

فیلتراسیون عمق بستر: آسیب سازند در نتیجه‌ی جریان سیال در محیط متخلخل

سعید سورانی^۱، مسعود ریاضی^{۲*}

شیراز، دانشگاه شیراز، خیابان ملا صدرا، دانشکده مهندسی ۲، کد پستی ۷۱۳۴۸-۱۴۶۶۶


mriazi@shirazu.ac.ir

چکیده

مدت چندان زیادی نیست که محققان شروع به مطالعه‌ی مسئله‌ی مهاجرت ذرات در محیط متخلخل مخزن نموده‌اند. مشاهدات تایید می‌نمایند که جریان سیال در شرایط خاصی می‌تواند بسیار مخرب باشد و ریز ذراتی که درون خلل و فرج وجود دارند و از استحکام کافی برخوردار نیستند را از جای خود جابجا نموده و در مکان‌های دیگری رسوب دهد یا در گلوگاه‌های تنگ، به تله بیندازد. تزریق آب به داخل سازند از دیرباز یکی از روش‌های افزایش بازدهی تولید از مخازن نفتی بوده است که با ایجاد مکانیزم‌های فیزیکی و شیمیایی می‌تواند باعث بهبود تولید نفت گردد. اما در کنار سودمندی‌های آن باید در نظر داشت که فرایند تزریق آب، خود می‌تواند آسیب‌های بسیار زیاد و جبران‌ناپذیری را به مخزن وارد نماید. در بسیاری از آزمایشات و تجربه‌های میدانی ثابت شده است که جریان سیال به صورت تزریق و یا تولید منجر به تحریک ریز ذرات می‌شود که همین اتفاق ساده که توسط ریز ذرات بسیار کوچک انجام می‌گیرد، می‌تواند بسیار مخرب بوده و تراوایی و در نتیجه قابلیت تولید و تزریق را به شدت کاهش دهد. اما همه‌ی این حالات در مخزن غیر قابل اجتناب بوده و فقط می‌توان تاثیر مخرب فرایند مذکور را با روش‌هایی تقلیل داد. این روش‌ها معمولاً با ایجاد تغییرات شیمیایی در آب تزریقی و تغییر نرخ تزریق و تولید هستند که می‌توانند بر مهاجرت ذرات ریز تاثیرگذار باشند. در این مقاله عوامل موثر بر مهاجرت ذرات مانند نرخ تزریق، تغییر در جهشوری، تغییرات شیمیایی آب تزریقی، pH و میزان و نوع ترشوندگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مواردی که در اینجا مورد بحث قرار می‌گیرد، شامل چگونگی تاثیر این پارامترها بر نیروهای الکتریکی و لایه‌ی دوگانه‌ی (double layer) بین ذرات و سطح دیواره‌ی تخلخل و خود ذرات با یکدیگر است و اینکه چگونه با تغییر خواص آب تزریقی می‌توان این نیروها را در جهتی تغییر داد تا این آسیب‌ها به حداقل برسد.

واژه‌های کلیدی: مهاجرت ذرات، آسیب سازند، کاهش تراوایی، نیروهای بین سطحی، 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

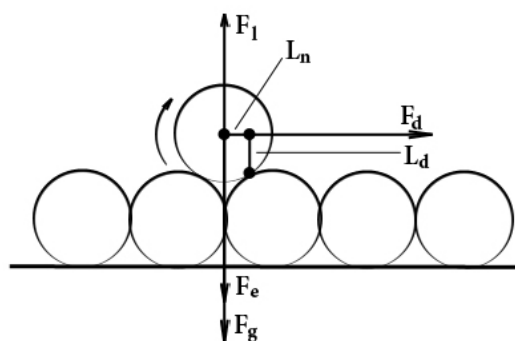
برای سال‌های بسیاری، محققان تاثیر تزریق آب بر تولید از مخازن نفت را بررسی نموده‌اند و نتایج تزریق در مغزه و نتایج میدانی، افزایشی بین ۲ تا ۴۰٪ را نشان دادند [۱]. بعد از انتشار این مطلب که تغییر ترکیبات آب تزریقی می‌تواند بر افزایش تولید تاثیرگذار باشد [۲] به تحقیقات بیشتری بر این موضوع پرداخته شد که برخی از این بررسی‌ها نشان دادند که این افزایش تولید به دلیل تبادل یون‌های چندگانه (Multiple Ione Exchange - MIE) بین سطح جامد و آب‌نمک می‌باشد [۳]. در شوری‌های پایین مشاهده شده که ترکیبات قطبی جذب شده بر روی سطح رس (clay) با پتانسیل منفی، از clay جدا شده و کاتیون‌های چند ظرفیتی به جای آنها می‌نشینند. در این تئوری اشاره شده است که انبساط لایه‌ی الکتریکی دوگانه در نتیجه‌ی MIE باعث جدا شدن ترکیبات نفتی از سطح و در نهایت افزایش تولید می‌شود [۱]. اما این گونه تزریق سیال و تغییر در لایه‌ی دوگانه ممکن است موجب جابجایی ریزذرات در نهایت کاهش تراوایی شود.

