

ازدیاد برداشت نفت به وسیله تزریق آب در مخازن نفت

اصول تزریق آب :

هدف از تزریق آب در مخزن تامین انرژی مورد نیاز برای رانش نفت به وسیله ثابت نگه داشتن فشار (نگهداری شرایط فشاری مخزن اطراف نقطه حباب که B_0 حداکثر و ویسکوزیته حداقل داریم) و یا به وسیله جارو کردن نفت در شرایطی که تخلیه طبیعی جوابگوی میزان تولید مورد نیاز نیست ، می باشد .

انواع تزریق آب در مخازن نفتی :

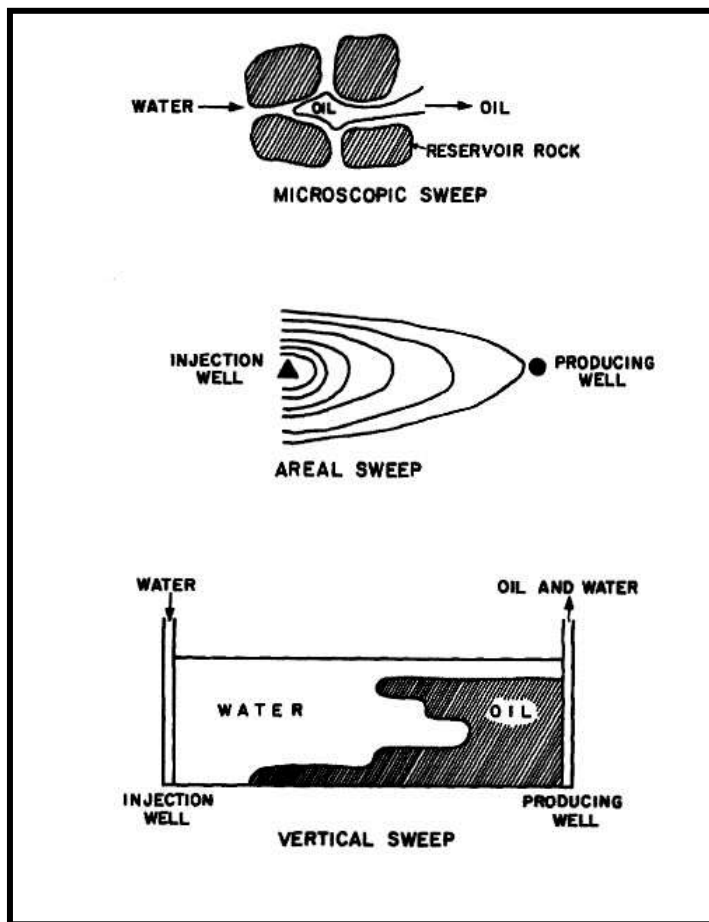
تزریق آب به دو صورت تزریق آب در سفره های آبی موجود و تزریق در ستون نفتی در مخازن کاربرد دارد . راندمان تزریق آب در مخازن نفتی آب دوست (Water Wet) بسیار بیشتر از بازدهی آن در مخازن نفتی نفت دوست (Oil Wet) می باشد . توجه به این نکته ضروری است که فعال بودن سفره آبی و یا تزریق آب در مخازن گازی در تولید این مخازن تأثیر منفی دارد .

پارامترهایی مهم در مطالعه راندمان تزریق آب عبارتند از :

بازده میکروسکوپی و ماکروسکوپی ، نسبت تحرک ، الگوی تزریق ، فشار بهینه برای تزریق و زمان شروع تزریق .

