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

محمدجواد درویش‌نژاد*[۱]، قاسم زرگر[۲]، ابوالقاسم امامزاده[۱] و افشین جنت‌رستمی[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 وگاز 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 100 شبیه‌سازی و ضریب بهره‌دهی و تولید تجمعی 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 تجمعی 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

به‌طورکلی 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 تولید کننده نفت قرار

گرفته اســت. به دلیل افت فشــار در مخازن ایران، استفاده از روش‌های ازدیاد برداشت مناسب برای تثبیت و افزایش فشــار بیش از پیش احساس می‌شود. با وجود ذخایر عظیم گاز در کشــورمان، اســتفاده از روش‌های ازدیاد برداشــت مانند تزریق متناوب آب و گاز (WAG)[1] با ضریب بازیافت بالاتر نســبت به روش‌های معمول امتزاجی، غیرامتزاجی و تزریق گاز ضروری اســت. در روش تزریق WAG، آب و گاز در ســیکل‌های زمانی مشخص شده به طور متناوب به مخزن تزریق می‌شوند. افزایش بازدهی در این روش به‌دلیل افزایش سطح تماس سیال تزریقی با نواحی جاروب نشده مخصوصــاً مناطقی که قبلاً به دلیل حرکت گاز به ســمت بــالا (در تزریق گاز) و یا حرکت آب به ســمت پایین (در تزریق آب) تحت تاثیر قرار نگرفته‌اند، می‌باشد [۱]. در این روش، گاز تزریق شــده حفره‌های دارای میزان اشباع بالای نفت را اشــغال و به این ترتیب باعث به حرکت درآوردن نفت بخش‌های جاروب نشــده مخزن می‌شوند. در ادامه با تزریــق آب نیز نفت باقی‌مانده و محصور شــده در اطراف ســنگ‌های مخزن حرکــت کرده و موجب کاهش بیشــتر میزان اشــباع نفت و افزایش بازدهی تولید می‌شود [۲و۳]. به‌علاوه تزریق آب بعد از گاز موجب جلوگیری از افزایش درصد اشــباع و تحرک نســبی گاز، کنترل و کاهش نسبت تحــرک و ایجاد جبهــه حرکت پایدار در مخزن می‌شــود. این جبهه ســبب جلوگیری از ایجاد پدیده انگشــتی شدن زودرس گاز در چاه تولیدی می‌گردد [٤]. به‌طورکلی درصد اشــباع نفت باقی‌مانده در تزریق WAG کمتر از روش‌های معمول تزریق آب و گاز می‌باشــد. لذا این روش پتانســیل مناســبی برای افزایش راندمان جابجایی ماکروسکوپیک و میکروسکوپیک مخزن دارد [۳و٤].

در این روش، Cole در اواخر دهه ٦٠ با انجام مطالعات آزمایشــگاهی و میدانی، افزایش بازدهی و تولید در ناحیه ســه فازی ایجاد شــده در مخزن را نتیجه تغییرات کشش ســطحی گاز – نفت عنــوان کرد. وی بر پایه مشــاهدات خویش در یک سیســتم سه فازی شامل آب، نفت و گاز با توجه به تمایل ســیالات به آرایش تعادلی با حداقل انرژی، کشش سطحی سیستم گاز – نفت را کمتر از کشش سطحی گاز – آب فــرض کرد. بنابراین در این حالت مولکول‌های گاز بــه اجبار در مجاورت و تماس بــا نفت قرار گرفته و موجب افزایش حجم قطرات نفت می‌شــوند. با جابجایی نفت توســط آب تزریقی در صورت وجود حباب‌های گاز در قطرات نفت، میزان نفــت باقی‌مانده در مخزن به میزان حجــم حباب‌های گاز کاهش می‌یابــد. بدین‌ترتیب تزریق متناوب آب و گاز موجب کاهش اشباع باقی‌مانده و افزایش ضریب بهره‌دهی مخزن می‌شود [۵].

مروری بر مقالات و پژوهش‌های انجام شده

تزریــق متنــاوب آب و گاز، اولین بار در ســال ۱۹۵۷ در آلبرتا انجام و نتایج موفقیت‌آمیز آن گزارش شد [٦]. بعد از آن و خصوصاً در دو دهــه اخیر به‌دلیل مزایای فراوان این روش نسبت به روش‌های تزریق جداگانه آب و گاز (مانند کنترل تحرک نســبی فازهای جابجا شونده و جابجا کننده، ممانعت از انگشتی‌شــدن زودرس گاز در چاه‌های تولیدی نفت، قابلیت تولید نفت باقی‌مانده از مناطق جاروب نشده در تزریــق آب و یا تزریق گاز، ایجاد جبهه پیشــروی قابل کنترل و پایدار، قابلیت اســتفاده از ابزار عملیاتی روش‌های تزریق آب و گاز) در میادیــن مختلف جهان مانند امریکا، کانادا، دریای شمال، روســیه، ترکیه و ونزوئلا، عملیاتی و اجرا شــدند. در طی این سال‌ها به‌منظور درک واقعیت‌ها و تغییرات شــرایط 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 شبیه‌ســاز ECLIPSE100 به مقایسه و بررسی روش‌های تزریــق غیرامتزاجی گاز و WAG در میدان Baty Kozluca در ترکیه پرداخت. بررســی‌های وی نشــان داد که تزریق غیرامتزاجی گاز به‌دلیل نســبت تحرک نامناســب، 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 بررســی تزریقWAG و مقایســه آن با تزریق آب و گاز در لایه‌های با تراوایی متفاوت میدان دریای شــمال پرداختند. آنها عنوان داشــتند که انگشتی‌شــدن آب و گاز

1.Water Alternating Gas (WAG) Injection

در لایه‌هـای با تراوایی بالاو عدم حرکت و فرایند جاروبی نامناسـب در لایه‌هـای بـا تراوایی پاییـن موجب کاهش بازدهـی تزریق در ایـن روش‌ها می‌شـود. مطالعات آنها نشـان داد که تزریـق تناوبـی آب و گاز در روش WAG موجـب جلوگیری از حرکت گاز در لایه‌هـای با تراوایی بـالا و ایجاد ناحیه سـه فازی در مخـزن و پایداری جبهه حرکت می‌شـود. لذا این روش بازدهی بالاتری نسـبت به روش‌هـای تزریـق آب و گاز دارد [۵]. Shi و همکاران با اسـتفاده از نتایج میدانی به‌دسـت آمده به مطالعه و بررسی دوره ۲۰ سـاله تزریق WAG در میدان Kuparuk در شمال آلاسکا پرداختند. آنها ابراز داشتند که اگرچه در ابتدا تزریق گاز به‌عنـوان روش ازدیاد برداشـت در این میدان انتخاب و انجام شـد، اما به‌دلیل انگشتی‌شـدن زودرس و افزایش GOR، برای رفع این مشـکل تزریق WAG پیشنهاد و مورد اسـتفاده قرار گرفت. به طوری که در طـول دوره تزریق، تولید نفت به میـزان MMSTB ۱۲۰ افزایش پیدا کرد [۸]. Instefjord نیز به بررسـی ۱۰ ساله تزریق WAG در میدان Gullfaks پرداخت. مطالعات وی نشـان می‌دهد که در این میـدان در طـول دوره تزریق، تولید نفت تقریبـاً به میزان MMSTB ۲ بیشـتر از تولید طبیعی می‌باشد. وی بیان کرد کـه تزریق WAG در این میـدان موجب افزایش بازدهی و راندمان جابجایی و کاهش درصد آب تولیدی می‌شود [۸].

