



بررسی امکان استفاده از سورفکتانت بجای استفاده همزمان از سورفکتانت و پلیمر در فرایند ازدیاد برداشت شیمیایی

پیمان کامرانفر^۱، سید امین شفیعی نجفی^۲، محمد جامی الاحمدی^۳

دانشگاه صنعت نفت، دانشکده نفت اهواز
keyvan.kamranfar@gmail.com

چکیده

یکی از مهمترین کاربردهای سورفکتانت ها استفاده آنها در فرایند ازدیاد برداشت از مخازن میباشد. در این فرآیندها سورفکتانت به منظور کم کردن کشش بین سطحی (IFT) آب و نفت به درون مخزن تزریق میشود، بطوری که مقدار کشش بین سطحی آب و نفت از حدود 30 dyne/cm به حدود 10^{-3} dyne/cm کاهش می یابد. معمولا پلیمر نیز بمنظور افزایش گرانروی پس از سورفکتانت به مخزن تزریق می شود که باعث کاهش تحرک فاز تزریق شده به مخزن می شود. در مطالعات قبلی، اثرات احتمالی سورفکتانت ها بر روی گرانروی محلول برای کاربرد های ازدیاد برداشت نادیده گرفته شده است. در برخی از سورفکتانت ها در غلظت های بالای غلظت بحرانی میسل (Critical Micelle Concentration, CMC)، شکل هندسی میسل ها دچار تغییر می شود. این تغییر شکل باعث تغییر قابل توجه گرانروی محلول می شود. در این مطالعه، با استفاده از دیتاهای آزمایشگاهی موجود در مقالات به همراه یک مدل ریاضی از پیش توسعه داده شده، به بررسی اثرات شکل هندسی میسل ها بر روی گرانروی محلول پرداخته شده است. نتایج این مطالعه نشان میدهد که تغییر شکل هندسی میسل ها از شکل کروی به شکل استوانه ای باعث افزایش شدید گرانروی محلول DeAC (dodecyl ammonium chloride) می شود. در نتیجه میتوان بجای استفاده همزمان از سورفکتانت و پلیمر، با استفاده از انواع خاصی از سورفکتانت ها، هم کشش بین سطحی را کاهش داده و هم گرانروی محلول را افزایش داد. به عبارت دیگر، برخی سورفکتانت ها میتوانند نقش سورفکتانت و پلیمر را بطور همزمان در فرایند ازدیاد برداشت شیمیایی بازی کنند.

واژه های کلیدی: میسل، گرانروی، ازدیاد برداشت، CMC، DeAC

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، مخازن هیدروکربوری

² دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، مخازن هیدروکربوری، دانشگاه صنعت نفت، دانشکده نفت اهواز

³ دکترای مهندسی شیمی، استاد دانشگاه صنعت نفت



۱ - مقدمه

پس از مراحل اولیه و ثانویه برداشت از مخزن، حجم زیادی از نفت درون مخزن باقی می ماند، حجم باقیمانده که اغلب حدود ۷۰٪ از مقدار نفت در جای مخزن را تشکیل میدهد بدلیل نیروهای موینگی، نسبت تحرک (Mobility Ratio) نامطلوب فازها و ناهمگونی (heterogeneity) سنگ مخزن به روش های عادی قابل تولید نیست.

سیلاب زنی شیمیایی فرآیندی است که طی آن محلولی حاوی سورفکتانت که به نام میکروامولسیون (Microemulsion) شناخته میشود، بصورت یکجا و از طریق یک یا چند چاه تزریقی تحت یک الگوی خاص تزریق (Injection Pattern) به درون مخزن تزریق میشود. سپس بوسیله تزریق آب، میکروامولسیون و نفت جاروب شده بوسیله آن به سمت چاه تولیدی هدایت میشود، که باعث تولید مقداری از نفت های بدام افتاده در مخزن می شود. معمولا پس از تزریق سورفکتانت مقداری پلیمر را نیز به درون مخزن تزریق میکنند و سپس تزریق آب را انجام میدهند، تزریق پلیمر به دلیل گرانی و بالا و در نتیجه نسبت تحرک (Mobility Ratio) کم آن باعث بهبود فرآیند جاروب نفت درون مخزن می شود. استفاده از سورفکتانت برای کاهش کشش بین سطحی آب و نفت درون مخزن یک فرآیند شناخته شده از دید برداشت است [2]. به منظور بررسی کمی تاثیر سورفکتانت بر روی کشش بین سطحی، گرانی و دیگر خواص مرتبط با تولید از مخازن، پارامتر بدون بعد عدد موینگی به شکل زیر تعریف شده است:

$$Nc = \mu V / \sigma \quad (1)$$

در این معادله μ گرانی میکروامولسیون با واحد Poises، V سرعت ظاهری میکروامولسیون با واحد m/Sec و σ هم کشش بین سطحی با واحد dyne/cm میباشد [3]. رابطه کلی بین عدد موینگی (Nc) و اشباع نفت باقیمانده (Residual oilsaturation, Sor) درون مخزن به این صورت است که با افزایش Nc مقدار Sor کاهش می یابد، به عبارت دیگر با افزایش عدد موینگی مقدار بازیافت افزایش می یابد.

سورفکتانت ها مولکول های دوگانه ای هستند که دارای یک سر آبدوست (Hydrophilic Head - Water loving head) و یک سر آبگریز (Hydrophobic Head - Water hating head) می باشند. همین ساختار دوگانه سورفکتانت ها باعث رفتار دوگانه آنها در برابر حلال ها میشود [4]. به همین دلیل سورفکتانت ها در صنایع بسیاری از جمله صنایع داروسازی، غذا، ازدیاد برداشت از مخازن و غیره کاربرد گسترده ای دارند [5].

