

مطالعه و ارزیابی عملکرد تزریق متناوب آب و گاز (WAG) در یکی از مخازن نفتی شکاف دار غرب ایران

محمدجواد درویش نژاد^{۱*}، قاسم زرگر^۲، ابوالقاسم امامزاده^۱ و افشین جنت رستمی^۳

۱- دانشگاه آزاد، واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- دانشگاه صنعت نفت

۳- شرکت ملی نفت مناطق مرکزی ایران

darvishnezhad@gmail.com

پژوهش نفت

سال بیستم

شماره ۶۲

صفحه ۴۳-۲۸، ۱۳۸۹

چکیده

با گسترش و پیشرفت صنعت نفت، تمایل به افزایش تولید از میادین نفتی بیش از پیش مورد توجه و در اولویت قرار گرفت. به همین منظور روش‌های جدید ازدیاد برداشت پیشنهاد و مورد استفاده قرار می‌گیرند. تزریق متناوب آب و گاز نیز از جمله این روش‌ها هستند. در این روش آب و گاز به صورت متناوب و در یک محل به مخزن تزریق می‌شوند. هدف اصلی فرایند تزریق متناوب آب و گاز، افزایش بازدهی تزریق گاز توسط تزریق آب با افزایش سطح تماس سیال تزریقی با مخزن، کنترل نسبت تحرک میان سیال تزریقی و نفت مخزن و ایجاد جبهه حرکت پایدار است. تزریق متناوب آب و گاز به روش‌های امتزاجی، غیرامتزاجی، هیبرید (ترکیبی)، پیوسته و انتخابی پیوسته انجام می‌شود.

در این پژوهش، روش‌های مختلف تزریق متناوب آب و گاز در یکی از مخازن شرکت ملی نفت ایران با استفاده از بسته نرم‌افزار تجاری GeoQuest و ماژول ECLIPSE از بسته 100 شبیه‌سازی و ضریب بهره‌دهی و تولید جمعی در پارامترهای مؤثر بر تزریق مانند چرخه (سیکل)، نوع و روش تزریق (غیرامتزاجی، هیبرید (ترکیبی)، و انتخابی پیوسته) مورد بررسی قرار گرفتند. سپس روش‌های تزریق منفرد آب، گاز و تزریق متناوب آب و گاز برای انتخاب روش

مناسب تزریق در میدان مورد نظر مقایسه شدند. در نهایت با طراحی سناریوهای مختلف تزریق متناوب آب و گاز و تزریق جداگانه آب و گاز در الگوهای چهار و پنج نقطه‌ای تزریق، ضریب بهره‌دهی، درصد اشباع نفت باقی‌مانده و تولید جمعی به‌منظور مشخص کردن الگوی بهینه تزریق در روش‌های ذکر شده محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد در صورتی که پارامترهای مؤثر بر تزریق متناوب آب و گاز به درستی طراحی و انتخاب شوند، ضریب بهره‌دهی و تولید در این روش به مراتب بیشتر از تزریق جداگانه آب و گاز می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ازدیاد برداشت، شبیه‌سازی، تزریق متناوب آب و گاز، ضریب بهره‌دهی، الگوی تزریق

مقدمه

به‌طور کلی با بهره‌برداری و تولید، فشار از مخزن کاهش یافته و این امر منجر به گازی‌شدن مخزن و کاهش تولید می‌شود. با توجه به نقش نفت و فرآورده‌های نفتی در بازار جهانی و دنیای اقتصاد، اتخاذ تدابیری مناسب و استفاده از روش‌های ازدیاد برداشت بهینه برای بهبود بازدهی و افزایش تولید، سرلوحه کار کشورهای تولیدکننده نفت قرار

گاز به اجبار در مجاورت و تماس با نفت قرار گرفته و موجب افزایش حجم قطرات نفت می‌شوند. با جابجایی نفت توسط آب تزریقی در صورت وجود حباب‌های گاز در قطرات نفت، میزان نفت باقی‌مانده در مخزن به میزان حجم حباب‌های گاز کاهش می‌یابد. بدین ترتیب تزریق متناوب آب و گاز موجب کاهش اشباع باقی‌مانده و افزایش ضریب بهره‌دهی مخزن می‌شود [۵].

مروری بر مقالات و پژوهش‌های انجام شده

تزریق متناوب آب و گاز، اولین بار در سال ۱۹۵۷ در آلبرتا انجام و نتایج موفقیت‌آمیز آن گزارش شد [۶]. بعد از آن و خصوصاً در دو دهه اخیر به دلیل مزایای فراوان این روش نسبت به روش‌های تزریق جداگانه آب و گاز (مانند کنترل تحرک نسبی فازهای جابجا شونده و جابجا کننده، ممانعت از انگشتی شدن زودرس گاز در چاه‌های تولیدی نفت، قابلیت تولید نفت باقی‌مانده از مناطق جاروب نشده در تزریق آب و یا تزریق گاز، ایجاد جبهه پیشروی قابل کنترل و پایدار، قابلیت استفاده از ابزار عملیاتی روش‌های تزریق آب و گاز) در میادین مختلف جهان مانند امریکا، کانادا، دریای شمال، روسیه، ترکیه و ونزوئلا، عملیاتی و اجرا شدند. در طی این سال‌ها به‌منظور درک واقعیت‌ها و تغییرات شرایط مخزن در دوره تزریق، محققین به بررسی و مطالعه جوانب بیشتری از تزریق WAG پرداختند.

Cobanoglu (۲۰۰۱) با طراحی سناریوهای مختلف دبی تزریق، سیکل و تعداد چاه‌های تولیدی و تزریقی با استفاده از شبیه‌ساز ECLIPSE100 به مقایسه و بررسی روش‌های تزریق غیرامتزاجی گاز و WAG در میدان Baty Kozluca در ترکیه پرداخت. بررسی‌های وی نشان داد که تزریق غیرامتزاجی گاز به دلیل نسبت تحرک نامناسب، افزایش محسوسی در بازدهی میدان کرد. وی عنوان کرد که تزریق غیرامتزاجی WAG نسبت به تزریق غیرامتزاجی، گاز دارای بازدهی و تولید بیشتری است [۷]. Hustod و Klov در سال ۲۰۰۲ به بررسی تزریق WAG و مقایسه آن با تزریق آب و گاز در لایه‌های با تراوایی متفاوت میدان دریای شمال پرداختند. آنها عنوان داشتند که انگشتی شدن آب و گاز

گرفته است. به دلیل افت فشار در مخازن ایران، استفاده از روش‌های ازدیاد برداشت مناسب برای تثبیت و افزایش فشار بیش از پیش احساس می‌شود. با وجود ذخایر عظیم گاز در کشورمان، استفاده از روش‌های ازدیاد برداشت مانند تزریق متناوب آب و گاز (WAG) با ضریب بازیافت بالاتر نسبت به روش‌های معمول امتزاجی، غیرامتزاجی و تزریق گاز ضروری است. در روش تزریق WAG، آب و گاز در سیکل‌های زمانی مشخص شده به طور متناوب به مخزن تزریق می‌شوند. افزایش بازدهی در این روش به دلیل افزایش سطح تماس سیال تزریقی با نواحی جاروب نشده مخصوصاً مناطقی که قبلاً به دلیل حرکت گاز به سمت بالا (در تزریق گاز) و یا حرکت آب به سمت پایین (در تزریق آب) تحت تاثیر قرار نگرفته‌اند، می‌باشد [۱]. در این روش، گاز تزریق شده حفره‌های دارای میزان اشباع بالای نفت را اشغال و به این ترتیب باعث به حرکت درآوردن نفت بخش‌های جاروب نشده مخزن می‌شوند. در ادامه با تزریق آب نیز نفت باقی‌مانده و محصور شده در اطراف سنگ‌های مخزن حرکت کرده و موجب کاهش بیشتر میزان اشباع نفت و افزایش بازدهی تولید می‌شود [۲ و ۳]. به‌علاوه تزریق آب بعد از گاز موجب جلوگیری از افزایش درصد اشباع و تحرک نسبی گاز، کنترل و کاهش نسبت تحرک و ایجاد جبهه حرکت پایدار در مخزن می‌شود. این جبهه سبب جلوگیری از ایجاد پدیده انگشتی شدن زودرس گاز در چاه تولیدی می‌گردد [۴]. به‌طور کلی درصد اشباع نفت باقی‌مانده در تزریق WAG کمتر از روش‌های معمول تزریق آب و گاز می‌باشد. لذا این روش پتانسیل مناسبی برای افزایش راندمان جابجایی ماکروسکوپی و میکروسکوپی مخزن دارد [۳ و ۴].

در این روش، Cole در اواخر دهه ۶۰ با انجام مطالعات آزمایشگاهی و میدانی، افزایش بازدهی و تولید در ناحیه سه فازی ایجاد شده در مخزن را نتیجه تغییرات کشش سطحی گاز - نفت عنوان کرد. وی بر پایه مشاهدات خویش در یک سیستم سه فازی شامل آب، نفت و گاز با توجه به تمایل سیالات به آرایش تعادلی با حداقل انرژی، کشش سطحی سیستم گاز - نفت را کمتر از کشش سطحی گاز - آب فرض کرد. بنابراین در این حالت مولکول‌های

الگوی تزریق، اندازه اسلاگ تزریقی، نسبت WAG و غیره می‌باشد. بنابراین به کار بردن و مدیریت این روش نیازمند بررسی‌های زمین‌شناسی، شناخت مخزن و عملیات بهره‌برداری و مدیریت مخزن می‌باشد. در این قسمت برخی از عوامل مؤثر بر تزریق به اختصار تشریح می‌شود.

