را تعیین می‌کند. در این پژوهش، رابطه‌ای نظری بر اساس هم‌دمای جذب لانگمیر پیشنهاد شده است که تأثیر مواد تعلیق شکن در کشش بین سطحی دو فاز را نشان می‌دهد. بر اساس نظریه جذب لانگمیر، وقتی گازی در تماس با سطح جامد قرار می‌گیرد، مولکول‌های گاز بر روی سطح جذب می‌شوند تا جایی که فشار در دو فاز به شرایط تعادل برسد. در این پژوهش، فرض شده است که مواد تعلیق شکن هنگام تماس با سطح مشترک دو فاز، همانند مولکول‌های گاز در تماس با سطح جامد رفتار می‌کنند بنابراین، سطح قطرات آب درون امولسیون تا جایی با مواد تعلیق شکن پوشیده می‌شود که به حالت اشباع برسد. اصولاً، مواد فعال سطحی در حالت عادی تمایل به جذب شدن در سطح مشترک دارند؛ بنابراین تا زمانی که سطح مشترک اشباع شود این ترکیبات از توده (Bulk) امولسیون به سمت سطح مشترک دو فاز حرکت می‌کنند. در این هنگام، مواد فعال سطحی به شکل تجمعی میسل (Micelle) در کنار هم آرایش پیدا می‌کنند و تعادل بین پتانسیل شیمیایی مواد فعال سطحی در حالت میسل و در حالت آزاد در

(۹)

$$\frac{\partial n(v, z, t)}{\partial t} + u \frac{\partial n(v, z, t)}{\partial z} = \frac{1}{2} \int_{v=0}^v \beta(v-v', v') n(v', z, t) n(v-v', z, t) dv' - n(v, z, t) \int_{v=0}^{\infty} \beta(v, v') n(v', z, t) dv'$$

عبارت اول در سمت راست معادله (۹) بیان گر تولد قطرات در نتیجه به هم پیوستن قطرات کوچک تر است در حالی که عبارت دوم، نشان دهنده مرگ قطرات در نتیجه به هم پیوستگی با سایر قطرات است. معادله زیر، ضریب به هم چسبیدگی قطرات را نشان می دهد که حاصل ضرب تابع فرکانس برخورد قطرات در بازده به هم چسبیدگی آن ها است [۱۵].

(۱۰)

$$\beta(d_i, d_j) = \alpha(d_i, d_j) \times e_{ij} = K_{\alpha} \pi(d_i + d_j)^2 V_{ij}^{(0)} e_{ij}$$

$$e(d_i, d_j) = 0.3 \lambda^{1/2} + \frac{1}{2} B_i \lambda^6 \quad (11)$$

در روابط بالا e_{ij} نشان دهنده بازده به هم چسبیدگی قطرات، $V_{ij}^{(0)}$ سرعت نسبی دو قطره وقتی تنها تحت تأثیر نیروی جاذبه قرار دارند، λ نسبت قطر دو قطره و B_i عدد بوند است [۱۵ و ۱۶]. همچنین باید اشاره شود که u که سرعت حد قطرات است، طبق قانون استوکس محاسبه می شود.

با توجه به این که در معادله موازنه جمعیت، تأثیر مواد تعلیق شکن در به هم پیوستگی قطرات در نظر گرفته نشده است، بنابراین، لازم است که ضریب به هم چسبیدگی به نحوی تصحیح شود که اثر این مواد لحاظ شود. در هنگام برخورد دو قطره با یکدیگر، مدت زمان اعمال نیرویی که موجب به هم چسبیدگی آن ها می شود باید به اندازه ای باشد که ضخامت فیلم مایع احاطه کننده قطرات به حد بحرانی خود رسیده، از هم گسیخته و تخلیه شود تا در نهایت فرایند به هم پیوستگی قطرات رخ دهد. واضح است که برای رخ دادن این پدیده، مدت زمان تماس سطح قطرات با یکدیگر بایستی بیشتر از مدت زمان لازم برای به هم پیوستگی قطرات باشد. رابطه ای برای بازده برخورد

بین سطحی است، می توان نتیجه گرفت که افزایش پوشش سطح مشترک با مواد تعلیق شکن، متناظر با کاهش کشش بین سطحی است. از این رو، می توان نشان داد که میزان پوشش سطح مشترک تابعی از معکوس کشش بین سطحی است.

$$\theta = \frac{KC_1}{1+KC_1} = f\left(\frac{1}{\sigma}\right) \quad (6)$$

بنابراین، رابطه زیر که کشش بین سطحی دو فاز آب و نفت را پیش بینی می کند، پیشنهاد می شود که K_1 ، K_2 و K_3 متغیرهای قابل تنظیم هستند و لازم است که با داده های آزمایشگاهی تنظیم شوند.