مطالعه فرآیند تزریق آب از دو منظور تاثیر این مکانیسم در بازدهی میکروسکوپی و ماکروسکوپی مخزن قابل ارزیابی است . در بررسی این خواص توجه به ترکنندگی آب و شرایط مخزن از دیدگاه مکانیسم ترشوندگی نیز حائز اهمیت است . از نقطه نظر میکروسکوپی به علت وجود نیروی کشش سطح بین دو سیال آب و نفت ، مقدار نفت در منافذ بزرگ بر جا می ماند . در مواقعی که مخزن Water Wet باشد به دلیل آن که آب از روی دیواره ها حرکت می کند و همچنین حرکت آب در منافذ ریزتر ، نفت بیشتری را نسبت به حالت Oil Wet که آب باید از میان فضا های بزرگ حرکت کند ، جارو می کند . همچنین به دلیل این که آب تمایل دارد در منافذ کوچکتر نفوذ کند لذا نفت موجود در منافذ بزرگتر نیز به علت اثر پدیده ترشوندگی و نحوه حرکت سیال ترکننده ، ممکن است به تله بیفتد .

از جنبه مطالعات ماکروسکوپی، ضریب بازدهی سطحی (Volumetric Sweep Efficiency) که حاصل ضرب بازدهی عمودی و بازدهی سطحی می باشد در ارزیابی میزان راندمان تزریق آب موثر است.



پدیده جاروب کردن نفت به وسیله آب

نسبت تحرک، پارامترهای مهم دیگری در آگاهی از راندمان مکانیسم های تزریق می باشد که به صورت نسبت تحرک آب به تحرک نفت تعریف می شود. وقتی که نسبت تحرک از یک بزرگتر باشد در واقع آب از نفت سریعتر حرکت خواهد کرد و به جای جاروی کردن نفت های درون فضای خالی از راحت ترین مسیر که معمولاً دارای تراوایی بیشتری می باشد به سمت چاه های تولید حرکت می کند. در این حالت مدل حرکت آب از حالت پیستونی خارج خواهد شد و با پدیده Breakthrough مواجه خواهیم بود که در نتیجه بازدهی نهایی نیز کاهش می یابد. لذا برای کاهش نسبت تحرک، یا ویسکوزیته آب را با افزودن مواد ویسکوز مانند پلیمرها افزایش می دهند و یا با

Plug کردن مناطق با تراوایی بالا و یا با افزایش تراوایی نسبی نفت باعث جلوگیری از وقوع این پدیده می شوند .

پارامتر مهم در راندمان بازدهی سطحی الگوی چاه های تولید و تزریقی می باشد که نحوه طراحی این الگوها با توجه به پارامتر های زمین شناسی و اقتصادی می تواند به فرم های ۵ نقطه (۱ تزریقی در مرکز یک مربع و ۴ تولیدی در رئوس آن) ، الگوی خطی ، تزریق محیطی ، ۷ نقطه ، ۹ نقطه معمولی و معکوس و الگوی ویژه (۲ و ۳ و ۴ نقطه) باشد .

برای مخزن با شیب قابل قبول و تراوایی بالا الگوی محیطی و برای مخزن با شیب و تراوایی کم الگوی دیگر توصیه می شود .

در مخزن با سفره آبی فعال هنگامی که فشار مخزن در حین تولید کاهش می یابد به علت ایجاد فضای خالی ، آب به سمت ناحیه هیدروکربن دار (ستون نفتی) حرکت می کند . تراوایی و اندازه سفره آبی ، مهمترین پارامتر هایی هستند که باید در ارزیابی فعال بودن یا فعال نبودن سفره آبی در نظر گرفت . همان طور که می دانیم تولید میدان نفتی با مشاهده آب در چاه تولیدی قطع نخواهد شد . بنابراین برای مهندسی مخزن تعقیب بالا آمدن آب و دبی آن ، به کمک چاه های مشاهده ای مهم است .