به‌علاوه گزارشـات دیگری نیـز در مورد تزریقWAG توسـط Trnerr در میدان Seeligsou، Quale و همکاران در میدان Stephansen ،Siri در میدان Joffre Viking، Skauge وAarra در میـدان Snorer و Quraini و همکاران در میدان West sak منتشـر شـد که نتایج نشـان‌دهنده 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 سراسـر 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 برداشـت بـه کمـک فرایند تزریـق WAG تحت تأثیـر پارامترهایـی مانند هتروژنسـی ولایه‌بنـدی مخزن، الگـوی تزریق، اندازه اسـلاگ تزریقی، نسـبت WAG و غیره می‌باشـد. بنابراین بـه کار بردن و مدیریت این روش نیازمند بررسی‌های زمین‌شناسی، شناخت مخزن و عملیات بهره‌بـرداری و مدیریت مخزن می‌باشـد. در این قسـمت 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 می‌باشـند. هتروژنسی عمودی مخزن بـر عملکرد تزریق گاز مؤثر و ممکن اسـت باعث افزایش بازدهی جابجایی تزریق شـود. اما به‌طورکلی موجب ایجاد پدیده تفکیک ثقلی و افزایش سرعت حرکت سیال تزریقی و کاهش بازدهی نفت می‌شود. در این حالت گاز و آب به‌دلیل وجود لایه‌های پرتراوا به‌ترتیب به قسمت بالا و پایین مخزن رفته و بدون اینکه بازدهی را به‌طور محسوسی افزایش دهند به سـمت چاه تولیدی حرکت می‌کنند. هتروژنسی مخزن، تزریق و جابجایی را در فرایند سیلابزنی کنترل می‌کند. نتایج مطالعات شبیه‌سـازی مخزن نشـان می‌دهد که نسبت‌های بـالای تراوایی افقی به عمـودی (Kh/Kv) موجب افزایش قابل ملاحظه تولید نفت در فرایند تزریق WAG می‌شـود.

در مخازن لایه‌بندی‌شده (لایه‌دار) بزرگ، تراوایی بالای برخـی از لایه‌ها موجب انگشتی‌شـدن ویسـکوزیته و در نتیجه کاهش بازدهی جابجایی می‌شـود. در فرایند WAG هنگامی که آب تزریق می‌شـود به‌سـرعت گاز را جابجا و همه لایه‌ها را به یک تحرک نسـبی نزدیک به حالت اولیه مخزن می‌رسـاند و بدین‌ترتیب آب تزریقی موجب کاهش تحـرک در لایه هـای پرتراوا و افزایش سـطح تماس گاز تزریقی با نفت مخزن و افزایش تولید می‌شود [۱۱].

الگوی تزریق

الگـوی تزریـق و فضـای اطراف چاه‌هـا، تأثیر مهـم و قابل توجهـی بر بازدهی جاروبی مخـزن 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 نسـبت به سـایر الگوهای تزریق موجب شده که این الگو

در فرایندهای عملیاتی انجام شـده تاکنون بیشـترین استفاده و کاربرد را داشته باشد [۱۲].

اندازه اسلاگ تزریقی

اندازه و حجم اسلاگ تزریقی، بیان‌کننده مقدار تجمعی گاز تزریقی در فرایند تزریق است. این مقدار به صورت درصد حجم هیدروکربن و فضای خالـی مخزن(%HCPV) بیان می‌شـود. انتخاب مقدار بهینه این پارامتر در طراحی فرایند تزریق (مخصوصاً تزریق امتزاجی) مهم و اساسی می‌باشد. بازده نهایی و تولید، وابسته به اندازه اسلاگ تزریقی است. امـا به‌طورکلی افزایش آن موجب افزایـش بازدهی نهایی نمی‌شود. شـرایط اقتصادی پروژه مانند قیمت نفت و گاز تزریقی، مدت زمان رسـیدن به افزایش بازدهی و تولید بر مقدار بهینه اسلاگ تزریقی 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، محاسـبه می‌شـود. مقدار بهینه اندازه اسلاگ تزریقی باید در هر نمونه مجزا و جداگانه اندازه‌گیری شـود [۱۳].

تأثیر ترکیب و میزان نمک موجود در آب تزریقی

مهاجـرت ذرات ریز جامد درون محیـط متخلخل مخزن یکی از مواردی اسـت که دارای بیشترین تأثیر را بر قابلیت تحرک سـیال (یا تراوایی نسبی) از سـنگ مخزن داشته و باعث کاهش آن می‌شـود. Gray و Rex در مطالعه‌هایشان در مـورد مهاجرت میـکا و کائولونیت متوجه شـدند که مهاجـرت ذرات ریـز به‌وسـیله تغییر درصـد نمک و یا تغییر ناگهانی نسـبت یون‌های موجود در آب شـور باعث کاهش تراوایی می‌شـوند. بنابراین یکی از اولین عامل‌هایی کـه در مهاجرت ذرات ریز مطرح اسـت، درصد وترکیب نمک موجود در آن می‌باشـد. مطالعات آزمایشـگاهی نیز نشـان می‌دهد کـه درصد نمک، ترکیـب و pH آب دارای بیشـترین تأثیر در جابجایـی میکروسـکوپیک و بازدهی نفت به‌وسـیله تزریق آب در فرایند آشـام می‌باشد [۱٤].

نسبت WAG

نسـبت WAG عبارتست از نسبت حجم کل تزریق آب به گاز. محاسـبه نسبت WAG بهینه و اسـتفاده از آن یکی از پارامترهای مهم طراحی اسـت که بر روی شرایط عملیاتی و اقتصادی پـروژه تاثیر زیادی دارد. بـا مطالعه، پیش‌بینی وتجارب به‌دست‌آمده از شرایط پروژه، تزریق گاز پیشنهاد می‌شـود که نسـبت WAG در پروژه تزریق WAG بعد از افزایش مقدار بهینه گاز تولیدی (GOR)، افزایش یابد. افزایش نسـبت WAG در این مرحله باعث افزایش کنترل نسـبت تحرک و جلوگیری از ایجاد پروفایل گاز تولیدی می‌شود. محاسبه نسبت WAG بهینه تحت تأثیر نوع ترشوندگی سنگ مخـزن نیز قـرار دارد. به‌عنوان مثال نسـبت WAG بالا در فرایند بازدهی نفت در مخازن آب دوست بیشترین تأثیر را داشـته و باعث کاهش مقدار نفت باقی‌مانده می‌شود [۱۵].

تراوایی نسبی

تراوایی نسـبی یکی از پارامترهای فیزیکی مهم است. این پارامتر شـامل اثر خصوصیات ترشـوندگی، درصد اشباع سـیالات و هتروژنسی سنگ مخزن می‌باشد. تزریق تناوبی آب و گاز در طـول فراینـد تزریـق (که به‌هـدف تغییر و افزایش بازدهی سطحی و عمودی انجام می‌پذیرد)، موجب تغییر درصد اشـباع سـیالات در هر دوره می‌شود. در ادامه تغییر درصد اشـباع موجب تغییر در تراوایی نسبی سیالات تزریقی می‌شـود. یکـی از مهمترین مسـائلی که در نتیجه تغییر تراوایی نسـبی رخ می دهد، کاهش تزریق‌پذیری در طول دوره ازدیاد برداشت اسـت. بنابراین تزریق‌پذیری و مخصوصاً تزریق‌پذیری آب یکی از مواردی اسـت که بعد از سیکل تزریق گاز تغییر و کاهش می‌یابد. بنابراین مطالعه و بررسی کمی نمودارهای تراوایی نسبی به‌منظور پیش بینی عملکرد تزریق گاز و آب در این روش بسیار مهم است [۱٦].