هتروژنسی و لایه‌بندی مخزن

هتروژنسی و لایه‌بندی مخزن دارای مهمترین اثر بر فرایند جابجایی گاز - آب می‌باشند. هتروژنسی عمودی مخزن بر عملکرد تزریق گاز مؤثر و ممکن است باعث افزایش بازدهی جابجایی تزریق شود. اما به‌طور کلی موجب ایجاد پدیده تفکیک ثقیل و افزایش سرعت حرکت سیال تزریقی و کاهش بازدهی نفت می‌شود. در این حالت گاز و آب به دلیل وجود لایه‌های پرتراوا به ترتیب به قسمت بالا و پایین مخزن رفته و بدون اینکه بازدهی را به‌طور محسوسی افزایش دهند به سمت چاه تولیدی حرکت می‌کنند. هتروژنسی مخزن، تزریق و جابجایی را در فرایند سیلابزنی کنترل می‌کند. نتایج مطالعات شبیه‌سازی مخزن نشان می‌دهد که نسبت‌های بالای تراوایی افقی به عمودی (Kh/Kv) موجب افزایش قابل ملاحظه تولید نفت در فرایند تزریق WAG می‌شود. در مخازن لایه‌بندی شده (لایه‌دار) بزرگ، تراوایی بالای برخی از لایه‌ها موجب انگشتی شدن و یسکوزیته و در نتیجه کاهش بازدهی جابجایی می‌شود. در فرایند WAG هنگامی که آب تزریق می‌شود به‌سرعت گاز را جابجا و همه لایه‌ها را به یک تحرک نسبی نزدیک به حالت اولیه مخزن می‌رساند و بدین ترتیب آب تزریقی موجب کاهش تحرک در لایه‌های پرتراوا و افزایش سطح تماس گاز تزریقی با نفت مخزن و افزایش تولید می‌شود [۱۱].

الگوی تزریق

الگوی تزریق و فضای اطراف چاه‌ها، تأثیر مهم و قابل توجهی بر بازدهی جارویی مخزن دارد. فضای اطراف چاه‌ها نشان‌دهنده افزایش فشار متوسط مخزن می‌باشد (با افزایش نسبت چاه تزریقی به تولیدی، فشار متوسط مخزن افزایش می‌یابد). بیشترین و عمومی‌ترین الگوی تزریق، الگوی پنج نقطه‌ای و نه نقطه‌ای تزریق است. کنترل بهتر جبهه حرکت و حفظ و تثبیت فشار متوسط مخزن در الگوی پنج نقطه‌ای نسبت به سایر الگوهای تزریق موجب شده که این الگو

در لایه‌های با تراوایی بالا و عدم حرکت و فرایند جارویی نامناسب در لایه‌های با تراوایی پایین موجب کاهش بازدهی تزریق در این روش‌ها می‌شود. مطالعات آنها نشان داد که تزریق تناوبی آب و گاز در روش WAG موجب جلوگیری از حرکت گاز در لایه‌های با تراوایی بالا و ایجاد ناحیه سه فازی در مخزن و پایداری جبهه حرکت می‌شود. لذا این روش بازدهی بالاتری نسبت به روش‌های تزریق آب و گاز دارد [۵]. Shi و همکاران با استفاده از نتایج میدانی به‌دست آمده به مطالعه و بررسی دوره ۲۰ ساله تزریق WAG در میدان Kuparuk در شمال آلاسکا پرداختند. آنها ابراز داشتند که اگرچه در ابتدا تزریق گاز به‌عنوان روش ازدیاد برداشت در این میدان انتخاب و انجام شد، اما به دلیل انگشتی شدن زودرس و افزایش GOR، برای رفع این مشکل تزریق WAG پیشنهاد و مورد استفاده قرار گرفت. به طوری که در طول دوره تزریق، تولید نفت به میزان ۱۲۰ MMSTB افزایش پیدا کرد [۸]. Instefjord نیز به بررسی ۱۰ ساله تزریق WAG در میدان Gullfaks پرداخت. مطالعات وی نشان می‌دهد که در این میدان در طول دوره تزریق، تولید نفت تقریباً به میزان ۲ MMSTB بیشتر از تولید طبیعی می‌باشد. وی بیان کرد که تزریق WAG در این میدان موجب افزایش بازدهی و راندمان جابجایی و کاهش درصد آب تولیدی می‌شود [۸]. به‌علاوه گزارشات دیگری نیز در مورد تزریق WAG توسط Trnerr در میدان Quale، Seeligsou و همکاران در میدان Siri، Stephansen در میدان Joffre Viking، Skauge و Aarra در میدان Snorer و Quraini و همکاران در میدان West sak منتشر شد که نتایج نشان‌دهنده موفقیت‌آمیز بودن این روش نسبت به روش‌های معمول ازدیاد برداشت می‌باشد [۹ و ۱۰]. در دهه اخیر تقریباً ۴۰ درصد از پروژه‌های تزریق گاز در سراسر دنیا از جمله کانادا، روسیه، ترکیه و نروژ به صورت تزریق WAG انجام پذیرفته و ۸۰ درصد از این پروژه‌ها نیز موفقیت‌آمیز گزارش شده‌اند [۱۱].

پارامترهای مؤثر بر تزریق متناوب آب و گاز

ازدیاد برداشت به کمک فرایند تزریق WAG تحت تأثیر پارامترهایی مانند هتروژنسی و لایه‌بندی مخزن،

و تجارب به دست آمده از شرایط پروژه، تزریق گاز پیشنهاد می‌شود که نسبت WAG در پروژه تزریق WAG بعد از افزایش مقدار بهینه گاز تولیدی (GOR)، افزایش یابد. افزایش نسبت WAG در این مرحله باعث افزایش کنترل نسبت تحرک و جلوگیری از ایجاد پروفایل گاز تولیدی می‌شود. محاسبه نسبت WAG بهینه تحت تأثیر نوع ترشوندگی سنگ مخزن نیز قرار دارد. به عنوان مثال نسبت WAG بالا در فرایند بازدهی نفت در مخازن آب دوست بیشترین تأثیر را داشته و باعث کاهش مقدار نفت باقی مانده می‌شود [۱۵].

تراوایی نسبی

تراوایی نسبی یکی از پارامترهای فیزیکی مهم است. این پارامتر شامل اثر خصوصیات ترشوندگی، درصد اشباع سیالات و هتروژنسی سنگ مخزن می‌باشد. تزریق تناوبی آب و گاز در طول فرایند تزریق (که به هدف تغییر و افزایش بازدهی سطحی و عمودی انجام می‌پذیرد)، موجب تغییر درصد اشباع سیالات در هر دوره می‌شود. در ادامه تغییر درصد اشباع موجب تغییر در تراوایی نسبی سیالات تزریق می‌شود. یکی از مهمترین مسائلی که در نتیجه تغییر تراوایی نسبی رخ می‌دهد، کاهش تزریق پذیری در طول دوره ازدیاد برداشت است. بنابراین تزریق پذیری و مخصوصاً تزریق پذیری آب یکی از مواردی است که بعد از سیکل تزریق گاز تغییر و کاهش می‌یابد. بنابراین مطالعه و بررسی کمی نمودارهای تراوایی نسبی به منظور پیش بینی عملکرد تزریق گاز و آب در این روش بسیار مهم است [۱۶].

خصوصیات گاز تزریقی

یکی از مهمترین سؤالاتی که برای طراحی فرایند مطرح است انتخاب گاز تزریقی است. گازهای تزریقی مورد استفاده در پروژه‌های ازدیاد برداشت به طور کلی به سه دسته CO_2 ، گاز هیدروکربنی و غیرهیدروکربنی تقسیم می‌شوند. گازهای هیدروکربنی مورد استفاده در تزریق، شامل گازهای تولیدی مخزن می‌باشند. کریستنس و همکاران پیشنهاد کردند که تزریق گاز در میداین دریایی هیدروکربنی و در بقیه موارد دی اکسید کربن باشد [۳]. امروزه در اکثر میداین دریایی برای تزریق از گازهای هیدروکربنی تولیدی همان میدان استفاده می‌شود. اما انتخاب نهایی گاز بستگی به تخمین و محاسبه عوامل گوناگون از جمله هزینه‌های انجام طرح و چگونگی

در فرایندهای عملیاتی انجام شده تاکنون بیشترین استفاده و کاربرد را داشته باشد [۱۲].

اندازه اسلاگ تزریقی

اندازه و حجم اسلاگ تزریقی، بیان کننده مقدار تجمعی گاز تزریق در فرایند تزریق است. این مقدار به صورت درصد حجم هیدروکربن و فضای خالی مخزن (HCPV%) بیان می‌شود. انتخاب مقدار بهینه این پارامتر در طراحی فرایند تزریق (مخصوصاً تزریق امتزاجی) مهم و اساسی می‌باشد. بازده نهایی و تولید، وابسته به اندازه اسلاگ تزریق است. اما به طور کلی افزایش آن موجب افزایش بازدهی نهایی نمی‌شود. شرایط اقتصادی پروژه مانند قیمت نفت و گاز تزریق، مدت زمان رسیدن به افزایش بازدهی و تولید بر مقدار بهینه اسلاگ تزریق اثرگذار می‌باشد. بنابراین مقدار نهایی آن بعد از شروع پروژه هنگامی که اطلاعات بیشتری در مورد قیمت نفت و شرایط بهره‌برداری در آینده مشخص شد، محاسبه می‌شود. مقدار بهینه اندازه اسلاگ تزریق باید در هر نمونه مجزا و جداگانه اندازه‌گیری شود [۱۳].

تأثیر ترکیب و میزان نمک موجود در آب تزریقی

مهاجرت ذرات ریز جامد درون محیط متخلخل مخزن یکی از مواردی است که دارای بیشترین تأثیر را بر قابلیت تحرک سیال (یا تراوایی نسبی) از سنگ مخزن داشته و باعث کاهش آن می‌شود. Gray و Rex در مطالعه‌هایشان در مورد مهاجرت میکا و کائولونیت متوجه شدند که مهاجرت ذرات ریز به وسیله تغییر درصد نمک و یا تغییر ناگهانی نسبت یون‌های موجود در آب شور باعث کاهش تراوایی می‌شوند. بنابراین یکی از اولین عامل‌هایی که در مهاجرت ذرات ریز مطرح است، درصد و ترکیب نمک موجود در آن می‌باشد. مطالعات آزمایشگاهی نیز نشان می‌دهد که درصد نمک، ترکیب و pH آب دارای بیشترین تأثیر در جابجایی میکروسکوپی و بازدهی نفت به وسیله تزریق آب در فرایند آشام می‌باشد [۱۴].

