

بررسی تاثیر نیروهای سطحی بر چگونگی تعیین ترشوندگی سنگ مخازن نفتی

سعید سورانی^۱، مسعود ریاضی^{۲*}

شیراز، دانشگاه شیراز، خیابان ملا صدرا، دانشکده مهندسی ۲، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، بخش مهندسی نفت، کد پستی ۱۴۶۶۶-۷۱۳۴۸


mriazi@shirazu.ac.ir

چکیده

ترشوندگی به عنوان تمایل سیال برای گسترده شدن و یا چسبیدن بر روی سطح جامد در مجاورت یک سیال غیر قابل امتزاج دیگر تعریف می شود. برای اندازه گیری ترشوندگی، آزمون هایی وجود دارند که مهم ترین آنها اندازه گیری زاویه تماس است. این زاویه از صفر تا ۳۶۰ درجه متغیر بوده و مقدار آن بستگی به خواص فیزیکی و شیمیایی سنگ و سیال دارد. با ایجاد تغییرات شیمیایی در سیالی که در تماس با سطح جامد قرار دارد می توان رفتارها و تعاملات بین آنها را اصلاح نمود. یکی از عامل های اصلی که ترشوندگی را تعیین می نماید نوعی پتانسیلی الکتریکی می باشد که پتانسیل زتا نامیده می شود. با بررسی این کمیت می توان بسیاری از رفتارهای سیالات را در محیط متخلخل تعیین و پیش بینی نمود. از جمله پدیده هایی که تابع پتانسیل زتا هستند و بررسی آنها برای شناسایی مخزن و بهره وری هرچه بیشتر از آن ضروریست، می توان زاویه تماس یا ترشوندگی، فشار انفصال (disjoining pressure) و ضریب انتشار روی سطح (spreading coefficient) را نام برد. در این مقاله تاثیر کمیت پتانسیل زتا بر ترشوندگی و پدیده های مربوط به آن مورد مطالعه و بررسی قرار می گیرد. همچنین با استفاده از روابط ریاضی تاثیر عواملی مانند قدرت اسیدی (pH) و درجه شوری سیال بر پتانسیل زتا مورد بحث قرار می گیرد و غلظت های بهینه یون های مثبت و منفی عناصر مختلف، برای رسیدن به ترشوندگی کهبیشینه ی تولید از مخازن را در زمان تزریق آب موجب می شود، مورد مطالعه قرار می گیرد.

واژه های کلیدی: ترشوندگی، زاویه تماس، پتانسیل زتا، نیروهای بین سطحی، pH، درجه شوری، ازدیاد برداشت نفت.

۱- دانشجوی کارشناسی دانشگاه شیراز، بخش مهندسی نفت، soorani.saeed@yahoo.com

۲- استادیار دانشگاه شیراز، بخش مهندسی نفت،  mriazi@shirazu.ac.ir

۱- مقدمه

برای افزایش تولید نفت از مخازن نفتی در مرحله‌ی دوم تولید معمولاً از روش تزریق آب (waterflood) استفاده می‌شود. عملکرد تزریق آب به شدت تحت تاثیر خواص سنگ، نفت، آب سازند و آب تزریقی است و یکی از مهم‌ترین این خواص، ترشوندگی است که تحرک آب در محیط متخلخل مخزن و مسیرهای عبور را تعیین می‌کند [۱]. تاکنون روابط زیادی برای بیان تاثیر ترشوندگی بر پدیده‌های موثر بر تولید نفت ارائه شده است. رابطه‌ی بین درجه اشباع آب و فشار مویینه که تابعی از ترشوندگی هستند توسط Leveret بیان شده است [۲]. رابطه‌ی ای نیز توسط Corey و Brook ارائه شده است که به دلیل سادگی کار با معادله و دقت بالای آن بسیار پرکاربرد می‌باشد [۳]. بعدها نیز روابط بسیاری برای مرتبط نمودن زاویه‌ی تماس، نیروی مویینی و درجه‌ی اشباع توسط محققین دیگر ارائه شد که روابط قبلی را تکمیل و تصحیح می‌نماید [۴-۶].

هدف از طرح این بحث بیان دیدگاهی نسبتاً جدید برای بررسی پدیده‌ی ترشوندگی و ایجاد روابطی بین این کمیت و روابط پیشین است. در اینجا ترشوندگی به وسیله‌ی کمیتی به نام پتانسیل زتا (ζ potential) و از طریق محاسبه‌ی شارژ و پتانسیل سطحی (ψ_0) مطالعه شده و اینکه این مقادیر چگونه می‌توانند بر تولید نهایی از مخزن تاثیرگذار باشند.

