بررسی آزمایشگاهی تزریق غیر امتزاجی متناوب آب گرم و گاز دی اکسید کربن گرم در ازدیاد برداشت نفت در یک مدل شکاف دار

محمد جواد درستکار، علی محبی*، امیر صرافی، عطاالله سلطانی گوهریزی

کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی شیمی

پیام‌نگار: **amohebbi2002@yahoo.com**

چکیده

تکنیک های مختلفی به منظور افزایش ضریب بازیافت از مخزن و بهبود تولید آن به کار می‌رود و در این میان تزریق متناوب آب و گاز[1] یکی از روشهای مناسب در این زمینه است. در این روش، توده‌های آب و گاز به طور متوالی به درون مخزن تزریق می‌شوند. از مهمترین مزایای این روش، در مقایسه با روش هایی همچون تزریق منفرد آب و یا گاز می توان به مواردی همچون افزایش میزان حجم جاروب شده توسط آب پس از تزریق گاز و کاهش درصد اشباع نفت باقیمانده به دلیل تاثیرات سه فازی اشاره کرد که باعث جابه جایی، تولید و برداشت آسانتر نفت می گردد. در این مقاله، مطالعه تئوری و آزمایشگاهی فرایندهای تزریق منفرد آب، تزریق گاز دی اکسید کربن، تزریق گاز دی اکسید کربن گرم، تزریق غیر امتزاجی متناوب آب و گاز دی اکسید کربن و همچنین روش جدید تزریق متناوب آب گرم و گاز دی اکسید کربن گرم در یک سند پک شکافدار صورت پذیرفته است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که استفاده از روش نوین تزریق غیر امتزاجی متناوب آب گرم و گاز دی اکسید کربن گرم که برای اولین بار در این مطالعه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است، مؤثرتر از سایر روشهای مذکور در افزایش بازیافت نفت می باشد.

کلمات کلیدی: ازدیاد برداشت نفت، مدل آزمایشگاهی، سند پک شکافدار، تزریق غیر امتزاجی متناوب آب گرم و گاز دی اکسید کربن گرم، خیساندن

۱- مقدمه

تحت شرایط غالب در بسیاری از مخازن نفت، جابجایی غیر امتزاجی گاز و نفت در مقایسه با جابجایی آب-نفت از افزایش بازدهی جابه جایی میکروسکوپی بالاتری برخوردار است. با این حال، گاز، تحرک بسیار بالایی دارد و بدلیل تحرک بالا در مقایسه با دیگر سیالات مورد استفاده در ازدیاد برداشت مقدار قابل توجهی از نفت را در پشت سر جا می گذارد[۱]. تزریق متناوب آب و گاز یک روش بسیار موثر در کنترل تحرک بالای گاز برای سیلاب زنی افقی در بسیاری از مخازن دنیا بکار رفته و موفقیت این روش ثابت شده است. از طرف دیگر، تزریق غیر امتزاجی متناوب آب و گاز، در میادین نفتی سابقه کمتری دارد[۲]. توسعه تزریق متناوب آب و گاز در بهبود فرایند کنترل سیلاب زنی کمک بسیاری کرده است. بازدهی بالاتر جابه جایی

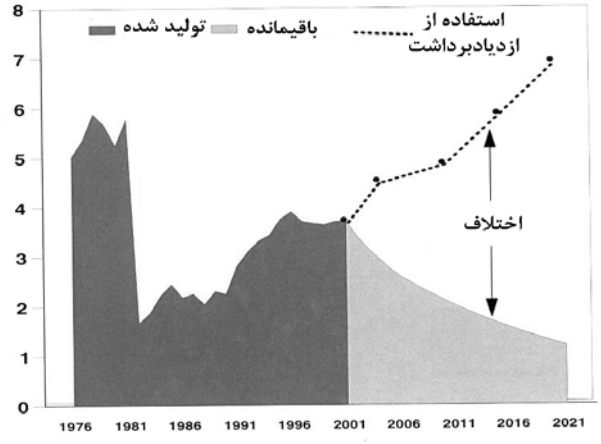
1. Water Alternating Gas

میکروسکوپی گاز به همراه بازدهی بهتر جابجایی ماکروسکوپی آب، تولید نفت را در مقایسه با یک سیلاب زنی ساده توسط آب، به مقدار قابل توجهی افزایش می دهد. تقریباً تمام پروژه های تزریق گاز، امروزه به روش تزریق متناوب آب و گاز انجام می گیرد[۳]. در آمریکا، بیشترین کاربرد روش تزریق متناوب آب و گاز در سواحل متمرکز است و طیف وسیعی از گازهای تزریقی برای مخازن با خصوصیات متفاوت در روش امتزاجی بکار رفته است. اگر چه انواع بسیاری از گازهای تزریقی را CO_2 و گازهای هیدروکربنی تشکیل می دهند، فراوانی ذخایر گاز CO_2 و دسترسی به دانش فنی، عامل مهمی برای رشد فرایندهای تزریق CO_2 در آمریکا می باشد[۳].

پارامترهای اصلی که باید در تزریق متناوب آب و گاز در مقیاس آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گیرند عبارتند از: ناهمگنی مخزن، نوع سنگ، ویژگیهای سیال، گاز تزریقی، و نسبت گاز به آب تزریقی و ملاحظات گرانشی. دیگر پارامترهای موثر در تزریق گاز و تولید ثانویه شامل توسعه امتزاج پذیری و ترکیب نفت و آب نمک است[۳]. در مورد کاربرد تزریق متناوب آب و گاز در مخازن شکاف دار اطلاعات زیادی در دسترس نیست. اعتقاد بر این بوده که استفاده از مزایای سیلاب زنی آب و تزریق گاز با یکدیگر به دلیل وجود شکاف‌ها در مخزن، غیر ممکن است[۴]. در استفاده از روش تزریق متناوب آب و گاز در مخزن شکاف دار، شکستگی‌ها باعث پیشرفت سریع سیالات تزریقی می شوند[۵]. با این حال، چند نمونه از مخازن وجود دارند که نشان می دهند استفاده از تزریق متناوب آب و گاز در مخازن شکاف دار طبیعی از امتیاز بالقوهٔ قابل ملاحظه ای برخوردار است[۲]. هدف اصلی از این کار، بررسی کاربرد تزریق متناوب آب گرم و گاز CO_2 گرم در مدل های معمولی و شکاف دار است.