نسبت WAG

نسبت WAG عبارتست از نسبت حجم کل تزریق آب به گاز. محاسبه نسبت WAG بهینه و استفاده از آن یکی از پارامترهای مهم طراحی است که بر روی شرایط عملیاتی و اقتصادی پروژه تأثیر زیادی دارد. با مطالعه، پیش‌بینی

نیز وجود دارد که باید مد نظر قرار گیرند. در صورت عدم شناخت صحیح از شرایط لایه‌های مخزن، طراحی و اجرای پروژه تزریق ممکن است نه تنها موفقیت‌آمیز نباشد بلکه با ایجاد انگشتی شدن و حرکت رو به پایین آب و یا رو به بالای گاز، از دست رفتن مخزن را سبب شود، به طوری که برخی از گزارش‌ها نشان‌دهنده ایجاد آسفالتین و هیدرات، کاهش تزریق‌پذیری، خوردگی، انباشت نفت و ایجاد هیدرات معدنی در پروژه تزریق WAG می‌باشد [۱۷].

توصیف میدان مورد مطالعه

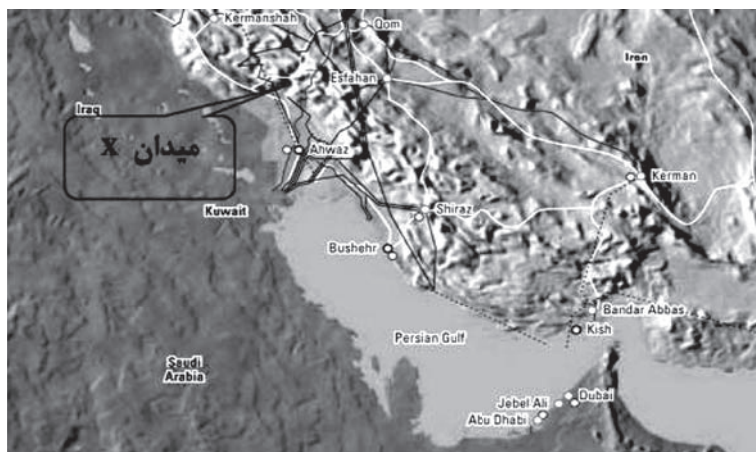
میدان مورد مطالعه (X)، یک طاقدیس نامتقارن به طول ۲۵ و عرض ۵ کیلومتر بر روی گروه بنگستان و در جنوب غرب ایران واقع شده است (شکل ۱). این میدان در سال ۱۳۴۸ با حفر چاه ۱ در منتهی‌الیه جنوب شرقی میدان کشف و به دنبال آن چاه‌های توصیفی ۲ و ۳ در محور ستیغی در سال ۱۳۵۴ حفاری شدند. میدان مورد مطالعه یک میدان نفتی و دارای نفت مرغوب با درجه سبکی API ۴۵ بوده و نسبت گاز به نفت و ضریب حجمی نفت آن به ترتیب $1/38 \text{ Rbbl/STB}$ و 668 scf/STB می‌باشد (جدول ۱). براساس اطلاعات پتروفیزیکی و زمین‌شناسی، این مخزن از سه سازند ایلام، سورگه و سروک تشکیل شده است. به دلیل تفاوت در خصوصیات سنگ‌شناسی و نیز تغییرات تخلخل و اشباع هیدروکربن، مخزن به پنج زون تقسیم شده است. بر این اساس سازند ایلام به دو زون (زون‌های ۱ و ۲)، سازند سورگه به یک زون (زون ۳) و سازند سروک به دو زون (زون‌های ۴ و ۵) تقسیم شده است (جدول ۲).

تهیه گاز دارد. میدان ایکوفیسک نمونه خوبی از این مسئله است. اگرچه مطالعات شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی نشان داد که تزریق دی‌اکسید کربن نسبت به سایر گازهای تزریقی دارای بازدهی و تولید بیشتری است اما به دلیل در دسترس بودن گاز هیدروکربنی و دیگر ملاحظات اقتصادی طرح، از تزریق امتزاجی این گاز در پروژه استفاده شد [۶].

ملاحظات اقتصادی پروژه تزریق WAG

در انجام پروژه تزریق WAG باید پارامترهای مهمی مانند نسبت تزریق، سیکل تزریق، حجم اسلاگ تزریقی، دبی تزریق، نوع گاز تزریقی، روش تزریق، امتزاجی یا غیرامتزاجی بودن تزریق گاز، الگوی تزریق، ترکیب آب تزریقی و غیره در شرایط آزمایشگاهی و میدانی و یا با استفاده از شبیه‌سازها دقیقاً مورد مطالعه و بررسی قرار گیرند. بنابراین تخمین و محاسبه مقدار و شرایط بهینه پارامترهای فوق با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و پتروفیزیک مخزن برای کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش بازدهی نهایی و تولید ضروری می‌باشد [۱۳].

همچنین میزان هزینه تهیه آب، گاز و انتقال آنها به محل از مهمترین مسائل یک پروژه هستند. در دسترس بودن گاز و هزینه تهیه حلال نیز برای یک فرایند تزریق دارای اهمیت است. زیرا در فرایند ازدیاد برداشت در دسترس بودن گاز با هزینه پایین یکی از عوامل مهم کاهش هزینه‌ها می‌باشد. به علاوه هزینه‌های حفاری چاه‌های تزریقی جدید، نمونه‌گیری، تعمیر و نگهداری چاه‌ها و هزینه‌های مطالعه و بررسی فرایندهای بهینه تزریق امتزاجی و غیرامتزاجی



شکل ۱- موقعیت میدان مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات مخزن مورد مطالعه

۴۳/۹۸	دانسیته نفت (lb/ft ^۳)	۱/۱۳	ضریب حجمی گازسازند (Rbbl/Mscf)
۱۳۴	دمای مخزن (°F)	۱/۳۸	ضریب حجمی نفت سازند (Rbbl/stb)
۰/۱۷۱	ویسکوزیته نفت (cp)	۶۶۸	نسبت گاز به نفت (scf/STB)
۰/۰۱۶	ویسکوزیته گاز (cp)	۲۰۰۱	عمق مینا (ftss)
۲۲/۸۶	درصد اشباع نفت (%)	۲۱۸۰	فشار متوسط مخزن در عمق مینا (psi)
۴/۲۹×۱۰ ^{-۶}	تراکم‌پذیری سنگ مخزن (1/psi)	۱۲۱۴	عمق تماس گاز-نفت (ftss)
۳/۱۸×۱۰ ^{-۶}	تراکم‌پذیری آب سازند (1/psi)	۲۹۹۸	عمق تماس نفت-آب (ftss)
۱۲۳۶/۴	حجم نفت فضای خالی (MMRbbl)	۴۵	°API
۵۴۱۵/۲	حجم فضای خالی مخزن (MMRbbl)	۶	تخلخل ماتریس (%)

جدول ۲- تقسیم‌بندی لایه‌های مخزن

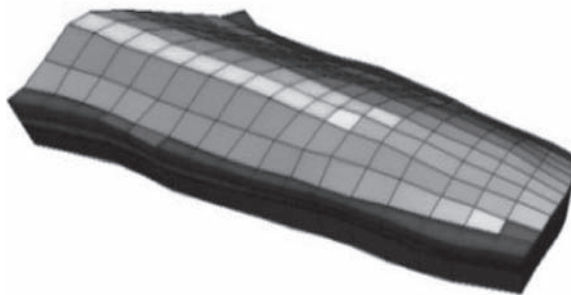
نام سازند	شماره لایه	ضخامت مفید سازند (ft)	نسبت ضخامت مفید به غیر مفید (NTG)	تخلخل (%)	حجم هیدروکربن فضای خالی	نفت اولیه (MMbbl)
ایلام	۱	۳۰۸	۰/۷۵	۷/۴۵	۴۲/۳۹	۴۱۰/۵
	۲	۱۷۱	۰/۵۴	۳/۸۸	۴۵/۸۳	۹۶
سورگاه	۳	۰	۰	-	-	۰
سروک	۴	۶۵	۰/۲۳	۲/۷۹	۳۷/۴۹	۱۷
	۵	۴۹	۰/۰۳۷	۴/۰۶	۳۵/۷۷	۱۰/۴

جدول ۳- خصوصیات مدل

شکاف‌دار	نوع محیط متخلخل مخزن
۱۷	تعداد گریدها در جهت X (N _x)
۱۰	تعداد گریدها در جهت Y (N _y)
۴۶	تعداد گریدها در جهت Z (N _z)
۷۸۲۰	تعداد کل گریدهای مخزن
۲۱۸۰	اندازه گرید در جهت X (ft)
۱۱۳۰	اندازه گرید در جهت Y (ft)
۱۱۶	اندازه گرید در جهت Z (ft)

