بهینه‌سازی آرایش چاه‌ها با استفاده از چاه‌های افقی دریک مخزن ذخیره‌سازی گاز میعانی

محمدایمان روح‌بخش ارفعی*، بهنام صدایی سولا و سیاوش ریاحی

انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۲ تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۵

چکیده

معمولا برای اطمینان از تامین گاز در زمان اوج مصرف، آن را در زیرزمین ذخیره می‌کنند. با پیشرفت ذخیره‌سازی در صنعت نفت، به بهینه‌سازی عمل‌کرد مخازن ذخیره و برداشت حداکثری از این مخازن توجه شده است. در این مقاله به بهینه‌سازی حفر چاه‌ها در یک مخزن واقعی گاز میعانی با هدف افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و بیشینه‌کردن راندمان تولید میعانات پرداخته و حفر چاه‌های جدید براساس قابلیت مخزن بررسی می‌شود. حفر چاه‌های تزریقی جدید و چینش آنها با توجه به خواص پتروفیزیکی مخزن هم‌چون تراوایی، تخلخل، اشباع سیالات و چیدمان چاه‌های موجود است. متفاوت بودن چاه‌های تزریق با تولید باعث می‌شود در ذخیره‌سازی، حجم بیش‌تری از گاز باقی‌مانده مخزن در جریان تولید استخراج شود و راندمان تولید میعانات افزایش یابد. چگونگی آرایش بهینه چاه‌ها برای ذخیره‌سازی و استفاده از چاه‌های افقی بررسی شده و نتایج نشان می‌دهند که این کار باعث کاهش تعداد چاه‌های لازم و افزایش بهره‌وری میعانات در زمان ذخیره‌سازی می‌شود. مقایسه بهره‌دهی چاه افقی با چاه عمودی نشان می‌دهد که چاه افقی، علاوه بر افزایش شاخص بهره‌دهی، تشکیل و تجمع میعانات را به تاخیر می‌اندازد و تاثیر تجمع میعانات بر مقدار بهره‌دهی را کاهش می‌دهد. تراوایی، تخلخل و اشباع به‌ترتیب بیش‌ترین اثر را بر تابع هدف می‌گذارند و آرایش بهینه چاه‌ها در این مخزن گازمیعانی، به نحوی که دبی لازم برای زمان اوج مصرف تامین شود، در مدت ۲۰ سال باعث افزایش ۱ میلیون بشکه‌ای تولید میعانات گازی باقی‌مانده در مخزن می‌شود.

کلمات کلیدی: ذخیره‌سازی، گاز میعانی، آرایش بهینه چاه‌ها، راندمان میعانات، چاه افقی.

مقدمه

مخازن ذخیره‌سازی انبارهایی هستند که عرضه آسان گاز را در زمان اوج تقاضا در فصول سرد سال ممکن می‌کنند[۱]. گاز طبیعی خط لوله(و به‌ندرت همراه با دیگر گازها چون نیتروژن و کربن‌دی‌اکسید[۲ و ۳])در زمان پایین بودن مصرف به مخزن ذخیره‌سازی زیرزمینی تزریق و هنگامی که تقاضا از عرضه خط لوله پیشی می‌گیرد، از مخزن ذخیره‌سازی به‌عنوان مکمل تولید می‌شود. از این فرآیند می‌توان در تولید نفت ومیعانات نیز بهره برد و آن را یک روش بهبود برداشت(IOR) در نظر گرفت.

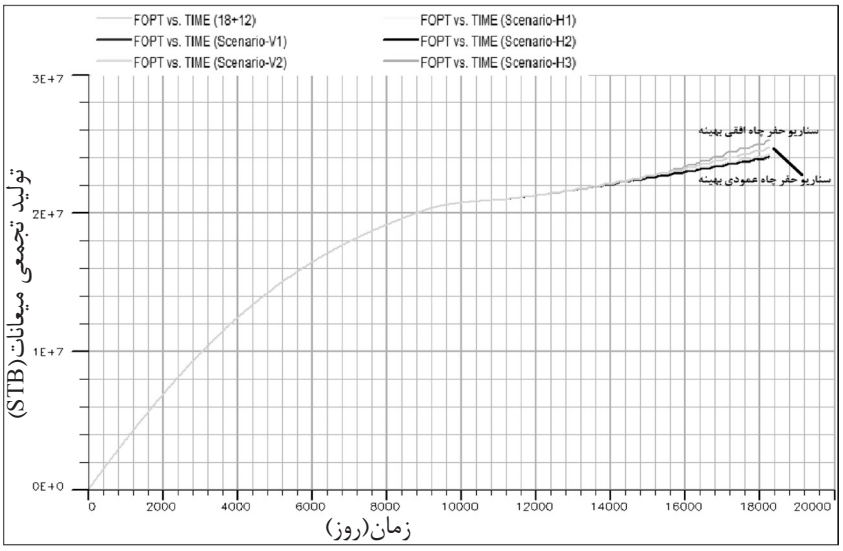
*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی irouhbakhsh@ut.ac.ir