(۷)

$$\frac{1}{\sigma} = K_1 + \frac{K_2 C_1}{1+K_3 C_1}$$

در رابطه بالا K_1 ، معکوس کشش بین سطحی در سطح مشترک دو فاز آب و نفت در شرایط عدم حضور ماده تعلیق شکن را نشان می دهد. همان طور که توضیح داده شد، مواد تعلیق شکن کشش بین سطحی دو فاز را کاهش می دهند و در نتیجه تخلیه فیلم مایع و نرخ برخورد قطرات را سرعت می بخشند. بنابراین می توان رابطه ای بین کشش سطحی دو فاز و تابع فرکانس برخورد قطرات آب در نظر گرفت. در رابطه زیر α نشان دهنده تابع فرکانس برخورد قطرات است.

(۸)

$$\alpha \propto f\left(\frac{1}{\sigma}\right)$$

۴ مدل سازی

در این پژوهش، جداسازی آب در مقیاس آزمایشگاهی در ظرفی تحت نیروی جاذبه بر اساس معادله موازنه جمعیت، مدل شده است. در معادله موازنه جمعیت مشخصات قطره توسط مختصات داخلی و خارجی تعیین می شود که مختصات داخلی خصوصیات فاز پراکنده و مختصات خارجی موقعیت فضایی قطرات را نشان می دهد. در این پژوهش Z که موقعیت محوری قطره را نشان می دهد به عنوان مختصات خارجی و v که بیان کننده حجم قطره است به عنوان مختصات داخلی در نظر گرفته شده است. شکل دینامیک معادله موازنه جمعیت به شکل زیر است:

(۱۴)

$$K_{\alpha} = K_1 \left[\left(1 + \frac{K_2 C_1}{1 + K_3 C_1} K_4 \right) e^{\left[\frac{K_2 C_1}{1 + K_3 C_1} \right]} \right]$$

۴-۱ حل مدل موازنه جمعیت

در این مطالعه، برای حل معادله موازنه جمعیت، روش حل عددی گسسته به شیوه کلاس‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹]. در روش کلاس‌های گسسته، محدوده پیوسته اندازه ذرات به محدوده‌های کوچک‌تری شکسته می‌شود که هر محدوده نشان دهنده‌ی کلاسی از اندازه ذرات است. در این روش به منظور محاسبه تعداد قطرات در هر زمان و مکان، دو جمله مرگ و تولد قطرات در هر کلاس محاسبه می‌شوند که مرگ یک قطره از کلاس مورد نظر، ناشی از به هم پیوستن قطره آن کلاس با قطرات کلاس‌های مختلف است و تولد قطره کلاس مورد نظر، به دلیل به هم پیوستن قطرات کلاس‌های کوچکتر از آن کلاس با یکدیگر برای رسیدن به اندازه کلاس مورد نظر است.

برای حل معادله، $n(v, z, t)$ به ۱۱۰ کلاس گسسته، شکسته شده است که $N_i(z, t)$ نشان دهنده تعداد قطرات در کلاس i ام است. شکل گسسته معادله موازنه جمعیت به شکل زیر است:

$$\frac{dN_i(z, t)}{dt} + u \frac{dN_i(z, t)}{dz} = \sum_{j,k}^{j \geq k} \left(1 - \frac{1}{2} \delta_{j,k} \right) \eta \beta_{j,k} N_j N_k - N_i \sum_{k=1}^M \beta_{i,k} N_k \quad (15)$$

η در معادله (۱۵) پارامتری است که در عبارت به هم چسبیدن دو کلاس j و k و به وجود آوردن کلاس i ام ظاهر می‌شود و بر اساس معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = \begin{cases} \frac{x_{i+1} - v}{x_{i+1} - x_i} & x_i \leq v \leq x_{i+1} \\ \frac{v - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} & x_{i-1} \leq v \leq x_i \end{cases} \quad (16)$$

در این روابط، پارامتر X_{i+1} بیانگر میانگین حسابی V_i و V_{i+1} است.

قطرات ارائه شده است که به صورت نسبت زمان لازم برای به هم چسبیدگی به مدت زمان تماس قطرات با یکدیگر است [۱۷ و ۱۸].