موازنه جرم برای چنین مخزنی در حالت فوق اشباع ($Pr > Pb$) به صورت زیر است :

حجم نفت اولیه = حجم نفت باقیمانده + حجم آب ورودی + انبساط سنگ و آب همزاد
در مخزن زیر فشار نقطه اشباع به شرطی که اشباع گاز آزاد شده از نفت بیشتر از اشباع بحرانی گاز (حداقل اشباع مورد نیاز برای حرکت گاز در مخزن) باشد بخشی از گاز آزاد شده به دلیل فعالیت نیرو های گراویتی و نقش جدایش ثقلی و Segregate Flow به سمت بالا و بخشی از آن به واسطه وجود نیروی های ویسکوزیته به سمت چاه تولیدی حرکت می کند . در این حالت براحتی می توان موازنه جرم برای گاز آزاد شده (با توجه به توازن بین نیرو های گراویتی ، موینگی و ویسکوز) را بدست آورد :

کل گاز محلول در نفت اولیه = گاز آزاد شده در مخزن در شرایط استاندارد + گاز تولید شده

در سر چاه + گاز محلول مانده در نفت

ازدیاد برداشت نفت به وسیله تزریق آب در مخازن نفت

موازنه برای نفت به صورت زیر نوشته می شود :

حجم نفت اولیه = حجم نفت باقیمانده در مخزن + حجم گاز آزاد شده از نفت

اما در مورد مخازن با مکانیزم انبساط کلاهیگ گازی و سفره آبی غیر فعال موازنه مواد به

صورت زیر خواهد بود :

حجم نفت اولیه = حجم نفت باقیمانده + افزایش حجم کلاهیگ گازی + گاز محلول آزاد شده

در حالی که موازنه جرم برای هر مخزن را می توان به صورت زیر نوشت :

حجم نفت اولیه = حجم نفت باقیمانده + حجم گاز آزاد شده + میزان انبساط گازی + میزان

آب ورودی از سفره آب + میزان انبساط سنگ و آب همزاد + حجم سیال تزریقی

برای دستیابی و برآورد میزان آب تزریقی و زمان مناسب تزریق از موازنه جرم استفاده می

شود :

میزان آب تزریقی = میزان نفت اولیه در آغاز فرایند - نفت باقیمانده در ناحیه جارو شده -

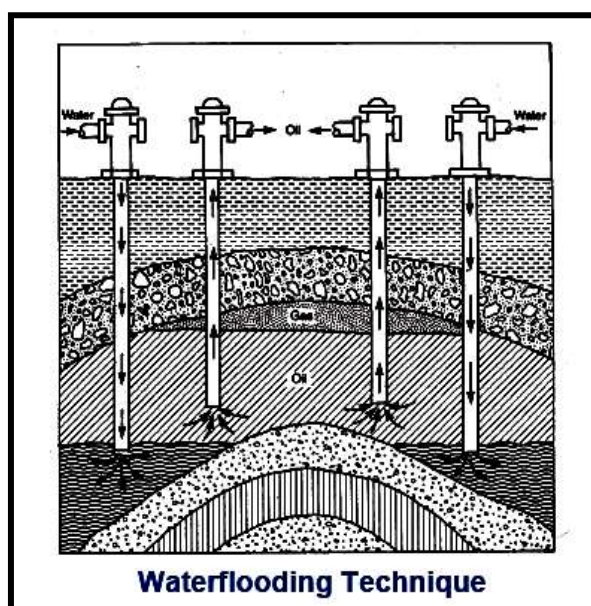
نفت باقیمانده در ناحیه جارو نشده

تعداد چاه های تزریقی به سادگی با استفاده از میزان کل آب تزریقی و میزان متوسط تزریق

(از شاخص تزریق و تغییرات فشار در اطراف چاه تولید) در هر چاه قابل محاسبه است . البته در

این میان بهینه سازی اقتصادی نقش مهمی ایفا می کند .