علاوه بر تزریق سیال به داخل مخزن، خود تولید نیز در شرایطی می‌تواند منجر به مهاجرت ریزذرات شود. این دو مورد (مهاجرت ذرات تحت تاثیر تزریق یا تولید) باید به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرند. در این مقاله به مباحث مشترک بین این دو و به طور کلی جریاناتی که در داخل محیط متخلخل موجب مهاجرت می‌شوند، پرداخته می‌شود.

کاهش تولید در نتیجه‌ی حرکت ذرات که بعضاً به تولید نیز می‌رسد، در مخازنی که میزان زیادی خرده‌سنگ دارند، مخازن نفت سنگین و همچنین مخازن گازی که با نرخ بالا از آن تولید می‌شود، بسیار زیاد مشاهده شده است [۴-۷]. پارامترهای زیادی هستند که تعیین کننده‌ی مهاجرت ذرات در یک سازند در حال تولید هستند: ترکیبات کانی، اندازه و شکل خلل و فرج و ذرات، اندازه و توزیع اندازه‌ی گلوله‌های محیط متخلخل، درجه اشباع نسبی هر سیال، ترشوندگی ذرات، گرانیروی فاز در حال جریان، کشش بین سطحی سیال‌ها، نرخ تولید و تغییر خواص شیمیایی در حین عملیات حفاری و تکمیل [۸]. هر کدام از این عوامل باید به طور جداگانه مورد تحلیل قرار گیرند اما آنچه که در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود صرفاً بحث در مورد جریان سیال در محیط متخلخل و تاثیر آن بر جابجایی ذرات است.

نیروهای محرک می‌توانند موجب فرسایش محیط داخلی خلل و فرج و مهاجرت ریز ذرات در سنگ و به تله افتادن آنها در یک گلوگاه و در نتیجه کاهش تراوایی شود. با توجه به کنده شدن و سپس گیر افتادن ذره، به ترتیب یک افزایش و سپس یک کاهش تراوایی اتفاق می‌افتد. باید در نظر داشت که گشادتر شدن مسیر حرکت سیال در مرحله‌ی اول، بسیار کم اهمیت و قابل چشم پوشی است اما کاهش تراوایی که در نتیجه‌ی گیر افتادن یک ذره می‌باشد، بسیار مهم است. در فرایند مرحله دوم، یک گلوگاه بند آورده می‌شود که به معنای خارج شدن کامل یک مسیر عبور سیال از سیستم می‌باشد [۹].

در حین جریان سیال درون محیط متخلخل، ذرات روی دیواره (معمولاً Clay، فلداسپارهای سست، کوارتز، کربناته و غیره) تحت تاثیر چهار نیرو قرار می‌گیرند: (۱) کشش (drag)؛ (۲) الکتریکی؛ (۳) جاذبه و (۴) بالا برنده (lifting) (شکل ۱). از اینرو pH، درجه شوری، ترکیب شیمیایی و نرخ تزریق/تولید سیال برای شناسایی و کنترل این آسیب‌ها بسیار پر اهمیت هستند. با انجام یک موازنه‌ی نیرو یا گشتاور، که در واقع هدف اصلی این مطالعه می‌باشد، می‌توان مقدار بحرانی هر کدام از این کمیت‌ها را یافت [۱۰].

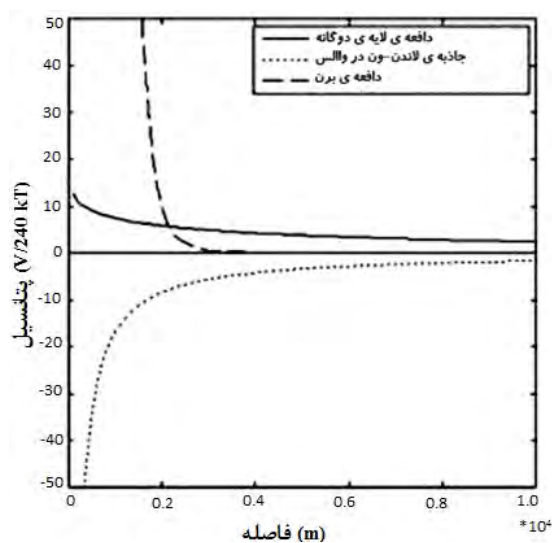


شکل ۱. نیروهای وارد بر یک ذره که روی دیواره‌ی حفره واقع شده است.

