

غربال‌گری مخازن نفتی جهت تزریق نیتروژن و گاز طبیعی با ترکیب روش طراحی آزمایش‌ها و شبیه‌سازی مخازن به‌همراه مطالعه موردی

پژوهش‌نفت

سال بیست و چهارم
شماره ۷۹

صفحه، ۱۴۶-۱۳۵ ۱۳۹۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۳/۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۱/۸

احد فریدونی^۱، مسعود فریدونی*^۲، سیامک مرادی^۲، قاسم زرگر^۲ و مصطفی گنجه قزوینی^۳

۱- دانشکده نفت اهواز، دانشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۲- دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران

۳- پژوهش و فناوری شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

نفت در تزریق هر یک از گازها ارائه می‌شود که با استفاده از آن می‌توان چندین مخزن مختلف کاندیدای تزریق هر یک از دو گاز را غربال‌گری اولیه کرد.

واژه‌های کلیدی: غربال‌گری مخازن، تزریق گاز، پارامترهای مؤثر، تحلیل آماری، ضریب بازیافت

مقدمه

زمانی که چندین مخزن با خواص سنگ و سیال مختلف کاندیدای انجام یک پروژه ازدیاد برداشت باشند و به دلیل محدودیت‌هایی مانند منابع سیال تزریقی، امکانات سطحی و ... مجبور به انجام گزینش شوند؛ این سؤال پیش خواهد آمد که «کدام مخزن برای انجام پروژه ازدیاد برداشت مدنظر، گزینه مناسب‌تری خواهد بود؟».

روش آنالیز غربال‌گری متداول، شامل جستجوی نمونه‌های موفق میدانی، یافتن اشتراکات این میدان‌ها و استخراج فیلترهای غربال‌گری بر مبنای خصوصیات آنهاست.

تأیر و همکاران علاوه بر مطالعه و تحلیل پروژه‌های میدانی، نتایج آزمایشگاهی را نیز برای تعدادی از روش‌های

چکیده

یکی از روش‌های معمول غربال‌گری مخازن جهت انجام پروژه‌های ازدیاد برداشت، مقایسه پروژه‌های انجام شده موفق در جهان با مخازن موجود است. از آنجایی که در این روش ممکن است به دلیل عدم وجود نمونه مشابه، بعضی از مخازن مناسب جهت تزریق در نظر گرفته نشوند، وجود روش مناسب دیگری برای غربال‌گری مخازن جهت انجام پروژه‌های ازدیاد برداشت ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله ابتدا با استفاده از ترکیب روش طراحی آزمایش‌ها و شبیه‌سازی ترکیبی مخازن، پارامترهای سنگ و سیال مؤثر بر عملکرد تزریق دو گاز نیتروژن و گاز طبیعی جهت تثبیت فشار در مخازن معمولی تعیین می‌شود، سپس اثر مستقل و متقابل این پارامترها در تزریق هر یک از گازها به صورت جداگانه مورد تحلیل آماری قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه می‌گردد. در انتها نیز رابطه تجربی مناسب جهت تخمین ضریب بازیافت نهایی

گازهای تزریقی محاسبه و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. همچنین فرضیه‌های وجود تأثیر متقابل دو پارامتری بر یکدیگر بررسی می‌شوند و در نهایت نیز با کمک نتایج به‌دست آمده یک رابطه تجربی با دقت مناسب برای پیش‌بینی ضریب بازیافت نفت طی تزریق هر یک از گازها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB ارائه می‌شود.

روش کار

توصیف مدل شبیه‌سازی

برای غربال‌گری موثر در فرآیند تثبیت فشار طی تزریق نیتروژن و گاز طبیعی مطابق شکل ۱ از یک مدل سه بعدی استفاده شده است. مدل ساخته شده به طول ۲۰۰۰ ft و عرض ۱۰۰۰ ft، همگن و ناهمسان‌گرد است. این مدل بدون آبده و با کلاهی گازی اولیه می‌باشد و در آن از الگوی تزریق ۵ نقطه‌ای استفاده شده است. برای مدل‌سازی این الگو دو چاه در رأس‌های قطری مدل قرار می‌گیرند؛ چاه تزریقی در بخش فوقانی و چاه تولیدی در بخش تحتانی مخزن تکمیل می‌شوند. به این ترتیب می‌توان اثرات نامطلوب پدیده جدایش فازها را کاهش داد. چاه تزریقی تحت فشار ته چاهی ۴۵۰۰ پام (معادل فشار اولیه مخزن) هر یک از گازها را به درون مخزن تزریق می‌کند و چاه تولیدی نیز با دبی ۲۰۰ STB/D تولید خواهد کرد. خلاصه‌ای از ویژگی‌های مخزن در جدول ۱ نشان داده شده است.