۲- اهمیت بحث ازدیاد برداشت نفت در ایران

مخازن نفتی ایران دارای ساختار متفاوتی نسبت به مخازن نفتی دنیا می‌باشند به طوری که اکثر این مخازن ساختاری کربناته داشته و تنها ۱۰ درصد از آنها دارای ساختار شنی هستند. از طرفی، بخش نسبتاً بزرگی از نفت موجود در این مخازن، سنگین بوده و به آسانی قابل استحصال نیست. ضریب بازیافت نفت برای اکثر مخازن هیدروکربوری ایران در حدود ۲۴ درصد گزارش شده است که این مقدار بسیار کمتر از ضریب بازیافت متداول نفت در جهان می باشد. از این رو می توان گفت که در مخازن ایران، میزان نفت باقی مانده در یک مخزن هیدروکربوری نسبت به مقدار برداشت شده از آن بسیار زیاد است. بنابراین چنانچه نفت استحصال نشده مخازن استخراج نگردد، در آینده ای نه چندان دور با کاهش شدید تولید از مخازن نفتی روبرو خواهیم شد. برآوردهای اولیه نشان می‌دهند که در صورت استفاده نکردن از روشهای ازدیاد برداشت، افتی مطابق آنچه که در شکل (۱) نشان داده شده است در میزان تولید از مخازن خواهیم داشت.



شکل ۱- کاهش میزان تولید در صورت استفاده نکردن از روشهای ازدیاد برداشت[۷].

۳- روش تزریق متناوب آب و گاز

تزریق متناوب آب و گاز، یک فرایند ثانویه ازدیاد برداشت نفت است که کاربرد آن از سال ۱۹۵۰ برای اولین بار مطرح گردیده و بشدت افزایش یافته است. فرایند تزریق متناوب آب وگاز ترکیبی از دو فرایند بازیافت ثانویه سیلاب زنی آب و تزریق گاز است. فرایند تزریق متناوب آب وگاز در اصل با بهبود بازدهی جابجایی ماکروسکوپی و میکروسکوپی بصورت همزمان باعث افزایش تولید می شود. همانطور که در معادلات (۱) و (۲) دیده می شود از آب بعنوان یک عامل کنترل تحرک پذیری گاز استفاده شده است. چرخه طبیعی فرایند تزریق متناوب آب و گاز باعث افزایش اشباع آب در چرخه تزریق آب و کاهش اشباع آب در چرخه تزریق گاز می شود. این فرایند القای چرخه های آشام و زهکشی سبب می شود که اشباع نفت باقی مانده در فرایند تزریق متناوب، در مقایسه با سیلاب زنی توسط آب و تزریق گاز، به مقدار قابل توجهی کاهش یابد[۶]. در این فرایند، توابع کسری که برای جریان آب و گاز به صورت زیر تعریف می شوند عبارتند از:

$$f_w = \frac{k_w/\mu_w}{k_w/\mu_w + k_o/\mu_o + k_g/\mu_g} \quad (۱)$$

$$f_g = \frac{k_g/\mu_g}{k_w/\mu_w + k_o/\mu_o + k_g/\mu_g} \quad (۲)$$

که k تراوایی مؤثر و μ گرانروی است.

فاکتور تولید نفت را می توان توسط دو عامل بازدهی رفت و برگشت ماکروسکوپی و میکروسکوپی توصیف کرد. علاوه بر این، بازدهی رفت و برگشت ماکروسکوپی توسط بازدهی رفت و برگشت افقی و عمودی تعریف شده و می‌توان آن را به صورت زیر فرمولبندی کرد:

$$R_f = E_v.E_h.E_m \quad (۳)$$

بازدهی جاروبی افقی بستگی به نسبت تحرک پذیری (معادله (۴)) و بازدهی جاروبی عمودی بستگی به نسبت نیروهای گرانروی به گرانی (ثقل) دارد (معادلهٔ (۵)).

$$M = \frac{k_{rg}/\mu_g}{k_{ro}/\mu_o} \quad (۴)$$

$$R_{v/g} = \left(\frac{v\mu_o}{kg\Delta\rho}\right)\left(\frac{L}{h}\right) \quad (۵)$$

۴- شرح دستگاه

مشخصات کلی مجموعه دستگاهی که در انجام آزمایشات تزریق منفرد آب، تزریق گاز دی اکسید کربن، تزریق گاز دی اکسید کربن گرم، تزریق غیر امتزاجی متناوب آب و گاز دی اکسید کربن و تزریق غیر امتزاجی متناوب آب گرم و گاز دی اکسید کربن گرم در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است عبارتند از:

۱) مغزهٔ نگهدار: مغزه نگهدار طراحی شده دارای ابعادی به قطر ۴/۲ سانتی متر و طول ۳۵ سانتی متر است که جنس آن نوعی فولاد ضد زنگ می باشد.

۲) پمپ: به منظور طراحی پمپ دستگاه از یک ستون شیشه ای جهت تزریق آب و یک لوله U شکل استفاده شده است. در پایین ستون شیشه ای یک شیر و در بالای آن یک سه راهی تعبیه گردیده، که از یک مسیر آن برای تزریق گاز دی اکسید کربن، از یک مسیر برای پر کردن ستون از آب و از مسیر دیگر برای تزریق گاز و آب به درون سند پک استفاده می شود.

۳) سیستم حرارتی و محفظه کنترل درجهٔ حرارت: مجموعه سیستم مغزهٔ نگهدار در داخل یک حمام هوا قرار می گیرد. این حمام، از توانایی تنظیم درجه حرارت سیستم بین دمای محیط تا ۳۵۰ درجه سانتی گراد برخوردار است.