۲-۱- نیروهای الکتریکی

Khilar و Fogler [۱۱] و همکارانش [۱۲] مدل تک-ذره‌ای و شرایط انفصال ذره را با استفاده از بررسی بر هم کنش کلیه‌ی انرژی‌های بین ذره و سطح نشان داده‌اند. با توجه به این بر هم کنش‌ها، کل انرژی با استفاده از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید که معمولاً مقدار E_{HR} در آن برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲):

$$E_T = E_{DLR} + E_{LVA} + E_{BR} + E_{HR} \quad (1)$$



شکل ۲. تغییرات نیروهای الکتریکی جاذبه و دافعه‌ی موثر با فاصله از دیواره [۱۱].

اگر ذره به صورت یک کره و دیواره بحفره به شکل یک صفحه در نظر گرفته شود، نیروهای بالا را می‌توان با استفاده از روابط زیر محاسبه نمود.

نیروی دافعه‌ی لایه‌ی دوگانه [۱۳]:

$$E_{DLR} = 16\epsilon \left(\frac{k_B T}{e} \right) r_p \tanh \left(\frac{y_1}{4} \right) \tanh \left(\frac{y_2}{4} \right) e^{-\kappa h} \quad (2)$$

$$y_j = \frac{\epsilon \psi_j}{kT}$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{8\pi e^2}{2\epsilon k_B T} \sum_i n_i z_i^2}$$

بر هم کنش Van der Waals توسط Hunter [۱۳] اینگونه نوشته شد:

$$E_{LVA} = \frac{A}{6} \left(\ln \left(\frac{h+2r_p}{h} \right) - \frac{2r_p}{h} \left(\frac{h+r_p}{h+2r_p} \right) \right) \quad (۳)$$

نیروی دافعه‌ی Born یک نیروی کوتاه برد است که به دلیل تداخل ابرهای الکترونی ایجاد می‌شود. Ruckenstein و Prive [۱۴] بیانی را برای سیستم کره-صفحه جهت محاسبه‌ی این نیرو ارائه نموده‌اند:

$$E_{BR} = \frac{A\delta}{7560} \left(\frac{8r_p+h}{(2r_p+h)^7} + \frac{6r_p-h}{h^7} \right) \quad (۴)$$

که می‌توان مقدار δ تقریباً برابر با 0.5 نانومتر فرض کرد [۱۱]. کل انرژی یک کره (ذره) با یک صفحه (دیواره‌ی حفره) در شرایط مختلف مطابق شکل ۳ است [۱۵].

۳-۱- نیروی کشش

نیروی کشش، نیرویی است که در جهت عکس راستای جریان بر شیئی وارد می‌شود تا جلوی حرکت آن را بگیرد. در سیستم‌های کلوییدی، نیروی کششی به دلیل مقاومت ذرات در برابر حرکت در حین جریان سیال در حال حرکت ایجاد می‌شود. این مقاومت به دلیل برش گرانروی (viscous shear) سیالی که بر روی ذرات در حال جریان استو اختلاف فشار بین جریان بالادست (upstream) و پایین دست (downstream) در طرفین ذره می‌باشد. برای یک ذره‌ی کروی با قطر d_p ، که در حال جریان در یک سیال نیوتونی که با سرعت U حرکت می‌کند، نیرویی کشش به خواص سیال مانند گرانروی و چگالی بستگی دارد. [۱۶]