در غلظت های کم، مولکول های سورفکتانت به فرم آزاد یا مونومر (monomer) درون محلول قرار میگیرند، ولی پس از اینکه غلظت سورفکتانت درون محلول از یک حد بحرانی بیشتر شود، مولکول ها تشکیل تجمع هایی را می دهند. به این تجمع های مولکولی، میسل (micelle) و به غلظت بحرانی مذکور Critical Micelle Concentration, CMC گفته میشود [6]. در غلظت های بالاتر از CMC، افزایش سورفکتانت به محلول باعث افزایش در غلظت میسل میشود درحالیکه غلظت مونومر تقریباً ثابت می ماند [4].

تشکیل میسل خواص محلول از جمله کشش بین سطحی، رسانایی معادل، فشار اسمزی، انحلال پذیری و غیره را تحت تاثیر قرار میدهد [5]. نتایج کارهای آزمایشگاهی نشان داده است که میسل های تشکیل شده میتوانند در قالب یکی از شکلهای هندسی کروی، سیلندری یا میله ای، صفحه ای و بیضی درون محلول وجود داشته باشند. شکل میسل بوسیله پارامترهایی از جمله ساختار سورفکتانت، غلظت سورفکتانت، دما و مواد افزودنی از جمله نمک کنترل میشود [8]. تغییر در این پارامترها ممکن است باعث تغییر در شکل میسل ها شود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داده است که معمولا در غلظت های کم بالای CMC شکل



میسل ها کروی است، بنابراین شکل اولیه و عمده میسل ها شکل کروی است، اما افزایش غلظت سورفکتانت ممکن است باعث افزایش عدد تجمع (Aggregation number)، یعنی تعداد سورفکتانت های تجمع یافته در اطراف یک میسل میشود و همچنین ممکن است اندازه میسل ها را افزایش دهد، و در نهایت ممکن است باعث تغییر شکل میسل ها از کروی به سیلندری شود [7].

نتایج نشان می دهد که اندازه میسل با ریشه دوم غلظت متناسب است. همچنین نتایج آنالیز دیتاهای آزمایشگاهی برخی سورفکتانت ها از جمله [9] hexadecyltrimethylammonium bromide، hexadecylheptoxyethylene glycol monoether [10]، [11] tetradecylhexoxyethyleneglycolmonoether نشان داده است که در غلظت های بالاتر، میسل های سیلندری تشکیل می شوند [12].

بر اساس نوع رفتار تغییر شکل میسل ها در برابر افزایش غلظت، سورفکتانت ها را میتوان به سه نوع اصلی تقسیم کرد [13]:

- ۱- سورفکتانت های با حلالیت بالا در آب که تغییر شکل محسوسی در میسل های آنها رخ نمیدهد. بنابراین در این نوع سورفکتانت ها با افزایش غلظت بالای CMC انتظار تغییر خواص محلول از جمله گرانیوی نمی رود.
- ۲- سورفکتانت های با حلالیت بالا در آب، که با افزایش غلظت بالای CMC شکل هندسی میسل ها دچار تغییر می شود. بنابراین در این نوع سورفکتانت ها خواص محلول از جمله گرانیوی ممکن است دچار تغییرات شدیدی شود.
- ۳- سورفکتانت های با حلالیت پایین در آب، در این نوع از سورفکتانت ها افزایش غلظت ممکن است حتی در غلظت های پایین باعث جدایش فازها شود، بنابراین این نوع از سورفکتانت ها برای استفاده در فرآیند های ازدیاد برداشت مناسب نیستند.

برای نوع دوم سورفکتانت ها، تغییر شکل میسل ها بعد از یک غلظت آستانه (C_{th}) رخ می دهد، بطوریکه شکل غالب میسل ها از حالت کرویبه حالت سیلندری تغییر پیدا می کند. همانطور که قبلا هم گفته شد علاوه بر غلظت سورفکتانت، مقدار شوری یا غلظت نمک درون محلول هم روی تغییر شکل میسل ها موثر می باشد [14].

میسل های سیلندری بزرگتر از میسل های کروی هستند. همچنین اندازه میسل های استوانه ای با افزایش غلظت سورفکتانت بالاتر از C_{th} افزایش پیدا می کند. علاوه بر، این تحقیقات نشان داده است که میسل های سیلندری بر خلاف چیزی که قبلا تصور میشد، حالت غیر انعطاف پذیری دارند [15]. بنابراین میتوان پیش بینی کرد که با افزایش غلظت برخی سورفکتانت ها بالاتر از C_{th} ، گرانیوی محلول افزایش یابد. این در حالی است که افزایش غلظت سورفکتانت ها بالاتر از CMC اثری روی مقدار کشش بین سطحی نداشته و به همین دلیل تا کنون برای فرآیند های ازدیاد برداشت مطالعات قابل توجهی در زمینه تاثیر افزایش غلظت سورفکتانت بالاتر از CMC بر روی خواص دیگر محلول از جمله گرانیوی انجام نشده است.

همانطور که قبلا هم ذکر شد، در مطالعات قبلی مربوط به ازدیاد برداشت، اثرات احتمالی سورفکتانت بر روی گرانیوی نادیده گرفته شده است. بنابراین هدف اصلی این مطالعه بررسی اثرات سورفکتانت ها بر روی گرانیوی محلول می باشد.

برای پیش بینی گرانیوی محلول حاوی سورفکتانت زمانی که شکل عمده میسل ها سیلندری باشد یک مدل ریاضی وجود دارد. در این مطالعه با استفاده از مدل یاد شده به همراه دیتا های آزمایشگاهی مربوط به سورفکتانت کاتیونی DodecylAmmoniumChloride (DeAC) به بررسی شرایطی پرداخته میشود که در آن گرانیوی محلول حاوی سورفکتانت به اندازه کافی افزایش پیدا کند بطوریکه بتوان آنرا در فرآیند ازدیاد برداشت بجای استفاده همزمان از پلیمر و سورفکتانت بکار برد.