مخـازن گاز میعانـی نوعی خـاص از مخـازن هیدروکربوری و حدواسـط مخـازن نفتـی و گازی هسـتند. ایـن مخـازن رفتـار فـازی و ترمودینامیکـی بسـیار پیچیـده دارنـد و به‌دلیـل تغییـر ترکیـب اجـزای اولیـه سـیال در زمـان تولیـد اسـتفاده از شبیه‌سـازی ترکیبـی را ناگزیـر می‌کننـد. در ایـن مخـازن دمـا بیـن دمـای بحرانـی و نقطـه حداکثـر دماسـت و در نتیجـه، بـا تولیـد از مخـزن و افـت فشـار، تـوده‌ای از میعانـات گازی در اطـراف چـاه تشـکیل می‌شـود. تشـکیل میعانـات گازی در اطـراف چـاه، کـه خـود ارزش افـزوده بالایـی نیـز دارنـد، تراوایـی نسـبی گاز را کاهـش می‌دهـد و در نتیجـه بهـره‌وری چـاه افـت خواهـد کـرد[۳]. نزدیـک چـاه دو پدیـده متقابـل بـر تراوایـی موثـر گاز تاثیـر می‌گذارنـد و آن را بـه دبـی وابسـته می‌کنند(شـکل ۱)[۴ و ۵]:

- افزایـش تراوایـی نسـبی بـا سـرعت کـه در آزمایش‌های متعـدد تزریـق سـیال در مغـزه نیـز مشـاهده شـده اسـت. ایـن پدیـده غالبـا لختگـی سـرعت[1] یـا جفت‌شـدگی مثبـت[2] نامیـده می‌شـود؛
- پدیـده اینرسـی(جریان غیردارسـی) کـه در سـرعت‌های بـالا تراوایـی موثـر گاز را کاهـش می‌دهـد.

در ذخیره‌سـازی زیرزمینـی گاز بـا اجـرای سـناریوهای متعـدد بـرای هـر مخـزن، تعـداد چاه‌هـا و آرایـش آنهـا بایدبهینـه باشـد[۶] تـا راندمـان اقتصـادی پـروژه بالاتـر رود. دقـت در خـواص PVT بـرای محاسـبه بهره‌دهـی چـاه در مخـازن گازمیعانـی، به‌دلیـل پیچیدگـی رفتـار سـیال و ارزش میعانـات، اهمیـت بیش‌تـری دارد. در مخـازن گاز میعانـی عمل‌کـرد چـاه بـا رفتـار فـازی و حجمـی سـیال مخـزن ارتبـاط مسـتقیم دارد[۷].

در ایـن پژوهـش یـک مخـزن گازمیعانـی در ایـران بـرای رسـیدن بـه آرایـش بهینـه چاه‌هـا، چگونگـی اسـتفاده از چاه‌هـای موجـود و عوامـل موثـر بـر افزایـش راندمـان اقتصـادی حاصـل از حفـر چاه‌هـا در ذخیره‌سـازی زیرزمینـی گاز بررسـی می‌شـود. ذخیره‌سـازی علمـی نویـن و به‌سـرعت روبه‌رشـد در ایـران اسـت. از طرفـی پیچیدگی‌هـای رفتـار مخـازن گاز میعانـی تـا حـد زیـادی نتایـج را بـه چگونگـی انجـام فرآینـد وابسـته می‌کننـد. ایـن پژوهـش، به‌دلیـل اسـتفاده از یـک مخـزن واقعـی در ایـران و بررسـی نتایـج تابـع هـدف براسـاس انـواع آرایـش چاه‌هـا و خـواص مخـزن، می‌توانـد راه‌گشـای انتخـاب مخـزن و چاه‌هـا بـرای ذخیره‌سـازی و بیشـینه کـردن بهـره‌وری اقتصـادی باشـد.



شکل ۱ مقایسه تولید تجمعی میعانات برای ۶ سناریوی حفر ۱۲ حلقه چاه جدید.