$$F_d = f(d_p, U, \mu, \rho)$$

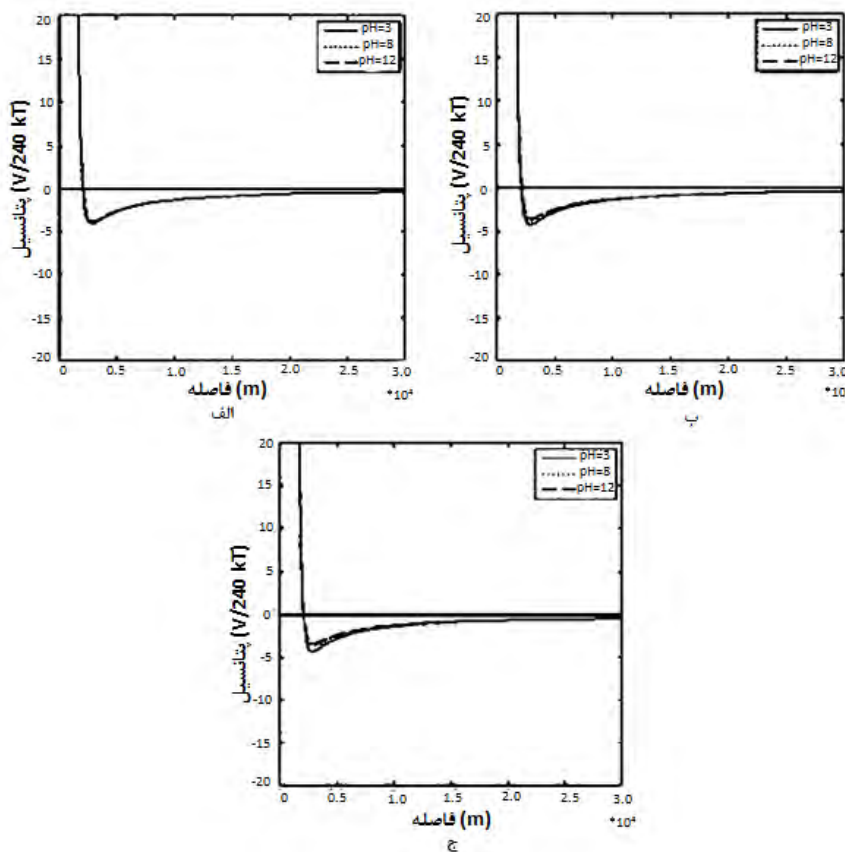
در جریان متقاطع (cross-flow)، سرعت دارای دو پارامتر است: یکی موازی با سطح دیواره و دیگری عمود بر آن. در نتیجه در حالت جریان متقاطع دو نیرو کشش وجود دارد: نیروی کششی مماس تحت تاثیر سرعت جریان موازی (U_{cf}) و دیگری نیروی کششی نرمال تحت تاثیر پارامتر دیگر سرعت (U_p) که به عنوان سرعت فیلتره نیز شناخته می‌شود.

در این حالت هر دو پارامتر کشش (مماس و نرمال) در کشش کل تاثیر گذارند. در سوسپانسیون‌های کلوییدی در آب، عدد رینولد مقدار کوچکی دارد.

$$Re = \frac{\rho U r}{\mu}$$

جریان Stokes نشان می‌دهد که در رینولدهای پایین، $Re \leq 1$ ، نیروی کششی را صرفاً می‌توان کشش مماس در نظر گرفت. Stokes به طور آنالیزی نشان داد که در مقادیر بسیار پایین عدد رینولد که نیروهای اینرسی را می‌توان نادیده گرفت، نیروی کشش بر روی یک کره با شعاع r_p که سیال با گرانروی μ و سرعت U بر روی آن حرکت می‌کند، برابر است با [۱۰]:

$$F_d = \frac{\pi \omega r_p^2 U}{\varphi(H-h_c)} \quad (5)$$



شکل ۳. انرژی کل به عنوان تابعی از pH. الف) کلراید؛ ب) ایلیت و ج) مونتموریلنیت [۱۵].

۴-۱- نیروی بالا برنده

در سیستم مورد بحث، نیروی بالا برنده به دلیل جریان برشی (shear flow) است. نیروی بالا برنده در نتیجه‌ی گرادیان سرعت به وجود می‌آید. وقتی که سیال به یک ذره می‌رسد، سرعت در بالای آن بیشتر از قسمت زیرین است (در صورتی که ذره به سطحی چسبیده باشد این سرعت برابر صفر است). در نتیجه با توجه به رابطه‌ی برنولی، فشار در قسمت بالایی کمتر از قسمت پایینی است، $(\frac{dp}{\rho} + \frac{1}{2}V^2 + gh = cte)$. در این صورت ذره تحت تاثیر این اختلاف فشار بالا می‌رود. با توجه به آزمایشات و تئوری، مقدار نیروی بالا برنده را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود [۱۶ و ۱۰]:

$$F_l = C r_p^3 \sqrt{\frac{\rho_w \mu U^3}{(H-h)^3}} \quad (6)$$

بطوریکه به ثابت C در منابع مختلف، مقادیری متفاوت اختصاص داده شده [۱۷-۱۸].