۲ - مدل ریاضی

گرانروی میکرومولسیون را میتوان از معادله درجه سه زیر حساب کرد [15]:

$$\eta r = 1 + m + k_1 \times m^2 + k_2 \times m^3 \quad (2)$$

بطوریکه ηr و m موجود در معادله (2) به ترتیب بصورت معادلات (3) و (4) تعریف میشوند:

$$\eta r = \frac{\mu}{\mu_{CMC}} \quad (3)$$

$$m = v \times \Phi \quad (4)$$

عبارت $k_1 \times m^2$ موجود در معادله (2) بعنوان برهمکنش هیدرودینامیکی (Hydrodynamic interaction) تعریف میشود و براساس مطالعات انجام شده مقدار k_1 در حدود ۰,۷۵ تخمین زده شده است. همچنین عبارت $k_2 \times m^3$ بصورت برهم کنش بین میسل ها تعریف می شود و برای محلول های رقیق این عبارت صفر در نظر گرفته می شود [15]. بازه غلظت سورفکتانت ها برای استفاده در فرایندهای ازدیاد برداشت معمولاً کمتر از 2 gr/100ml می باشد که در بازه محلول های رقیق قرار گرفته و بنابراین فرض نادیده گرفتن عبارت $k_2 \times m^3$ برای آن صدق می کند.

دو عبارت v و Φ موجود در معادله (2) به ترتیب عبارتند از فاکتور شکل (Shape factor) و جزء حجمی (Volume fraction). این دو عبارت که در ادامه توضیح داده خواهند شد، فقط تابع غلظت سورفکتانت می باشند. v بصورت معادله (5) تعریف می شود.

$$\Phi = X_m \times \left(\frac{V_s}{V_w} \right) \quad (5)$$

همچنین اگر غلظت سورفکتانت، C برحسب gr/100ml و جرم مولکولی سورفکتانت، MWs برحسب gr/mole باشند، معادله (5) را میتوان به شکل معادله (6) هم نوشت:

$$\Phi = \left(\frac{10}{55.5} MWs \right) (Cm) \times \left(\frac{V_s}{V_w} \right) \quad (6)$$

بطوریکه Cm و Xm بترتیب به صورت معادلات (7) و (8) تعریف میشوند:

$$Cm = C - CMC \quad (7)$$

$$Xm = X - Xcmc \quad (8)$$

فاکتور شکل، v در معادله (4) اثرات اندازه میسل بر روی گرانروی محلول را نشان می دهد و به شکل زیر تعریف میشود:

$$\text{For } J > 15, \quad v = 1.6 + \frac{J^2}{15} [(\ln(2J) - 1.5)^{-1} + 3(\ln(2J) - 0.5)^{-1}] \quad (9)$$



$$(10) \text{ For } 1 < J < 15, \quad v = 2.5 + 0.407(J - 1)^{1.508}$$

پارامتر J یک پارامتر بدون بعد است که بصورت نسبت محوری (Axial ratio) بیضی هم ارز و به همان حجم و طول مربوط به شکل میسل تعریف میشود. به عبارت دیگر، میسل سیلندری با یک بیضی کشیده با همان حجم و طول هم ارز در نظر گرفته می شود. پارامتر J بصورت زیر تعریف میشود:

$$J = \left(\frac{L}{d}\right) \sqrt{\frac{2}{\left(3 - \left(\frac{d}{L}\right)\right)}} \quad (11)$$

پارامتر L/d در معادله (11) نسبت محوری میسل های سیلندری بوده و به شکل زیر تعریف میشود:

$$\left(\frac{L}{d}\right) = \left(\frac{gs \cdot vo - \frac{4\pi lo^3}{3}}{2\pi lo^2(lo + \delta)}\right) + 1 \quad (12)$$

با توجه به تعریف میسل، حجم بزرگترین میسل کروی برابر است با:

$$gs \cdot Vo = \left(\frac{4}{3}\right)\pi lo^3 \quad (13)$$

در معادله (13)، gs عدد تجمع بزرگترین میسل کروی است. این پارامتر بدون بعد را میتوان بصورت آزمایشگاهی یا با استفاده از جداول مربوط به خواص سورفکتانت ها تعیین کرد. همچنین دو پارامتر lo و Vo موجود در معادله (13) بترتیب بصورت معادلات (14) و (15) تعریف میشوند [1].

$$lo = 0.15 + 0.1265N \quad (14)$$

$$Vo = 2.74 + 2.69N \quad (15)$$

N موجود در این معادلات، تعداد مولکولهای کربن موجود در ساختار سورفکتانت میباشد.

با ترکیب معادلات (12) و (13) و پس از یک سری محاسبات ریاضی، میتوان شکل مناسبتری از معادله (12) را بصورت زیر نوشت:

$$\left(\frac{L}{d}\right) = 1 + 0.667 \left[\frac{lo}{lo + \delta}\right] \left[\left(\frac{gw}{gs}\right) - 1\right] \quad (16)$$

پارامتر δ بصورت طول موثر سر آبدوست مولکول سورفکتانت تعریف می شود، واحد δ در این معادله نانومتر می باشد. همچنین gw هم پارامتر بدون بعدی است که بیانگر عدد تجمع میسل های سیلندری در هر غلظتی از سورفکتانت می باشد و به شکل زیر تعریف می شود:

$$gw = gs + 2\sqrt{K(X - Xcmc)} \quad (17)$$

پارامتر K در معادله (17)، یک ضریب ترمودینامیکی است که ارجحیت شکل گیری میسل های سیلندری را در برابر تشکیل میسل های کروی نشان می دهد. با توجه به تعریف این پارامتر کاملاً واضح است که با افزایش مقدار K ، احتمال تشکیل شدن



میسل های سیلندری بیشتر می شود. همچنین نتایج نشان داده است برای زمانیکه شکل عمده میسل ها سیلندری است، برای یک بازه از غلظت سورفکتانت، پارامتر K مقداری ثابت خواهد بود [15].