خاصیت مذکور یک خاصیت فیزیکی-شیمیایی است که تحت تاثیر مجاورت یک سطح جامد و یک سیال ایجاد می‌شود. در مخازن نفتی، خواص آبی که قبل از مهاجرت نفت در محیط متخلخل وجود دارد (خواصی مثل pH و غلظت یونی)، پتانسیل الکتریکی دیواره‌ی خلل و فرج‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در مخازن کربناته که قسمت اعظمی از مخازن نفت را شامل می‌شوند [۷] این شارژ مقداری مثبت می‌باشد [۸]. بعد از مهاجرت و ورود نفت (که دارای شارژ منفی است) به محیط متخلخل، نفت بر روی دیواره‌ی سنگ جذب می‌شود و در نهایت همین فرایند باعث می‌شود که حدود ۸۰٪ این مخازن نفت-دوست تا خنثی باشند [۹]. تعیین ترشوندگی مخزن، بحثی مفصل می‌باشد، در این مقاله فقط از مواردی خاص مانند روش‌های تعیین زاویه‌ی تماس و ضریب Amott مثال زده شده است. در مورد ضریب Amott صرفاً به این توضیح بسنده می‌شود که مقدار این کمیت برای جامدات آب-دوست تا نفت-دوست از +۱ تا -۱ تغییر می‌کند (مقدار +۱ نشان‌دهنده‌ی قویا آب-دوست و مقدار -۱ نشان‌دهنده‌ی قویا نفت-دوست است). برای این ضریب مقادیر +۰/۳ تا -۰/۳ خنثی در نظر گرفته می‌شود.

نتایج آزمایشگاهی تحقیقات Jadhunandan و Morrow [۱۰] نشان داد که بیشینه‌ی تولید نفت معمولاً در حالتی اتفاق می‌افتد که مخزن آب-دوست ضعیف باشد. نتایج نشان داده که تولید از مخازن قویا آب-دوست و قویا نفت-دوست تا حد اندکی به مقدار حجم آب تزریقی بستگی دارد و این وابستگی با نزدیک شدن به حالتی که ترشوندگی مقداری میانی باشد، افزایش می‌یابد. تاکنون مقالات بسیار زیادی باهدف تغییر ترشوندگی برای افزایش تولید با استفاده از مواد شیمیایی و نمک‌ها ارائه شده است. در این مطالعه تاثیرات برخی از این پارامترها بر پتانسیل زتا مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج آنها با این دیدگاه تطبیق داده می‌شود.

۲- بررسی دیدگاه الکتریکی شیمی سطح

تاثیر شارژهای الکتریکی بر سطوح، یکی از مسائل کلیدی در شناخت فیزیک-شیمی سطح است. تعاملات نیروهای کولنی بین دو ذره‌ی دارای شارژ، یون‌ها و تعاملات آنها با سطوح، تعیین‌کننده‌ی بسیاری از رفتارهای کنترل‌کننده در مخزن می‌باشد که در این بحث برای بررسی ترشوندگی سطوح، به مطالعه و تحلیل نیروی بین یون‌های محلول در سیال و سطح دیواره‌ی تخلخل‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۲- لایه‌های دوگانه‌ی الکتریکی (Electrical Double Layer)

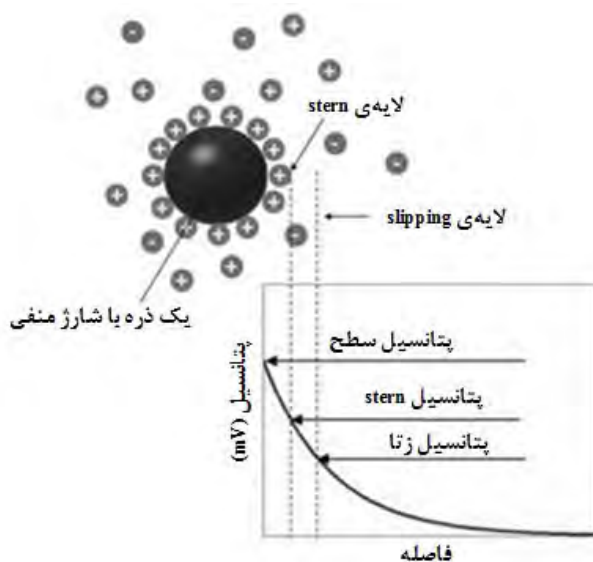
یک گروه مهم از نیروهای مربوط به پدیده‌های الکتریکی به دلیل توزیع یون‌های محلول در سیال در اطراف یک سطح جامد دارای شارژ است. برای درک این موضوع، یک سطح جامد فرض می‌شود که دارای شارژ منفی یکنواخت بوده و در تماس با یک فاز محلول می‌باشد (در مخازن، این محلول همان آب اولیه است) که در برگیرنده‌ی یون‌های مثبت و منفی است. پتانسیل الکتریکی در سطح با مقدار ψ_0 شروع شده و با افزایش فاصله از سطح (به سمت داخل محلول) این پتانسیل کاهش می‌یابد. در هر نقطه از محلول، پتانسیل الکتریکی، ψ ، انرژی پتانسیل هر یون، $ze\psi$ ، را در میدان منطقه‌ای تعیین می‌کند. در حالتی که مثال زده شد، یون‌های منفی از سطح دور شده و یون‌های مثبت به سمت سطح جذب می‌شوند. [۱۱] این فرایند موجب تشکیل دو لایه با شارژهای الکتریکی مختلف‌العلامت در مجاورت سطح جامد می‌شود؛ یک لایه با شارژ منفی درست بلافاصله روی سطح (لایه‌ی stern) که محکم بر روی سطح چسبیده و به سادگی از آن جدا نمی‌شود و یک لایه‌ی با شارژ مثبت پس از لایه‌ی اول (لایه‌ی slipping که بر روی لایه‌ی اول می‌لغزد) که به تدریج با فاصله گرفتن از سطح از غلظت آنها کاهیده می‌شود و بالطبع مقدار پتانسیل آن نیز کم می‌شود (شکل ۱) [۱۲]. گرادبان پتانسیل را می‌توان با استفاده از معادله‌ی Poisson اندازه‌گیری نمود [۱۳-۱۴].