1. Velocity Stripping
2. Positive Coupling

هنگامی‌که مخزن گاز میعانی تخلیه‌شده برای ذخیره‌سازی به کار می‌رود، تزریق گاز باعث می‌شود فشار مخزن و تبخیر میعانات افزایش یابد که نتیجه آن گاز تولیدی در دوره برداشت شامل هیدروکربن‌های سنگین خواهد بود. بعد از تطابق معادله حالت، تزریق به مخزن و تولید گاز از آن به کمک نرم‌افزار تجاری شبیه‌سازی می‌شود.تاثیر تعداد چاه‌ها بر عمل‌کرد و ظرفیت ذخیره‌سازی گاز نیز بررسی می‌شود.

توصیف مخزن

مخزن مطالعه‌شده یک مخزن گاز میعانی با مساحت ۲۰۰ km^2 در جنوب ایران است. فشار و دمای اولیه آن در عمق مبنای ft ۷۸۷۴ به‌ترتیب pam ۵۱۰۰ و ۲۱۱ ºF است و فشار نقطه شبنم pam ۵۰۰۰ گزارش شده است. ضخامت مخزن ۲۰۰ فوت است و ۴ لایه دارد که ضخامت آنها ۴۰ تا ft ۶۰ است. حجم گاز درجای مخزن TSCF ۴ ارزیابی شده و از سال ۱۹۸۶ میلادی با دبی MMSCFD ۲۰۰ تولید کرده است.

جدول۱ اطلاعات اولیه مخزن مطالعه‌شده(خواص به شکل میانگین مخزن بیان شده‌اند).

عنوان	مقدار
تخلخل(٪)	۱۵
تراوایی افقی(md)	۴۴
تراوایی عمودی(md)	۱۰
اشباع آب(٪)	۳۸
ضخامت مخزن(فوت)	۲۰۰
مولی متان(٪)	۸۷
مولی اجزای(٪) نیمه‌سنگین(C_3-C_6)	۲/۹
درصد مولی اجزای سنگین(C_{7+})	۱/۶

در حال حاضر فشار این مخزن نیمه تخلیه‌شده ۳۲۰۰ پام است که برای برداشت MMMSCF ۷۰ گاز کاری سالیانه مناسب است. تخلخل، تراوایی، اشباع آب و ترکیب برخی اجزای سیال مخزن پس از تطابق معادله حالت در جدول ۱ آمده‌اند.

این مخزن ناهمگن است، اما در مجموع خواص پتروفیزیکی آن برای ذخیره‌سازی مناسب‌اند و مخزن توان تزریق‌پذیری و تولید در زمان کوتاه را دارد. این میدان ۱۸ حلقه چاه عمودی حفرشده دارد و در برنامه توسعه میدان، حفر ۱۲ حلقه چاه جدید مطالعه می‌شود. این چاه‌ها قرار است برای تزریق استفاده شوند. به این منظور ۱۲ حلقه چاه جدید برای تزریق در میدان حفر شدند و با توجه به اصول مهندسی و خواص مخزن سعی شده چاه‌ها در نقاط بهینه حفر شوند.

بررسی اثر جداسازی چاه‌های تزریق و تولید در ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز

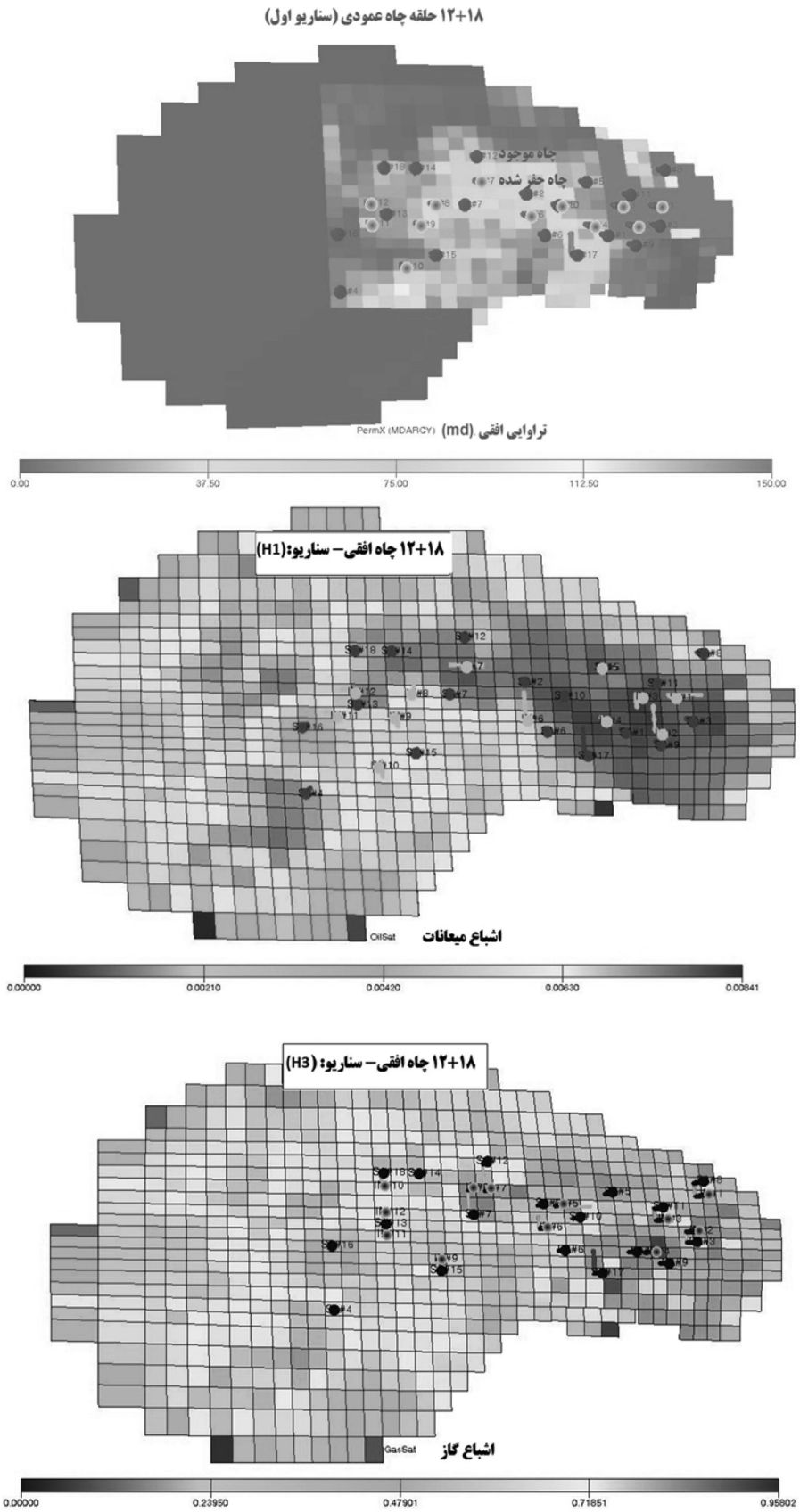
آرایش بهینه چاه‌ها با ۶ سناریو حفر چاه جدید بررسی شد. برای حفر چاه‌های جدید، مکان قرارگیری چاه‌های اولیه میدان، تراوایی سازند، تخلخل و اشباع سیالات در سازند در نظر گرفته شد. تابع هدف بیش‌ترین ظرفیت ذخیره‌سازی همراه با بیشینه راندمان تولید میعانات است. ۶ برنامه مختلف حفر چاه(۳ سناریوی حفر چاه‌های عمودی و ۳ سناریوی حفر چاه افقی) بررسی شدند که اولویت اولین سناریو تراوایی، دومین سناریو تخلخل و سومین سناریو اشباع بوده است و در ۳ سناریوی بعدی چاه‌های افقی براساس همین الویت‌بندی حفر شدند. سناریوی اول مبناست و در این سناریوها با دبی MMSCFD ۲۰۰ در ۶ ماه تزریق و با همان دبی در ۶ ماه باقی‌مانده تولید انجام می‌شود. نتایج مقایسه تولید تجمعی میعانات گازی برای ۶ سناریوی حفر چاه در شکل ۱ دیده می‌شوند. مشاهده می‌شود که در سناریوی چاه افقی بهینه، راندمان تولید میعانات حدود ۱ میلیون بشکه استاندارد بیش از دیگر سناریوهاست که اهمیت چگونگی و محل حفر چاه‌ها را در شرایط ذخیره‌سازی نشان می‌دهد. شماتیکی از محل حفر چاه‌های جدید در میدان در شکل ۲ آمده است.