بدلیل سختی حل معادلات مربوط به مدل توضیح داده شده برای استفاده در غلظت های مختلف، پس از مقداری محاسبات و ساده سازی ها، معادله (2) به شکل معادله (18) دوباره نویسی شده است:

$$\eta_r = [0.0324 \times (kI/MW_s^2) \times (V_s/V_w)^2] (C_m \times V_c)^2 + [0.1802 \times (1/MW_s) \times (V_s/V_w)] (C_m \times V_c) + 1 \quad (18)$$

همچنین معادله مربوط به گرانی نسبتی را میتوان به شکل یک معادله درجه سه بصورت زیر نوشت:

$$\eta_r = a \times (C_m \times V_c)^2 + b \times (C_m \times V_c) + C \quad (19)$$

برای نشان دادن وابستگی پارامتر V به غلظت سورفکتانت، در معادله های (18) و (19) از اندیس c برای V استفاده شده است. با مقایسه معادله های (18) و (20) میتوان ضرایب معادله را به شکل زیر تعریف نمود:

$$a = 0.0324 \times (K/MW_s^2) \times (V_s/V_w)^2 \quad (20)$$

$$b = 0.1802 \times (1/MW_s) \times (V_s/V_w) \quad (21)$$

$$C = 1 \quad (22)$$

و l_0 و V_0 به ترتیب طول و حجم مربوط به دنباله آگریز مولکول سورفکتانت با واحد نانومتر می باشند.

برای رسم بهتر نتایج، پارامتر گرانی بدون بعد را بصورت زیر تعریف میکنیم:

$$\mu_{rd} = \frac{\eta_r - \eta_{rCMC}}{\eta_r} \quad (23)$$

همچنین با قرار دادن معادله (3) در معادله (23)، شکل ساده تری از گرانی بدون بعد به صورت زیر بدست می آید:

$$\mu_{rd} = \frac{\mu - \mu_{CMC}}{\mu} \quad (24)$$

۳ - روش کار

همانطور که گفته شد، مدل توصیف شده در مرحله قبلی برای پیش بینی گرانی میکرومولسیون است زمانی که شکل عمده میسل ها سیلندری باشد، بنابراین اولین مرحله از کار تعیین غلظت آستانه، C_{th} است، بطوریکه بالاتر از این غلظت شکل میسل ها به سیلندری تغییر پیدا کرده و میتوان از مدل مذکور استفاده نمود.

برای تعیین C_{th} ، بایستی دیتاهای آزمایشگاهی شامل گرانی بر حسب غلظت سورفکتانت را برای غلظت های مختلف رسم کرد. اما قبل از آن بایستی گرانی نسبتی را طبق رابطه گفته شده در بخش قبل به گرانی بدون بعد تبدیل کنیم. از آنجا که تشکیل میسل های استوانه ای باعث افزایش گرانی میکرومولسیون میشود، بنابراین C_{th} را میتوان بعنوان غلظتی در نظر گرفت که بعد از آن گرانی شروع به افزایش شدید میکند.



پارامترهای لازم برای پیش بینی گرانروی با استفاده از مدل گفته شده شامل موارد ذیل میشوند: MWs ، (Vs/Vw) ، K و Vo, Io, gs . سه پارامتر اول اساساً تابع نوع و ساختار مولکولی سورفکتانت بوده و براحتی قابل محاسبه هستند، Io و Vo را هم میتوان بترتیب با استفاده از معادلات (14) و (15) محاسبه نمود. تعیین K مهمترین و چالش برانگیزترین پارامتر مدل است چرا که هیچ مدل یا رابطه تجربی برای تعیین آن وجود ندارد.

با توجه به مطالعات گذشته، برای هر غلظت نمک خاصی مقدار K برای غلظت های سورفکتانت بالاتر از C_{th} تقریباً ثابت باقی می ماند [15]. بنابراین، در این مطالعه با استفاده از دیتاهای آزمایشگاهی موجود برای هر غلظت نمک خاص، ابتدا مقدار K بهینه را برای غلظت های بالاتر از C_{th} محاسبه کرده و سپس با قرار دادن این مقدار K در معادلات مدل، گرانروی میکروامولسیون برای دیگر غلظت های سورفکتانت را میتوان پیش بینی کرد.

خواص کلی مورد نیاز سورفکتانت مورد مطالعه (DeAC) در جدول شماره ۱ آورده شده است. همچنین دیتاهای آزمایشگاهی شامل گرانروی محلول بر حسب غلظت سورفکتانت در جدول ۲ آورده شده است. در نهایت مقادیر CMC مربوط به سورفکتانت DeAC برای غلظت های مختلف نمک در جدول شماره ۳ آورده شده است.

همانطور که از معادلات مشخص است، حل مدل به روش سعی و خطا نیاز دارد و با توجه به حجم بالای محاسبات و همچنین نیاز به حل همزمان تمام معادلات گفته شده، حل دستی معادلات عملاً ناممکن می باشد، بنابراین، دو برنامه با استفاده از MATLAB نوشته شد که با بکارگیری آنها قادر خواهیم بود برای شرایط مختلف، معادلات مورد نیاز را با سرعت مناسبی حل کنیم. برنامه اول با استفاده از دیتاهای آزمایشگاهی موجود و با استفاده از روش های سعی و خطا بهترین مقدار K را طوری حساب میکند که پیش بینی های مدل با واقعیت کمترین اختلاف ممکن را داشته باشد. سپس با وارد کردن K محاسبه شده در مرحله قبل به برنامه دوم، مقادیر گرانروی میکروامولسیون برای غلظت های مختلف بدست می آید.