$$\nabla^2 \psi = \frac{8\pi n_0 z e}{\epsilon} \sinh \frac{ze\psi}{kT} \quad (1)$$

$$\nabla^2 \psi = \kappa^2 \psi$$

بطوریکه κ برابر با طول Debye است و مقدار معکوس ضخامت آتمسفر یونی اطراف هر سطح دارای شارژ بوده و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$\kappa^2 = \frac{4\pi e^2}{\epsilon kT} \sum_i n_i z_i \quad (2)$$



شکل ۱. نمایش شماتیک لایه‌های stern, slipping [۱۲].

با حل معادلات بالا، مقدار پتانسیل نسبت به فاصله از سطح برابر خواهد بود با [۱۵-۱۶]:

$$\psi(x) = \frac{2k_B T}{e} \ln \left(\frac{[1 + \gamma \exp(-\kappa x)]}{[1 - \gamma \exp(-\kappa x)]} \right) \quad (3)$$

بطوریکه:

$$\gamma = \frac{\exp\left(\frac{\psi_{r0}}{2}\right) - 1}{\exp\left(\frac{\psi_{r0}}{2}\right) + 1}$$

9

$$\psi_{r0} = \frac{e\psi_0}{k_B T}$$

$$\psi_0 = -2.3 \left(\frac{k_B T}{e}\right) (pH - pH_0) \quad (4)$$

با استفاده از روابط فوق می‌توان پتانسیل محلول را در هر فاصله‌ای از سطح به دست آورد.

۳-۲- نیروهای بین مولکولی

همانطور که گفته شد، عامل تعیین کننده‌ی ترشوندگی جامدات، نیروهای بین مولکول‌های سیال و جامد در تماس بایکدیگر هستند. نیروهای بین مولکولی به دو دسته‌ی کوتاه-برد و دور-برد تقسیم می‌شوند. از جمله نیروهای کوتاه برد (که اهمیت کمتری نسبت به دسته‌ی دیگر دارند) می‌توان نیروهای آبپوشی (Hydration)، آب‌ترسی (Hydrophobic)، نوسانی (Oscillatory) و نوسان غشایی (Membrane Fluctuation) را نام برد [۱۷]. اما دسته‌ی مهمتر نیروهای Van der Waals و نیروهای الکترو استاتیک لایه‌ی دوگانه هستند. نیروهای الکترواستاتیک لایه‌ی دوگانه، همانطور که گفته شد، تابعی از خواص فیزیکی و شیمیایی سنگ و سیال هستند. نیروهای Van der Waals معمولاً به صورت جاذبه بوده و توضیح آنرا از بحث این مقاله می‌باشد..