سعی شده چاه‌های تزریقی در بین چاه‌های تولیدی حفر شوند تا بیش‌ترین پوشش از چاه‌ها به‌صورت ۵ نقطه‌ای و ... رخ دهد. در دو سناریوی دیگر حفر چاه‌های عمودی، مکان حفر چاه‌ها با توجه به خواص پتروفیزیکی مخزن تا حدودی تغییر کرد تا بهترین محل برای این کار تعیین شود. در برنامه‌های حفر چاه افقی سعی شد مکان نسبی چاه افقی حفرشده بیش‌ترین پوشش را از نظر تامین غذا برای چاه‌های تولیدی فراهم کند. در شرایط مشابه تزریق، تولید تجمعی گاز برای چاه‌ها، با توجه به محدودیت‌های اعمال‌شده در میدان، مشابه است و تغییرچندانی نمی‌کند. به همین علت برای مقایسه، به راندمان تولید میعانات گازی توجه شد. در آینده، اثرگذاری تعداد چاه‌ها بر ظرفیت گاز کاری در مخزن جداگانه بررسی می‌شود.

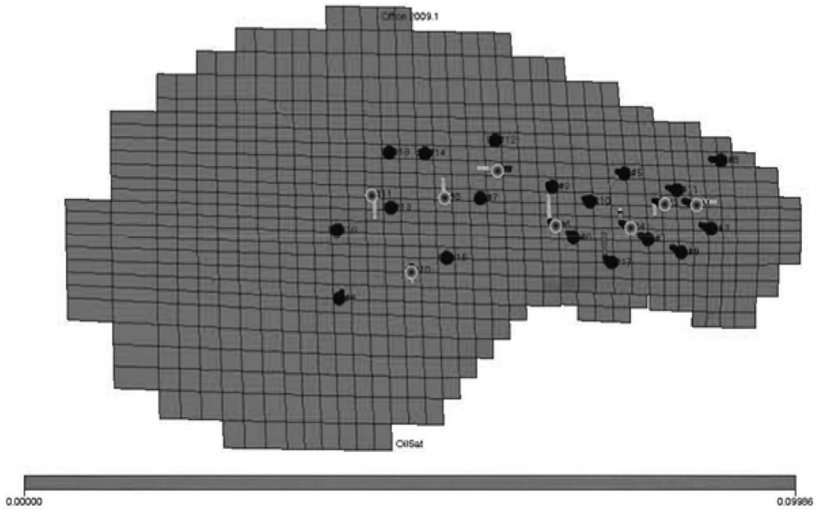
در بین سناریوهای بررسی‌شده در چاه‌های عمودی، سناریوی اول بیش‌ترین راندمان را داشت. در این سناریو سعی شد چاه‌های تزریقی در مکانی که بیش‌ترین تراوایی را دارد حفر شوند. نکته دیگر مکان چاه‌های تولیدی در اطراف چاه تزریقی بود. هم‌چنین سعی شد اشباع آب در آن قسمت‌ها کم‌تر باشد. با توجه به این سه نکته، بیش‌ترین تولید تجمعی میعانات(در حجم گاز پایه و گاز کاری ثابت) به‌دست آمد به شکلی که در پایان دوران تزریق و تولید ۱ میلیون بشکه استاندارد، تولید میعانات نسبت به دیگر سناریوها بهبود داشت که دلیل آن نیز بهتر بودن تراوایی مخزن در محل چاه‌های جدید حفرشده و پوشش مناسب فضای مخزن و چاه‌های تولیدی است که بر گسترش فشار در مخزن اثر دارد.

به این منظور راندمان چاه عمودی و افقی نیز مقایسه شد. در حفر چاه‌های افقی نیز نکات مشابه حفر چاه‌های عمودی رعایت شدند. در این برنامه لایه‌های تزریقی نیز بررسی شدند. نتایج نشان می‌دهند که تولید میعانات در سناریوی بهینه حفر چاه‌های افقی ۵۰۰ هزار بشکه استاندارد بیش از سناریوی بهینه حفر چاه‌های عمودی می‌شود که این بهبود تولید با توجه به سطح تماس بیش‌تر چاه با مخزن قابل‌توجیه است[۶]. در سناریوی بهینه، تزریق از دو لایه انتهایی و در مکان بهینه انجام شد؛ یعنی چاه‌های تزریقی در لایه ۳ و ۴ به‌طور افقی حفر و مشبک‌کاری شدند. این کار به جاروب بهتر سیال با ارزش مخزن از چاه‌های تزریقی به سمت چاه‌های تولیدی انجامید.