۴-۱- نیروی جاذبه

نیروی ارشمیدس به دلیل اختلاف چگالی سیال و ذره به وجود می‌آید. بسته به مقدار چگالی ذره، نیروی ارشمیدس می‌تواند رو به بالا یا رو به پایین باشد. این مسئله با توجه به فرمول زیر تعیین می‌شود:

$$F_g = \frac{4}{3} \pi r_p^3 g (\rho_p - \rho_f) \quad (7)$$

۲- ضریب فرسایش

تعیین موقعیت استاتیک یک ذره به وسیله‌ی ضریب فرسایش که نسبت بدون بعد نیروهای منفصل‌گر و متصل‌گر می‌باشد، انجام می‌شود. رابطه ۸ نحوه محاسبه این پارامتر را نشان می‌دهد:

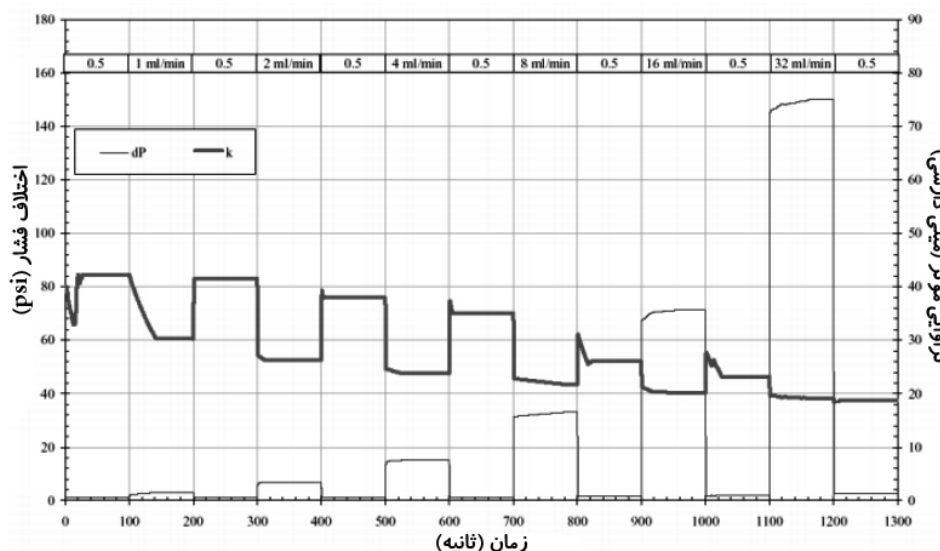
$$\varepsilon(U, \gamma) = \frac{F_d(U) \frac{d}{l_n} + F_l(U)}{F_e(\gamma) + F_g} \quad (8)$$

با توجه به این تعریف، می‌توان گفت که یک ذره زمانی از مکان خود کنده می‌شود که این عدد از ۱ بیشتر شود [۹].

۳- عوامل موثر بر مهاجرت ذرات

۳-۱- نرخ تزریق

نرخ تزریق مناسب (کم‌آسیب‌ترین نرخ) را می‌توان با استفاده از روابطی که ارائه شد و یا از طرق کارهای آزمایشگاهی تعیین نمود. Kaibin و همکارانش [۱۹] برای به دست آوردن تغییرات تراوایی در نرخ‌های تولید مختلف، نفت را به داخل مغزه تزریق نمودند تا شرایط تولید از مخزن را شبیه‌سازی نمایند. نرخ‌ها مختلف تزریق همانگونه که شکل ۴ نشان می‌دهد باعث کاهش تراوایی از ۴۲ به ۱۸ میلی داریسی شده است.

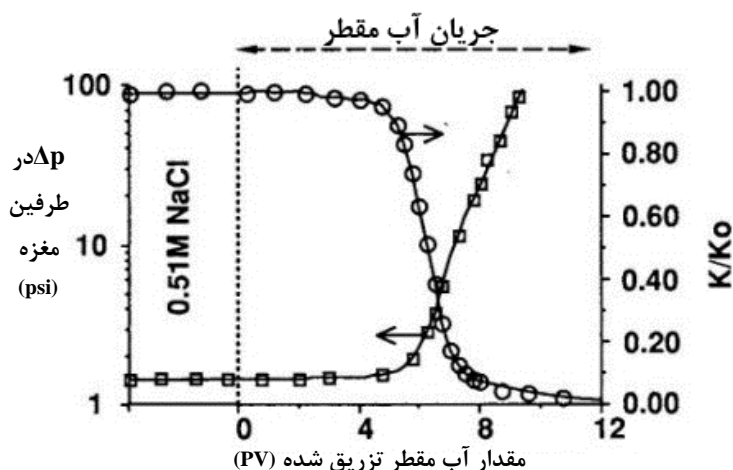


شکل ۴. تغییر تراوایی تحت تاثیر افزایش نرخ جریان [۱۹].