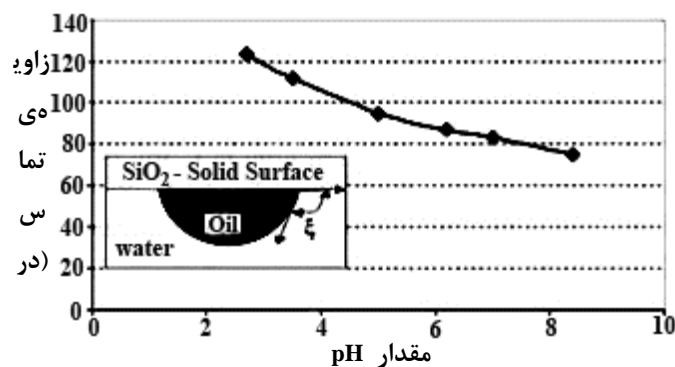
۳- تاثیر pH بر ترشوندگی

جدول ۱ و شکل ۲ نتایج آزمایشات Al-Rossies و همکارانش را بر تاثیر pH محلولهای مختلف بر پتانسیل سطحی و زاویه‌ی تماس نشان می‌دهد [۱۸]. این نتایج بیانگر چگونگی رابطه‌ی pH با زاویه‌ی تماس و نیز پتانسیل سطحی است و به نحوی رابطه‌ی بین دو کمیت آخر را روشن می‌نماید. در آزمایشات مذکور، با افزایش pH تا محدوده‌ی بین ۴/۵ و ۵/۱، پتانسیل سطحی به بیشینه مقدار خود رسیده و پس از آن رو به کاهش می‌رود. در شکل ۲ نیز با افزایش pH زاویه‌ی تماس کم می‌شود. Fodgen و همکارانش برای اندازه‌گیری تاثیر pHهای مختلف بر وضعیت ترشوندگی شیشه و Kaolinite، کمیت پتانسیل زتا را اندازه‌گیری کرده و نتایج را به صورت جدول ۲ ارائه داده‌اند [۱۹].

جدول ۱. پتانسیل سطحی برای pHهای مختلف [۱۸]

pH	۲	۳	۴	۴/۵	۵/۱	۷	۹/۲۱	۱۰	۱۳
پتانسیل سطحی، ψ_0 (mV)	۵۸/۸	۶۱/۲	۶۲	۶۹/۱	۵۸/۲	۵۴	۵۲/۸	۶۱/۷	۵۲

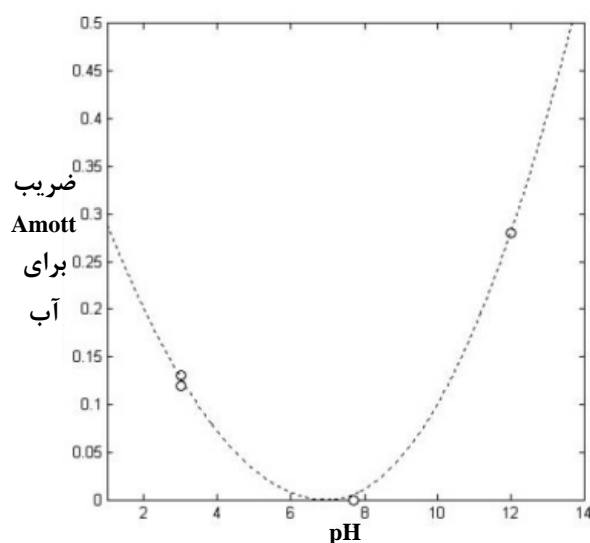
تأثیر pH بر روند تغییرات زاویه‌ی تماس به صورتی است که در یک نقطه که به آن نقطه‌ی شارژ صفر میگویند، تغییر علامت می‌دهد. این مسئله در نتیجه‌ی آزمایشات برخی محققین (شکل ۳ و ۴) نشان داده شده و نیز با توجه به رابطه‌ی شماره‌ی ۴ قابل توجیه است [۱۲ و ۲۰].



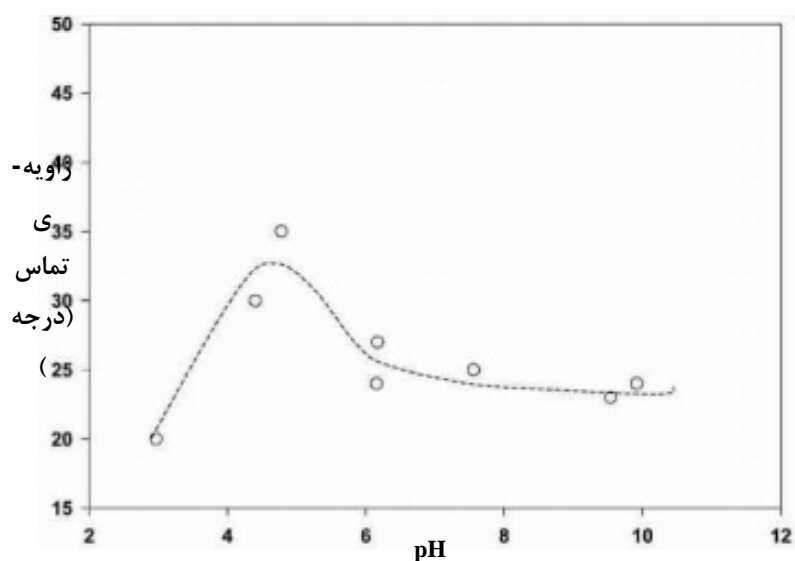
شکل ۲. زاویه‌ی تماس برای سه فاز نفت/آب/جامد بر حسب pH محلول [19].