خصوصیات گاز تزریقی

یکی ازمهمترین سؤالاتی که برای طراحی فرایند مطرح است انتخاب گاز تزریقی است. گازهای تزریقی مورد استفاده در پروژه‌های ازدیاد برداشت به‌طورکلی به سه دسته CO_2، گاز هیدروکربنی و غیرهیدروکربنی تقسـیم می‌شوند. گازهای هیدروکربنی مورد استفاده در تزریق، شامل گازهای تولیدی مخزن می‌باشـند. کریستنسن و همکاران پیشنهاد کردند که تزریـق گاز در میادین دریایی هیدروکربنی و در بقیه موارد دی‌اکسـید کربن باشـد [۳]. امروزه در اکثر میادین دریایی برای تزریق از گازهـای هیدروکربنی تولیدی همان میدان استفاده می‌شود. اماانتخاب نهایی گاز بستگی به تخمین و محاسبه عوامل گوناگون از جمله هزینه‌های انجام طرح و چگونگی

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 به‌دلیل در دسترس‌بودن گاز هیدروکربنی و دیگر ملاحضات اقتصادی طرح، از تزریق امتزاجی این گاز در پروژه استفاده شد [٦].

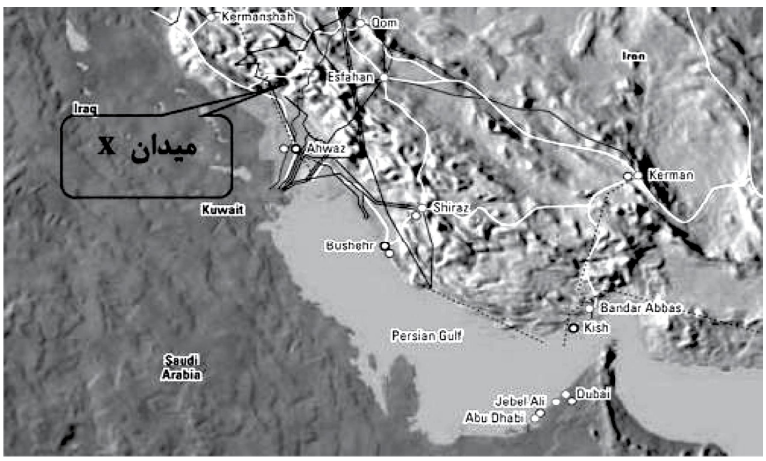
ملاحضات اقتصادی پروژه تزریق WAG

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. به‌علاوه هزینه‌های حفاری چاه‌های تزریقی جدید، نمونه‌گیری، تعمیر و نگهداری چاه‌ها و هزینه‌های مطالعه و بررسی فرایندهای بهینه تزریق امتزاجی و غیرامتزاجی 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 انگشتی‌شدن و حرکت رو به پایین آب و یا رو به بالای گاز، از دست رفتن مخزن را سبب شود، به‌طوری‌که 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 ۱۳٤۸ با حفر چاه ۱ در منتهی‌الیه جنوب شرقی میدان کشف و به‌دنبال آن چاه‌های توصیفی ۲ و ۳ در محور ستیغی در سال ۱۳٥٤ حفاری شدند. میدان مورد مطالعه یک میدان نفتی و دارای نفت مرغوب با درجه سبکی API ٤٥ بوده و نسبت گاز به نفت و ضریب حجمی نفت آن به‌ترتیب ٦٦۸ scf/STB و ۱/۳۸ Rbbl/STB می‌باشد (جدول۱). براساس اطلاعات پتروفیزیکی و زمین‌شناسی، این مخزن از سه سازند ایلام، سورگاه و سروک تشکیل شده است. به‌دلیل 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 (زون‌های۱و۲)، سازند سورگاه به یک زون (زون۳) و سازند سروک به دو زون (زون‌های٤و٥) تقسیم شده است (جدول۲).



شکل۱- موقعیت میدان مورد مطالعه

جدول۱- مشخصات مخزن مورد مطالعه

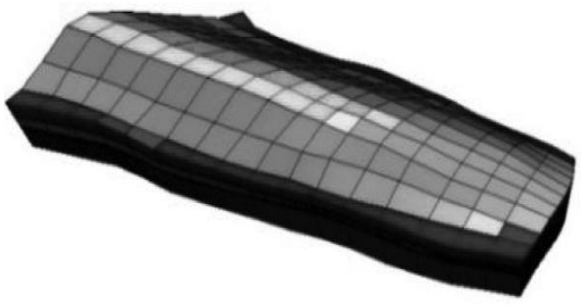
ضریب حجمی گازسازند (Rbbl/Mscf)	۱/۱۳	دانسیته نفت (lb/ft۳)	٤۳/۹۸
ضریب حجمی نفت سازند (Rbbl/stb)	۱/۳۸	دمای مخزن (°F)	۱۳٤
نسبت گاز به نفت (scf/STB)	٦٦۸	ویسکوزیته نفت (cp)	۰/۱۷۱
عمق مبنا (ftss)	۲۰۰۱	ویسکوزیته گاز (cp)	۰/۰۱٦
فشار متوسط مخزن در عمق مبنا (psi)	۲۱۸۰	درصد اشباع نفت (٪)	۲۲/۸٦
عمق تماس گاز-نفت (ftss)	۱۲۱٤	تراکم‌پذیری سنگ مخزن (1/ psi)	٤/۲۹×۱۰$^{-٦}$
عمق تماس نفت-آب (ftss)	۲۹۹۸	تراکم‌پذیری آب سازند (1/ psi)	۳/۱۸×۱۰$^{-٦}$
°API	٤٥	حجم نفت فضای خالی (MMRbbl)	۱۲۳٦/٤
تخلخل ماتریس (٪)	٦	حجم فضای خالی مخزن (MMRbbl)	٥٤۱٥/۲

جدول۲- تقسیم‌بندی لایه‌های مخزن

نام سازند	شماره لایه	ضخامت مفید سازند (ft)	نسبت ضخامت مفید به غیرمفید (NTG)	تخلخل (٪)	حجم هیدروکربن فضای خالی	نفت اولیه (MMbbl)
ایلام	۱	۳۰۸	۰/۷٥	۷/٤٥	٤۲/۳۹	٤۱۰/٥
	۲	۱۷۱	۰/٥٤	۳/۸۸	٤٥/۸۳	۹٦
سورگاه	۳	۰	۰	–	–	۰
سروک	٤	٦٥	۰/۲۳	۲/۷۹	۳۷/٤۹	۱۷
	٥	٤۹	۰/۰۳۷	٤/۰٦	۳٥/۷۷	۱۰/٤

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 (شکل۲). مدل فوق شامل ۷۸۲۰ گرید بلوک (٤٦×۱۰×۱۷) و از نوع تخلخل دوگانه می‌باشد. اطلاعات مربوط به گریدبندی مخزن در جدول ۳ نشان داده شده است.