مراحل مربوط به پیش بینی گرانروی محلول با استفاده از مدل گفته شده را میتوان بصورت زیر در ۶ مرحله خلاصه نمود، همچنین در شکل ۱ این مراحل بصورت نموداری نشان داده شده است:

- ۱- تعیین پارامترهای MWs ، (Vs/Vw) و gs با استفاده از جداول مربوط به خواص سورفکتانت ها.
- ۲- محاسبه Io و Vo با استفاده از معادلات (14) و (15).
- ۳- استفاده از دیتاهای آزمایشگاهی شامل گرانروی محلول بر حسب غلظت سورفکتانت در برنامه MATLAB نوشته شده با استفاده از روش سعی و خطا برای تعیین K بهینه در هر غلظت نمک.
- ۴- در این مرحله با داشتن مقادیر K های بهینه محاسبه شده بازای هر غلظت نمک در مرحله قبل، و رسم نمودار K بر حسب غلظت نمک در مختصات کارتزین، یک نمودار حاصل می شود که میتوان از آن برای تخمین K در غلظت های نمک دیگر که دیتای آزمایشگاهی آن در دسترس نیست استفاده نمود.
- ۵- در این مرحله با دانستن غلظت نمک بهینه برای فرآیند ازدیاد برداشت، و با استفاده از نمودار بدست آمده در مرحله قبل، مقدار K بهینه در آن غلظت نمک تعیین می گردد.
- ۶- در نهایت با وارد کردن مقدار K بهینه مورد نظر برای فرآیند ازدیاد برداشت، در برنامه MATLAB نوشته شده، و حل معادلات (18) تا (22) توسط این برنامه، مقادیر گرانروی محلول بر حسب غلظت سورفکتانت محاسبه می شود.



شکل ۱. نمودار مربوط به پروسه محاسبات مربوط به مدل.

۴- نتایج و بحث

در این مطالعه توانستیم گرانروی میکرومولسیون را با استفاده از یک مدل از پیش ارائه شده به همراه یک سری دیتای آزمایشگاهی موجود، برای بازه نسبتا گسترده ای از غلظت نمک NaCl و غلظت سورفکتانت بدست آوریم. همانطور که از نتایج کار کاملا مشخص است، گرانروی محلول به غلظت نمک و غلظت سورفکتانت وابسته میباشد. بنابراین میتوان نتایج کار را در قالب دو بخش زیر ارائه نمود:

۴,۱- تاثیر غلظت سورفکتانت

اثر غلظت سورفکتانت بر روی گرانروی میکرومولسیون در شکل های شماره ۲ و ۳ برای بازه گسترده ای از غلظت نمک نشان داده شده است. همانطور که از شکل شماره ۲ مشخص است، زمانیکه غلظت سورفکتانت کمتر از 0.20 gr/100ml باشد، برای تمام غلظت های نمک، گرانروی محلول تقریبا ثابت می ماند. اما به محض اینکه غلظت سورفکتانت از مقدار آستانه 0.20 gr/100ml بیشتر شود، گرانروی محلول به شکل محسوسی شروع به افزایش میکند. در شکل شماره ۳ هم رفتار کاملا مشابهی مشاهده می شود، در این شکل هم همانطور که مشخص است، تغییرات گرانروی فقط برای غلظت های بالاتر از غلظت آستانه قابل توجه است.

بنابراین، غلظت 0.20 gr/100ml غلظت آستانه (C_{th}) است بطوریکه تغییر شکل میسل از شکل کروی به سیلندری در این غلظت رخ میدهد و همین امر باعث افزایش شدید گرانروی محلول شده است. همچنین مقدار تغییر در گرانروی به غلظت نمک وابسته است که در بخش بعدی به تفصیل توضیح داده شده است.

۴,۲- تاثیر غلظت نمک (NaCl)



نمودارهای شماره ۲ و ۳ نشان میدهند که برای حالتی که غلظت نمک 0.20 M و کمتر است، با افزایش غلظت سورفکتانت افزایشی در گرانروی محلول رخ نمیدهد، ولی برای غلظت های نمک بیشتر مثل 0.25 M با افزایش در غلظت سورفکتانت شاهد افزایش قابل توجه گرانروی محلول هستیم.

تاثیر غلظت نمک بر روی مقادیر K محاسبه شده و گرانروی بدون بعد میکرومولسیون بترتیب در شکل های شماره ۴ و ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان میدهد که افزایش غلظت نمک باعث افزایش مقدار K و در نتیجه افزایش در گرانروی محلول می شود. همچنین نتایج کار نشان میدهد که افزایش در مقدار K برای غلظت های نمک کمتر از 0.20 M ناچیز میباشد (شکل شماره ۴ و جدول شماره ۴ را ببینید). همانطور که در شکل شماره ۵ مشخص است، بین پیش بینی های انجام شده و نتایج آزمایشگاهی موجود، تطابق قابل قبولی مشاهده میشود.

علت اصلی افزایش در گرانروی محلول تغییر شکل میسل ها از کروی به سیلندری میباشد. از آنجا که میسل های سیلندری برخلاف میسل های کروی حالت غیر قابل انعطاف دارند [15]. بنابراین این افزایش گرانروی در اثر تبدیل شدن به میسل های سیلندری قابل توجه و قابل پیش بینی می باشد.