جدول ۲. اثر pH بر پتانسیل سطحی شیشه و kaolinite [20].

pH	Kaolinite (میلی ولت)	شیشه (میلی ولت)
۴	-۲/۸	-۵/۸
۶	-۵/۰	-۹/۱
۹	-۴/۸	-۸/۳



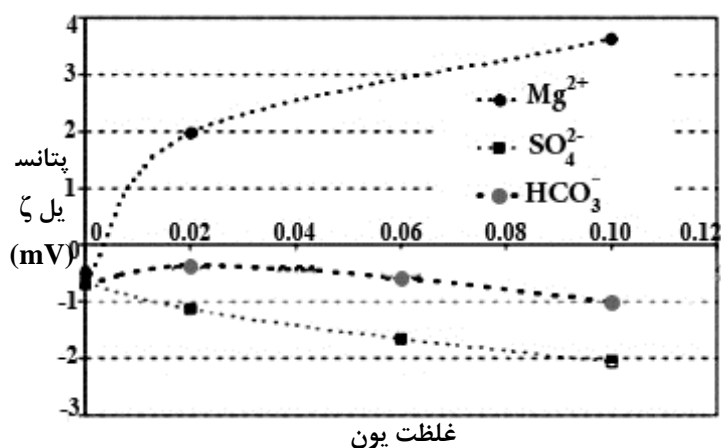
شکل ۳. تغییرات ضریب Amott به عنوان تابعی از ترشوندگی بر حسب pH [۱۴].



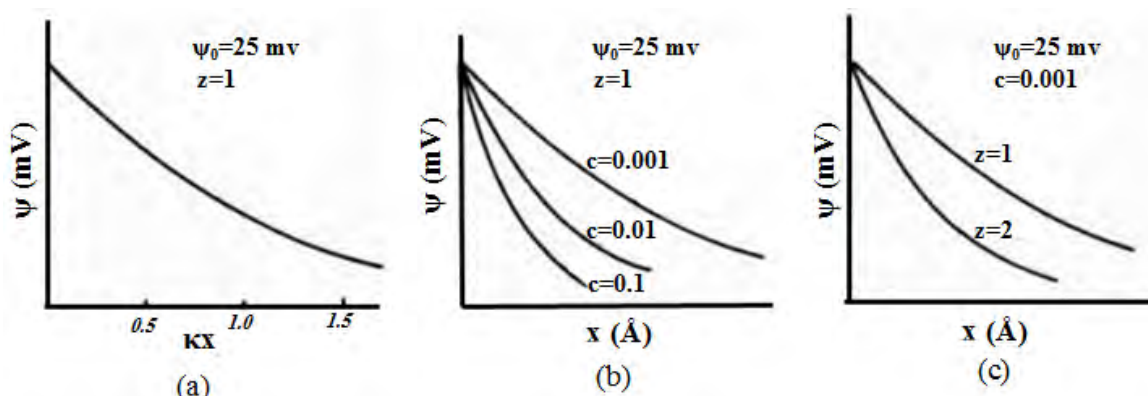
شکل ۴. زاویه‌ی تماس بر حسب pH [۲۰].

۴- تاثیر قدرت یونی بر ترشوندگی

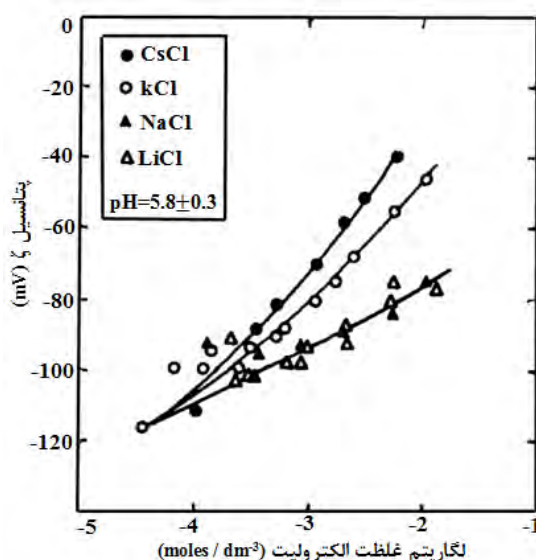
تاثیر جذب یون‌های سولفات و منیزیم بر سطح کلسیت بر تغییرات پتانسیل سطحی و تغییرات منتج شده در ترشوندگی کلسیت نفت-دوست توسط Gomari و همکارانش [۲۱] بررسی شد. تغییرات پتانسیل زتا بر اثر حضور این یون‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. مطالعات انجام گرفته بر روی تاثیر غلظت یونی بر ترشوندگی بسیار گسترده است [۱۷ و ۱۹] و نتایج اتخاذ شده که در اینجا مورد بررسی قرار می‌گیرد، معمولاً بین همه‌ی آنها مشترک است. در شکل ۶ منحنی‌های رسم شده توسط Adamson [۱] برای نمایش اثر غلظت و ظرفیت یون بر طول Debye و تغییرات پتانسیل سیال و در شکل ۷ از همان منبع، تاثیر الکترولیت‌های مختلف بر پتانسیل زتا نشان داده شده‌است.