(۱۲)

$$e_{ij} = \exp \left(- \frac{t_{coalescence}}{\tau_{contact}} \right)$$

با افزایش غلظت مواد تعلیق‌شکن در امولسیون و کاهش کشش بین سطحی در سطح مشترک، زمان به هم چسبیدگی قطرات کاهش می‌یابد. بنابراین با در نظر گرفتن رابطه پیشنهاد شده برای کشش بین سطحی دو فاز، می‌توان نتیجه گرفت:

(۱۳)

$$t_{coalescence} \propto \sigma \Rightarrow e_{ij} \propto \exp(-\sigma) \Rightarrow e_{ij} \propto \exp \left(\frac{K_2 C}{1 + K_3 C} \right)$$

به منظور تصحیح معادله موازنه جمعیت برای در نظر گرفتن تأثیر مواد تعلیق‌شکن در افزایش فرکانس برخورد قطرات، نحوه عملکرد این ترکیبات در توده امولسیون و سطح مشترک بررسی شد و این نتیجه حاصل شد که با مهاجرت مواد تعلیق‌شکن از توده امولسیون به سمت سطح مشترک و اشباع شدن این ناحیه، کشش بین سطحی و زمان گسسته شدن فیلم محبوس، کاهش یافته و فرکانس برخورد قطرات افزایش می‌یابد. در واقع فرایند جذب این مواد در سطح مشترک با توجه به هم‌دمای جذب لانگمیر، تا جایی که پدیده اشباع رخ دهد، حالت نمایی دارد. بنابراین، با بررسی نتایج آزمایشگاهی حاصل از آزمون بطری و همچنین با توجه به رابطه (۱۳)، این نتیجه به دست آمد که رابطه نمایی در مقایسه با روابط دیگر از جمله خطی، درجه دو و لگاریتمی برای پیش‌بینی فرایند آب‌زدایی از امولسیون بهتر است. از این رو، به منظور لحاظ کردن اثر ماده تعلیق‌شکن، رابطه زیر برای K_{α} در تابع فرکانس برخورد (معادله (۱۰))، در نظر گرفته شده است که K_1 ، K_2 و K_3 پارامترهای معادله پیشنهاد داده شده برای کشش بین سطحی ((۷)) و K_4 پارامتر قابل تنظیم مدل است.

تعلیق شکن در شکستن امولسیون نفت خام استفاده نشده‌اند، با انجام آزمایش‌های بطری تأیید شد. به منظور تعیین پارامترهای رابطه پیشنهادی کشش بین سطحی، از نتایج به دست آمده از آزمایش کشش بین سطحی توسط روش قطره آویزان، استفاده شد که نتایج عددی حاصل از آزمایش و همچنین نتایج به دست آمده از مدل کشش بین سطحی در جدول ۴ گزارش شده است. جدول ۵ متغیرهای قابل تنظیم و نیز ضریب همبستگی مدل کشش بین سطحی پیشنهاد شده بر اساس هم‌دمای جذب لانگمیر را نشان می‌دهد. به منظور محاسبه ضرایب معادله، اختلاف مطلق کشش بین سطحی آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط مدل به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد و مقدار آن به

۵ نتایج و تحلیل داده‌ها

۵-۱ مدل کشش بین سطحی

در این پژوهش، تلاش شد مدلی نظری ارائه شود که تأثیر مواد تعلیق شکن در شکستن امولسیون آب در نفت را در نظر بگیرد. همان‌طور که توضیح داده شد، سازوکار جذب مواد تعلیق شکن در سطح مشترک دو فاز آب و نفت همانند مولکول‌های گاز در فرایند جذب سطحی است. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، بررسی صحت و اعتبار سازوکار پیشنهادی و نیز مدل بسط داده شده بر اساس هم‌دمای جذب لانگمیر است. همچنین لازم است که متغیرهای قابل تنظیم مدل پیشنهادی، با داده‌های آزمایشگاهی تنظیم شوند. کارایی دو ماده فعال سطحی DDAO و $C_{13}E_{10}$ که تاکنون در صنعت نفت به عنوان