۳-۲ تاثیر تغییر درجه شوری

وقتی آب تزریقی به مخزن، شوری کمتری نسبت به آب مخزن داشته باشد، آزادسازی ذرات اتفاق می‌افتد و اگر شوری آب تزریقی بیشتر باشد موجب لخته شدگی ذرات معلق می‌شود. با تغییر ناگهانی شوری که باعث کاهش شدید تراوایی می‌شود، "water shock" می‌گویند. پدیده‌ای که باعث water shock می‌شود "Lever و Dawe [۵] گزارش داده‌اند که در آزمایشی با تغییر شوری آب تزریقی به مغزه از ۳٪ به صفر (آب مقطر) تراوایی از ۱۷۰ "water sensitivity" نام دارد. شکل ۵ رخ دادن water shock را پس از تزریق آب مقطر در مغزه‌ی حاوی آب با شوری ۰/۵۱M NaCl نشان می‌دهد به ۱۷ میلی داری کاهش یافته است. این کاهش تراوایی را می‌توان مربوط به مهاجرت ذرات دانست. البته مطالعات جدید [۲۰-۲۲] نشان داده‌اند که می‌توان با تغییر تدریجی شوری آب تزریقی، کاهش تراوایی را به حداقل ممکن رساند. شوری آب تزریقی را می‌توان با قرار دادن یک محفظه‌ی همزن در قسمت بالادست مغزه به تدریج کاهش داد. محفظه ابتدا با آب با شوری معین پر شده و همزمان با تزریق، آب مقطر با نرخ برابر با نرخ تزریق وارد محفظه می‌شود و محتوای ظرف با یک همزن به صورت یکنواخت در می‌آید. با گذشت زمان این عمل باعث کاهش شوری به صورت توانی می‌شود. این زمان تابعی از ثابت زمانی محفظه‌ی همزن، τ است (رابطه‌ی ۹). توسط Khilar و همکارانش مشخص شده است که یک نرخ کاهش شوری بحرانی، τ_{cr} وجود دارد که در مقادیر کمتر از آن، water shock کمینه شده یا کاملاً از بین می‌رود [۲۳]. در مورد این فرایند، اینگونه فرض می‌شود که کاهش تدریجی درجه شوری، غلظت ذرات معلق را در سیال سوسپانسیون پایین نگاه داشته و در نتیجه، ذرات برای عبور از گلوگاه‌ها با مشکل روبرو نمی‌شوند [۲۴].

$$\tau = \frac{v}{q} \quad (9)$$



شکل ۵. تراوایی و افت فشار در یک water shock [۲۴].

۳-۳ اثر pH

Hilbeler و همکاران [۲۵] نشان دادند که pH و درجه شوری با یکدیگر در ارتباط بوده و باید همزمان با هم تعریف شوند تا برای برنامه‌ریزی استراتژی تزریق، آسیب‌ها به حداقل رسانده شوند. کاهش شوری موجب یک افزایش درجای pH می‌شود که باعث چند برابر شدن فرایند آزادسازی ذرات و کاهش شدید تراوایی می‌شود (یک بار به دلیل کاهش شوری و یک بار

هم به دلیل افزایش pH ناشی از آن). مطالعات نشان داده‌اند که پراکنده شدن ذرات در pH پایین، کمتر می‌شود [۲۶-۲۷]. در نتیجه می‌توان با استفاده از محلول‌های اسیدی، از آسیب مربوط به water shock جلوگیری نمود [۲۸]. البته باید این نکته را در نظر داشت که در pHهای پایین‌تر، خود سنگ شروع به حل شدن در سیال می‌کند [۲۹].

۳-۴- اثر ترشوندگی

ذراتیکه در محیط متخلخل حضور دارند، با توجه به ترشوندگی خود تمایل به جریان یافتن همراه با جریان سیال دارند. یعنی اگر یک ذره تمایل آب-دوستی داشته باشد، جریان سیال آب آن را بیشتر از جریان نفت تحت تاثیر قرار داده و با خود همراه می‌کند. این عامل مربوط به نیروهای الکترواستاتیکی می‌باشد، که این بار به جای نیروهای بین ذره و دیواره، بایستی نیروی بین سیال و ذره را بررسی نمود. تاکنون راه‌حلهایی برای رفع این مسئله نیز ارائه شده است [۳۰].