شکل ۵. تاثیر غلظت یون‌های مختلف در چند غلظت بر پتانسیل زتا [۲۱].



شکل ۶. نمایش تاثیر ظرفیت و غلظت یون بر (a) طول Debye، (b) تاثیر غلظت بر پتانسیل و (c) تاثیر ظرفیت بر پتانسیل [۱۱].



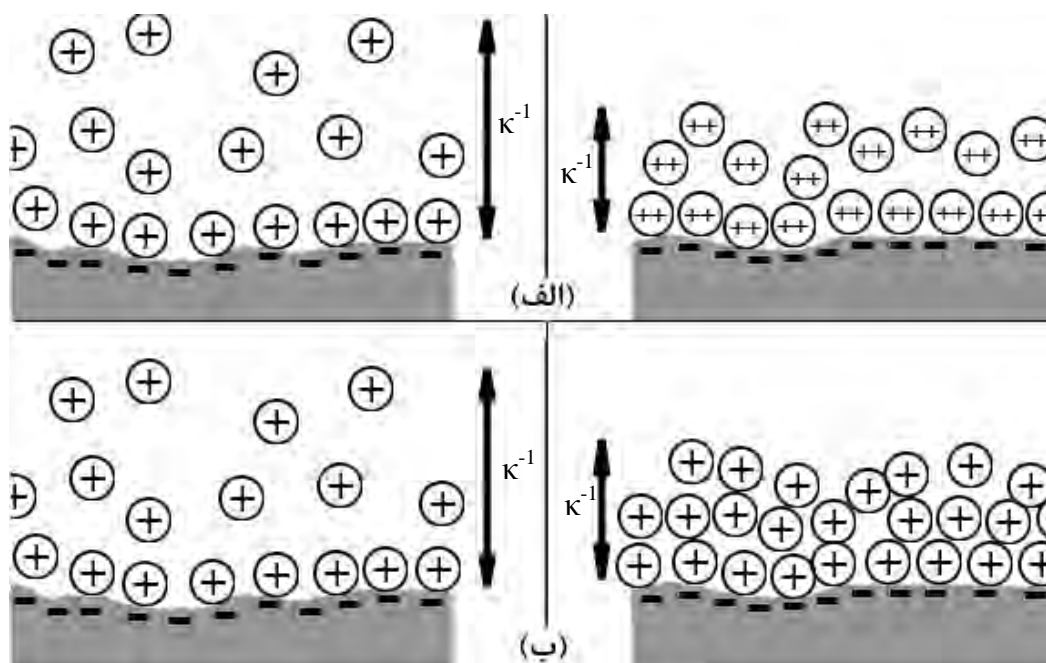
شکل ۷. اثر نوع الکترولیت بر پتانسیل زتا در pH ثابت تقریباً برابر ۵/۸ [۱۱].

۵- تحلیل دیدگاه

یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر ترشوندگی، pH محلول است. نحوه‌ی تاثیر این عامل با در نظر گرفتن رابطه‌ی ۴ قابل بررسی است. با توجه به نتایج آزمایشات (شکل‌های ۳ و ۴ و جداول ۱ و ۲) این رابطه به صورتی خطی عمل نکرده و در یک نقطه‌ی شارژ صفر که تابعی از pH است و آن را *pH* نقطه‌ی شارژ صفر، pH_0 می‌نامند، روند تغییرات پتانسیل (و در نتیجه ترشوندگی) عوض می‌شود. اما برخی نتایج (شکل ۲) خلاف این قضیه را نشان می‌دهد که این تفاوت می‌تواند به خاطر تفاوت در خواص سطح جامد باشد که منجر به خطی عمل نمودن این رابطه می‌شود.