جدول ۴- مقایسه کشش بین سطحی تجربی و محاسبه شده توسط مدل

تعلیق شکن	غلظت (mg/L)	کشش بین سطحی (تجربی) (mN/m)	کشش بین سطحی (مدل) (mN/m)	AAPD (Absolute Average Percent Deviation)
DDAO	۰	۳۰/۱۸۶۲	۲۹/۶۱۳۰	%۶/۱۲
	۱۰۰	۱۱/۸۴۲۷	۱۳/۴۱۸۵	
	۲۰۰	۹/۱۳۵۱	۸/۲۶۳۰	
	۴۰۰	۳/۹۵۳۱	۴/۲۲۱۴	
	۵۰۰	۳/۳۴۷۶	۳/۲۲۲۲	
	۶۰۰	۲/۴۷۴۸	۲/۵۱۱۳	
$C_{13}E_{10}$	۰	۳۰/۱۸۶۲	۲۹/۸۹۲۹	%۵/۴۹
	۵۰	۱۲/۱۶۸۸	۱۳/۲۱۴۴	
	۱۰۰	۱۰/۵۳۰۲	۱۰/۰۶۴۹	
	۳۰۰	۷/۹۱۰۰	۷/۲۰۹۲	
	۵۰۰	۶/۲۱۹۳	۶/۵۳۶۴	
	۷۰۰	۵/۹۳۶۹	۶/۲۳۵۷	
HEOD-TS	۱۳۵/۶۷۱۴	۴۹/۴۰۷۶	۴۹/۵۱۳۹	%۱/۳۸
	۳۸۲/۸۰۵۷	۴۴/۴۷۹۲	۴۳/۷۷۹۵	
	۱۱۴۴/۷۸۲	۳۸/۱۳۲۱	۳۸/۳۶۷۶	
	۲۹۵۶/۹۴۷	۳۴/۱۹۷۲	۳۵/۶۳۹۷	
	۸۶۳۸/۹۶۹	۳۴/۳۶۴۰	۳۴/۲۴۹۷	
	۲۴۴۹۵/۵۵	۳۴/۳۸۸۶	۳۳/۷۳۸۹	
	۷۱۵۱۵/۵۵	۳۳/۸۴۷۸	۳۳/۵۵۰۲	

جدول ۵- متغیرهای قابل تنظیم رابطه کشش بین سطحی

تعلیق شکن	K_1	K_2	K_3	R^2
DDAO	۰/۰۰۰۳۸۲۳	۰/۰۳۳۷۶	-۰/۰۰۰۶۱۷۳	۰/۹۹۳۷
$C_{13}E_{10}$	۰/۰۰۱۱۷	۰/۰۳۳۴۵	۰/۰۰۷۸۳	۰/۹۸۰۹
HEOD-TS	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۱۷۶۸	۰/۰۰۱۹۱	۰/۹۷۷

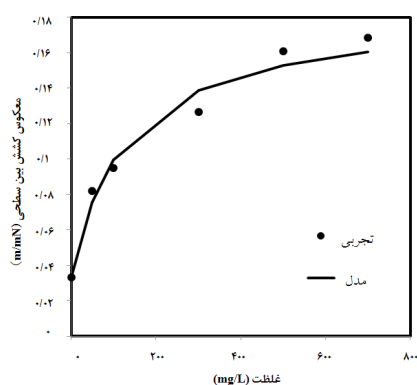
اساس هم‌دمای جذب لانگمیر برای ارتباط دادن غلظت
تعلیق شکن به کشش بین سطحی، تأیید می‌شود.

۲-۵ مدل فرکانس برخورد

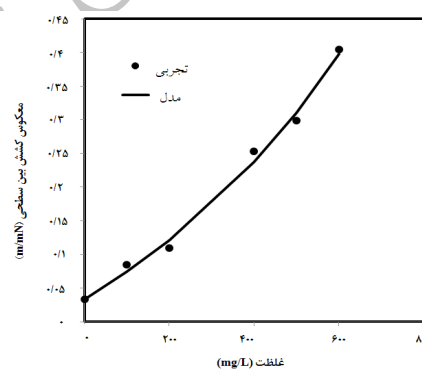
در این پژوهش، هدف اصلی توسعه مدلی نظری است
که تأثیر مواد تعلیق شکن در تابع فرکانس برخورد قطرات
و شکسته شدن امولسیون را در نظر بگیرد. به طور کلی،
نتیجه گرفته شد که ارتباطی میان میزان جذب

حداقل رسانده شد.

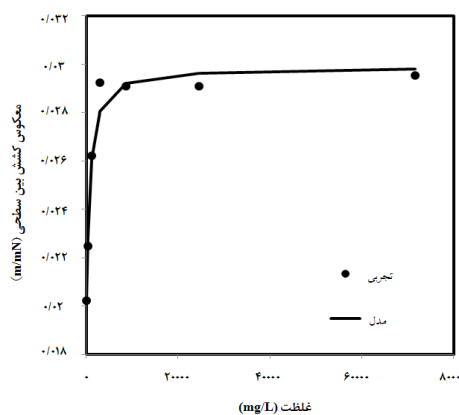
شکل‌های ۲ (الف-ج) نتایج معکوس کشش بین سطحی
بر حسب غلظت را برای تعلیق شکن‌های مورد مطالعه
نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق
خوبی بین کشش بین سطحی محاسبه شده توسط
مدل و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد. بنابراین صحت
و اعتبار سازوکار پیشنهادی و نیز مدل بسط داده شده بر



شکل ۲ (ب)- معکوس کشش بین سطحی بر حسب زمان برای
تعلیق شکن $C_{13}E_{10}$



شکل ۲ (الف)- معکوس کشش بین سطحی بر حسب زمان برای
تعلیق شکن DDAO



شکل ۲ (ج)- معکوس کشش بین سطحی بر حسب زمان برای تعلیق شکن
HEOD-TS

شکل های ۳ (الف-ج) شدت جدا شدن آب توسط مدل معادله موازنه جمعیت و همچنین داده های آزمایشگاهی بر حسب زمان را در حضور تعلیق شکن های شیمیایی مورد بررسی نشان می دهند. مقایسه نتایج شبیه سازی و داده های آزمایشگاهی نشان می دهد که مدل پیشنهادی فرکانس برخورد، به خوبی، جدا شدن دو فاز آب و نفت را پیش بینی می کند.