۴- نتیجه‌گیری

با بررسی و مطالعه‌ی نیروهای بین مولکولی می‌توان برنامه‌های تزریق و تولید مخازن را به گونه‌ای طراحی نمود که آسیب‌های سازند به حداقل برسند. این ملاحظات بایستی این شرایط را مد نظر قرار دهند:

- تزریق آب می‌تواند شرایط فیزیک سطحی را به گونه‌ای تغییر دهد که محاسبات، افزایش تولید را پیش‌بینی کنند اما همان تغییرات ممکن است منجر به مهاجرت ذرات و آسیب‌هایی شوند که نتایج نهایی با نتایج مدل‌سازی‌های قبلی تطابق نداشته باشند.
- برای تولید از مخازن نفت و گاز (به خصوص مخازن نفت سنگین که گر انرژی بالایی دارند) همواره باید نرخ تولیدی را اعمال نمود که مهاجرت ذرات ناشی از نیروهای کشش به حداقل برسند.
- مواردی که در تزریق آب به داخل مخزن باید در نظر گرفته شوند بر چهار نیرویی که بر ذرات وارد می‌شوند تاثیر می‌گذارند. نیروی کشش و نیروی الکتریکی دو نیرو از نیروهای چهارگانه هستند که تحت کنترل مهندس مخزن می‌باشد. با طراحی دقیق نرخ تزریق و خواص شیمیایی آب (pH و درجه شوری) باید چهار نیروی نامبرده را به گونه‌ای موازنه نمود تا مهاجرت ذرات به حداقل برسد.
- با توجه به بالا بودن درجه شوری آب اولیه مخزن، نباید ناگهان آبی با شوری بسیار پایین‌تر از آب مخزن به داخل مخزن تزریق شود. بلکه باید از شوری‌های بالا شروع نمود و به طور تدریجی میزان شوری را تا مقادیر مطلوب کاهش داد.

۵- فهرست علائم و نمادها

d: قطر	۵-۱- نمادهای انگلیسی
E: انرژی	A: ثابت Hamaker
e: بار الکترون	C: ثابت
F: نیرو	

g: گراویته‌ی زمین	ت: تابع زمانی
H: ارتفاع کانال	ψ: پتانسیل سطح
h: فاصله‌ی ذره و صفحه	ω: ظریب تناسب
h _c : ضخامت لایه	
k _B : ثابت بولتزمن	۵-۳- زیروندها
l: اهرم	BR: نیروی دافعه‌ی Born
n: غلظت یون	cf: جریان متقاطع
q: نرخ تزریق/تولید	cr: مقدار بحرانی
r: شعاع	d: کشش
T: دمای مطلق	DLR: نیروی دافعه‌ی لایه‌ی دوگانه
U: سرعت	e: الکتریکی
v: حجم	f: سیال
z: ظرفیت یون	g: گراویته
	HR: نیروی دافعه‌ی هیدرودینامیک
۵-۲- نمادهای یونانی	z: جزء لام
γ: قدرت یونی	l: بالابرنده
ε: رسانایی الکتریکی محیط	LVA: نیروی جاذبه‌ی London-Van der Waals
κ: طول Debye	n: نرمال
μ: گرانیروی	p: ذره
ρ: چگالی	

منابع

1. A. Lager; K. J. Webb; I. R. Collinsd. M. Richmond; "Losal Enhanced Oil Recovery: Evidence of Enhanced Oil Recovery atthe Reservoir Scale"; SPE 113976; 2008.
2. H.O.Yildiz,N.R. Morrow;"Effect of Brine Composition on Recovery Waterflooding of Moutray Crude Oil by Petroleum Science & Engineering"; 14: 159-168; 1996.
3. A. Lager, K.J.Webb, C.J.J. Black,M. Singleton, K.S.Sorbie;"Low Salinity Oil Recovery- An Experimental Investigation" International Symposium of the Society of Core Analysts"; Trondheim; 2006.
4. N.Mungan; " Permeability Reduction through Changes in pH and Salinity"; Journal of Petroleum Technology, Vol. 17, Pp. 1449-1453; 1965.
5. A.Lever, R. Daw; "Water-Sensitivity and Migration of Fines intheHopeman Sandstone"; Journal of Petroleum Geology, Vol. 7, Pp. 97-107; 1984.
6. F. Civan; "Reservoir Formation Damage: Fundamentals, Modeling, Assessment and Mitigation"; Gulf Professional Publishing, Elsevier, Burlington, 2007.
7. D.Tiab, E.C. Donaldson; "Petrophysics: Theory And Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties"; Gulf Professional Pub., MA, USA, 2004.
8. R.M. Miranda, D.R. Underdown; "Laboratory Measurement of Critical Rate: A Novel Approach for Quantifying Fines Migration Problems"; SPE 25432; 1993.