هر کدام از انواع یون‌های حاضر در محلول‌ها با توجه به نوع و تعداد بارهایشان به نحوی بر ترشوندگی سطح جامد تاثیرگذار هستند. همانطور که در شکل ۶a نشان داده شده، برای سطحی که پتانسیل آن ۲۵ میکرو ولت در نظر گرفته شده، با افزایش غلظت یون‌های تک ظرفیتی محلول، با فاصله گرفتن از سطح جامد، افت پتانسیل بیشتری مشاهده می‌شود که این

بدین معناست که تمرکز بارها بیشتر در نزدیکی سطح تجمع نموده و یک لایه Stern نازک و مستحکم تشکیل شده است. همین مسئله نیز برای افزایش ظرفیت یونی صادق است (شکل ۶c). به عنوان مثال اگر یون‌های حاضر در سطح مثبت در نظر گرفته شود، برای حالت‌های با ظرفیت و غلظت بیشتر، پتانسیل مثبت تمایل جذب نفت (که شارژ منفی دارد) بر روی این لایه را افزایش داده و ترشوندگی سطح، اصطلاحاً نفت-دوست قوی می‌شود. بیان ریاضی این مشاهدات با استفاده از رابطه‌ی ۳ قابل ارائه است و گرادیان غلظت با توجه به رابطه‌ی ۱ برای محلول‌های غلیظتر و ظرفیت یونی بالاتر بیشتر می‌شود، زیرا با توجه به رابطه‌ی ۲ که تعداد یونها و ظرفیت آنها با طول Debye رابطه‌ی عکس داشته و افزایش این دو پارامتر موجب کاهش پهنای ناحیه‌ای که یونها در مجاورت سطح دارای شارژ توزیع شده‌اند می‌شود. این عامل توجیهی برای استفاده از روش تزریق آب هوشمند (smart water) به مخازن نفت دوست است که معمولاً تولید بیشتری را نسبت به روش تزریق آب دریا و آب‌هایی که شوری بالا دارند نتیجه می‌دهد. شکل ۸ به درک بهتر این مطلب کمک می‌کند.



شکل ۸. نمایش شماتیک تجمع یونها در کنار یک سطح دارای پتانسیل برابر. الف) مقایسه‌ی یون تک ظرفیتی و دو ظرفیتی؛ ب) مقایسه‌ی غلظت بالا و پایین (سمت راست دارای غلظت بیشتر است).

در صورتی که فاز نفت در این محیط قرار داشته باشد، تمایل بیشتری به چسبیدن بر روی سطوح سمت راست تصویر دارد؛ زیرا اگرچه سطح سنگ دارای پتانسیل یکسان در هر دو شرایط است، اما به خاطر تراکم بار بیشتر در حالات سمت راست، چگالی منطقه‌ای بار بیشتر بوده (طول Debye کمتر است) و باعث می‌شود اصطلاحاً سنگ نفت-دوست‌تر شود. از اینرو زمان‌هایی که از آب با شوری پایین استفاده می‌شود، شرایط سمت چپ ایجاد شده و باعث جدا شدن آسان‌تر نفت از سطح سنگ می‌شود.

آنچه که در شکل ۷ نشان داده شده بیانگر این موضوع است که علاوه بر پارامترهای ذکر شده، نوع یون‌های الکترولیت نیز بر پتانسیل و ترشوندگی تاثیرگذار است. به خاطر تفاوت در رسانش الکترولیت‌های مختلف، ϵ و ثابت‌های دیگر در لایه‌ی

دوگانه و ثابت‌هایی مثل ثابت Hamaker در روابط نیروهای Van der Waals است که در نهایت منجر به مشاهده اختلافاتی در ترشوندگی‌ها می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این بحث تلاش شد تا بین روش‌های قدیمی آزمایشات ترشوندگی و یک روش نسبتاً جدید ارتباطاتی برقرار شود. همچنین نشان داده شد که بسیاری از نتایج آزمایشاتی که بعضاً نیاز به تجهیزات خاصی داشته و زمان‌بر می‌باشند با بررسی روابط مربوط به نیروهای الکتریکی سطحی قابل استنتاج بوده که هزینه‌ی کمتر و دقت بسیار بالاتری دارد. همچنین موثر بودن مبحث جدید تزریق آب هوشمند نیز با استفاده از همین روش نشان داده شد و مکانیزم و اینکه چرا کاهش شوری آب تزریقی باعث افزایش بازدهی مخازن نفت-دوست می‌شود توضیح داده شد.

در نهایت با بررسی تاثیر انواع الکترولیت‌ها بر پتانسیل، مشاهده شد که می‌توان نوع محلول تزریقی، ظرفیت یون‌های آن و غلظت نمک‌ها را با به کار گرفتن روابط موجود به گونه‌ای تنظیم کرد که قبل از انجام آزمایشات و عملیات تزریق از اینکه به شرایط ترشوندگی مطلوب خواهیم رسید، اطمینان نسبی حاصل نمود.