پارامترهای مورد بررسی

پارامترهای شیب مخزن و ضخامت مخزن (h)، نفوذپذیری مطلق افقی (k_h)، اشباع آب همزاد (S_{wc})، فشار موئینگی آستانه (P_{ct})، پارامتر توزیع اندازه منافذ (λ) و ویسکوزیته سیال مخزن (μ_o) به‌عنوان پارامترهای مورد بررسی بر عملکرد تزریق نیتروژن و گاز طبیعی در نظر گرفته شده و در مدل‌های دینامیکی متغیر می‌باشند.

ازدیاد برداشت به بانک اطلاعاتی خود افزودند [۱]. مانریکه و همکاران نیز روش مشابهی را برای غربال‌گری روش‌های ازدیاد برداشت مختلف در مخازن کرناته به‌کار بردند [۲]. لازم است تا با استفاده از آنالیز غربال‌گری، پارامترهای موثر را اولویت‌بندی کرده و تأثیر هر یک را در موفقیت و یا عدم موفقیت روش بیان نمود [۳].

اخیراً روش متفاوت دیگری برای غربال‌گری توسعه یافته است. در این روش یکی از تکنیک‌های طراحی آزمایش‌ها با تحلیل آماری نتایج حاصل از شبیه‌سازی ترکیب می‌شود [۴، ۵ و ۶]. آمودا و همکاران مزایا و معایب روش طراحی آزمایش‌ها در آنالیز غربال‌گری مخازن نفتی را به همراه تحلیل ریسک و عدم قطعیت ارائه دادند [۷]. وانگاس و کونا با استفاده از روش طراحی فاکتوریل جزئی^۱ توانستند پارامترهای تأثیرگذار در محاسبه ارزش خالص فعلی (NPV)^۲ یک مخزن خاص را تحت عملیات ازدیاد برداشت تزریق بخار به کمک ریزش ثقلی SAGD^۳ مشخص کرده و رابطه‌ای برای تخمین این کمیت ارائه دهند [۸]. تحقیقات مشابهی نیز برای مکانیسم‌های ازدیاد برداشت احتراق درجای مرطوب^۴ [۹] و بررسی عملکرد تزریق بخار [۱۰] در منابع موجود است. مرادی و همکارانش بعضی از پارامترهای مهم در تزریق غیر امتزاجی نیتروژن را در مخازن معمولی مورد بررسی قرار دادند [۱۱].

در این مقاله هفت پارامتر از خواص سنگ و سیال مخزن به عنوان پارامترهای غربال‌گری در تزریق دو گاز نیتروژن و گاز طبیعی جهت تثبیت فشار مخزن انتخاب می‌شود. سپس با استفاده از ترکیب روش طراحی آزمایش‌ها و شبیه‌سازی ترکیبی مخازن، پارامترهای موثر بر تزریق هر یک از گازها تعیین می‌گردند. در این مرحله از روش فاکتوریل جزئی که یکی از روش‌های طراحی آزمایش‌ها است برای طراحی آزمایش‌های شبیه‌سازی و ساخت مدل مربوط به آن توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز CMG/GEM استفاده می‌شود [۱۲].

در مرحله بعد نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی با کمک روش‌های استنباط آماری مورد آنالیز قرار می‌گیرد. در این مرحله تأثیر مستقل پارامترهای هدف و میزان عدم قطعیت آنها به کمک روش‌های استنباط آماری برای هر یک از

1. Fractional Factorial

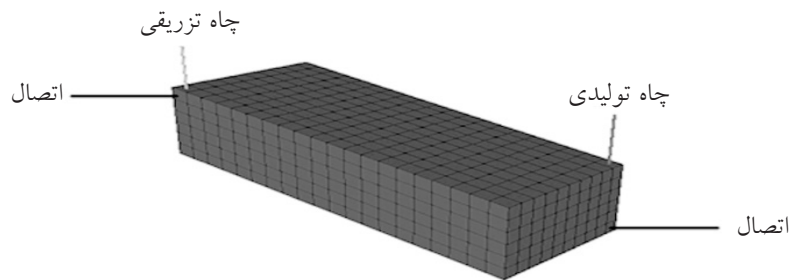
2. Net Present Value

3. Steam Assisted Gravity Drainage

4. Wet In-situ Combustion

5. Non- isotrop

6. Aquifer



شکل ۱- نمایشی از مدل استفاده شده در تزریق نیتروژن و گاز طبیعی

جدول ۱- خلاصه‌ای از ویژگی‌های مخزن.

مقادیر	پارامترهای مخزن
۰/۱۵ (%)	اشباع نفت باقی مانده، S_{or}
۰/۰۲ (%)	اشباع بحرانی گاز، S_{wc}
۲۰۰ STB/D	دبی تولیدی، Q
۰/۱۵ (%)	تخلخل ϕ
۰/۱	نسبت نفوذپذیری عمودی به افقی، K_v/K_h

حداقل آزمایش‌های ممکن می‌توان حداکثر اطلاعات را از یک فرآیند به‌دست آورد.