۴) شیرها و لوله ها: شیرها ضد زنگ می باشند و توانایی مقاومت در برابر H_2S و CO_2 را دارند. لوله های مورد استفاده نیز از جنس مس و پلاستیک و با قطر داخلی ۲ میلیمتر می باشند. در مواردی که سیال گرم است از لوله های مسی استفاده می شود.

۵) گرمکن: بمنظور گرم کردن سیال تزریقی از یک گرمکن در مسیر تزریق استفاده شده است. بر روی این گرمکن یک ظرف که حاوی ژلی با دمای جوش بالاست قرار گرفته است. همچنین دو لوله مسی به طول ۲ متر جهت گرم کردن آب و گاز دی اکسید کربن درون این ظرف به صورت مارپیچ درآمده اند.

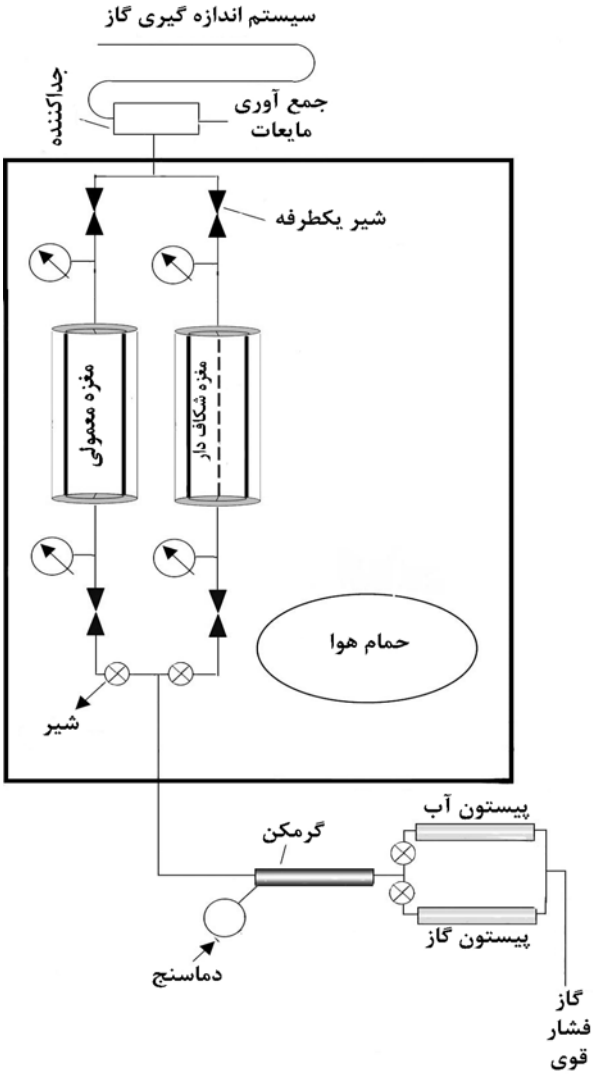
۶) تفکیک کننده و سیستم اندازه گیری سیال تولیدی: تفکیک کننده از یک لوله فولادی که دارای یک ورودی برای ورود سیالات از بالا و دو خروجی می باشد، ساخته شده است. یک خروجی در بالا برای خروج گاز و خروجی دیگر در پایین برای خارج شدن مایعات تعبیه شده است. در شکل (۲) طرح اجمالی سیستم تزریق مورد استفاده در این آزمایشها نشان داده شده است.

۵- روش مطالعه

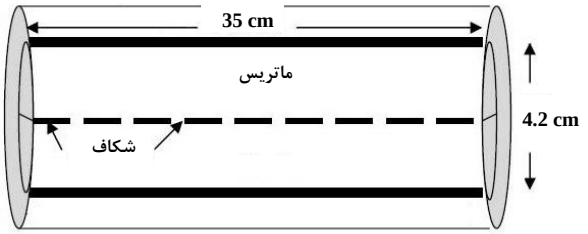
۵-۱ روش آزمایش

در این مطالعه از گاز دی اکسید کربن به عنوان گاز غیر امتزاجی و نفت مارون به عنوان سیال جابجا شونده استفاده شد. مغزهٔ شکافدار مورد استفاده به صورت زیر تهیه شده است. داخل مغزهٔ نگهدارنده از سیلیس هایی با اندازه های ۸۰، ۱۰۰، ۱۴۰و۱۷۰ مش و با نسبت های مساوی پر و تحت رطوبت مناسب و فشار بالا فشرده شده اند که هدف از انجام این عمل بدست آوردن یک مدل همگن با تراوایی است. برای

شکاف دار کردن از روش جدیدی استفاده شد، بدین صورت که در زمان پر کردن نگهدارنده با سیلیس در مرکز نگهدارنده یک لایه پشم شیشه با ضخامت ۱ میلیمتر طوری قرار داده شد که نگهدارنده به دو قسمت مساوی تقسیم و دوسوی پشم شیشه از سیلیس پر شد و تحت فشار و رطوبت مناسب فشرده گردید (مطابق شکل (۳)). پشم شیشه دارای تراوایی بالا می باشد که باعث می شود در وسط مغزه مانند یک شکاف عمل کند. بمنظور جلوگیری از خروج دانه های سیلیس, ورودی و خروجی مدل‌ها با توری ۱۰۰ مش و پشم شیشه مسدود شدند.



شکل ۲- سیستم تزریق در این مطالعه.



شکل ۳- مدل مغزه شکافدار

خصوصیات مربوط به سند پک در جدول (۱) و خواص نفت در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۱- خصوصیات سند پک شکافدار

جنس سند پک	سیلیس
طول	۳۵ سانتی متر
قطر	۴/۲ سانتی متر
حجم کل	۴۸۴/۹ سانتی متر مکعب
سطح مقطع	۱۳/۸۵ سانتی متر مربع
نفوذپذیری	۰/۵ دارسی
تخلخل	۲۸ درصد

جدول ۲- خواص نفت

چگالی	۰/۸۷ گرم بر سانتی متر مکعب
°API	۳۱
گرانروی	۲/۱۶۸ سانتی پوآز

۲-۵ آماده سازی سند پک

۱) ابتدا سند پک آماده شده توسط تولوئن داغ شستشو می‌شود.