ساخت مدل

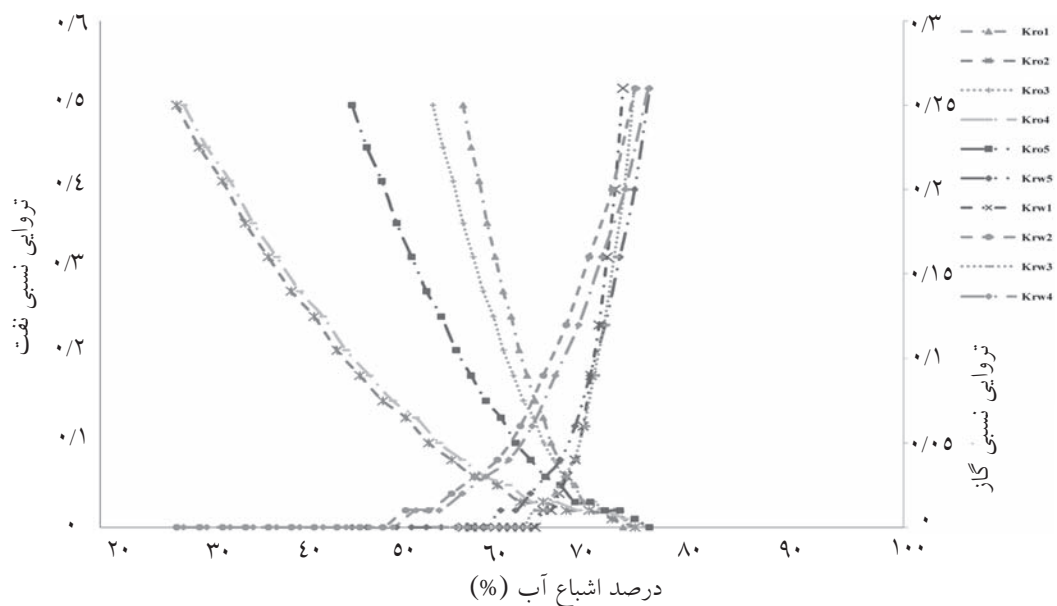
برای شبیه‌سازی تزریق متناوب آب و گاز، مدل سه بعدی و استاتیک میدان با استفاده از نرم‌افزار Flo Grid طراحی و ساخته شد (شکل ۲). مدل فوق شامل ۷۸۲۰ گرید بلوک (۱۷×۱۰×۴۶) و از نوع تخلخل دوگانه می‌باشد. اطلاعات مربوط به گریدبندی مخزن در جدول ۳ نشان داده شده است.



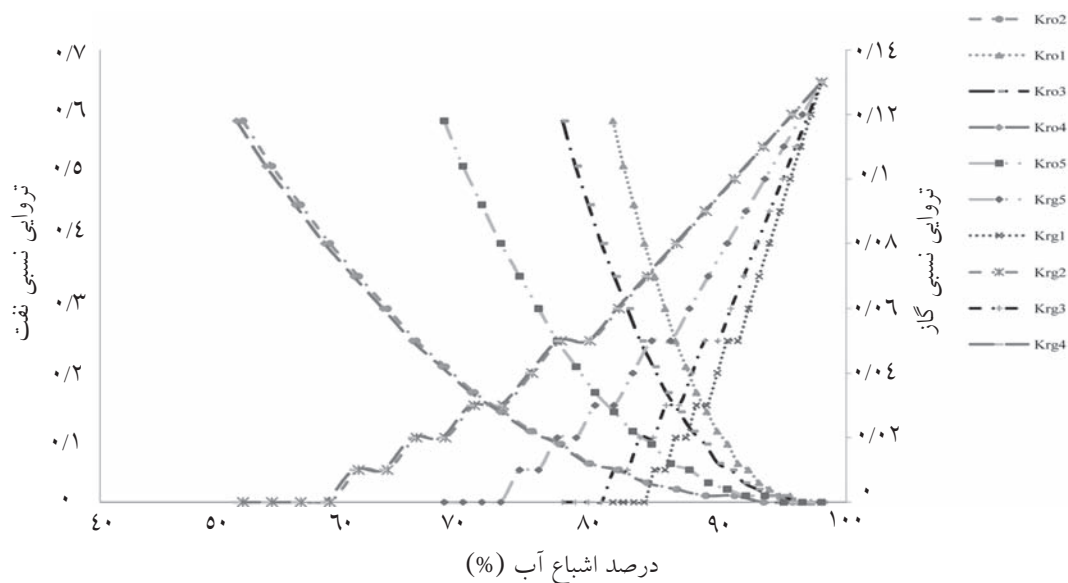
شکل ۲- مدل سه بعدی مخزن

اشباع آب - تخلخل و نتایج آزمایش‌های ویژه مغزه در مدل تعریف شد. بر این اساس برای هر یک از پنج لایه مخزن یک نوع سنگ در نظر گرفته شد. بنابراین منحنی‌های تراوایی نسبی آب - نفت و گاز - نفت و منحنی فشار مؤینگی آب - نفت و گاز - نفت برای پنج نوع سنگ مخزن ترسیم و در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. منحنی‌های تراوایی نسبی و فشار مؤینگی برای سیستم‌های آب - نفت و گاز - نفت در شکل‌های ۳ تا ۶ نشان داده شده‌اند.

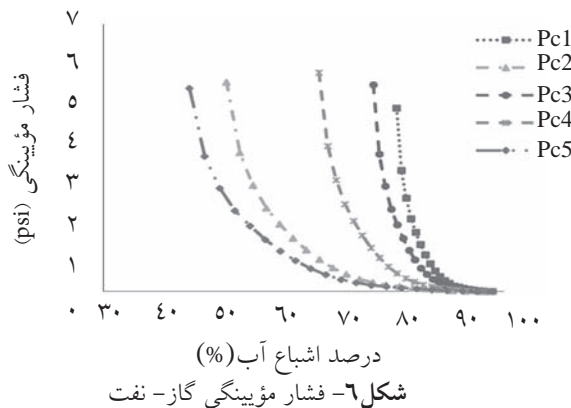
برای گریدبندی مخزن از روش Corner Point استفاده شد که نسبت به روش Block Center دارای دقت بیشتری است. اطلاعات مدل استاتیک مخزن اعم از تخلخل، تراوایی مطلق و نسبی، توزیع اولیه اشباع سیالات و همچنین خواص سیالات مخزن به کمک روش‌های Up Scaling برای کلیه گریدها محاسبه و به عنوان داده‌های ورودی به نرم‌افزار Eclipse 100، به منظور شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. انواع سنگ با استفاده از نمودارهای فراوانی سنگ، نمودار



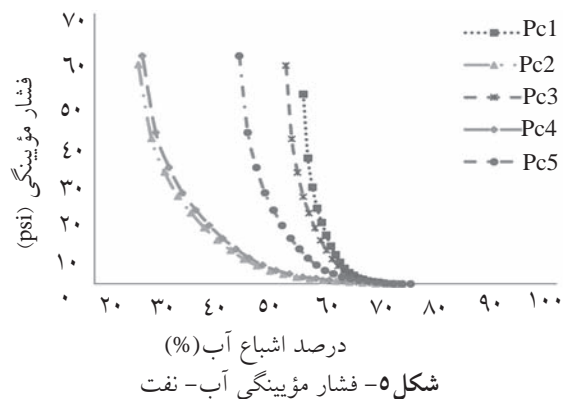
شکل ۳- تراوایی نسبی آب-نفت



شکل ۴- تراوایی نسبی آب-نفت



شکل ۶- فشار مؤینگی گاز- نفت



شکل ۵- فشار مؤینگی آب- نفت

(اساس کار شبیه‌ساز E100) به صورت زیر بیان می‌شود؛

$$\sigma = 4 \left(\frac{l}{l_x^2} + \frac{l}{l_y^2} + \frac{l}{l_z^2} \right)$$

در رابطه بالا l_x ، l_y و l_z به ترتیب طول ماتریس در جهات x ، y و z می‌باشد.

جدول ۴- خصوصیات شکاف

۰/۰۷	تخلخل شکاف (%)
۱۲	تراوایی شکاف (md)
۰/۰۰۰۸	عامل ارتباط سیال بین ماتریس- شکاف (1/ft ²)
۲۰	ارتفاع مؤثر گرید بلوک ماتریس در پدیده ریزش ثقلی (ft)
۲۲۱۰	فشار متوسط شکاف در عمق مبنا (psi)
۳۱۹/۱	حجم فضای خالی شکاف (MMRbbl)
۱۸/۴۰	حجم گاز شکاف (MMRbbl)
۳۰/۹۷	حجم نفت شکاف (MMRbbl)
۳۶۵/۴۸	حجم آب شکاف (MMRbbl)
۴۹/۳۷	حجم کل هیدروکربن شکاف (MMRbbl)

شبیه‌سازی تزریق متناوب آب و گاز

در روش WAG آب و گاز به طور متناوب به مخزن تزریق می‌شوند (شکل ۷). با توجه به شکل، دوره‌ای که تزریق گاز انجام می‌شود دبی تزریق آب صفر و برعکس دوره‌ای که تزریق آب انجام می‌شود دبی تزریق گاز صفر می‌باشد. عوامل و پارامترهای متعددی در موفقیت آمیز بودن پروژه تزریق WAG مؤثر می‌باشند. در این قسمت پارامترهایی مانند سیکل یا دوره تزریق^۱، نوع تزریق و روش تزریق مورد بررسی قرار می‌گیرند.

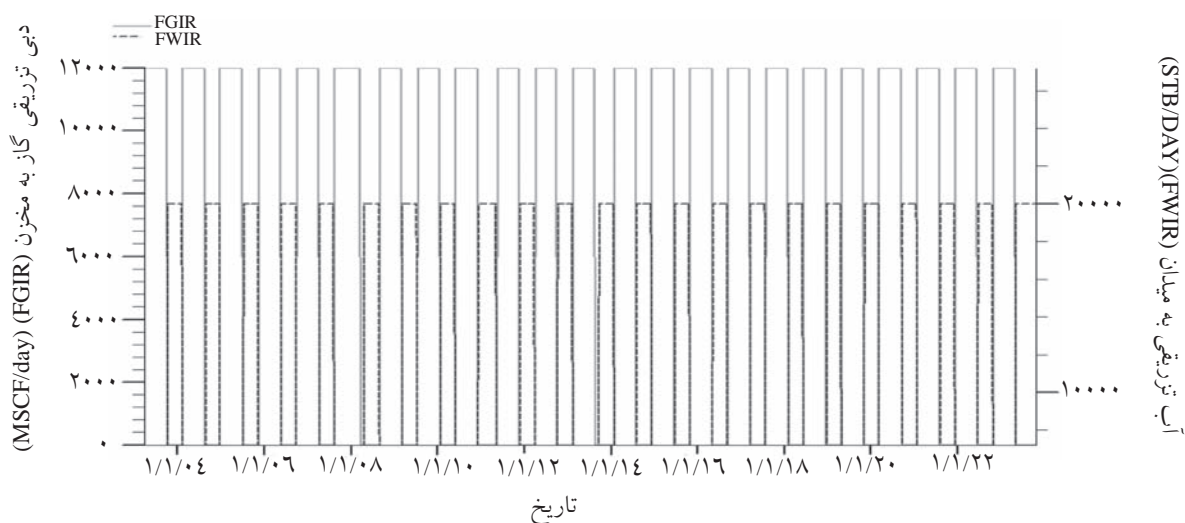
تأثیر خصوصیات شکاف بر تولید

مخازن کربناته تقریباً نیمی از مخازن دنیا را تشکیل می‌دهند و اکثر آنها نیز شکاف‌دار می‌باشند. بیش از دو سوم نفت موجود در این مخازن به دلیل اینکه اکثر آنها نفت دوست یا خنثی بوده و تراوایی ماتریکس آنها پایین می‌باشد به وسیله روش‌های طبیعی و ثانویه قابل برداشت نمی‌باشند. این عامل باعث می‌شود که تأثیر نیروهای رانشی و فرایندهای جابجایی نیز در این مخازن کاهش یابد. بنابراین مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی سیستم‌های شکاف‌دار، فرم تشکیل آنها و تأثیر شکاف بر فرایند تزریق برای انتخاب سناریوی مناسب به منظور افزایش بازدهی، تولید و چگونگی حرکت سیالات تزریقی و نفت در محیط متخلخل مخزن ضروری است [۱۸].