در نهایت میتوان نتیجه گرفت که میتوان با پیش بینی صحیح غلظت های سورفکتانت و نمک مورد نیاز برای فرآیند ازدیاد برداشت شیمیایی، به شرایطی دست یافت که تزریق سورفکتانت به مخزن علاوه بر کاهش شدید کشش بین سطحی، باعث افزایش گرانروی میکرومولسیون شود. سورفکتانت با قابلیت های گفته شده را میتواند بجای استفاده همزمان از سورفکتانت و پلیمر، بکار برد. بعنوان مثال با در نظر گرفتن یک فرآیند معمولی ازدیاد برداشت شیمیایی با شرایط غلظت نمک 0.30 M، استفاده از سورفکتانت DeAC با غلظت 0.8 gr/100ml میتواند علاوه بر کاهش کشش بین سطحی، مقدار گرانروی را تا ۵ برابر افزایش دهد (شکل شماره ۵ را ببینید). و این یعنی کنترل هر دو عامل کشش بین سطحی و تحرک پذیری محلول بوسیله سورفکتانت.

۵ - نتیجه گیری

گرانروی محاسبه شده توسط مدل و روش ارائه شده با دیتاهای آزمایشگاهی موجود در بازه گسترده ای از غلظت های سورفکتانت و نمک برای کاربرد های ازدیاد برداشت از مخازن، مقایسه شده است. نتایج حاصل دقت بالا و قابل قبول روش را بیان میکند. نتایج همچنین نشان میدهد که برای برخی سورفکتانت ها از قبیل DeAC، در غلظت های نمک معمول برای کاربرد های ازدیاد برداشت، با بکار بردن غلظت مناسب سورفکتانت میتوان علاوه بر کاهش کشش بین سطحی، گرانروی محلول را افزایش داده و در نتیجه تحرک پذیری محلول را هم به اندازه کافی کاهش داد. افزایش گرانروی محلول حاوی سورفکتانت بدلیل تغییر شکل میسل ها از کروی به سیلندری می باشد.

از آنجا که در فرآیندهای ازدیاد برداشت شیمیایی سورفکتانت و پلیمر به ترتیب برای کاهش کشش بین سطحی و افزایش گرانروی به کار میروند. لذا نتایج این مطالعه نشان میدهد که میتوان فقط با بکارگیری برخی سورفکتانت ها به دو هدف گفته شده



یعنی کشش بین سطحی کم و گرانیروی بالا بصورت همزمان دست پیدا کرد، این مهم زمانی بدست می آید که شرایط مناسب شامل غلظت نمک، غلظت سورفکتانت و نوع سورفکتانت مناسب، مهیا باشد. به بیان دیگر نتایج کار نشان می دهد که تحت شرایطی، برخی سورفکتانت ها با ویژگی های گفته شده میتوانند بصورت همزمان نقش پلیمر و سورفکتانت را در فرایند ازدیاد برداشت بازی کنند.



جدول ۱. خواص مربوط به سورفکتانت [4]DeAC.

Surfactant Name	DeAC
MW, g/mol	222
gs	57
Vs/Vw	14
L ₀	1.68
V ₀	0.6

جدول ۲. دیتاهای آزمایشگاهی گرانروی نسبی بر حسب غلظت سورفکتانت در غلظت های نمک (NaCl) متفاوت [15].

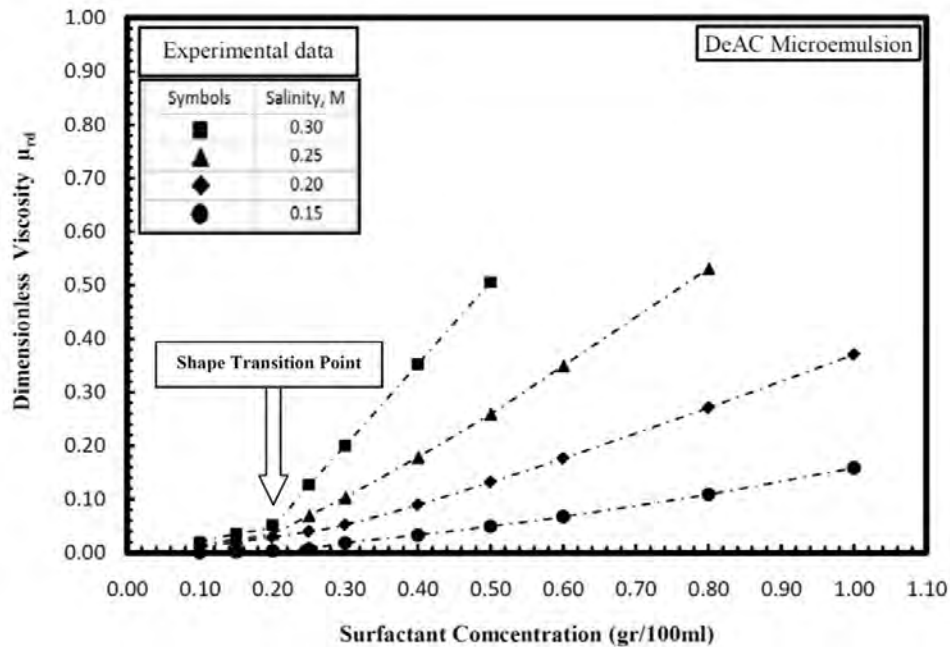
گرانروی نسبی DeAC در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد				غلظت سورفکتانت
غلظت نمک 0.15 M	غلظت نمک 0.20 M	غلظت نمک 0.25 M	غلظت نمک 0.30 M	g/100ml
1.000	1.011	1.014	1.022	0.10
1.001	1.023	1.026	1.035	0.15
1.003	1.034	1.038	1.071	0.20
1.005	1.041	1.075	1.145	0.25
1.019	1.055	1.116	1.250	0.30
1.034	1.098	1.218	1.545	0.40
1.052	1.152	1.351	2.023	0.50
1.072	1.214	1.538		0.60
1.123	1.372	2.134	4.555	0.80
1.189	1.588	3.282		1.00

جدول ۳. مقادیر CMC مربوط به سورفکتانت DeAC در غلظت های نمک (NaCl) مختلف [10].