میزان بازیابی در تزریق آب = بازدهی سطحی × بازده عمودی × بازده جابجایی



نحوه قرار گرفتن چاه تولیدی و تزریقی

معادلات حاکم در تزریق آب

مقدار k (نفوذ پذیری مطلق) برای تمام سیالات در یک محیط متخلخل وقتی به تنهایی به میزان ۱۰۰ درصد محیط را پر کنند ثابت و مستقل از نوع سیال است . ولی اگر بیش از یک سیال در محیط باشد نظیر آب و نفت ، در این صورت نفوذ پذیری نسبت به هر فاز تغییر می کند و به آن نفوذ پذیری موثر گویند .

$$k_w = \frac{q_w \mu_w L}{A \Delta P}$$

$$k_o = \frac{q_o \mu_o L}{A \Delta P}$$

k_w و k_o به ترتیب نفوذ پذیری موثر نسبت به آب و نفت هستند . نسبت نفوذ پذیری موثر به نفوذ پذیری مطلق را نفوذ پذیری نسبی گویند .

$$k_{rw} = \frac{k_w}{k}$$

$$k_{ro} = \frac{k_o}{k}$$

هر گاه در یک محیط متخلخل ، آب و نفت هر دو جریان داشته باشند نسبت این جریان ها به صورت زیر در می آید .

$$\frac{q_w}{q_o} = \frac{k_w / \mu_w}{k_o / \mu_o} = \frac{\lambda_w}{\lambda_o} = M$$

λ تحرک و M نسبت تحرک ها است . هر قدر نسبت k_w / k_o که برابر k_{rw} / k_{ro} است بیشتر باشد آب با سرعت بیشتری نسبت به نفت حرکت می کند . بنابراین در حرکت نسبی آب و نفت در یک محیط ، نسبت نفوذ پذیری آنها دارای اهمیت است . نفوذ پذیری نسبی یک سیال در یک محیط متخلخل با تغییر درجه سیر شدن فاز مربوطه تغییر می کند ولی این بستگی ساده نیست . وقتی $S_w = S_{wc}$ است یعنی میزان سیر شدن آب برابر مقدار اولیه آب همزاد باشد مقدار $k_w = 0$ می شود . یعنی آب دارای حرکت نیست .

$$\text{بازیابی} = \frac{\text{نفت باقیمانده در مخزن} - \text{نفت اولیه در مخزن}}{\text{نفت اولیه در مخزن}} \times 100 = \frac{S_{oi} S_{or}}{S_{oi}} \times 100$$

یک رابطه نسبتاً تقریبی بین نسبت $\frac{k_o}{k_w}$ و S_w به صورت زیر است :

$$\frac{k_o}{k_w} = ae^{sb \cdot w}$$

طبق رابطه بالا تغییرات $\frac{k_o}{k_w}$ نسبت به S_w روی کاغذ نیمه لگاریتمی تقریباً به صورت یک خط مستقیم است .

خاصیت ترشوندگی

یکی از خواص بسیار مهم مخازن نفت که روی میزان بازیابی نفت در عملیات سیلاب زنی نقش موثری دارد خاصیت ترشوندگی است . اگر یک سیال مانند آب روی شیشه ای قرار گیرد ، هنگامی که سیستم به تعادل می رسد لایه نازکی از آب روی شیشه را می پوشاند و سطح آب با شیشه زاویه ای مانند θ می سازد . همین پدیده در زیر زمین بین آب و نفت و سنگ مخزن به وجود می آید .

جایی که آب و نفت در زیر زمین قرار دارند نه تنها نیروی کشش سطحی بین آب و نفت بلکه بین سیال و جامد نیز وجود دارد . ترکیب تمام این نیروها خاصیت ترشوندگی و فشار موئینه را در یک سنگ مخزن تعیین می کند .

نیروی چسبندگی یک سیال با سطح جامد که تابعی از نیروی کشش سطحی است تعیین کننده این است که سیال سطح جامد را تر می کند .