تخلخل و تراوایی شکاف از عوامل مؤثر بر تولید و افت فشار مخزن می‌باشند. چنانچه با کاهش تراوایی شکاف، دبی تولید کاهش و افت فشار بیشتر می‌شود.

تخلخل و تراوایی شکاف در مدل مورد مطالعه به ترتیب ۰/۰۷٪ و ۱۲ md می‌باشد. در جدول ۴ خصوصیات شکاف در مخزن مورد مطالعه آورده شده است. عوامل دیگری نیز مانند ارتباط سیال بین ماتریس- شکاف^۱ و ارتفاع مؤثر گرید بلوک ماتریس در پدیده ریزش ثقلی^۲ (فاصله بین شکاف‌ها)، در شبیه‌سازی مخازن شکاف‌دار مهم و تأثیرگذار هستند. مقادیر بسیار پایین فاصله بین شکاف‌ها موجب کاهش تولید و فشار مخزن می‌شود. فاکتور انتقال سیال بین ماتریس و شکاف (σ)، بیان‌کننده میزان انتقال نفت از ماتریس به شکاف می‌باشد. این پارامتر وابسته به طول ماتریس در جهات x ، y و z بوده و در رابطه کاظمی

1. Dual Porosity Matrix-Fracture Coupling
2. Effective Matrix Block Height for Gravity Drainage
3. Cycle Injection



شکل ۷- تزریق متناوب آب و گاز

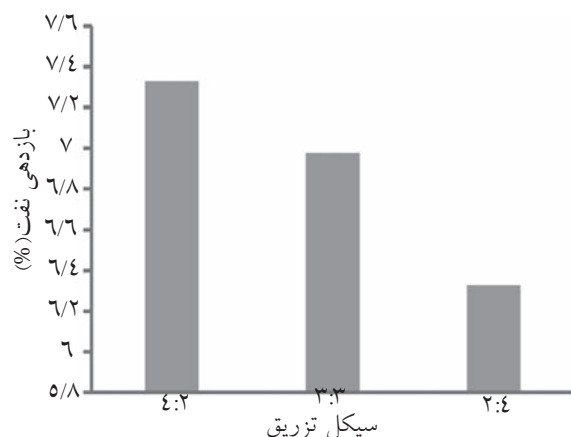
که سیکل تزریق ۲:۴، دارای بیشترین ضریب بهره‌دهی و تولید تجمعی می‌باشد. به طور کلی بررسی‌ها در میدان مورد مطالعه نشان می‌دهد در صورتی که دوره تزریق گاز بیشتر از آب باشد ضریب بهره‌دهی و تولید بیشتر است.

نوع تزریق

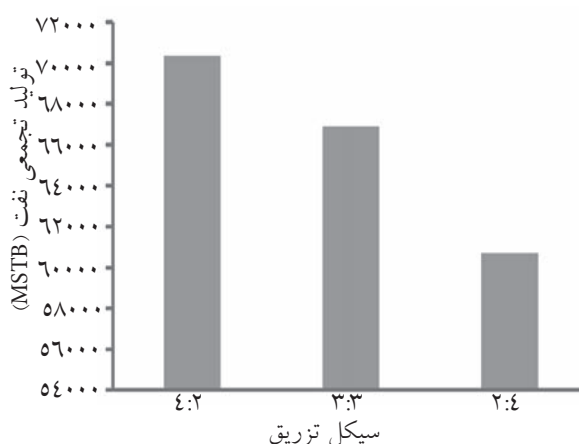
بسته به آب‌دوست یا نفت‌دوست بودن سنگ مخزن، تراوایی افقی و عمودی و شرایط پتروفیزیکی و لایه‌بندی مخزن در تزریق تناوبی، آب می‌تواند قبل از گاز و برعکس گاز قبل از آب به مخزن تزریق شود. روش تزریق در پروژه WAG باید طوری طراحی و انتخاب شود که فاز اولیه تزریق نه تنها موجب انباشت نفت نشود بلکه جابجایی و کاهش اشباع نفت باقی‌مانده را سبب بشود و شرایط مخزن را طوری تغییر دهد که فاز ثانویه تزریق موجب

سیکل تزریق

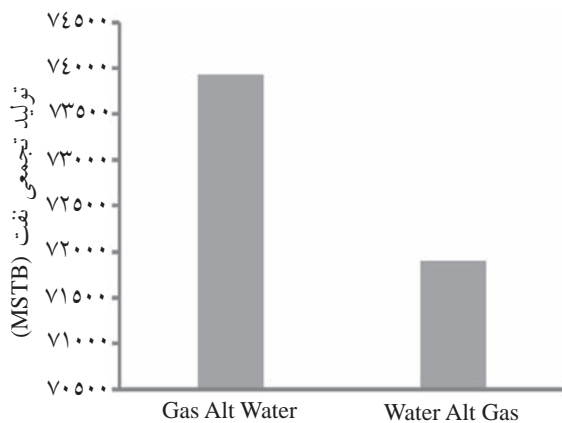
در این روش آب و گاز در دوره‌ها و سیکل‌های متناوب به مخزن تزریق می‌شوند. بنابراین مشخص کردن دوره تزریق آب و گاز از مهمترین مسائل و چالش‌های این روش می‌باشد. به طوری که انتخاب سیکل بهینه تزریق نه تنها باعث افزایش بازدهی و تولید می‌شود بلکه سبب کاهش حجم آب مورد نیاز و هزینه‌های تزریق نیز خواهد شد. پارامترهایی مانند در دسترس بودن، هزینه تهیه و تعیین نوع گاز تزریقی و نوع مخزن در تعیین سیکل و مدت زمان تزریق نیز مؤثر می‌باشند [۱۳]. در این قسمت در دوره تزریق یکسان (۶ ماه) سه سیکل ۲:۴، ۳:۳ و ۴:۲، شبیه‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفت (در سیکل ۲:۴، دو ماه گاز و چهار ماه آب تزریق می‌شود). نتایج روش‌های ذکر شده (شکل‌های ۸ و ۹) نشان می‌دهد



شکل ۹- تولید تجمعی در سیکل‌های مختلف تزریق

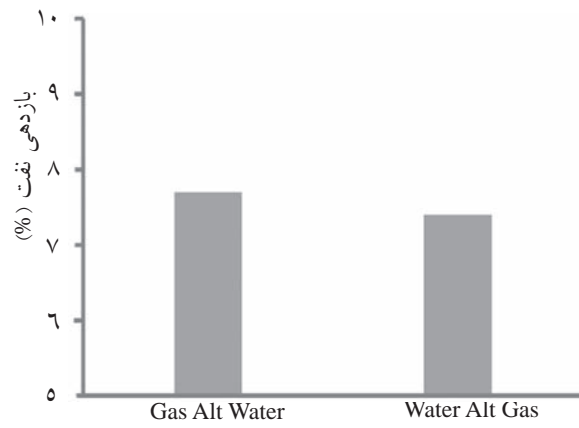


شکل ۸- ضریب بهره‌دهی در سیکل‌های مختلف تزریق



سناریو تزریق

شکل ۱۱- ضریب بهره‌دهی در روش‌های تزریق



سناریو تزریق

شکل ۱۰- ضریب بهره‌دهی در روش‌های تزریق

قسمت‌های جاروب نشده مخزن نسبت به روش‌های معمول تزریق آب و گاز انجام می‌پذیرد. این روش در مخازنی که به دلیل وجود ناهمگنی‌های شدید و یا زاویه دار بودن، سبب ناپایداری جبهه تزریق می‌شود به کار می‌رود. در این مطالعه گاز با دبی 18000 Mscf/day و آب با دبی 12000 STB/day با سیکل تزریق ۴:۲ و با نسبت تزریق ۱:۱ به مدت ۲۰ سال به مخزن تزریق می‌شود.

با توجه به اهداف مورد نظر در پروژه‌های ازدیاد برداشت و شرایط میدانی، چگونگی تزریق چرخه‌های آب و گاز در مکانیزم WAG به صورت‌های دیگری نیز طراحی می‌شود. دو روش تزریق هیبرید و پیوسته از این جمله روش‌ها بوده و در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

تزریق هیبرید^۲ WAG

در روش هیبرید ابتدا اسلاگ بزرگی از گاز برای مدت شش ماه تا یک سال (بسته به نوع و شرایط لایه هیدروکربنی) به مخزن تزریق و پس از آن تزریق متناوب آب و گاز با نسبت یک صورت می‌گیرد. در این مطالعه گاز با دبی تزریق 30000 Mscf/day و به مدت ۱ سال به مخزن تزریق و بعد از آن تزریق متناوب آب و گاز به مدت ۱۹ سال انجام می‌شود.