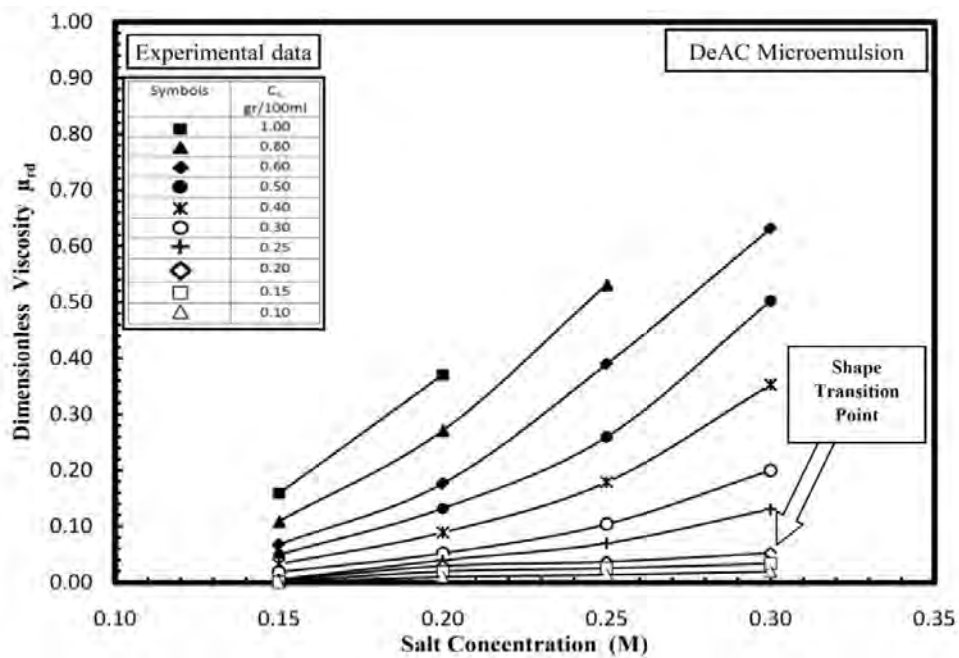
غلظت نمک M, NaCl	مقدار CMC, g/100 ml
0.15	0.100
0.20	0.093
0.25	0.093
0.30	0.085

جدول ۴. مقادیر محاسبه شده پارامتر K بر حسب غلظت نمک (NaCl).

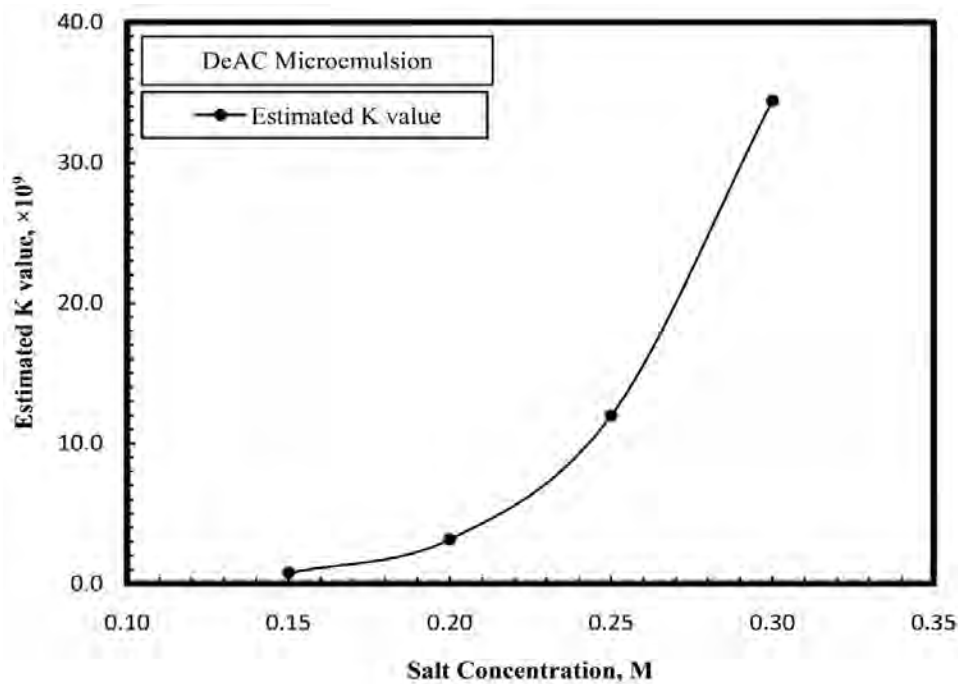
غلظت نمک M, NaCl	غلظت نمک NaCl, % جرمی	مقدار K محاسبه شده
0.15	0.8	7.684×10^8
0.20	1.1	3.171×10^9
0.25	1.3	1.199×10^{10}
0.30	1.6	3.443×10^{10}