۲) بعد از تمیز کردن سند پک آن را در کوره در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد در چند مرحله قرار می‌دهند تا با عبور دادن گاز دی اکسید کربن از آن کاملاً خشک گردد.

۳) حجم فضاهای خالی با اشباع نمونه‌ها توسط آب نمک اندازه گیری شد. از آنجایی که آزمون‌ها در شرایط آب همزاد انجام می شوند، بایستی ابتدا سند پک با آب و سپس با نفت اشباع شود[۷]. نفت با شت جریان $0/5 cm^3/min$ از بالای نمونه‌ها که

بصورت عمودی قرار گرفته بودند بدرون مدل‌ها تزریق گردید. در سند پک معمولی پس از تولید $69/6cm^3$ آب نمک در خروجی، نفت مشاهده شد. حجم کلی نفت تزریقی به درون سند پک معمولی (1/5PV)، $145/5\ cm^3$ و حجم کلی آب نمک تولیدی از سند پک معمولی $81/8\ cm^3$بود. در سند پک شکاف دار پس از اشباع نمونه توسط آب نمک مانند روش بالا نفت به درون نمونه تزریق و پس از تولید $97/78\ cm^3$آب نمک در خروجی، نفت مشاهده شد. کل نفت تزریقی در این سند پک (1/5PV)، $204/28\ cm^3$ و آب نمک تولیدی $115/3\ cm^3$ بود. بنابراین اشباع آب اولیه (Sw_i) سندپک معمولی و شکاف دار بترتیب ۱۵/۶۶٪ و ۱۵/۰۶ ٪ بدست آمد. همچنین اشباع نفت اولیه (So_i) برای مدل معمولی و شکاف دار بترتیب ۸۴/۳۴ ٪ و۸۴/۹۴ ٪ بود.

۴) نفوذپذیری اندازه گیری می شود [۷].

۵) مغزهٔ نگه دار و مغزهٔ درون آن به صورت افقی در داخل محفظه کنترل درجه حرارت قرار داده می شوند.

۶) در نهایت، گاز دی اکسید کربن و آب با دبی مشخص که در ادامه مقاله آورده شده است، به درون مغزه تزریق می شوند و میزان بازیافت نهایی در هر مرحله اندازه گیری می شود.

۶- آزمایشهای جابجایی

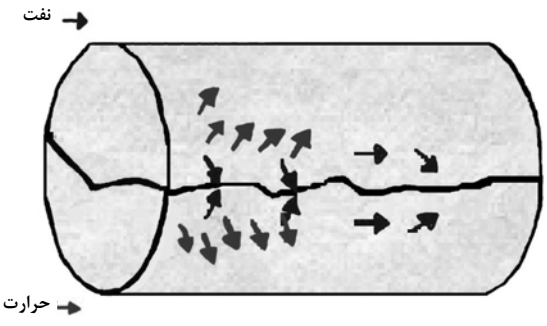
آزمایشها بر روی نمونه سند پک شکافدار تهیه شده به ترتیب زیر انجام شد.

۶-۱ تزریق گاز دی اکسید کربن

پس از آماده سازی سند پک مورد نظر، سندپک اشباع شده از نفت در حضور آب همزاد جهت تزریق گاز دی اکسید کربن به طور افقی درون سیستم کنترل کننده درجه حرارت قرار گرفت و دمای دستگاه روی ۱۰۰°C تنظیم گردید و به منظور گرم شدن یکنواخت مدل، حدوداً بعد از گذشت یک ساعت از لحظهٔ قرار گرفتن نمونه در دستگاه، آزمایشها آغاز شد. در این مرحله از آزمایش، گاز دی اکسید کربن در دمای محیط و با شدت جریان ثابت $0/5cm^3/min$ به درون مدل تزریق شد و تزریق تا زمانی که دیگر نفتی در خروجی مشاهده نشد، ادامه یافت. در هر مرحله از عملیات تزریق، میزان بازیافت نفت محاسبه گردید.

۶-۲ تزریق گاز دی اکسید کربن گرم

پس از تزریق گاز دی اکسید کربن و پس از اینکه دیگر نفتی در خروجی دستگاه مشاهده نشد (آزمایش مرحله قبل)، تزریق گاز دی اکسید کربن گرم آغاز می شود. در اینجا گرمکنی که در مسیر تزریق قرار داشت روشن و دمای گاز دی اکسید کربن تزریقی به ۱۲۰ °C رسانده شد و با همان شرایط دمایی و فشاری و با دبی $0/5cm^3/min$ تزریق گاز دی اکسید کربن گرم آغاز گردید. در این شرایط، مشاهده شد که نفت تولید شده از مدل شکاف دار پس از تزریق حتی مقدار قابل توجهی گاز دی اکسیدکربن گرم، بسیار ناچیز است. دلیل اصلی، پایین بودن میزان نفت تولیدی، عبور گاز دی اکسید کربن گرم از شکاف به دلیل تراوایی بالای شکاف بود به طوری که این گاز از طریق این شکاف از نقطه ورود به راحتی به نقطه خروجی نمونه می رسید و از طرفی نفت موجود در شکاف قبلاً توسط گاز دی اکسید کربن معمولی تولید شده بود و دیگر نفتی در شکاف وجود نداشت که توسط گاز دی اکسید کربن گرم تولید شود. برای حل این مشکل و تولید نفت باقی مانده در ماتریس مدل شکافدار، تصمیم به انجام عمل خیساندن مغزه اتخاذ گردید. بدین صورت که گاز دی اکسید کربن گرم به درون مدل شکاف دار تزریق و با مشاهده گاز گرم در خروجی، تزریق متوقف و خروجی و ورودی مغزه بسته شدند. بدین ترتیب یک تبادل گرمایی بین ماتریس و گاز دی اکسید کربن گرم انجام گرفت و همانطور که در شکل (۴) مشاهده می شود گرما از شکاف به ماتریس منتقل شد که باعث افزایش دمای سیال موجود در ماتریس و کاهش ویسکوزیته و افزایش تحرک نفت موجود در ماتریس اطراف شکاف گردید و مقداری از نفت موجود در ماتریس اطراف شکاف به درون شکاف حرکت کرد. پس از ۶۰ دقیقه عمل خیساندن، تزریق گاز گرم آغاز شد و تولید نفت دوباره شروع گردید.