تزریق همزمان WAG

روشی که در آن آب و گاز به صورت پیوسته و در یک زمان به مخزن تزریق می‌شود، تزریق همزمان آب و گاز نامیده می‌شود. تزریق همزمان آب و گاز به دو روش

بهبود فرایند جابجایی نفت مخزن شود.

در این قسمت دو روش تزریق WAG طوری طراحی شدند که در روش اول تزریق گاز زودتر از آب و در روش دوم تزریق آب زودتر از گاز انجام شود. همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشخص است ضریب بهره‌دهی و تولید در صورتی که تزریق گاز زودتر از آب انجام شود، بیشتر است. دلیل این امر آب‌دوست بودن سنگ مخزن و بلوک‌شدن نفت به دلیل تزریق آب به عنوان فاز اول (در روش دوم) می‌باشد.

روش تزریق

Christensen (۱۹۹۸)، تزریق متناوب آب و گاز را به روش‌های امتزاجی، غیر امتزاجی، هیبرید (ترکیبی)، پیوسته و انتخابی پیوسته تقسیم بندی کرد. در میان روش‌های فوق تزریق امتزاجی ۷۹٪ و غیرامتزاجی ۱۸٪ از کل پروژه عملیاتی را به خود اختصاص داده و به عنوان بیشترین روش‌های مورد استفاده مطرح می‌باشند [۴]. در این قسمت نحوه طراحی شبیه‌سازی روش‌های غیرامتزاجی، هیبرید و پیوسته در طول دوره تزریق (۲۰ سال) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تزریق غیر امتزاجی^۱ WAG

در روش تزریق غیرامتزاجی WAG اسلاگ‌های گاز به صورت غیر امتزاجی و به‌طور متناوب با آب به مخزن تزریق می‌شوند. این نوع تزریق با هدف افزایش پایداری جبهه حرکت و افزایش سطح تماس سیالات تزریقی با

1. Immiscible WAG (IWAG)
2. Hybrid WAG (HWAG)

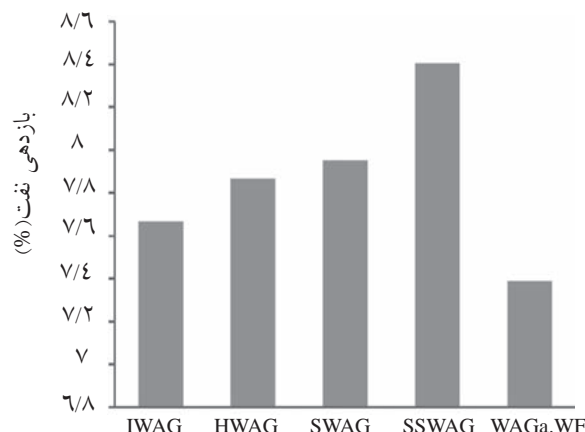
شناخته می شود. در طراحی این روش ابتدا آب به مدت ۵ سال و با دبی 20000 STB/day تزریق و در ادامه تزریق متناوب آب و گاز به مدت ۱۵ سال به مخزن انجام می شود.

مقایسه روش های مختلف تزریق WAG

در این قسمت روش های مختلف تزریق برای انتخاب روش بهینه مورد مقایسه قرار گرفته اند. در شکل های ۱۲ و ۱۳، ضریب بهره دهی و تولید تجمعی نفت در روش های ذکر شده نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱۲ مشخص است، تزریق انتخابی پیوسته WAG (SSWAG) دارای بیشترین ضریب بهره دهی می باشد. بنابراین می توان بیان کرد که به دلیل نوع تزریق و افزایش کارایی تزریق گاز و آب در حرکت و جابجایی نفت مخزن به سمت چاه تولیدی، بازده جابجایی در این روش از سایر روش های تزریق بهتر و مؤثرتر می باشد، به طوری که در شکل ۱۳ مشخص است، تزریق SSWAG دارای تولید تجمعی بیشتری نسبت به سایر روش های تزریق می باشد.

مقایسه روش های تزریق متناوب آب و گاز و تزریق منفرد آب و گاز

به دلیل اینکه تزریق WAG شامل روش های تزریق آب و گاز می باشد، مقایسه این روش با تزریق آب و گاز برای یافتن روش مناسب از دید برداشت و افزایش بازدهی

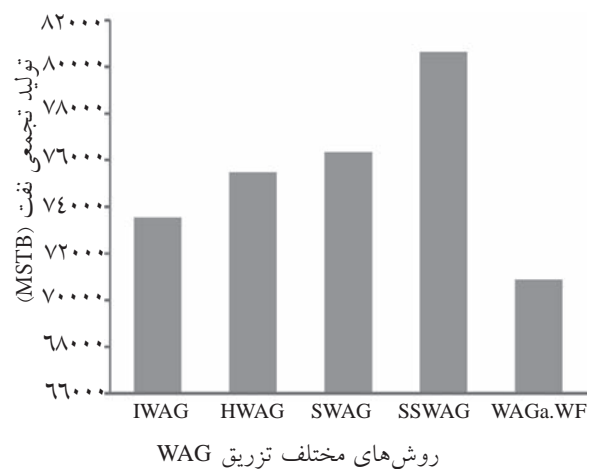


شکل ۱۳- تولید تجمعی در روش های تزریق

انجام می پذیرد. در روش اول آب و گاز در سطح با یکدیگر ترکیب و به صورت تک فازی به مخزن تزریق می شود. این روش، تزریق پیوسته^۱ WAG نامیده می شود. در روش دوم، توسط تکمیل دوگانه در چاه تزریقی عمودی، آب و گاز به طور همزمان به ترتیب به بالا و پایین لایه هیدروکربنی تزریق شده و به عنوان تزریق پیوسته انتخابی^۲ WAG مطرح می شود. در این روش اختلاف دانسیته بین سیالات تزریقی، موجب حرکت آب به سمت پایین و حرکت گاز به سمت بالا و به تبع آن ایجاد مکانیسم رانش و افزایش بازدهی فرایند جابجایی می شود [۱۰و۸]. بدین ترتیب جابجایی به دو صورت (میکروسکوپی و ماکروسکوپی) صورت پذیرفته و افزایش تولید را سبب می شود. بنابراین بازده نهایی و تولید در این روش نسبت به سایر روش های تزریق بسیار بیشتر است. تزریق پیوسته آب و گاز در چندین میدان در کانادا، میدان Siri در دریای شمال و Gllafaks در نروژ عملیاتی شده و گزارش ها نشان دهنده موفقیت آمیز بودن تزریق و افزایش بازدهی و تولید در این میادین می باشد.

تزریق WAG بعد از تزریق آب^۳

در این روش ابتدا آب به مدت چند سال به مخزن تزریق و در ادامه تزریق متناوب آب و گاز انجام می شود. از آنجایی که در این روش تزریق WAG بعد از آب انجام می شود، این نوع تزریق به عنوان یک روش ازدیاد برداشت ثالثیه



شکل ۱۲- ضریب بهره دهی در روش های تزریق

1. Simultaneous WAG (SWAG)
2. Selective Simultaneous WAG (SSWAG)
3. WAG after Water Flooding (WAG a.WF)

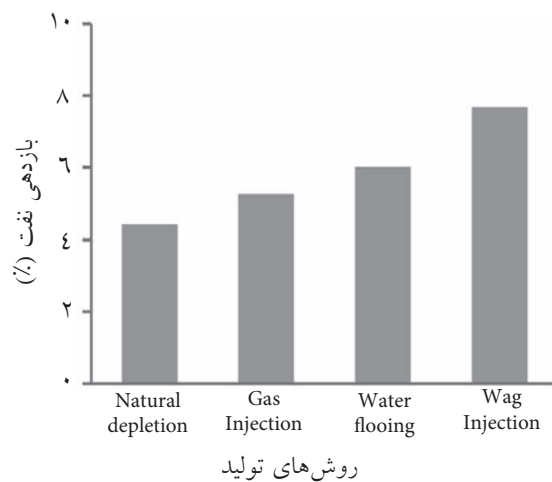
بررسی این شکل‌ها نشان می‌دهد که ضریب بازدهی و تولید تجمعی نیز در روش WAG از سایر روش‌ها بیشتر است. شکل ۱۷، نشان دهنده درصد اشباع نفت باقی‌مانده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است کمترین درصد اشباع نفت باقی‌مانده مربوط به تزریق WAG می‌باشد. این مطلب بیان می‌کند که بازدهی ماکروسکوپی و ماکروسکوپی در این روش از روش‌های تزریق آب و گاز مؤثرتر و مطلوب‌تر است. بنابراین استفاده از تزریق WAG بازده نهایی را افزایش و موجب می‌شود که نفت بیشتری از میدان برداشت و تولید شود.