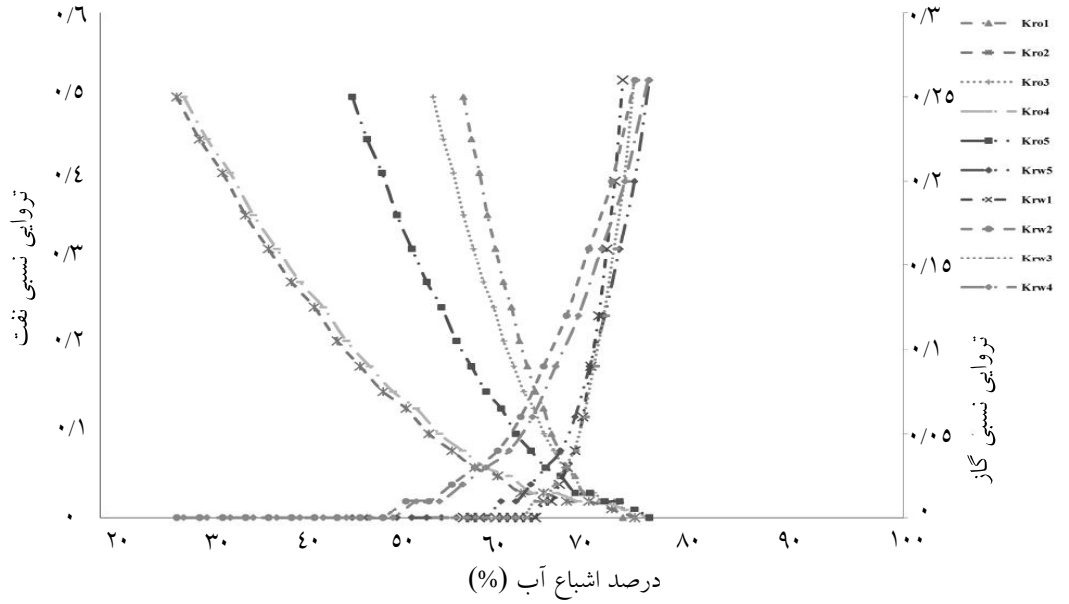


شکل۲- مدل سه بعدی مخزن

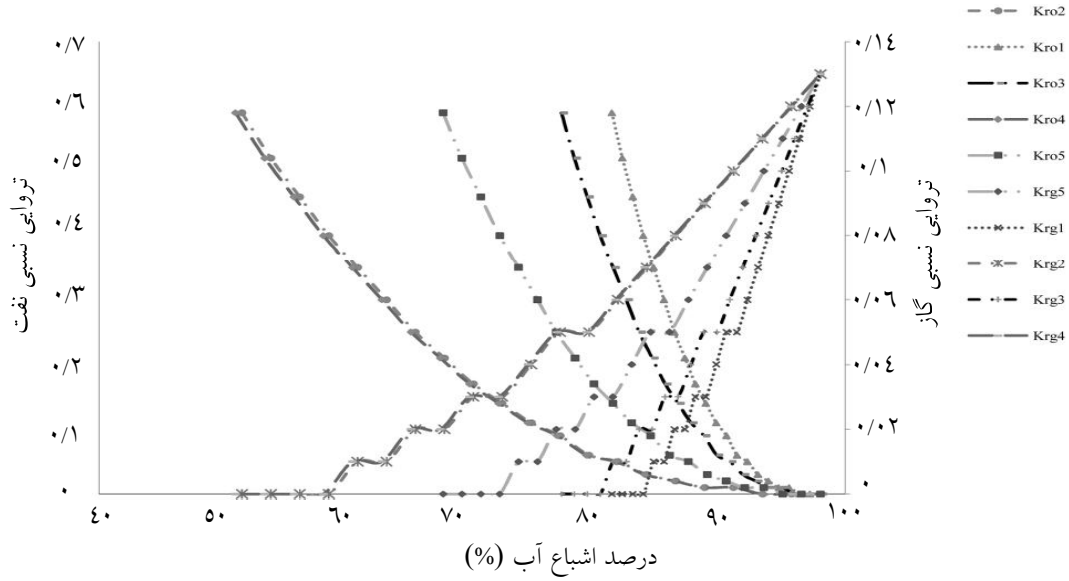
جدول۳- خصوصیات مدل

نوع محیط متخلخل مخزن	شکاف‌دار
تعداد گریدها در جهت X (N_X)	۱۷
تعداد گریدها در جهت Y (N_Y)	۱۰
تعداد گریدها در جهت Z (N_Z)	٤٦
تعداد کل گریدهای مخزن	۷۸۲۰
اندازه گرید در جهت X (ft)	۲۱۸۰
اندازه گرید در جهت Y (ft)	۱۱۳۰
اندازه گرید در جهت Z (ft)	۱۱٦

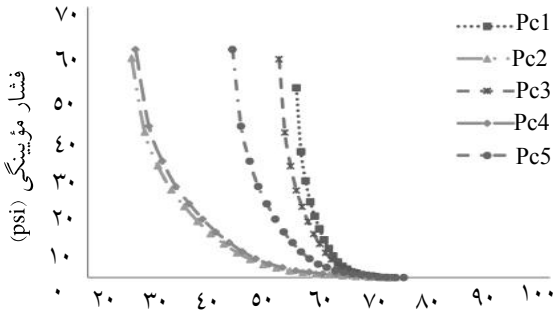
برای گریدبندی مخزن از روش Corner Point استفاده شد که نسبت به روش Block Center دارای دقت بیشتری است. اطلاعات مدل استاتیک مخزن اعم از تخلخل، تراوایی مطلق و نسبی، توزیع اولیه اشباع سیالات و همچنین خواص سیالات مخزن به کمک روش‌های Up Scaling برای کلیه گریدها محاسبه و به عنوان داده‌های ورودی به نرم‌افزار ECLIPSE۱۰۰، به‌منظور شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. انواع سنگ با استفاده از نمودارهای فراوانی سنگ، نمودار اشباع آب – تخلخل و نتایج آزمایش‌های ویژه مغزه در مدل تعریف شد. بر این اساس برای هریک از پنج لایه مخزن یک نوع سنگ در نظر گرفته شد. بنابراین منحنی‌های تراوایی نسبی آب – نفت و گاز – نفت و منحنی فشار مؤیینگی آب – نفت و گاز – نفت برای پنج نوع سنگ مخزن ترسیم و در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. منحنی‌های تراوایی نسبی و فشار مؤیینگی برای سیستم‌های آب – نفت و گاز – نفت در شکل‌های ۳ تا ٦ نشان داده شده‌اند.



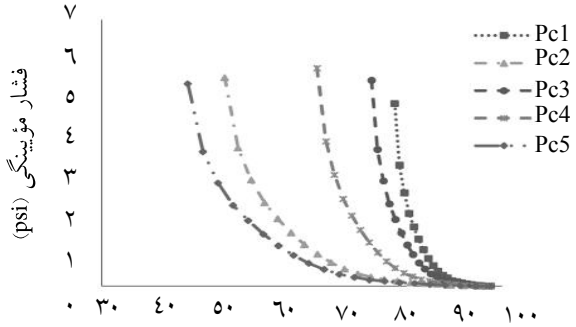
شکل۳- تراوایی نسبی آب- نفت



شکل٤- تراوایی نسبی آب- نفت



شکل۵- فشار مؤیینگی آب- نفت



شکل٦- فشار مؤیینگی گاز- نفت

تأثیر خصوصیات شکاف بر تولید

مخـــازن کربناتـــه تقریباً نیمـــی از مخازن دنیا را تشـــکیل می‌دهنـــد و اکثر آنها نیز شـــکاف‌دار می‌باشـــند. بیش ازدو ســـوم نفت موجـــود در این مخازن به‌دلیـــل اینکه اکثر آنها نفت دوســـت یا خنثی بوده و تراوایی ماتریکس آنها پایین می‌باشد به‌وســـیله روش‌های طبیعی و ثانویه قابل برداشت نمی‌باشـــند. ایـــن عامل باعث می‌شـــود که تأثیـــر نیروهای رانشـــی و فرایندهای جابجایی نیـــز در این مخازن کاهش یابد. بنابراین مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی سیستم‌های شکاف‌دار، فرم تشکیل آنها و تاثیر شکاف بر فرایند تزریق برای انتخاب ســـناریوی مناسب به منظور افزایش بازدهی، تولید و چگونگی حرکت سیالات تزریقی و نفت در محیط متخلخل مخزن ضروری است [۱۸].