شکل ۴- تبادل گرماز شکاف به ماتریس و تولید نفت

۶-۳ تزریق آب

برای انجام این آزمایش دوباره نمونه مورد نظر توسط تولوئن داغ شسته و در یک محیط گرم با عبور دادن گاز دی اکسید کربن، کاملاً خشک شد و مجدداً ابتدا با آب و سپس با نفت اشباع گردید. سند پک شکافدار درون دستگاه قرار گرفت و دمای دستگاه روی ۱۰۰ °C تنظیم گردید و به منظور گرم شدن یکنواخت مدل حدوداً بعد از یک ساعت آزمایش تزریق آب آغاز شد. بدین ترتیب که آب در دمای محیط و با شدت جریان ثابت ۰/۵cm^3/min به درون مدل تزریق شد و تزریق تا زمانی که دیگر نفتی در خروجی مشاهده نشد ادامه یافت.

۶-۴ تزریق متناوب آب و گاز دی اکسید کربن

پس از آماده سازی مغزهٔ مورد نظر، مغزهٔ اشباع شده از نفت در حضور آب همزاد جهت تزریق متناوب آب و گاز دی اکسید کربن به طور افقی درون سیستم کنترل کنندهٔ درجه حرارت قرار گرفت و دمای دستگاه روی ۱۰۰ °C تنظیم گردید و به منظور گرم شدن یکنواخت مدل، حدوداً بعد از یک ساعت از لحظهٔ قرار گرفتن نمونه در دستگاه، آزمایش مورد نظر آغاز شد. اندازهٔ هر توده ۵٪ حجم فضاهای خالی و نسبت اندازه آب و گاز، مساوی یک در نظر گرفته شد. ابتدا توده گاز دی اکسید کربن و سپس توده آب تزریق گردید. تزریق متناوب این توده‌ها تا زمانی ادامه یافت که دیگر نفتی در خروجی مشاهده نشد. در طول عملیات تزریق، شدت جریان تزریق ۰/۵cm^3/min بود و پس از هر مرحله تزریق، میزان بازیافت نفت از خروجی محاسبه می گردید.

۶-۵ تزریق متناوب آب گرم و گاز دی اکسید کربن گرم

پس از تزریق متناوب آب و گاز دی اکسید کربن و هنگامی که دیگر نفتی در خروجی مشاهده نشد (آزمایش مرحله قبل) تزریق متناوب آب گرم و گاز دی اکسید کربن گرم آغاز شد. بنابراین گرمکنی که در مسیر تزریق قرار داشت روشن شد و پس از گرم شدن آب تا دمای ۹۰°C و گاز دی اکسید کربن تزریقی تا دمای ۱۲۰ °C، با همان شدت جریان قبلی، عملیات تزریق انجام شد. پس از چند دقیقه تزریق، دوباره تولید نفت شروع شد. عملیات تزریق متناوب گاز دی اکسید کربن گرم و آب گرم تا جایی ادامه یافت که دیگر نفتی در خروجی سند پک مشاهده نشد. در این آزمایش نیز پس از هر مرحله تزریق، میزان بازیافت نفت خروجی محاسبه گردید.

عدد موئینگی[1] یک عدد بدون بعد است که بیانگر نسبت نیروهای ویسکوزیته به نیروهای بین سطحی موثر بر جریان سیال در محیط متخلخل می باشد. هدف اصلی هر روش ازدیاد برداشت، افزایش عدد موئینگی و فراهم آوردن نسبت تحرک پذیری مناسب است (M< 1). عدد موئینگی به عنوان نسبت نیروهای ویسکوز به موئینگی بصورت زیر تعریف می شود:

$$N_{ca} = \frac{Viscous\ Forces}{Capillary\ Forces} = \frac{v\mu}{\sigma} \qquad (۶)$$

که v و μ به ترتیب سرعت و گرانروی سیال جابجا کننده و σ کشش سطحی بین آب و نفت است. در این مطالعه، عدد موئینگی برای سندپک‌ها $۲/۱۷ \times ۱۰^{-۷}$ بدست آمد. نسبت تحرک پذیری (M) نسبت تحرک سیال جابجا کننده به سیال جاجا شده می باشد.

$$M = \frac{\left(k/\mu\right)_{\text{جابه جاکننده}}}{\left(k/\mu\right)_{\text{جابه جاشده}}} \qquad (۷)$$

که k و μ ، به ترتیب، تراوایی موثر یا نسبی و گرانروی می باشد.

۷- نتایج و بحث

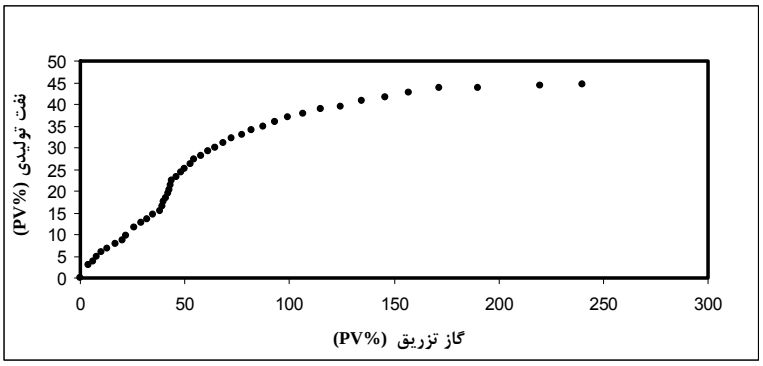
همانگونه که بیان شد، هدف از این مطالعه آزمایشگاهی، بررسی و مقایسه میزان بازدهی تولید از یک مغزهٔ شکافدار با استفاده از روشهای ازدیاد برداشت از جمله تزریق گاز دی اکسید کربن، تزریق گاز دی اکسید کربن گرم، تزریق آب، تزریق متناوب آب و گاز دی اکسید کربن و تزریق متناوب آب گرم و گاز دی اکسید کربن گرم می باشد. در زیر، اثر این روشها به همراه نمودار مربوط به آنها به تفصیل آورده شده است.