9. A. Zeinijahromi; P. Lemon; P. Bedrikovetsky; "Water-Cut Reduction During Waterflood by Induced Fines Migration: Effects of Varying Formation Damage Coefficient"; SPE 140953; 2011.
10. P. Bedrikovetsky; C.A. Furtado; A.L.S. De Souza; F.D. Siqueira; "Internal Erosion in Rocks during Produced and Seawater Injection"; SPE 107513; 2007.
11. K. Khilar, H. Fogler; "Migrations of Fines in Porous Media"; Chapter 3. Kluwer Academic Publishers, Boston; 1998.
12. K. Khilar, R. Vaidya, H. Fogler; "Colloidally-Induced Fines Release in Porous Media"; Journal of Petroleum Science and Engineering; 4, 213-221; 1990.
13. R. Hunter; "Foundations of Colloid Science"; Oxford University Press, New York; 2001.
14. E. Ruckenstein, D. Prieve; "Adsorption and Desorption of Particles and Their Chromatographic Separation"; Aiche J. 22, 276-283; 1976.
15. S. Takahashi; "Water Imbibition, Electrical Surface Forces, and Wettability of Low Permeability Fractured Porous Media"; Doctorate Dissertation; 2009.
16. R. Farajzadeh; "Produced Water Re-Injection (PWRI) An Experimental Investigation Into Internal Filtration and External Cake Build Up"; M.Sc. Thesis; Delft U.; 2004.
17. S. Kang, A. Subramani, E.M.V. Hoek, M.A. Deshusses, M.R. Matsumoto; "Direct observation of biofouling in cross-flow microfiltration: mechanisms of deposition and release" Journal of Membrane Science, 244: p. 151-165; 2004.
18. J. Altmann, S. Ripperger; "Particle deposition and layer formation at the crossflow microfiltration"; Journal of Membrane Science, 124: p. 119-128; 1997.
19. Q. Kaibin, Y. Gherryo, M. Shatwan, J. Fuller, W. Martin; "Fines Migration Evaluation In A Mature Field In Libya"; SPE 116063; 2008.
20. F. O. Jones; "Influence of Chemical Composition of Water on Clay Blocking of Permeability"; JPT 441-46; Trans. AIME, 231; 1965.
21. R. F. Sheuerman, B. M. Bergersen; "Injection-Water Salinity, Formation Pretreatment, and Well-Operation Fluid Selection Guidelines"; JPT 836-45; July 1990.
22. K. C. Khilar; "The Water Sensitivity of Berea Sandstone" PhD Dissertation. U Of Michigan; Ann Arbor; MI; 1981.
23. K. C. Khilar, H. S. Fogler, J. S. Ahluwalia; "Sandstone Water Sensitivity: Existence of A Critical Rate of Salinity Decrease for Particle Capture"; Chemical Engineering Sci. 38; No. 5, 789-800; 1983.
24. R.N. Valdy, H.S. Fogler; "Fines Migration and Formation Damage: Influence of pH and Ion Exchange"; SPE; 1992.
25. J. Hibbeler, T. Garcia, N. Chavez; "An Integrated Long-Term Solution for Migratory Fines Damage"; SPE 81017; 2003.
26. J. A. Leone, M. E. Scott; "Characterization and Control of Formation Damage During Waterflooding of High Clay-Content Reservoir" SPERE; 1279-86; Nov. 1988.
27. D. E. Simon, B. W. Mcdaniel, R. M. Coon; "Evaluation of Fluid pH Effects on Low Permeability Sandston"; SPE 6010; Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans; Oct. 3-6; 1976.
28. S. F. Kia, H. S. Fogler, M. G. Reed; "Effect of pH on Colloidally Induced Fines Migration" J. Colloid and Interface Sci. 118 (1) 158-68; 1987.
29. A.K.M. Adham, A. Kobayashi; "Effect of Intensity and pH of Rain on the Dissolution of Limestone"; Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference; Osaka, Japan, June 21-26, 2009.
30. T. Ezeukwu, R.L. Thomas, T. Gunnerod; "Fines Migration Control in High-Water-Cut Nigerian Oil Wells: Problems and Solutions"; SPE 39482; 1998.