۷- فهرست علائم و نمادها

c: غلظت مولی

e: بار الکترون (C)

k_B : ثابت بولتزمن (J/K)

n: غلظت یون

T: دما (K)

x: فاصله از سطح (m)

Z: ظرفیت یونی

ϵ : ضریب رسانایی الکتریکی محیط ($\epsilon_v \epsilon_e =$) (m^2/s)

κ : معکوس طول Debye (m^{-1})

ψ (در فرمول‌ها): پتانسیل (J/C)

ζ : پتانسیل زتا (V)

۷-۱- اندیس‌ها

0: مقدار در سطح

e: الکترولیت

i: آمین جزء

v: خلا

منابع

1. M. Faerstein, P. Couto, J. L. D. Alves; "A Comprehensive Approach for Assessing the Impacts of Wettability on Oil Production in Carbonate Reservoirs"; SPE 148280, 2011.
2. M.C. Leveret; "Capillary Behavior in Porous Solids"; SPE 941152, Tulsa, Aug. 1940.
3. R.H Brooks, A. T. Corey; "Hydraulic Properties of Porous Media"; Hydraulic Paper No. 3, Colorado State University; 1964.
4. S.M. Skjaeveland, L. M. Siqveland, A. Kjosavik, W. L. Hammervold Thomas, G. A. Virnovsky; "Capillary Pressure Correlation for Mixed-Wet Reservoirs," SPERE; 3, No. 1, 60–67; 2000.
5. D. D. Huang, M. M. Honarpour, R. Al-Hussainy; "An Improved Model for Relative Permeability and Capillary Pressure Incorporating Wettability"; Paper Presented at the Society of Core Analysts International Symposium, Calgary, Sept. 7–10; 1997.
6. H.M.Princen; "Capillary Pressure Behavior in Pores with Curved Triangular Cross-Section: Effect of Wettability and Pore Size Distribution," Coll. Surf.; 65, 221–230; 1992.
7. F.F. Jr. Craig; "The Reservoir Engineering Aspects of Waterflooding"; Monograph Series, SPE, Richardson, TX, 1971.
8. S. Strand, T. Austad, T. Puntervold, E. J. Høgnesen, M. Olsen, A. M. F. Barstad; "Smart Water" For Oil Recovery From Fractured Limestone: A Preliminary Study"; Energy & Fuels; 22, 3126–3133; 2008.
9. Amott; "Observations Relating To Wettability of Porous Rock"; 156-162; 1959.
10. P.P. Jadhunandan, N.R. Morrow; "Effect of Wettability on Waterflood Recovery for Crude-Oil/Brine/Rock Systems", SPE Reservoir Engineering 10, No. 1: 40–46, Feb. 1995.
11. A. W. Adamson, Department of Chemistry, University of Southern California, Los Angeles, California; "Physical Chemistry of Surfaces"; 6th Edition. Pages 169 - Page 195; 1997.
12. S. Takahashi; Doctorate Dissertation: "Water Imbibition, Electrical Surface Forces, and Wettability of Low Permeability Fractured Porous Media"; 2009.
13. H. R. Kruyt; "Colloid Since, in Surface and Colloidal Science", Elsevier, New York, 1948.
14. R. O. James and G. A. Parks; "In Surface and Colloidal Science" Vol. 12; E Matijevic Ed. Plenum, New York, 1982.
15. E. J. W. Verwey and J. Th. G. Overbeek; "Theory of the Stability of Lypophobic Colloids", Elsevier, New York, 1948.
16. J. T. G. Overbeek, "Pure and Applied Chemistry"; vol. 52, pp. 1151-1161; 1980.
17. S. Basu, M. M. Sharma; "Investigating the Role of Crude-Oil Components on Wettability Alteration Using Atomic Force Microscopy"; SPE Journal 4 (3); SPE 57466; September 1999.
18. A. A. S. Al-Rossies, B. D. Al-Anazi and A. M. Paiaman; "Effect Of pH-Values on The Contact Angle and Interfacial Tension". NAFTA 61 (4) 181-186; 2010.
19. R.Gupta, K.K. Mohanty; "Wettability Alteration of Fractured Carbonate Reservoirs"; SPE 113407; SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium in Tulsa, Oklahoma, U.S.A., 19–23 April 2008.
20. S. Hoeiland, T. Barth, A.M. Blokhuis, A. Skauge; "The Effect of Crude Oil Acid Fractions on Wettability as Studied by Interfacial Tension and Contact Angles"; Journal of Petroleum Science and Engineering; 30; 91–103; 2001.
21. K.A.R. Gomari, O. Karoussi, A. A. Hamouda; "Mechanistic Study of Interaction between Water and Carbonate Rocks for Enhancing Oil Recovery"; SPE 99628. 2006.