پس از انجام سناریوی تزریق گاز دی اکسید کربن، مشاهده گردید که مقدار بازیافت نهایی در نمونه شکافدار ۴۴/۶٪ حجم فضاهای خالی است. شکل (۵) بیانگر میزان تولید نفت از سند پک شکافدار پس از تزریق گاز دی اکسید کربن است.

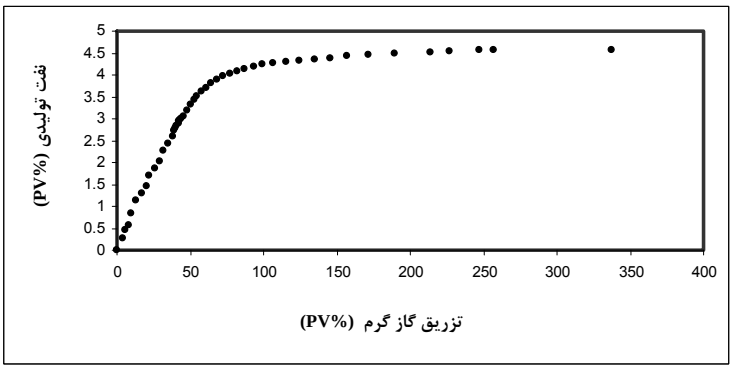
1. capillary number

همانگونه که در شرح آزمایشها نیز بیان گردید، پس از تزریق گاز دی اکسید کربن و هنگامی که دیگر نفتی در خروجی مشاهده نشد، تزریق گاز دی اکسید کربن گرم با دمای ۱۲۰ °C و با همان شرایط دمایی و فشاری و شدت جریان تزریقی قبلی آغاز گردید. بنابراین بعد از انجام عمل خیساندن مغزه و تبادل حرارتی بین شکاف و ماتریس، میزان بازیافت نهایی به اندازه ۴/۵۷٪ حجم فضاهای خالی نمونه افزایش یافت. شکل (۶) بیانگر میزان تولید نفت پس از تزریق گاز دی اکسیدکربن گرم در نمونه شکافدار است.

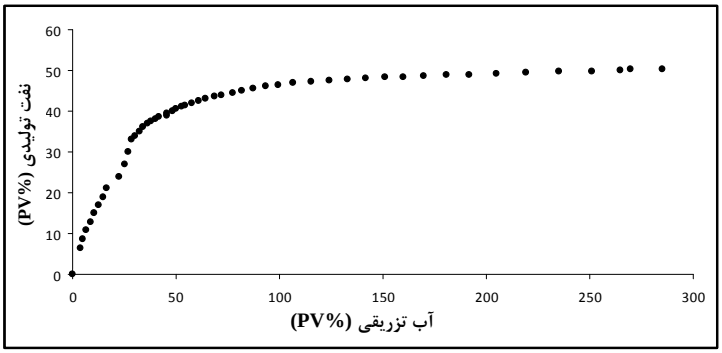
پس از انجام تزریق آب در سند پک شکافدار، مقدار بازیافت نهایی در این نمونه مساوی ۵۰/۲٪ حجم فضاهای خالی بدست آمد. شکل (۷) بیانگر میزان تولید نفت از نمونه شکافدار پس از تزریق آب است.



شکل ۵- میزان تولید نفت در مدل شکاف دار با تزریق گاز دی اکسید کربن



شکل ۶- میزان افزایش تولید نفت در تزریق گاز دی اکسیدکربن گرم در مدل شکافدار

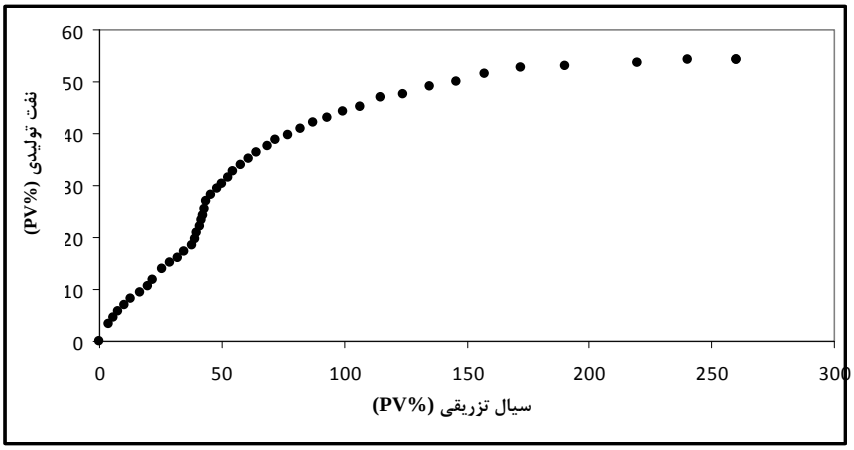


شکل ۷- میزان تولید نفت در تزریق آب در مدل شکاف دار

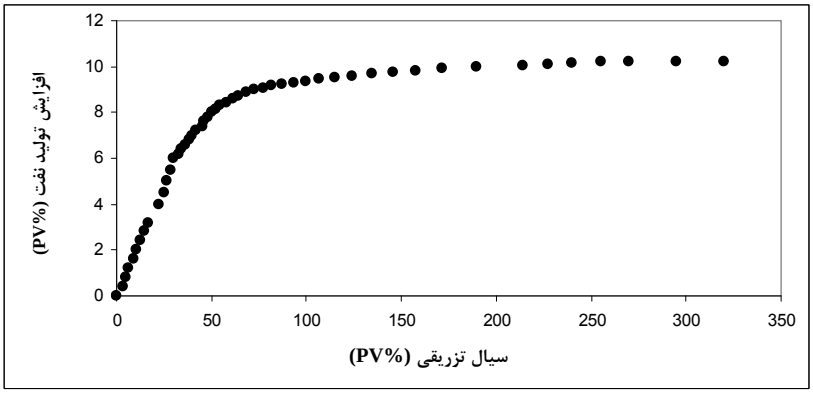
هنگامی که آب و گاز دی اکسیدکربن به طور متناوب بـه درون نمونـه سند پک شکافدار تزریق شد، مطـابق شـکل (۸) مـشاهده گردیـد کـه مقدار بازیافت نهایی نفت از این نمونه مساوی ۵۴/۱۲ ٪حجم فـضاهای خالی بوده است، به طوری که پس از این مقدار، تولیـد نفـت بـه طـور کامل متوقف گردید و دیگر هیچ نفتی از نمونه مورد نظر خارج نشد.