شکل ۴ توزیع اندازه قطرات را در قسمت بالای سامانه در حالت عدم حضور تعلیق شکن نشان می دهد. واضح است که در قسمت بالای سامانه، قطرات به دلیل وجود نیروی جاذبه به سمت پایین حرکت می کنند و ته نشین می شوند. همان طور که مشاهده می شود میزان تغییر در تعداد قطرات، بسیار کم است که نشان دهنده این است که در غیاب تعلیق شکن، برخورد قطرات آن قدر کم است که نمی تواند منجر به چسبیدن قطرات به یکدیگر شود و تنها حرکت براونی و تصادفی قطرات منجر به برخورد و به هم چسبیدگی و در نتیجه ته نشینی آن ها می شود.

شکل های ۵ (الف-ج) مقایسه بین توزیع اندازه قطرات بر حسب زمان را در قسمت بالا و پایین ظرف در حضور تعلیق شکن های مورد مطالعه نشان می دهند. واضح است که در قسمت مشخصی از ظرف، توزیع اندازه قطرات با گذشت زمان کاهش می یابد. در واقع تعلیق شکن ها فرکانس برخورد قطرات و نیز نرخ به هم چسبیدن آن ها را افزایش می دهند در نتیجه قطرات کوچک به هم می چسبند و قطرات بزرگ را تشکیل می دهند که به سمت پایین ظرف ته نشین می شوند. همان طور که

جدول ۶ - متغیرهای قابل تنظیم تعلیق شکن های مورد بررسی در مدل فرکانس برخورد

R ²	K ₄	تعلیق شکن
۰/۹۸۱۸	۰/۰۹۹۱۱×۱۰ ^۷	DDAO
۰/۹۸۴۵	۰/۸۹۶۶×۱۰ ^۷	C ₁₃ E ₁₀
۰/۹۸۵۷	۰/۵۳×۱۰ ^۷	HEOD-TS

تعلیق شکن ها بر روی سطح قطرات و در نتیجه فرکانس برخورد آن ها موجود است. باید اشاره شود که رفتار فاز پراکنده در امولسیون، در دو حالت حضور و عدم حضور مواد تعلیق شکن، بررسی شده است.

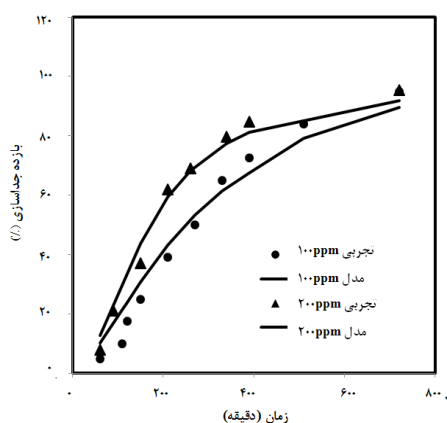
همان طور که قبلاً توضیح داده شد، توابع فرکانس برخورد که در معادلات موازنه جمعیت به کار برده می شوند، در شرایط عدم حضور تعلیق شکن توسعه داده شده اند. بنابراین، این تابع تصحیح شد؛ به نحوی که اثر ماده تعلیق شکن در آن لحاظ شود. به همین منظور، ابتدا سامانه بر اساس معادله موازنه جمعیت یک بعدی مدل شد؛ به این صورت که سامانه ناپیوسته ای به شکل بشر حاوی امولسیون آب در نفت به ارتفاع ۲۰ سانتیمتر شامل ده المان مساوی، در نظر گرفته شد و سپس مدل کشش بین سطحی بسط داده شده و در تابع فرکانس برخورد به کار برده شد و در نهایت معادله موازنه جمعیت با به کارگیری مدل فرکانس برخورد با استفاده از روش کلاس ها حل شده، شدت تغییر تعداد قطرات آب با زمان و مکان محاسبه شدند.