مقایسه ضریب بهره‌دهی و تولید در روش‌های مختلف تزریق متناوب آب و گاز و تزریق جداگانه آب و گاز در الگوهای چهار و پنج نقطه‌ای تزریق

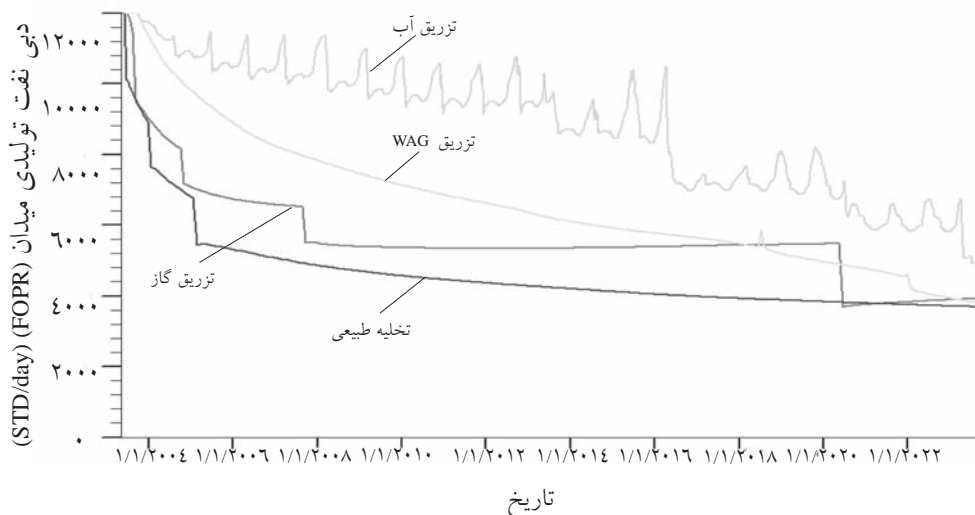
انتخاب روش بهینه تزریق از مهمترین عوامل مؤثر بر افزایش بازدهی و تولید در عملیات ازدیاد برداشت است. علاوه بر این فضای اطراف چاه‌ها، فاصله بین چاه‌های تولیدی و تزریقی، مکان‌یابی چاه‌ها و به‌طور کلی الگوی تزریق نیز از عوامل مؤثر بر افزایش راندمان جابجایی و بازدهی می‌باشد. در طراحی تزریق در این قسمت، محل چاه‌های تولیدی و تزریقی طوری انتخاب شده‌اند که فاصله بین چاه‌ها تقریباً برابر بوده تا از انگشتی شدن زودرس گاز و آب در یکی از چاه‌های تولیدی (به دلیل نزدیکی به چاه تزریقی) جلوگیری شود.

تولید ضروری است. برای انجام مقایسه صحیح و اصولی بین روش‌های فوق علاوه بر روش تزریق WAG، روش‌های تزریق آب و گاز مختلفی نیز طراحی و مورد مطالعه قرار گرفتند. سپس برای انجام مقایسه بین روش‌های فوق یک سناریو از هر روش که دارای بیشترین تولید بود، انتخاب شد. بنابراین مقایسه بین سناریوی بهینه هر روش که دارای تولید و بازدهی نهایی بالاتری بود، انجام پذیرفت.

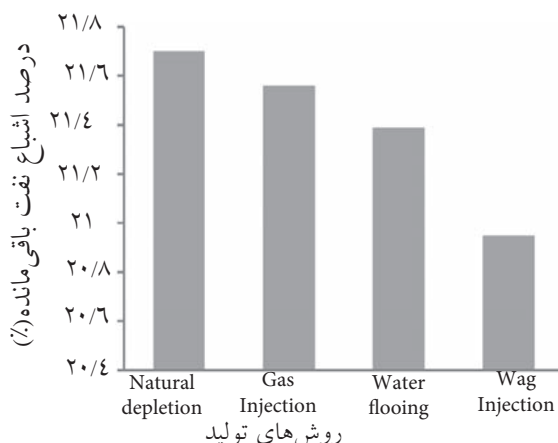
در شکل ۱۴، تولید روزانه در روش‌های ازدیاد برداشت مورد مقایسه قرار گرفت. همان‌طور که در این شکل مشخص است تزریق WAG دارای تولید بیشتری نسبت به سایر روش‌ها است. ضریب بهره‌دهی و تولید تجمعی در روش‌های تزریق WAG، آب، گاز و تولید طبیعی در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ آمده است.



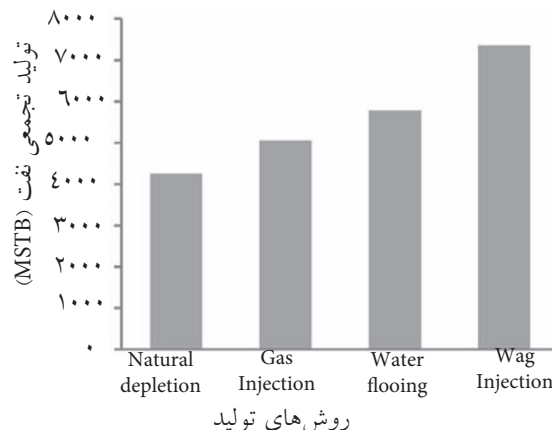
شکل ۱۴- تولید روزانه در روش‌های مختلف تولید



شکل ۱۵- ضریب بهره‌دهی در روش‌های مختلف تولید



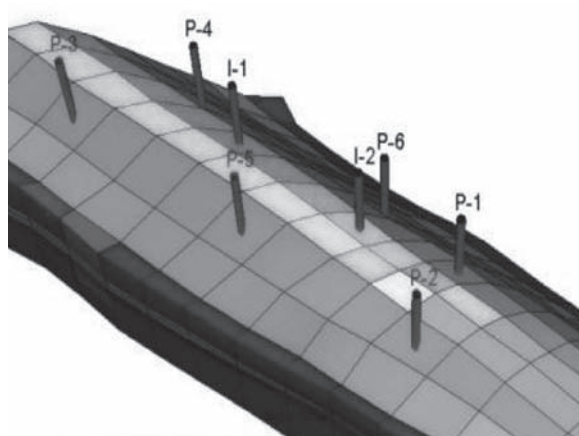
شکل ۱۷- درصد اشباع نفت باقی مانده روش های مختلف تولید



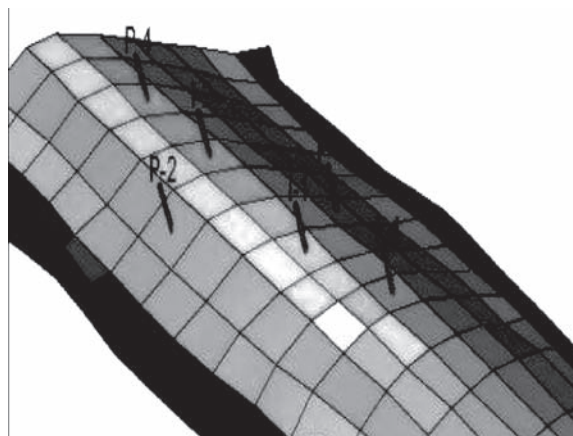
شکل ۱۶- تولید تجمعی در روش های مختلف تولید

در این روش تقریباً ۱/۵ برابر تزریق آب و گاز بوده و به میزان ۲۰ MMSTB بیشتر از روش های ذکر شده می باشد. به علاوه همان طور که در این شکل ها نشان داده شده است، از بین روش های تزریق آب و گاز، تزریق آب با الگوی تزریق ۴ نقطه ای دارای شرایط تولیدی مطلوب تری است. درصد اشباع نفت باقی مانده میدان در پایان دوره تولید در شکل ۲۲ نشان داده شده است. در این شکل تزریق SSWAG دارای کمترین درصد اشباع باقی مانده بوده و بنابراین راندمان جابجایی تزریق در این روش مناسب تر از سایر روش های مورد مطالعه می باشد.

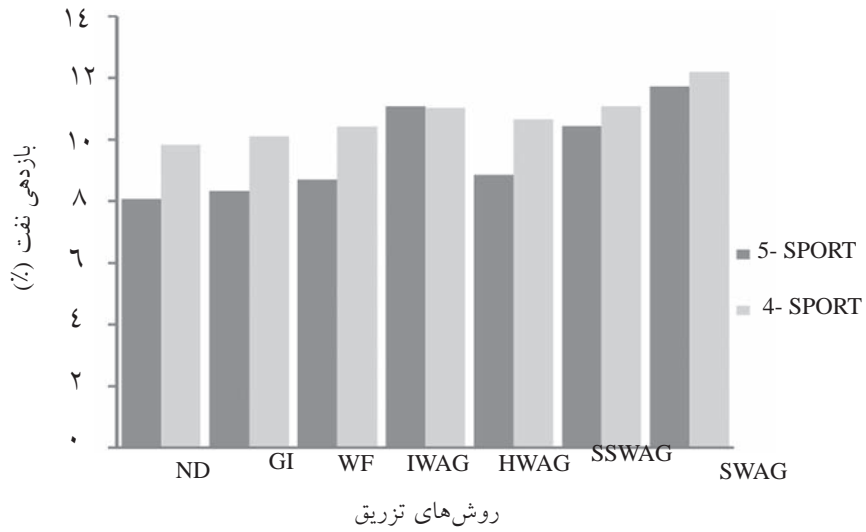
در این قسمت روش های مختلف تزریق متناوب آب و گاز (غیرامتزاجی، هیبرید و پیوسته و انتخابی پیوسته)، تزریق آب و گاز و تولید طبیعی در الگوهای چهار (۴چاه تولیدی-۲چاه تزریقی) و پنج (۶چاه تولیدی-۲چاه تزریقی) نقطه ای، طراحی و مقایسه شده اند (شکل های ۱۸ و ۱۹). در شکل های ۲۰ و ۲۱ ضریب بهره دهی و تولید تجمعی در روش های ذکر شده مورد مقایسه قرار گرفته اند. همان طور که در این شکل ها مشخص است، تزریق انتخابی پیوسته (WAG SSWAG) در الگوی ۴ نقطه ای دارای بالاترین ضریب بهره دهی و تولید است. به طوری که تولید تجمعی