طبق قرار داد ، زاویه سطح تماس نفت با آب (θ) به طرف مایع سنگین تر اندازه گرفته می شود و بین ۰ تا ۱۸۰° تغییر می کند . اگر σ_{wo} نیروی کشش سطحی بین آب و نفت و σ_{so} نیروی کشش سطحی بین سیال سبک تر و سطح جامد باشد ، نیروی چسبندگی (A_T) به صورت زیر است :

$$A_T = \sigma_{so} - \sigma_{sw} = \sigma_{wo} \cos \theta_{wo}$$

σ_{sw} نیروی کشش سطحی بین جامد و آب است . اگر نیروی چسبندگی A_T مثبت باشد بدین معنی است که سیال سنگین تر بهتر سطح جامد را تر می کند . بزرگی نیروی A_T معرف قابلیت ترکنندگی سیال ترکننده نسبت به سطح جامد است که باعث پخش شدن سیال ترکننده روی

سطح جامد می شود. هر گاه زاویه θ کوچک (A_T بزرگ) باشد این عمل سبب می شود که سیال سنگین تر به سرعت سطح جامد را بپوشاند. اگر $\theta < 90^\circ$ باشد سطح جامد نسبت به آب ترشونده است.

اگر $\theta > 90^\circ$ باشد در این صورت سطح جامد نسبت به نفت ترشونده است. خاصیت ترشوندگی یک مخزن تأثیر مستقیمی روی عملکرد سیلاب زنی با آب یا گاز دارد. سنگ ها ممکن است نسبت به آب و یا نفت ترشونده باشند. همچنین حالت های ترشوندگی حد میانه و یا مخلوط نیز وجود دارد.

اگر مخزنی قویاً نسبت به آب ترشونده باشد در عملیات سیلاب آبی بازدهی بهتری نسبت به مخازنی که قویاً نسبت به نفت ترشونده هستند دارد.

برای مخازنی که دارای خاصیت ترشوندگی مخلوط هستند بهترین بازدهی استخراج در اثر تزریق آب به دست می آید.

در مخازنی که نسبت به نفت ترشونده هستند، لازم است برای بازیابی بهتر نفت بعد از عملیات سیلاب زنی با آب عمل سیلاب گازی (گاز حل شونده در نفت) نیز صورت گیرد.

فشار موئینه

یکی از نیروهایی که سبب حرکت سیال در محیط های متخلخل می شود نیروهای موئینه است.

$$P_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{r}$$

زاویه θ در مخازنی که نسبت به آب خاصیت ترشوندگی دارند به صفر بسیار نزدیک است و عملاً $\cos\theta = 1$ می شود.

$$P_c = \frac{2\sigma_{wo}}{r}$$

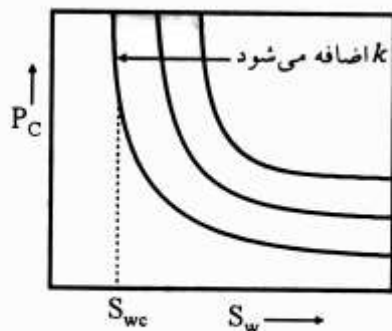
σ_{wo} نیروی کشش سطحی بین نفت و آب است.

واضح است که هر چه r کوچک تر باشد (اندازه خلل و فرج ها در سنگ مخزن کوچک باشد) مقدار P_c بیشتر و مقدار h بیشتر می شود. در واقع r معرف درجه تخلخل است. هر چند r بیشتر باشد نفوذ پذیری نیز بیشتر می شود و فشار موئینه کاهش می یابد.

ازدیاد برداشت نفت به وسیله تزریق آب در مخازن نفت

در حالت کلی فشار موئینه در مخزنی که شامل نفت و آب باشد، تابعی از درجه سیر شدن آب (S_w) است. در $S_w = S_{wc}$ یعنی جایی که درجه سیر شدن آب همزاد در مخزن داریم فشار موئینه بی نهایت است. در یک درجه سیر شدن معین هر چه نفوذ پذیری مخزن بیشتر باشد فشار موئینه کمتر است و نفت آسان تر خارج می شود.

برای این که نفت به راحتی خارج شود لازم است نیروهای موئینه کاهش یابد. این کار را می توان با کاهش نیروی کشش سطحی (σ) انجام داد با کاهش σ فشار P_c نیز کم می شود.