بازده جدا شدن آب که توانایی تعلیق شکن در شکستن امولسیون نفت خام را نشان می دهد، به فرم زیر است:

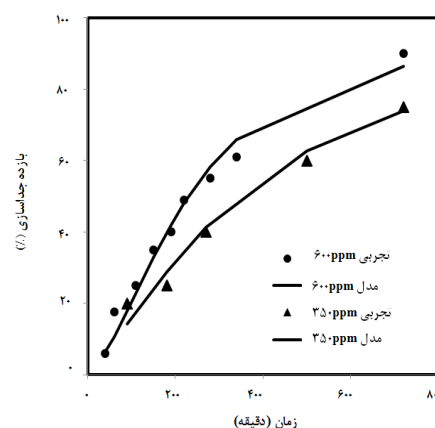
$$x(\%) = \frac{V}{V_0} \times 100 \quad (17)$$

که V حجم آب جدا شده و V_0 حجم اولیه آب در امولسیون و x بازده جدا شدن آب را نشان می دهد. K_4 در معادله (۱۴) براساس نمونه حاوی تعلیق شکن به نحوی محاسبه شد که اختلاف بین بازده جداسازی آب که توسط مدل فرکانس برخورد در معادله موازنه جمعیت پیش بینی می شود با مقادیر آزمایشگاهی آن، حداقل شود. پارامتر قابل تنظیم K_4 برای تعلیق شکن های مورد مطالعه و ضریب همبستگی مربوط به نتایج شبیه سازی شده و داده های آزمایشگاهی در جدول ۶ ارائه شده اند.

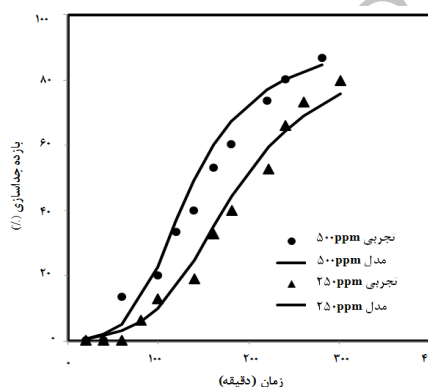
با به کارگیری مدل پیشنهادی فرکانس برخورد در معادله موازنه جمعیت، می توان شدت جداسازی آب از امولسیون نفت خام با گذر زمان را پیش بینی کرد.



شکل ۳ (ب) - بازده جداسازی بر حسب زمان در حضور ۱۰۰ و ۲۰۰ ppm تعلیق شکن $C_{13}E_{10}$



شکل ۳ (الف) - بازده جداسازی بر حسب زمان در حضور ۳۵۰ و ۶۰۰ ppm تعلیق شکن DDAO



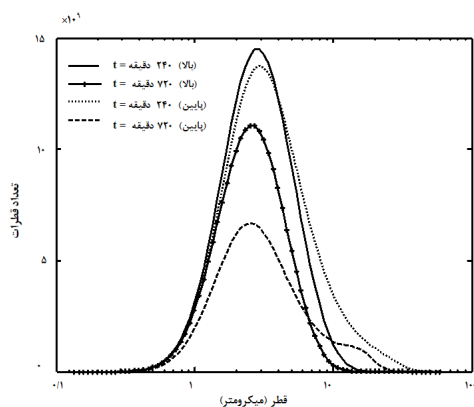
شکل ۳ (ج) - بازده جداسازی بر حسب زمان در حضور ۲۵۰ و ۵۰۰ ppm تعلیق شکن HEOD-TS

قسمت پایین ظرف نسبت به بالای ظرف، تعداد قطرات بزرگ، بیشتر و تعداد قطرات کوچک تر، کم تر است.

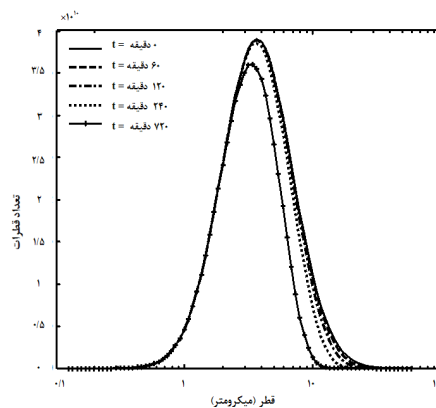
۶ نتیجه گیری

در این مطالعه، تابع فرکانس برخورد قطرات در معادله موازنه جمعیت تصحیح شد؛ به نحوی که تأثیر مواد تعلیق شکن در شکستن امولسیون آب در نفت را در غلظت های مختلف در نظر بگیرد. برای محاسبه متغیرهای قابل تنظیم مدل های ارائه شده، کارایی گروهی از مواد فعال سطحی به عنوان تعلیق شکن در شکستن امولسیون نفت خام از طریق آزمایش بطری، بررسی شد. طبق نتایج به دست آمده، می توان ترکیبات DDAO و