تخلخل و تراوایی شـــکاف از عوامل مؤثر بر تولید و افت فشـــار مخزن می‌باشـــند. 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 ٤ خصوصیات شکاف در مخزن مورد مطالعه آورده شـــده اســـت. عوامل دیگری نیز مانند ارتباط ســـیال بیـــن ماتریس- شـــکاف[1] و ارتفاع مؤثـــر گرید بلوک ماتریـــس در پدیده ریزش ثقلی[2] (فاصله بین شـــکاف‌ها)، در شبیه‌سازی مخازن شـــکاف‌دار مهم و تأثیرگذار هســـتند. مقادیر بسیار پایین فاصله بین شکاف‌ها موجب کاهش تولید و فشـــار مخزن می‌شود. فاکتور انتقال ســـیال بین ماتریس و شـــکاف *(σ)*، بیان‌کننده میزان انتقال نفت از ماتریس به شـــکاف می‌باشد. این پارامتر وابسته به طـــول ماتریس در جهات x ، y و z بوده و در رابطه کاظمی (اساس کار شبیه‌ساز E100) به صورت زیر بیان می‌شود؛

$$\sigma = 4\left(\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} + \frac{1}{l_z^2}\right)$$

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

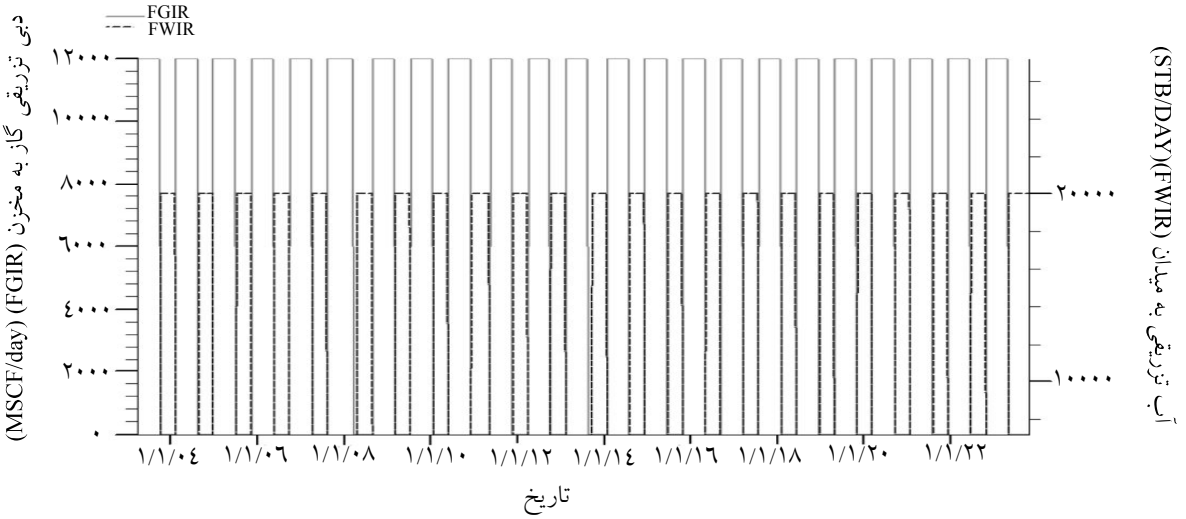
جدول٤- خصوصیات شکاف

تخلخل شکاف (%)	۰/۰۷
تراوایی شکاف (md)	۱۲
عامل ارتباط سیال بین ماتریس- شکاف ($1/ft^2$)	۰/۰۰۰۸
ارتفاع مؤثر گرید بلوک ماتریس در پدیده ریزش ثقلی (ft)	۲۰
فشار متوسط شکاف در عمق مبنا (psi)	۲۲۱۰
حجم فضای خالی شکاف (MMRbbl)	۳۱۹/۱
حجم گاز شکاف (MMRbbl)	۱۸/٤۰
حجم نفت شکاف (MMRbbl)	۳۰/۹۷
حجم آب شکاف (MMRbbl)	۳٦٥/٤۸
حجم کل هیدروکربن شکاف (MMRbbl)	٤۹/۳۷

شبیه‌سازی تزریق متناوب آب و گاز

در روش WAG آب و گاز به طور متناوب به مخزن تزریق می‌شوند(شـــکل ۷). با توجه به شـــکل، 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 پارامترهـــای متعددی در موفقیت‌آمیز بودن پروژه تزریق WAG مؤثر می‌باشـــند. در این قســـمت پارامترهایی مانند ســـیکل یا دوره تزریق[3]، نـــوع تزریق و روش تزریق مورد بررسی قرار می‌گیرند.

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



شکل۷- تزریق متناوب آب و گاز

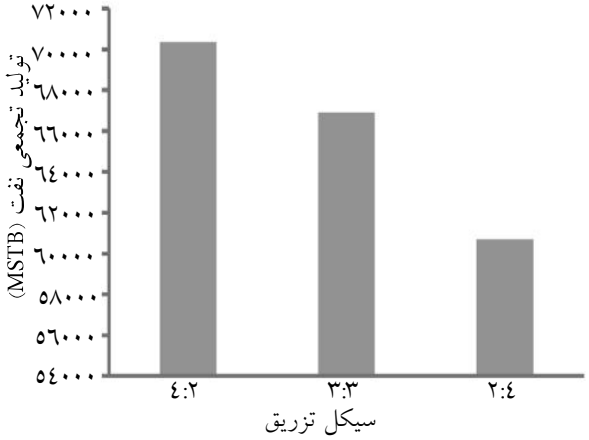
سیکل تزریق

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. به‌طوری 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].

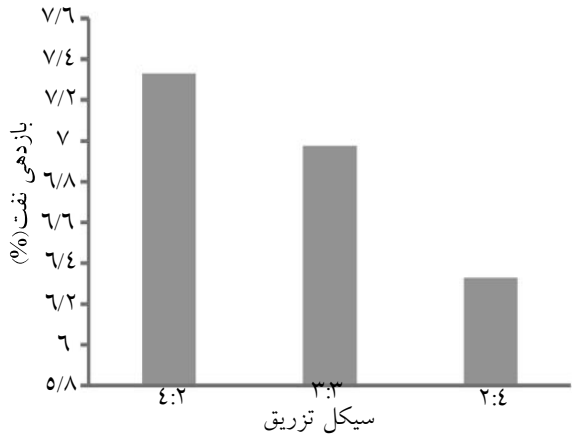
در این قسمت در دوره تزریق یکسان (٦ ماه) سه سیکل ٤:٢، ٢:٢ و ٢:٤، شبیه‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفت (در سیکل ٢:٤، دو ماه گاز و چهار ماه آب تزریق می‌شود). نتایج روش‌های ذکر شده (شکل‌های ۸ و۹) نشان می‌دهد که سیکل تزریق ٤:٢، دارای بیشترین ضریب بهره‌دهی و تولید تجمعی می‌باشد. به طور کلی بررسی‌ها در میدان مورد مطالعه نشان می‌دهد در صورتی که دوره تزریق گاز بیشتر از آب باشد ضریب بهره‌دهی و تولید بیشتر است.

نوع تزریق

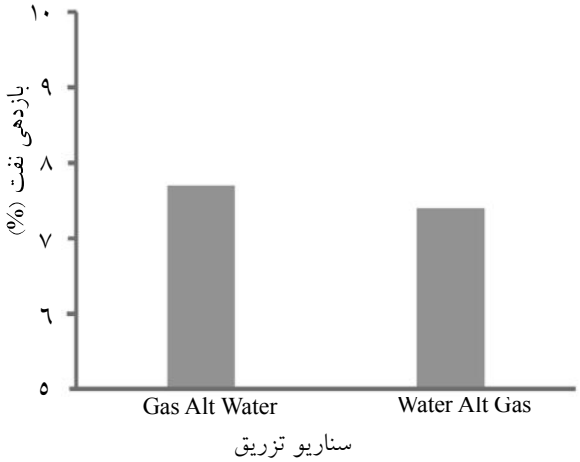
بسته به آب‌دوست یا نفت‌دوست بودن سنگ مخزن، تراوایی افقی و عمودی و شرایط پتروفیزیکی و لایه‌بندی مخزن در تزریق تناوبی، آب می‌تواند قبل از گاز و برعکس گاز قبل از آب به مخزن تزریق شود. روش تزریق در پروژه WAG باید طوری طراحی و انتخاب شود که فاز اولیه تزریق نه تنها موجب انباشت نفت نشود بلکه جابجایی و کاهش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