مقایسه بهره‌دهی چاه افقی و عمودی نشان می‌دهد که علاوه بر این که چاه افقی باعث افزایش شاخص بهره‌دهی می‌شود، تشکیل و تجمع میعانات گازی را به تاخیر می‌اندازد و از تاثیر تجمع میعانات گازی بر کاهش مقدار بهره‌دهی چاه‌ها می‌کاهد. مقدار اختلاف فشار برای یک چاه افقی کم‌تر از چاه عمودی است که سبب می‌شود تشکیل و تجمع میعانات گازی به تعویق افتد و اشباع میعانات در اطراف چاه افقی کم‌تر از چاه عمودی باشد[۶]. هم‌چنین تزریق گاز از لایه‌های پایینی به سمت چاه تولیدی باعث جاروب شدن مناسب سیال مخزن و در نتیجه افزایش ارزش گاز در بازه برداشت می‌شود. برای حفر چاه‌های افقی با توجه به راندمان به‌دست‌آمده، باید هزینه‌های تحمیل‌شده به خاطر حفر چاه افقی را نیز در نظر گرفت. در حفر چاه‌های افقی نکته دیگر که می‌توان در نظر گرفت کم کردن تعداد چاه‌های افقی است. وقتی تعداد چاه‌ها از حد معمول فراتر رود، افزایش تولید میعانات و فشار مخزن در دوره ذخیره‌سازی مشاهده نمی‌شود[۷]. چاه‌های افقی، به دلیل سطح تماس بیش‌تر با مخزن، قابلیت تزریق و تولیدی بالاتر از چاه عمودی دارند. به همین دلیل در سناریوی چاه افقی می‌توان ۸ حلقه چاه افقی را جای‌گزین ۱۲ حلقه چاه عمودی کرد. نتایج نشان می‌دهند که این تعداد چاه قابلیت ذخیره‌سازی حجمی برابر از گاز را دارند. شکل ۳ آرایش ۸ حلقه چاه افقی حفرشده را نشان می‌دهد.



شکل ۲ شماتیک محل حفر چاه‌های جدید در میدان.

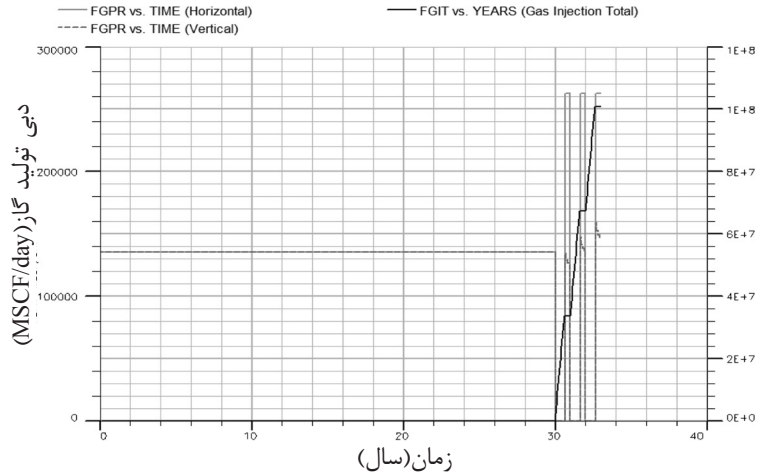


شکل۳ شماتیک مکان حفر ۸ حلقه چاه افقی در مخزن برای تزریق.

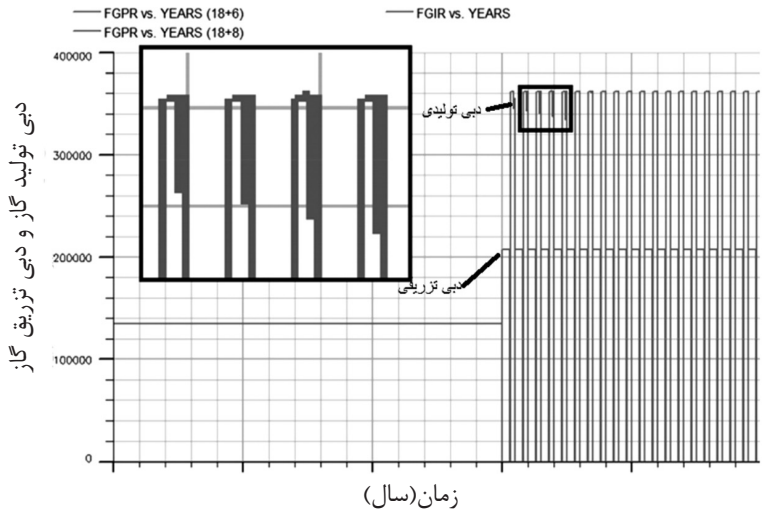
حال اگر به جای ۱۲ حلقه چاه عمودی نیز از ۸ حلقه استفاده شود، مشاهده می‌شود که مخزن با ۸ حلقه چاه عمودی نمی‌تواند به دبی لازم در زمان اوج مصرف برسد. در شکل ۴ دبی‌های چاه عمودی و افقی در حجم تزریق برابر مقایسه شده‌اند. این در حالی است که ۸ حلقه چاه افقی می‌توانند به دبی لازم در زمان اوج مصرف دست یابند.