پس از اینکه عملیات تزریق متناوب آب و گاز دی اکسید کـربن انجـام شد و دیگر نفتی در خروجی مشاهده نگردید، تزریق متناوب آب گرم و گاز دی اکسید کربن گرم انجام شد و مـشاهده شـد کـه مجـدداً نفـت شروع به تولید از این نمونه شکافدار کرد به گونه ای که میزان بازیافت در حدود ۱۰/۲٪ حجم فضاهای خالی افزایش یافت. شـکل (۹) بیـانگر میزان تولید نفت از سند پک شکافدار پس از تزریق متناوب بخار آب و گاز دی اکسید کربن گرم است.

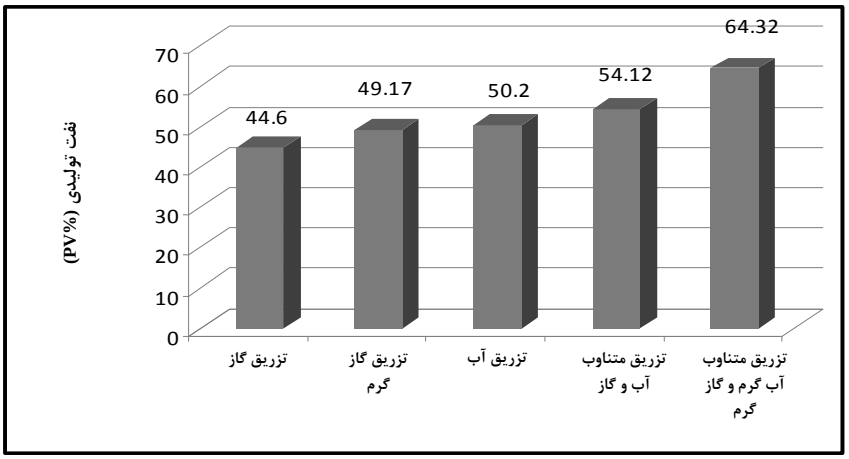
در شکل (۱۰) روشهای مختلفی که در این مطالعه مورد استفاده قـرار گرفتند مقایسه شده اند (اعداد بالای ستونها در شکل بـصورت درصـد می‌باشند). همانطور کـه مـشاهده مـی شـود میـزان بازیافـت نفـت بـا استفاده از روش تزریق متناوب آب گرم و گاز دی اکسید کـربن گـرم، نسبت به روش های تزریق متناوب آب و گاز دی اکسید کربن، تزریـق آب، تزریق گاز دی اکسید کربن و تزریق گـاز دی اکـسید کـربن گـرم بیشتر است.



شکل ۸- میزان تولید نفت در تزریق متناوب آب و گاز در مدل شکاف دار

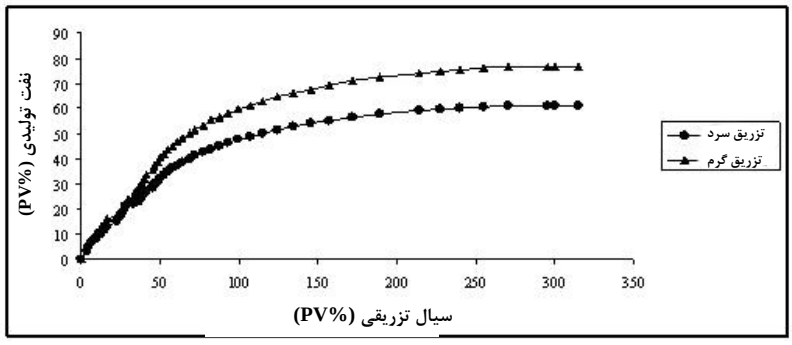


شکل ۹- میزان افزایش تولید نفت در تزریق متناوب آب گرم و گازگرم در مدل شکاف دار

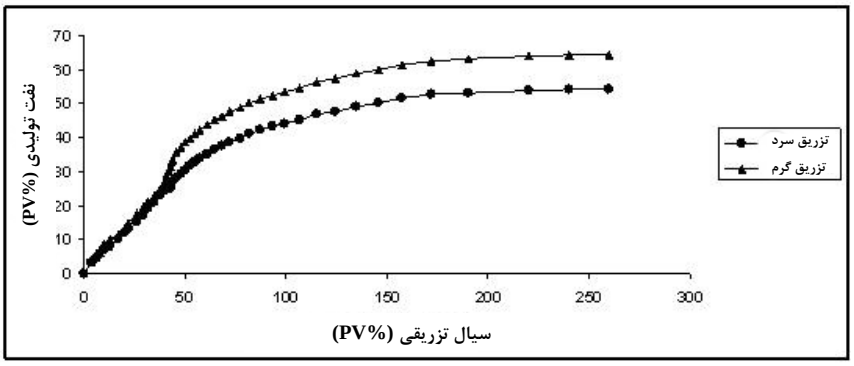


شکل ۱۰- مقایسه میزان تولید نفت از سند پک شکاف دار با استفاده از روش های تزریقی مختلف

در شکل (۱۱) میزان تولید نفت با استفاده از روش های تزریق متناوب آب و گاز و تزریق متناوب آب گرم و گاز گرم در سندپک معمولی (بدون شکاف) مقایسه شده اند. سندپک معمولی نیز مانند سندپک شکافدار از جنس سیلیس و ابعاد آن با مدل شکافدار، برابر است. شکل (۱۲) مقایسه ای بین میزان تولید با استفاده از روش تزریق متناوب آب گرم و گاز گرم و روش تزریق متناوب آب و گاز در مدل شکافدار است.