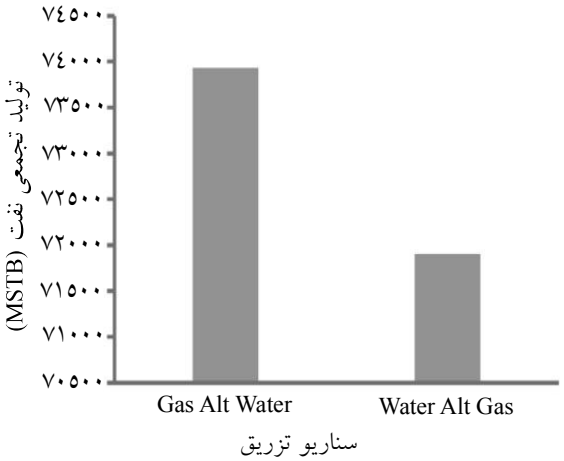
شکل۸- ضریب بهره‌دهی در سیکل‌های مختلف تزریق



شکل۹- تولید تجمعی در سیکل‌های مختلف تزریق



شکل ۱۰- ضریب بهره‌دهی در روش‌های تزریق



شکل ۱۱- ضریب بهره‌دهی در روش‌های تزریق

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 بلوکه‌شدن نفت به دلیل تزریق آب به عنوان فاز اول (در روش دوم) می‌باشد.

روش تزریق

Christensen (۱۹۹۸)، تزریق متناوب آب وگاز 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 می باشند [٤]. در این قسمت نحوه طراحی شبیه‌سازی روش‌های غیرامتزاجی، هیبرید و پیوسته در طول دوره تزریق (۲۰ سال) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تزریق غیر امتزاجی[1] WAG

در روش تزریق غیرامتزاجی WAG اسلاگ‌های گاز به‌صورت 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 قسمت های جاروب نشده مخزن نسبت به روش‌های معمول تزریق آب وگاز انجام می پذیرد. این روش در مخازنی که به‌دلیل وجود ناهمگنی‌های شدید و یا زاویه دار بودن، سبب ناپایداری جبهه تزریق می‌شود به کار می رود. در این مطالعه گاز با دبی Mscf/day ۱۸۰۰۰ و آب با دبی STB/day ۱۲۰۰۰ با سیکل تزریق ٤:۲ 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[2] 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 Mscf/day ۳۰۰۰۰ 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 وگاز نامیده می‌شود. تزریق همزمان آب وگاز به دو روش

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

انجـام می‌پذیـرد. در روش اول آب و گاز در سـطح بـا یکدیگر ترکیـب و به‌صورت تک فازی بـه مخزن تزریق می‌شود. این روش، تزریق پیوسته[1] WAG نامیده می‌شود. در روش دوم، توسـط تکمیل دوگانه در چاه تزریقی عمودی، آب و گاز بـه طور همزمان به ترتیب بـه بالا و پایین لایه هیدروکربنی تزریق شده و به عنوان تزریق پیوسته انتخابی[2] WAG مطـرح می‌شـود. در ایـن روش اختلاف دانسـتیه بین سـیالات تزریقی، موجب حرکت آب به سـمت پایین و حرکـت گاز به سـمت بالا و به تبع آن ایجاد مکانیسـم رانش و افزایش بازدهی فرایند جابجایی می‌شـود [۸و۱۰]. بدیـن ترتیب جابجایی به دو صورت (میکروسـکوپیک و ماکروسـکوپیک) صورت پذیرفته و افزایش تولید را سبب می‌شـود. بنابراین بازده نهایی و تولید در این روش نسبت به سایر روش‌های تزریق بسیار بیشتر است. تزریق پیوسته آب و گاز در چندین میدان در کانادا، میدان Siri در دریای شمال وGllafaks در نروژ عملیاتی شده و گزارش‌ها نشان دهنـده موفقیت‌آمیز بودن تزریق و افزایش بازدهی و تولید در این میادین می‌باشد.

تزریق WAG بعد از تزریق آب[3]

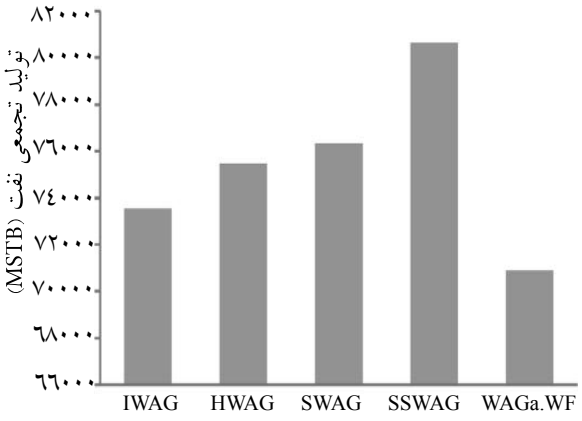
در این روش ابتدا آب به مدت چند سال به مخزن تزریق و در ادامه تزریق متناوب آب و گاز انجام می‌شود. از آنجایی کـه در این روش تزریق WAG بعد از آب انجام می‌شـود، ایـن نوع تزریق به عنوان یک روش ازدیاد برداشـت ثالثیه شناخته می شـود. در طراحی این روش ابتدا آب به مدت ۵ سال و با دبی ۲۰۰۰۰ STB/day تزریق و در ادامه تزریق متناوب آب و گاز به مدت ۱۵ سال به مخزن انجام می‌شود.

مقایسه روش‌های مختلف تزریق WAG

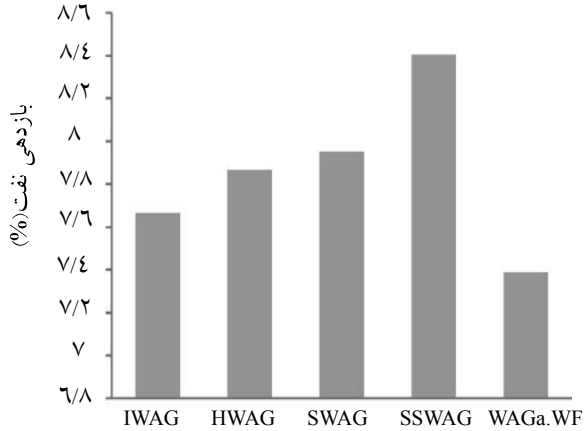
در این قسـمت روش‌های مختلف تزریـق برای انتخاب روش بهینه مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، ضریب بهره‌دهـی و تولید تجمعی نفت در روش‌های ذکر شـده نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص اسـت، تزریق انتخابی پیوسته (SSWAG) WAG دارای بیشترین ضریب بهره‌دهی می‌باشد. بنابراین می‌توان بیـان کرد که به دلیل نوع تزریـق و افزایش کارایی تزریق گاز و آب در حرکت و جابجایی نفت مخزن به سمت چاه تولیـدی، بازده جابجایی در این روش از سـایر روش‌های تزریق بهتر و مؤثرتر می‌باشـد، به‌طوری که در شـکل ۱۳ مشـخص اسـت، تزریق SSWAG دارای تولیـد تجمعی بیشتری نسبت به سایر روش‌های تزریق می‌باشد.