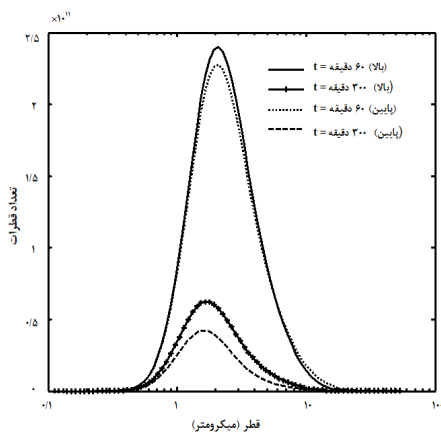
انتظار می رود، اوج نمودارهای توزیع اندازه قطرات به سمت قطرات کوچک تر جابجا می شود که نشان دهنده این است که با گذر زمان، قطرات بزرگ تر ته نشین شده اند در حالی که قطرات کوچک تر هنوز در سامانه باقی مانده اند. برخورد قطرات کوچک به واسطه حضور مواد تعلیق شکن در سامانه افزایش یافته که منجر به چسبیدن قطرات و تولید قطرات بزرگ تر و در نتیجه ته نشینی آن ها می شود؛ به همین دلیل تعداد قطرات کوچک تر کاهش می یابد. همچنین باید اشاره کرد که بیشتر بودن تعداد قطرات بزرگ تر و نیز حجم آب در پایین ظرف، منجر به افزایش برخورد و به هم چسبیدن قطرات کوچک تر در این قسمت می شود. در نتیجه در



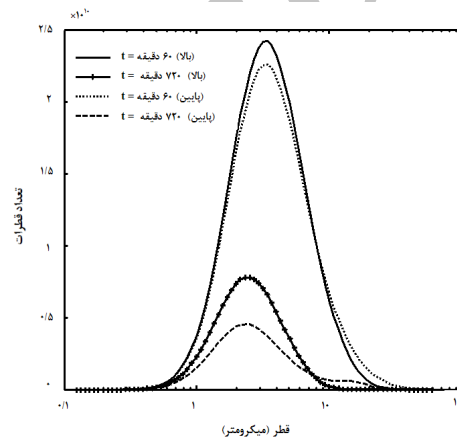
شکل ۵ (الف) - مقایسه توزیع اندازه قطرات بر حسب زمان در بالا و پایین سامانه در حضور تعلیق شکن DDAO



شکل ۴- توزیع اندازه قطرات بر حسب زمان در بالای سامانه در غیاب تعلیق شکن



شکل ۵ (ب) - مقایسه توزیع اندازه قطرات بر حسب زمان در بالا و پایین سامانه در حضور تعلیق شکن HEOD-TS



شکل ۵ (ج) - مقایسه توزیع اندازه قطرات بر حسب زمان در بالا و پایین سامانه در حضور تعلیق شکن $C_{13}E_{10}$

تأثیر مواد تعلیق شکن در افزایش شدت برخورد قطرات، اصلاح کند. تغییر اندازه قطرات و جداسازی آب از امولسیون نفت خام به وسیله معادله موازنه جمعیت شبیه سازی شد و صحت و اعتبار مدل ارائه شده با مشاهده تطابق نتایج بازده جداسازی حاصل از مدل سازی با نتایج آزمون بطری، تأیید شد.

$C_{13}E_{10}$ را به عنوان دو ماده تعلیق شکن جدید در فرایند نمک زدایی از نفت خام معرفی کرد. نشان داده شد که مدل پیشنهادی بر اساس هم دمای جذب لانگمیر، قادر است به خوبی غلظت مواد تعلیق شکن را به کشش بین سطحی امولسیون نفت خام ارتباط دهد و تابع فرکانس برخورد در معادله موازنه جمعیت را برای لحاظ کردن

فهرست علائم

B_i	عدد بوند	β	ضریب به هم چسبیدگی
C_1	غلظت	Γ	غلظت در سطح
d	قطر قطره آب	Γ^∞	حداکثر غلظت در سطح
e_{ij}	بازده به هم چسبیدگی	λ	نسبت قطر قطره کوچک به قطر بزرگ
g	جاذبه	θ	میزان پوشش سطح
K_α	ثابت تابع فرکانس برخورد	μ	گرانروی
n	چگالی پیوسته تعداد قطرات	μ^0	پتانسیل شیمیایی استاندارد
N_i	چگالی گسسته تعداد قطرات	ρ	چگالی
$t_{coalescence}$	زمان به هم چسبیدگی قطرات	σ	کشش بین سطحی
T	دما	$\tau_{contact}$	زمان تماس دو قطره
u	سرعت حد		
$v_{ij}^{(0)}$	سرعت نسبی		
v'	حجم قطره		
z	طول		