توزیع فشار موئینه با درجه سیر شدن آب

معادله مقدار جریان جزئی نفت و آب

$$q_t = q_o + q_w = q_i$$

q_t سرعت کل جریان نفت و آب بر حسب واحد حجم در مخزن نسبت به زمان است. q_o سرعت حجمی نفت، q_w سرعت حجمی آب و q_i سرعت تزریق آب است. جریان جزئی آب در هر نقطه مخزن به صورت زیر تعریف شده است.

$$f_w = \frac{q_w}{q_o + q_w} = \frac{q_w}{q_t}$$

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{\mu_w k_o}{k_w \mu_o}} = \frac{1}{1 + \frac{\mu_w k_{ro}}{\mu_o k_{rw}}}$$

یکی از مهم ترین پارامترها در تعیین میزان مؤثر بودن عمل سیلاب زنی آبی، نسبت تحرکها در نقطه پایانی است.

$$M = \frac{k'_{rw} / \mu_w}{k'_{ro} / \mu_o}$$

برای یک جریان افقی ، حرکت پیستونی موقعی اتفاق می افتد که $M \leq 1$ باشد . جایگزینی پیستون مانند نفت با آب که گاهی به آن جایجایی باکلی لورت هم گفته می شود به بهترین وجه توسط پارامتر M_s مشخص می شود . پارامتر M_s نسبت تحرک ها در جبهه شوک (Shock Front) که همان نقطه گذر آب است به صورت زیر تعریف می شود .

$$M_s = \frac{k_{r_o} (S_{wf}) / \mu_o + k_{r_w} (S_{wf}) / \mu_w}{k'_{r_o} / \mu_o}$$

نفوذ پذیری های نسبی در صورت کسر در نقطه سیر شدن آب در جبهه شوک (S_{wf}) به دست می آیند . جایگزینی با کلی لورت موقعی پایدار است که $M_s < 1$ باشد چنانچه این شرایط بر قرار نباشد آب به صورت کانال شکل وارد قسمت نفت شده و نقطه گذر خیلی زودتر از آنچه روشن ولج پیش بینی می کند اتفاق می افتد .

جریان آب ورودی (Water influx)

در قبال افت فشاری که در مخزن پدید می آید ، سفره آب جهت جبران یا کند کردن کاهش فشار ، با وارد کردن یا رسوخ دادن آب به مخزن به واسطه عوامل زیر از خود عکس العمل نشان می دهد .

الف : انبساط آب

ب : انبساط توده های دیگر هیدروکربنی شناخته یا ناشناخته موجود در سنگ سفره آب .

ج : تراکم پذیری سنگ سفره آب ،

د : جریان آرتزین ، جایی که سطح سفره آب مرتفع تر از سطح مخزن است .

W_e به مقدار آب ورودی و dw_e / dt شدت جریان آب ورودی در بسیاری موارد به صورت تابعی از زمان t و فشار مرزی p ، با دقت کافی از یکی از معادلات صفحه بعد بدست می آیند :

معادله Schilthuis : حالت پایدار

$$W_e = k \int_0^t (p_i - p) dt$$

$$\frac{dw_e}{dt} = k(p_i - p)$$

که در آن k ضریب ثابت آب ورودی بر حسب $bbL/day/psi$ و $(p_i - p)$ افت فشار مرزی بر حسب psi است .

معادله Hurst : حالت پایدار تغییر یافته

$$W_e = c \int_0^t \frac{(p_i - p) dt}{\text{Log } at}$$

$$\frac{dw_e}{dt} = \frac{c(p_i - p)}{\text{Log } at}$$

که در آن C ثابت آب ورودی بر حسب $bbL/day/psia$ و $(p_i - p)$ افت فشار مرزی بر حسب $psia$ و a ثابت تبدیل زمان است که به آحد زمان بستگی دارد .

معادله Hurst و Everdingen : حالت ناپایدار

$$W_e = b \sum_0^t \Delta p \times Q(t)$$

در این معادله B ثابت آب ورودی بر حسب bbL/psi و Δp نمو فشار بر حسب $psia$ و $Q(t)$ مقدار بدون بعد آب ورودی است که تابعی از زمان بدون بعد می باشد .