مقایسـه روش‌هـای تزریق متنـاوب آب و گاز و تزریق منفرد آب و گاز

به‌دلیل اینکه تزریق WAG شـامل روش‌های تزریق آب و گاز می‌باشـد، مقایسـه این روش با تزریق آب و گاز برای یافتن روش مناسـب ازدیـاد برداشـت و افزایش بازدهی



شکل۱۲- ضریب بهره‌دهی در روش‌های تزریق

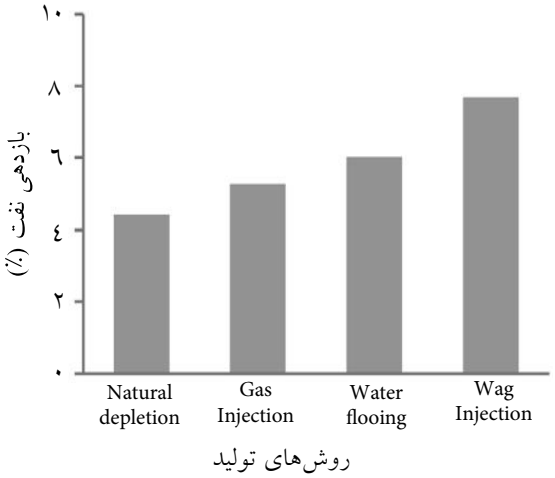


شکل۱۳- تولید تجمعی در روش‌های تزریق

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

تولید ضروری اســت. برای انجام مقایسه صحیح و اصولی بین روش‌های فوق علاوه بر روش تزریق WAG، روش‌های تزریــق آب و گاز مختلفی نیز طراحی و مورد مطالعه قرار گرفتند. ســپس برای انجام مقایسه بین روش‌های فوق یک ســناریو 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 ١٤، تولید روزانه در روش‌های ازدیاد برداشت مــورد مقایســه قرار گرفــت. همان‌طور که در این شــکل مشــخص اســت تزریق WAG دارای تولید بیشتری نسبت به سایر روش‌ها اســت. ضریب بهره‌دهی و تولید تجمعی در روش‌هــای تزریــق WAG، آب، گاز و تولید طبیعی در شکل‌های ١٥و١٦ آمده است.

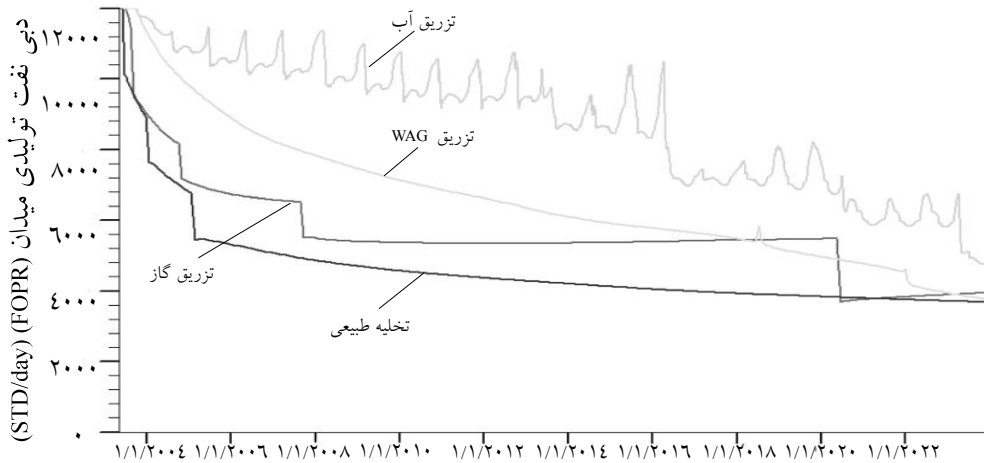


شکل١٤- تولید روزانه در روش‌های مختلف تولید

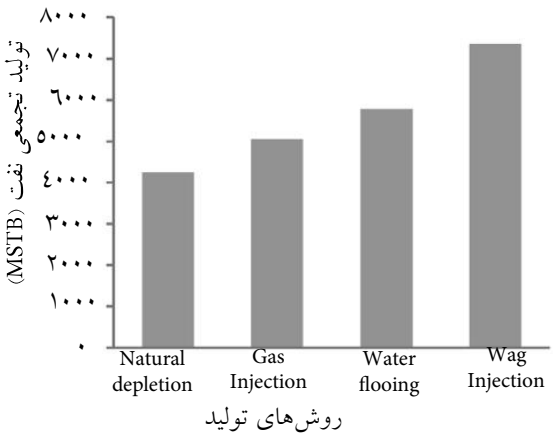
بررســی این شکل‌ها نشــان می‌دهد که ضریب بازدهی و تولید تجمعی نیز در روش WAG از ســایر روش‌ها بیشتر است. شکل١٧، نشــان دهنده درصد اشباع نفت باقی‌مانده اســت. همان‌طور که در این شکل مشخص است کمترین درصد اشــباع نفــت باقی‌مانــده مربوط بــه تزریق WAG می‌باشد. این مطلب بیان می‌کند که بازدهی ماکروسکوپیک و ماکروســکوپیک در ایــن روش از روش‌هــای تزریــق آب و گاز مؤثرتر و مطلوب‌تر اســت. بنابراین اســتفاده از تزریــق WAG بــازده نهایی را افزایش و موجب می‌شــود کــه نفــت بیشــتری از میــدان برداشــت و تولید شــود.

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

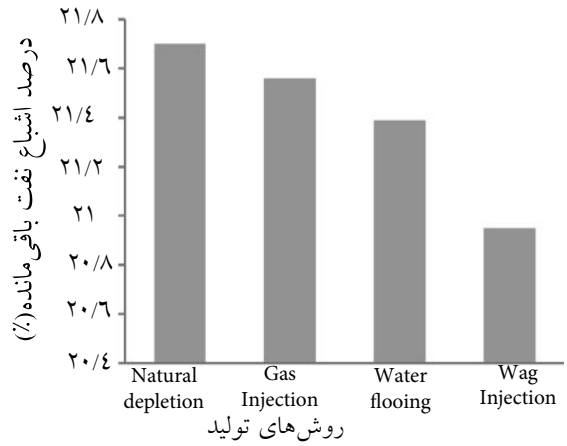
انتخاب روش بهینه تزریق از مهمترین عوامل مؤثر بر افزایش بازدهی و تولید در عملیات ازدیاد برداشت است. علاوه بر این فضای اطراف چاه‌ها، فاصله بین چاه‌های تولیدی و تزریقی، مکان‌یابی چاه‌ها و به‌طورکلی الگوی تزریق نیز از عوامل مؤثر بر افزایش راندمان جابجایی و بازدهی می‌باشد. در طراحی تزریق در این قســمت، محل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