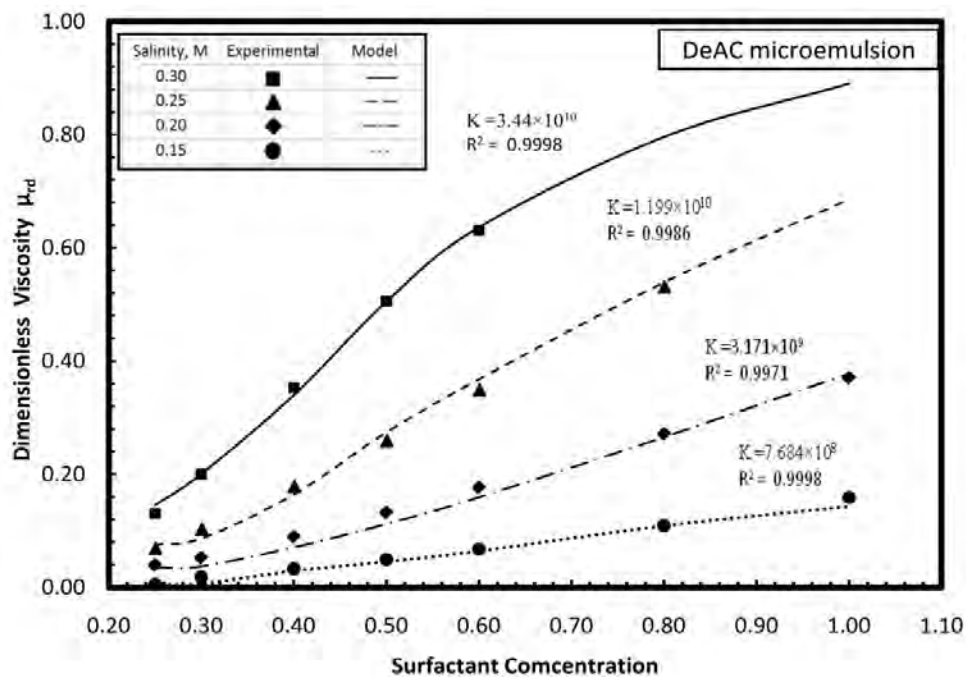
شکل ۲. گرانیروی بدون بعد برحسب غلظت سورفکتانت DeAC برای غلظت های مختلف نمک (NaCl) مربوط به نتایج آزمایشگاهی.



شکل ۳. گرانیروی بدون بعد برحسب غلظت نمک (NaCl) برای غلظت های مختلف سورفکتانت DeAC مربوط به نتایج آزمایشگاهی.



شکل ۴. نمودار مقادیر محاسبه شده پارامتر K برحسب غلظت نمک (NaCl) در مختصات کارترین.



شکل ۵. گرانروی بدون بعد مربوط به نتایج پیش بینی های مدل و دیتاهای آزمایشگاهی برحسب غلظت سورفکتانت DeAC برای غلظت های مختلف نمک (NaCl).



فهرست علائم و اختصارات

نماد	تعریف (واحد)
C	غلظت سورفکتانت (gr/100ml)
CMC	غلظت بحرانی میسل (gr/100ml)
gs	عدد تجمع بزرگترین میسل کروی (بدون بعد)
gw	در تجمع میسل سیلندری در غلظت های مختلف (بدون بعد)
lo	طول دنباله هیدروکربنی مولکول سورفکتانت (nm)
L/d	نسبت محوری میسل های سیلندری (بدون بعد)
J	نسبت محوری میسل های بیضی گون هم ارز (بدون بعد)
K	پارامتر ترمودینامیکی مربوط به مدل (بدون بعد)
MWs	جرم مولکولی سورفکتانت (gr/mole)
V	فاکتور شکل (بدون بعد)
Vo	حجم دنباله مولکول سورفکتانت (nm ³)
(Vs/Vw)	نسبت حجمی مولکول های سورفکتانت و آب (بدون بعد)
X	جزء مولی سورفکتانت (بدون بعد)
Xcmc	جزء مولیسورفکتانت در CMC (بدون بعد)
μ	گرانروی نسبی میکروامولسیون (بدون بعد)
μ_CMC	گرانروی نسبی میکروامولسیون در CMC (بدون بعد)
μ_d	گرانروی بدون بعد میکروامولسیون (بدون بعد)
δ	طول موثر سر آبدوست مولکول سورفکتانت (nm)
Φ	جزء حجمی سورفکتانت (بدون بعد)



منابع

1. Yuan, C., *Commercial scale simulations of surfactant/polymer flooding*. 2012.
2. Hirasaki, G., C. Miller, and M. Puerto, *Recent advances in surfactant EOR*. SPE Journal, 2011. 16(4): p. 889-907.
3. Liu, S., *Alkaline Surfactant Polymer enhanced oil recovery process*. 2008.
4. Israelachvili, J.N., *Intermolecular and surface forces: revised third edition*. 2011: Academic press.
5. Fanun, M., *Microemulsions: properties and applications*. 2010: CRC Press.
6. Salager, J.-L., *Surfactant's types and uses*. Fire p booket-E300-attaching aid in surfactant science and engineering in English. Merida Venezuela, 2002. 2: p. 3.
7. Al-Anber, Z.A., et al., *Sphere-to-rod transitions of micelles in model nonionic surfactant solutions*. The Journal of Chemical Physics, 2003. 118(8): p. 3816-3826.
8. Daful, A.G., *Microscopic modeling of the self assembly of surfactants: shape transitions and critical micelle concentrations*. 2011.
9. Debye, P. and E.W. Anacker, *Micelle Shape from Dissymmetry Measurements*. The Journal of Physical Chemistry, 1951. 55(5): p. 644-655.
10. Elworthy, P.H. and C.B. Macfarlane, *The physical chemistry of some non-ionic detergents**. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 1965. 17(2): p. 65-82.
11. Balmbra, R.R., et al., *Variations in the micelle size of non-ionic detergents*. Transactions of the Faraday Society, 1964. 60(0): p. 979-985.
12. Mukerjee, P., *Size distribution of small and large micelles. Multiple equilibrium analysis*. The Journal of Physical Chemistry, 1972. 76(4): p. 565-570.
13. Holmberg, K., et al., *Surfactants and polymers in aqueous solution*. Vol. 2. 2003: John Wiley & Sons Chichester.
14. Christov, N., et al., *Synergistic sphere-to-rod micelle transition in mixed solutions of sodium dodecyl sulfate and cocoamidopropyl betaine*. Langmuir, 2004. 20(3): p. 565-571.
15. Nagarajan, R., *Are large micelles rigid or flexible? A reinterpretation of viscosity data for micellar solutions*. Journal of Colloid and Interface Science, 1982. 90(2): p. 477-486.