شکل ۱۱- مقایسه روش تزریق متناوب آب گرم و گاز گرم و روش تزریق متناوب آب و گاز در مدل معمولی



شکل ۱۲- مقایسه روش تزریق متناوب آب گرم و گاز گرم و روش تزریق متناوب آب و گاز در مدل شکافدار

مقایسه شکلهای (۱۱) و (۱۲) نشان می‌دهد که میزان تولید در مدل شکافدار در اثر تزریق متناوب آب گرم و گاز گرم، به دلیل وجود شکاف، از مدل معمولی کمتر است و می‌توان در مدل شکافدار عمل خیساندن را انجام داد ولی در هر حال، همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، تزریق متناوب آب گرم و گاز گرم در مدل شکافدار نسبت به سایر روشهای تزریقی، بازدهی تولید بالاتری دارد.

۸. نتیجه گیری

در این مطالعه برای اولین بار تزریق آب گرم و گاز گرم بصورت متناوب به درون سندپک های آزمایشگاهی معمولی و شکاف دار به عنوان یک روش ازدیاد برداشت نفت بکار گرفته شد. این فرایند، ترکیبی از دو فرایند سیلاب زنی با آب گرم و گاز گرم است. تزریق متناوب آب و گاز به عنوان روشی مناسب برای نفت های سبک و میانی بکار رفته است اما از روش تزریق متناوب آب گرم و گاز گرم می توان برای نفت های سنگین نیز استفاده کرد زیرا این روش، ترکیبی از روش تزریق سیالات و روش های حرارتی است. دمای آب و گاز گرم باعث کاهش گرانروی نفت و کشش بین سطحی می شود. از نتایج این مطالعه می‌توان نتیجه گیریهای زیر را بیان کرد:

۱) میزان بازیافت نفت با استفاده از روش تزریق متناوب آب گرم و گاز دی اکسید کربن گرم، در مقایسه با روش هایی مانند تزریق متناوب آب و گاز دی اکسید کربن، تزریق آب، تزریق گاز دی اکسید کربن و تزریق گاز دی اکسید کربن گرم، بیشتر است.

۲) افزایش دما باعث افزایش خورندگی می شود و یکی از مشکلاتی که در استفاده از گاز دی اکسید کربن به ویژه زمانی که گرم می شود ممکن است بوجود آید، مشکل خورنده بودن این گاز است. البته در عملیات آزمایشگاهی معمولاً با مشکلات چندانی مواجه نخواهیم بود ولی چنانچه بخواهیم از این گاز در مقیاس صنعتی استفاده کنیم، بایستی حتماً این عامل را نیز در نظر بگیریم و همچنین در هنگام تزریق، بایستی رطوبت همراه گاز نباشد.

۳) گازگرم بدلیل تحرک پذیری بیشتر به مناطقی نفوذ می کند که در تزریق معمولی، آن مناطق، قابل دسترسی نبودند.

۴) می توان از فرایند تزریق متناوب آب گرم و گاز دی اکسیدکربن گرم در مخازن شکاف دار به عنوان روش مطلوب ازدیاد برداشت نفت استفاده کرد.

۵) علاوه بر نیاز جهانی به پژوهشهای علمی در این مقوله، مخازن ایران نیز نیاز مبرمی به استفاده از روشهای عملی و ارزان و در عین حال سودمند جهت افزایش برداشت نفت از مخازن دارند، زیرا به کمک روشهای کنونی، تنها بخش اندکی از ذخایر نفتی را می توان استخراج کرد و بخش قابل توجهی از این نعمت خدادادی خارج از دسترس باقی می ماند.

۶) در کشور ما با توجه به منابع گاز، مانند CO_2 (طرح های تولید آمونیاک) و گازهای هیدروکربنی و... و منابع آبی موجود، استفاده از تزریق متناوب آب و گاز به منظور ازدیاد برداشت نفت و صیانت از مخازن می تواند مورد توجه قرار گیرد.

مراجع

[1] Lawrence J J, Teletzke G F, Hutfilz J M, and Wilkinson J R., "Reservoir Simulation of Gas Injection Processes". Paper SPE 81459 presented at SPE 13th Middle East Oil Show & Conference, Bahrain, 5-8 April (2003) (SPE 81459).

[2] Christensen J R, Stenby E H, and Skauge A., "Review of WAG Field Experience". SPE Reservoir Evaluation and Engineering vol.4, no. 2, p.97, April (2001) (SPE).

[3] Madhav M. Kulkarni, Dandina N. Rao., "Experimental Investigation of Miscible and Immiscible Water-Alternating-Gas (WAG) Process Performance". The Craft and Hawkins Department of Petroleum Engineering, Louisiana State University, 3516 CEBA Bldg., Baton Rouge, LA 70803, United States, (2005).

[4] Haghighat, S A., WAG Modeling in Fractured Reservoirs. Thesis report MTA/PW/04-15 TU Delft, August (2004).

[5] Heeremans J C, Delft U. of Technology; T E H Esmaiel, Delft U. of Technology and Kuwait Inst. "Feasibility Study of WAG Injection in Naturally Fractured Reservoirs". Oklahoma, USA., 22-26 April (2006) (SPE 100034).

[6] Van Lingen P P, Barzanji O H M, van Kruijsdijk C P J W., "WAG Injection to Reduce Capillary Entrapment in Small-Scale Heterogeneities". Paper SPE 36662, SPE Annual Technical Conference Denver. Colorado, S.S.A, 6-9 October (1996) (SPE 36662).

[7] James W. Amyx, Daniel M. Bass, JR, Robert L. Whiting, "Petroleum Reservoir Engineering, Physical Properties", McGraw-Hill Book Company, Inc.