این ۸ حلقه چاه افقی چاه‌های تولیدی را به‌خوبی پوشش می‌دهند؛ یعنی با تزریق گاز لازم در زمان مصرف پایین و تولید همان حجم گاز در زمان اوج مصرف اهداف ذخیره‌سازی را تامین می‌کنند. حال اگر تعداد چاه‌ها از این مقدار کم‌تر شود، مخزن قابلیت تزریق همان حجم گاز را خواهد داشت، ولی در زمان تولید در دوره‌های ابتدایی ذخیره‌سازی، به‌دلیل عدم‌تامین پوشش فشاری لازم در چاه تولیدی، ناتوان از تامین دبی لازم برای زمان اوج مصرف خواهد بود. شکل ۵ دبی گاز تولیدی و دبی گاز تزریقی به میدان را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای ۶ حلقه چاه افقی، مخزن مطالعه‌شده در دوره‌های ابتدایی فصل برداشت با کاهش دبی در زمان اوج مصرف مواجه می‌شود.

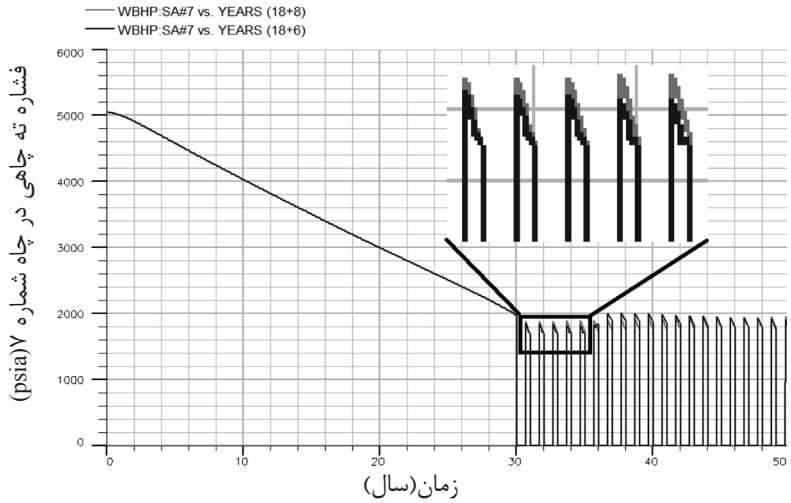
بررسی دلیل کاهش دبی در زمان اوج مصرف نشان داد که ۶ حلقه چاه افقی توانایی ایجاد فشار لازم را در چاه‌های تولیدی ندارند و فشار ته‌چاهی در چاه‌های تولیدی با ۶ حلقه چاه از ۸ حلقه چاه کم‌تر است. در شکل ۶ فشارهای ته‌چاهی در چاه شماره ۱۲ میدان برای این دو حالت مقایسه شده است. اگر تعداد چاه‌های حفرشده از حد لازم کم‌تر باشد، فشار در چاه‌های تولیدی به حد لازم نمی‌رسد و افت تولید گاز در زمان اوج مصرف رخ می‌دهد. در شکل ۷ نیز توزیع فشار در میدان در زمان تولید در دو حالت مقایسه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که آرایش بهینه چاه‌ها در حالتی است که اولویت حفر چاه‌ها به‌ترتیب با توجه به تراوایی، تخلخل و اشباع باشدتا در نهایت با تعداد کمتری چاه افقی راندمان اقتصادی بالاتری به‌دست آید که دلیل آن افزایش تولید میعانات و کاهش تعداد چاه‌های حفرشده است.