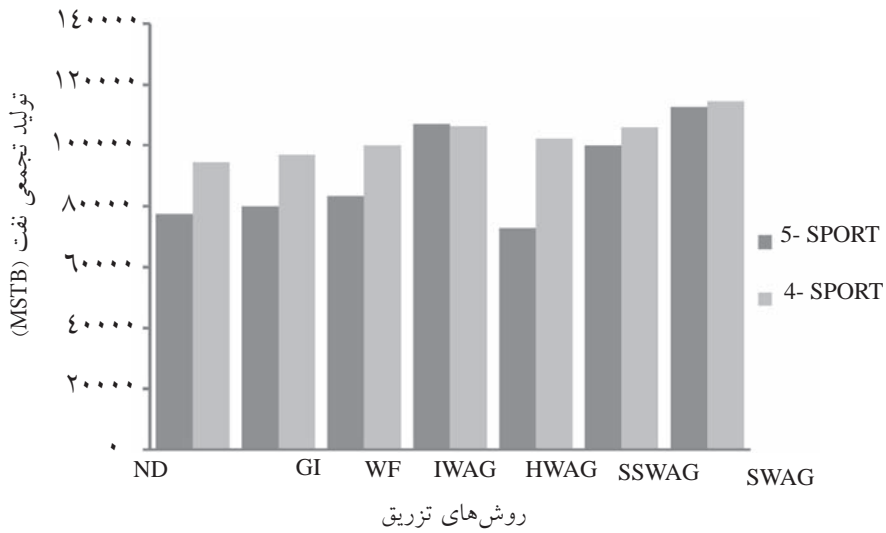
شکل ۱۹- الگوی پنج نقطه ای تزریق میدان x



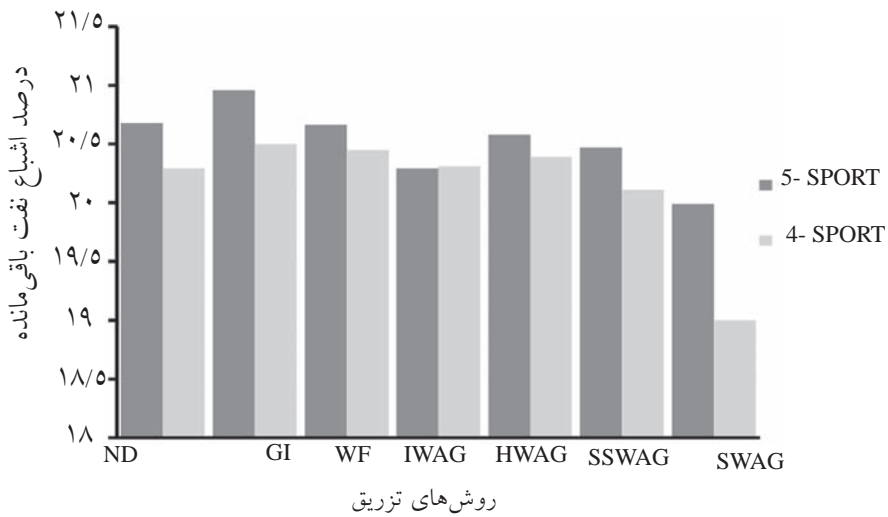
شکل ۱۸- الگوی چهار نقطه ای تزریق میدان x



شکل ۲۰- ضریب بهره‌دهی در روش‌های ازدیاد برداشت



شکل ۲۱- تولید تجمعی در روش‌های ازدیاد برداشت



شکل ۲۲- درصد اشباع نفت باقی مانده در روش‌های ازدیاد برداشت

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش‌های مختلف تزریق متناوب آب و گاز و تزریق جداگانه آب و گاز در یکی از مخازن شرکت ملی نفت مناطق مرکزی ایران، می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱- ضریب بهره‌دهی و تولید تجمعی در سیکل تزریق ۴؛۲ از دیگر سناریوهای تزریق بیشتر است. بررسی‌ها در میدان مورد مطالعه نشان می‌دهد در صورتی که دوره تزریق گاز بیشتر از آب باشد ضریب بهره‌دهی بیشتر خواهد شد.

۲- در روش WAG در صورتی که تزریق گاز زودتر از آب انجام شود (فاز آب به عنوان سیال ثانویه به مخزن تزریق شود)، نسبت به حالتی که تزریق آب زودتر و به عنوان سیال اولیه به مخزن تزریق شود، بازدهی و تولید بیشتر می‌شود.

۳- در میدان مورد مطالعه به دلیل آب‌دوست بودن سنگ مخزن تزریق آب دارای ضریب بازیافت بیشتری نسبت به تزریق گاز است.

۴- بازدهی و تولید بالاتر در روش SSWAG، نسبت به سایر روش‌های تزریق WAG، بیانگر بالاتر بودن جابجایی جارویی اعم از میکروسکوپی و ماکروسکوپی و کارآمدتر بودن این روش نسبت به سایر روش‌های تزریق است.

۵- ضریب بهره‌دهی و تولید تجمعی روش WAG نسبت به روش‌های تولید طبیعی، تزریق آب و گاز بیشتر است، لذا این روش به عنوان روش ازدیاد برداشت بهینه در میدان مورد مطالعه معرفی شد.

۶- تزریق WAG دارای درصد اشباع نفت باقی‌مانده

کمتری می‌باشد. بنابراین بازدهی جارویی (میکروسکوپی و ماکروسکوپی) در این روش نسبت به سایر روش‌های تزریق مطلوب‌تر است.

۷- از میان روش‌های مختلف تزریق آب، گاز و WAG در الگوهای ۴ و ۵ نقطه‌ای، تزریق انتخابی پیوسته آب و گاز (SSWAG)، در الگوی چهار نقطه‌ای دارای بالاترین ضریب بهره‌دهی و تولید تجمعی است.

۸- بازدهی بالاتر و درصد اشباع نفت باقی‌مانده کمتر در الگوی چهار نقطه‌ای نسبت به الگوی پنج نقطه‌ای نشان می‌دهد که افزایش چاه‌های تولیدی عملاً اثری بر افزایش بازدهی و تولید نداشته و تنها سرعت تولید را افزایش می‌دهد. بنابراین استفاده از الگوی پنج نقطه‌ای تزریق تنها موجب افزایش هزینه‌ها و مخصوصاً هزینه‌های حفاری چاه‌های تولیدی می‌شود.

۹- بازدهی و تولید پایین‌تر در روش تزریق پیوسته آب و گاز (SSWAG) نسبت به تزریق انتخابی پیوسته آب و گاز (SSWAG) بیانگر این مطلب است که در تزریق همزمان آب و گاز، تزریق آب و گاز به صورت تک فاز نسبت به تزریق جداگانه آب و گاز به بالا و پایین مخزن دارای راندمان جابجایی و تولید کمتری می‌باشد.

تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت و پشتیبانی شرکت ملی نفت ایران انجام شده است. نویسندگان از شرکت ملی نفت مناطق مرکزی به‌ویژه واحد مطالعات مخازن و پژوهش و توسعه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- [1] Skauge A. & Dale E.I., "Progress in immiscible WAG modeling", PP, SPE 111435, presentation at 2007 SPE/EAGE reservoir characterization and simulation Conference held in Abu Dhabi, UAE, 28-31 Oct 2007.
- [2] Berge L, Jange Stensen G, Crapez B & Quale E, "SWAG injectivity behavior based on siri field data", PP, SPE 75126, presentation at the SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium held in Tulsa, Oklahoma USA., 13-17. Apr 2002.
- [3] Christensen J.R., Stenby E.H. & Skauge A, "Review of WAG field experience", PP, SPE 71203, Presented at the SPE European Petroleum Conference held in Milan, Italy, 22-24. Oct 2001.
- [4] Sanchez L.N., "Management of water alternating gas (WAG) injection projects", PP, SPE 53714, presentation

at the 1999 SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference held in Caracas, Venezuela, 21–23. April 1999.

[5] Klov M. & Hustod N, “*Experimental investigation of various methods of tertiary gas injection*”, PP, SPE 80579, presented at the 2003 Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition, Houston USA., 13–17. Apr 2003.

[6] Quijada M.G., *Optimization of a CO₂ flood design wasson field - west texas*, Master Of Science Thesis, Texas A&M University, Aug 2005.

[7] Cobanoglu M., “*A Numerical study to evaluate the use of WAG as an EOR method for oil production improvement at B.Kozluca field*”, Turkey, PP, SPE 72127, presentation at the SPE Asia Pacific Improved Oil Recovery Conference held in Kuala Lumpur, Malaysia, 8–9. Oct 2001.

[8] Instefjord R. & Todnem C.A., “*10 Years of WAG injection in Lower Brent at the Gullfaks field*”, PP, SPE 78344, presentation at the SPE 13th European Petroleum Conference held in Aberdeen, Scotland, U.K., 29–31. Oct 2002.

[9] Shi W. & Corwith J, “*Kuparuk MWAG project after 20 years*”, PP, SPE 113933, presentation at the SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium held in Tulsa, Oklahoma USA., 19–23. Apr 2008.

[10] Rogers J.D. & Grigg R.B., “*A literature analysis of the WAG injectivity abnormalities in the CO₂ process*”, PP, SPE 59329, presented at the 2000 review SPE/DOE Improved Oil Recovery symposium on held in Tulsa, OK, 3-5. Apr 2000.

[11] Rehman T., *A Techno economical evaluation of miscible flooding*, Dalhousie university, June 2008.

[12] Barnawi M.T., *A Simulation study to verify stone’s simultaneous water and gas injection performance in a 5-spot pattern*, Master Of Science Thesis, Texas A&M University, May 2008.

[13] Bermude L. & Russell T.J., “*Parametric investigation of WAG floods above the MME*”, PP, SPE 84366, Presentation at Technical Conference Denver, 5–8. Oct 2007.

[14] Algharaib M., Gharbi R. & Malallah A., “*Parametric investigation of a modified swag injection technique*”, PP, SPE 105071, Presented at The 15th SPE Middle East Oil & Gas Conference Held in Bahrain, Kingdom of Bahrain, 11-14 Mar 2007.

[15] LaForce T. & Jessen K., “*Analytical and numerical investigation of multicomponent multiphase WAG displacements*”, PP, SPE 110264, presentation at the 2007 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Anaheim, California, U.S.A., 11–14 Nov 2007.

[16] Ghomin Y., Pope A.G. & Sepehrnoori K., “*Hysteresis and field-scale optimization of WAG injection*”, PP, SPE 110639, presentation at the 2008 SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium held in Tulsa, Oklahoma USA., 19–23. Apr 2008.

[17] Van Dijke M.I.J., Lorentzen M. & Sohrabi M., “*Pore-Scale simulation of WAG floods in mixed-wet micromodels*”, PP, SPE 113864, presentation at the SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium held in Tulsa, Oklahoma USA., 19–23. Apr 2008.

[18] Safdarian M., *Parametric study of WAG process its performance over the synthetic fracture model*, Master Of Science Thesis, Petroleum University of Technology at.