مراجع

- 1-Roostaie T., Farsi M., Rahimpour M.R. and Biniiaz P., Performance of Biodegradable Cellulose Based Agents for Demulsification of Crude Oil: Dehydration Capacity and Rate, Sep Purif Technol, 179, 291-296, 2017.
- 2- Mohayeji M., Farsi M., Rahimpour M.R. and Shariati A., Modeling and Operability Analysis of Water Separation from Crude Oil in an Industrial Gravitational Coalesce, J Taiwan Inst Chem Eng, 60, 76-82, 2016.
- 3- Al-Sabagh A., Kandile N., Nasser N., Mishrif M. and El-Tabey A.E., Demulsification Efficiency of Some New Demulsifiers Based on 1, 3, 5-Triethanolhexahydro-1, 3, 5-triazine, J Dispers Sci Technol., 35, 1361-1368, 2014.
- 4- Cunha R.E., Fortuny M., Dariva C. and Santos A.F., Mathematical Modeling of the Destabilization of Crude Oil Emulsions Using Population Balance Equation, Ind Eng Chem Res., 47, 7094-7103, 2008.
- 5- Goldszal A. and Bourrel M., Demulsification of Crude Oil Emulsions: Correlation to Microemulsion Phase Behavior, Ind Eng Chem Res., 39, 2746-2751, 2000.
- 6- Atta A.M., Allohedan H.A. and El-Mahdy G.A., De-watering of Petroleum Crude Oil Emulsions Using Modified Schiff Base Polymeric Surfactants, J Dispers Sci Technol., 122, 719-728, 2014.
- 7- Al-Sabagh A., Noor El-Din M., Abo-El Fotouh S. and Nasser N., Investigation of the Demulsification Efficiency of Some Ethoxylated Polyalkylphenol Formaldehydes Based on Locally Obtained Materials to Resolve Water-in-oil Emulsions, J Dispers Sci Technol, 30, 267-276, 2009.
- 8- Kedar K. and Bhagwat S.S, Effect of Polar Head Surfactants on the Demulsification of Crude Oil, Pet Sci Technol., 36, 91-98, 2018.
- 9- Mya O.B., Houga S., Chihouba S. and Asla B., Treatment of Algerian Crude Oil Using REB09305 OS Demulsifier, Egypt. J. Pet., 2017.
- 10- Grimes B., Population Balance Model for Batch Gravity Separation of Crude Oil and Water Emulsions. Part I: Model Formulation, J Dispers Sci Technol., 33,

578-590, 2012.

11- Grimes B.A., Dorao C.A., Opedal N., Kralova I., Sorland G. and Sjöblom J., Population Balance Model for Batch Gravity Separation of Crude Oil and Water Emulsions. Part II: Comparison to Experimental Crude Oil Separation Data, *J Dispers Sci Technol.*, 33, 591-598, 2012.

12- Espenes M., Modeling and Analysis of a Batch Gravity Separation of an Oil and Water Emulsion, 2014.

13- Atta A.M., Allohedan H.A. and El-Mahdy G.A., De-watering of Petroleum Crude Oil Emulsions Using Modified Schiff Base Polymeric Surfactants, *J Pet Sci Eng.*, 122, 719-728, 2014.

14- Atta A.M., Al-Lohedan H.A., Abdullah M.M. and ElSaeed S.M., Application of New Amphiphilic Ionic Liquid Based on Ethoxylated Octadecylammonium Tosylate as Demulsifier and Petroleum Crude Oil Spill Dispersant, *J Ind Eng Chem*, 33, 122-130, 2016.

15- Aryafard E., Farsi M., Rahimpour M.R. and Raeissi

S., Modeling Electrostatic Separation for Dehydration and Desalination of Crude Oil in an Industrial Two-stage Desalting Plant, *J Taiwan Inst Chem Eng.*, 58, 141-147, 2016.

16- Manga M. and Stone H., Collective Hydrodynamics of Deformable Drops and Bubbles in Dilute Low Reynolds Number Suspensions, *J Fluid Mech.*, 300, 231-263, 1995.

17- Chesters A.K., Modeling of Coalescence Processes in Fluid-Liquid Dispersions. A Review of Current Understanding., *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 69(A), 259, 1991.

18- Lee C.H., Erickson L.E. and Glasgow L.A., Bubble Breakup and Coalescence in Turbulent Gas-Liquid Dispersions, *Chem. Eng. Commun.*, 59, 65-84, 1987.

19- Kumar S. and Ramkrishna D., On the Solution of Population Balance Equations by Discretization—I. A Fixed Pivot Technique, *Chem Eng Sci.*, 51, 1311-1332, 1996.

Archive of SID