شکل١٥- ضریب بهره‌دهی در روش‌های مختلف تولید

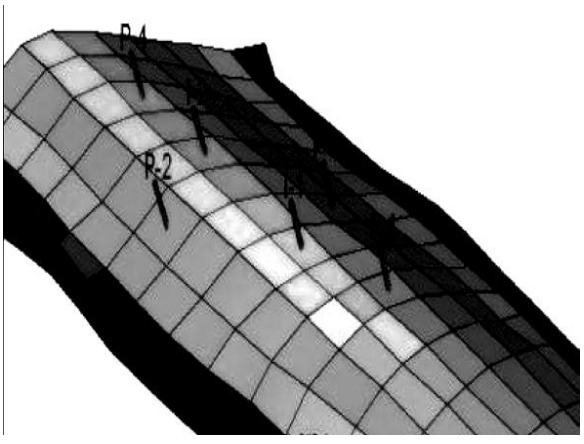


شکل۱۶- تولید تجمعی در روش‌های مختلف تولید

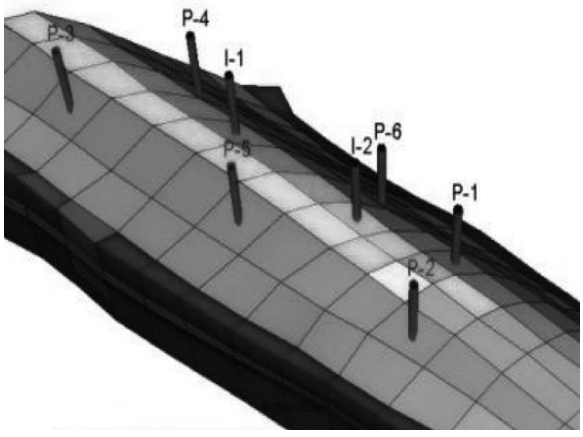


شکل۱۷- درصد اشباع نفت باقی‌مانده روش‌های مختلف تولید

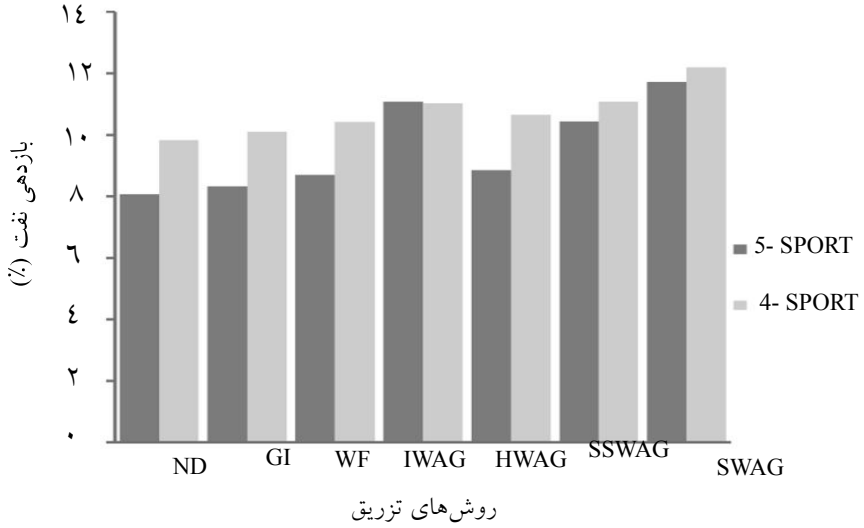
در این قسمت روش‌های مختلف تزریق متناوب آب و گاز (غیرامتزاجی، هیبرید و پیوسته و انتخابی پیوسته)، تزریق آب وگاز و تولید طبیعی در الگوهای چهار (٤چاه تولیدی-۲چاه تزریقی) و پنج (٦چاه تولیدی-۲چاه تزریقی) نقطه‌ای، طراحی و مقایسه شده‌اند(شکل‌های ۱۸ و ۱۹). در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ ضریب بهره‌دهی و تولید تجمعی در روش‌های ذکر شده مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، تزریق انتخابی پیوسته (WAG SSWAG) در الگوی ٤ نقطه‌ای دارای بالاترین ضریب بهره‌دهی و تولید است. به طوری که تولید تجمعی در این روش تقریباً ۱/۵ برابر تزریق آب و گاز بوده و به میزان MMSTB ۲۰ بیشتر از روش‌های ذکر شده می‌باشد. به‌علاوه همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، از بین روش‌های تزریق آب وگاز، تزریق آب با الگوی تزریق ٤ نقطه‌ای دارای شرایط تولیدی مطلوب‌تری است. درصد اشباع نفت باقی‌مانده میدان در پایان دوره تولید در شکل ۲۲ نشان داده شده است. در این شکل تزریق SSWAG دارای کمترین درصد اشباع باقی‌مانده بوده و بنابراین راندمان جابجایی تزریق در این روش مناسب‌تر از سایر روش‌های مورد مطالعه می‌باشد.



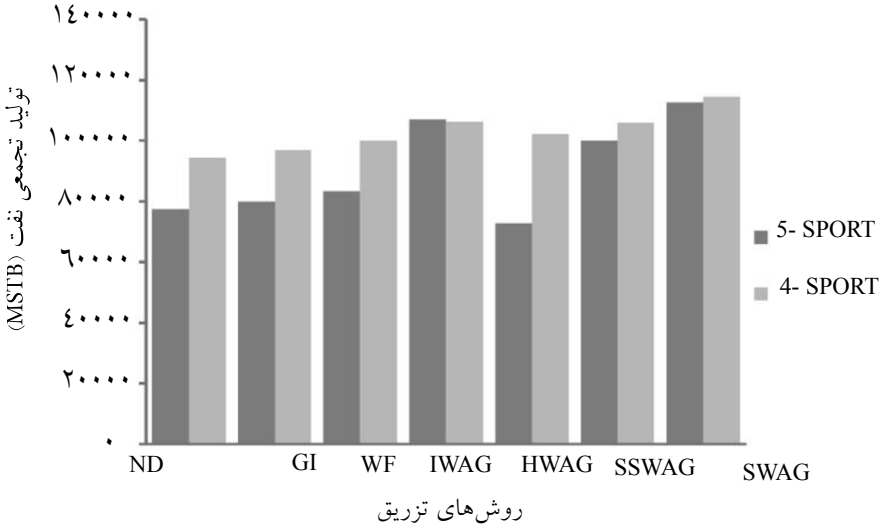
شکل۱۸- الگوی چهار نقطه‌ای تزریق میدانx



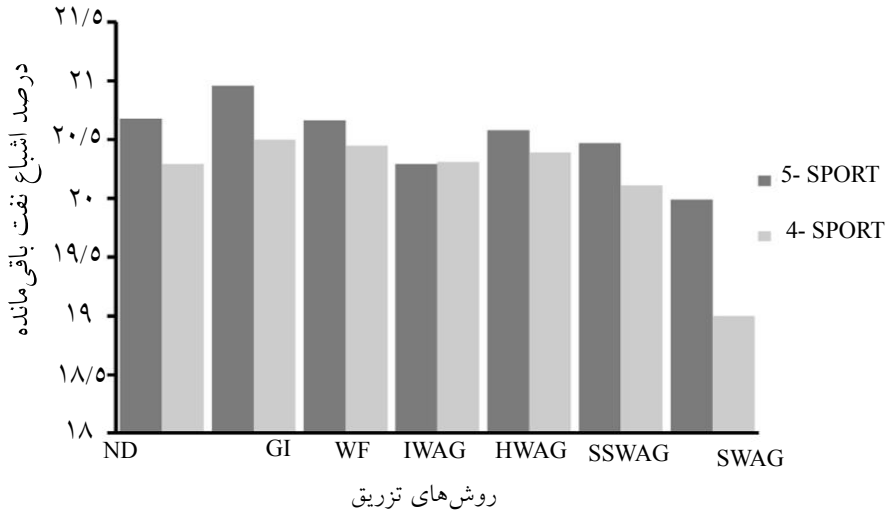
شکل۱۹- الگوی پنج نقطه‌ای تزریق میدان x



شکل۲۰- ضریب بهره‌دهی در روش‌های ازدیاد برداشت



شکل۲۱- تولید تجمعی در روش‌های ازدیاد برداشت



شکل۲۲- درصد اشباع نفت باقی‌مانده 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 ٤;٢ 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 به‌دلیل آب‌دوست بودن سنگ مخزن تزریق آب دارای ضریب بازیافت بیشتری نسبت به تزریق گاز است.

٤- بازدهی و تولید بالاتر در روش SSWAG، نسبت به سایر روش‌های تزریق WAG، بیانگر بالاتر بودن جابجایی جاروبی اعم از میکروسکوپیک و ماکروسکوپیک 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 وگاز بیشتر است، لذا این روش به عنوان روش ازدیاد برداشت بهینه در میدان مورد مطالعه معرفی شد.

٦- تزریق WAG دارای درصد اشباع نفت باقی‌مانده کمتری می‌باشد. بنابراین بازدهی جاروبی (میکروسکوپیک و ماکروسکوپیک) در این روش نسبت به سایر روش‌های تزریق مطلوب‌تر است.

۷- از میان روش‌های مختلف تزریق آب، گاز و WAG در الگوهای ٤و۵ 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 به‌صورت تک فاز نسبت به تزریق جداگانه آب و گاز به بالا و پایین مخزن دارای راندمان جابجایی و تولید کمتری می باشد.

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 CO_2 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 CO_2 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.