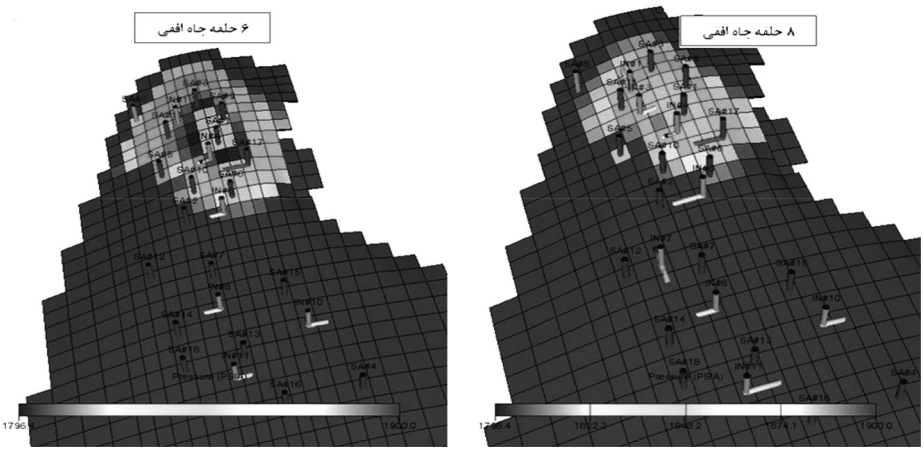
شکل۴ مقایسه دبی تولیدی ۸ حلقه چاه عمودی و افقی.



شکل ۵ دبی گاز تولیدی و تزریقی میدان برای سناریوهای ۸ و ۶ حلقه چاه افقی.



شکل۶ مقایسه فشار ته چاهی برای دو سناریوی حفر چاه افقی.



شکل ۷ توزیع فشار در میدان در زمان تولید برای سناریوهای حفر ۶ و ۸ حلقه چاه افقی.

نتیجه‌گیری

- افزایش چاه‌ها در شرایط عملیاتی یکسان تاثیر چندانی بر عمل‌کرد تولیدی مخزن ذخیره‌سازی ندارد، اما سبب افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن می‌شود. راندمان تولید میعانات چاه افقی از چاه عمودی بیش‌تر است. هم‌چنین با تعداد کم‌تری چاه افقیمی‌توان به ظرفیت ذخیره‌سازی برابری دست یافت؛

- جداسازی چاه تزریقی از چاه تولیدی در ذخیره‌سازی سبب افزایش تولید میعانات، به‌دلیل جاروب بهتر سیال در سطح مخزن، می‌شود. این مسئله در افزایش تولید میعانات از مخازن تخلیه‌شده دارای چاه‌های از پیش‌حفرشده بسیار کاربرد دارد و می‌توان ضریب بازیافت نهایی مخزن را بهبود بخشید؛

- باتوجه به نتایج حاصل، در انتخاب آرایش حفر چاه‌های جدید در مخزن مطالعه‌شده، تراوایی، تخلخل و اشباع به‌ترتیب بیش‌ترین تاثیر را بر افزایش راندمان تولید میعانات دارند. باید آرایش چاه‌ها را در هر مخزن بررسی کرد، زیرا در مخازن دارای آبران فعال یا اشباع زیاد آب، ممکن است نتایج متفاوت باشند.

مراجع

[1]. Azin R., Malakooti R., Helalizadeh A. and Zirrahi. M., *"Investigation of underground sour gas storage in depleted gas reservoir,"* Journal of Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP Energies nouvelles, DOI: 10.2516/ogst/2012003, France, 2013.

[2]. Ghomian Y., *"Reservoir simulation studies for coupled CO_2 sequestration and enhanced oil recovery",* Thesis Submitted to University of Texas at Austin in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, USA, May 2008.

[3]. Soroush M. and Alizadeh N., *"Underground gas storage in a partially depleted gas reservoir,"* JCPT, Vol. 47, No. 2, Feb. 2008.

[4]. Fevang O. and Withson C. H., *"Modeling gas condensate deliverability,"* SPE Paper No. 30714, Proceeding of SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, 22-25 October, 1995.

[۵]. گرامی ش.، طاهری الف.، قنواتی م.، ولی‌اللهی ح.، نورمحمد ع.، برزویی ن. و شوشتری م. الف.، *"چالش‌های مدل‌سازی آزمایشگاهی فرآیند ذخیره‌سازی گاز در یک مخزن شکاف‌دار گازمیعانی،"* مجله اکتشاف و تولید، شماره ۶۰، شهریور ۱۳۸۸.

[۶]. اسدی‌الله‌سوند، م.، مطالعه ذخیره‌سازی گاز طبیعی در یکی از مخازن کربناته ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ایران، ۱۳۸۹.

[۷]. عمونژاد سماکوش، ا.، شبیه‌سازی مخازن گاز میعانی شکاف‌دار و بررسی اثر خواص سنگ وسیال بر مکانیزم‌های تولید گاز در آنها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ایران، ۱۳۹۱.