در این مطالعه از روش فاکتوریل جزئی دو سطحی^۴ به منظور غربال‌گری پارامترهای موثر در تزریق نیتروژن و گاز طبیعی جهت تثبیت فشار مخزن استفاده شده است. در این روش برای هر متغیر، دو مقدار حداقل و حداکثر انتخاب می‌شود و به‌صورت نمادهای "۱-" برای مقادیر حداقل و "۱+" برای مقادیر حداکثر بیان می‌شوند [۱۴ و ۱۵]. اختلاط اثرات را همپوشانی می‌گویند که غالباً برای بیان درجه همپوشانی^۵ اثرات از مفهوم وضوح^۶ آزمایش استفاده می‌شود و آن را با اعداد یونانی نمایش می‌دهند. اطلاعات بیشتر در مورد روش طراحی فاکتوریل جزئی در سایر منابع موجود می‌باشد [۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸]. برای طراحی مدل‌های شبیه‌سازی در این مطالعه، از روش فاکتوریل جزئی دو سطحی با ۳۲ آزمایش با وضوح IV استفاده شده است که مقادیر حداقل و حداکثر پارامترها و ماتریس طراحی آزمایش‌ها به ترتیب در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است.

سه پارامتر λ ، S_{wc} و P_{ct} برای محاسبه نمودارهای نفوذپذیری نسبی و فشار موئینگی با استفاده از فرمول کوری-بروک^۱ استفاده می‌شوند [۱۳]:

$$k_{r,nwt} = [1 - S_{wt}^*]^2 \left[1 - (S_{wt}^*)^{\frac{2+\lambda}{\lambda}} \right] \quad (۱)$$

$$k_{rwt} = (S_{wt}^*)^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}} \quad (۲)$$

$$S_{wt}^* = \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc}} \quad (۳)$$

که $k_{r,nwt}$ نفوذپذیری نسبی فاز نوتر^۲، k_{rwt} نفوذپذیری نسبی فاز تر^۳ و S_w اشباع فاز تر را نشان می‌دهند. برای فشار موئینگی نیز رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۳]:

$$P_c = P_{ct} S_{wt}^{*(1/\lambda)} \quad (۴)$$

که P_c فشار موئینگی بین دو فاز و P_{ct} فشار موئینگی آستانه را بر حسب پام نشان می‌دهند [۱۳].

به‌منظور بررسی تأثیر ویسکوزیته نفت نیز داده‌های دو نمونه سیال با خواص متفاوت (ویسکوزیته کم و زیاد در شرایط مخزن) به‌عنوان نفت سبک و سنگین استفاده شده است. برخی خواص دو نمونه نفت مورد استفاده در جدول ۲ ذکر شده است.

طراحی مدل‌های شبیه‌سازی با روش طراحی آزمایش‌ها

روش طراحی آزمایش‌ها روشی آماری است که با انجام

1. Corey-Brooks
2. Non-wet Phase
3. Wet Phase
4. Two level Fractional Factorial Design
5. Confounding
6. Resolution

جدول ۲- خواص نمونه‌های نفت.

نفت سبک	نفت سنگین	واحد	خواص
۱۸۱/۴۸	۳۰۲/۵۱	Ibm/Ibmol	وزن مولکولی جزء MWC_{7+}, C_{7+}
۰/۸۸۵	۰/۹۳۹	-	$SG C_{7+}$ (وزن مخصوص)
۱۸۷۹/۶۹	۱۶۳۷/۴۸	Psi	فشار نقطه‌ی حباب، P_b
۳۰/۸۲	۲۰/۱۴	درجه	درجه سبکی نفت، API
۶۰۱	۳۰۷	SCF/STB	نسبت گاز به نفت تولیدی، GOR
۰/۴۷	۳/۱	cP	ویسکوزیته نفت
۲۰۰	۲۲۰	°F	دمای مخزن

جدول ۳- مقادیر حداقل و حداکثر فاکتورهای غربال‌گری

حداکثر (+۱)	حداقل (-۱)	واحد	پارامتر
۱۰۰۰	۱۸۰	ft	ضخامت، h
۵۰۰	۳۵	mD	نفوذپذیری مطلق افقی، Kh
۰/۴	۰/۱	-	اشباع آب همزاد، S_{wc}
۲	۰/۷۵	Psi	فشار موئینگی آستانه، P_{ct}
۶	۱/۵	-	پارامتر توزیع اندازه منافذ، λ
۳/۱	۰/۷۴	cP	ویسکوزیته نفت، μ_o
۴۰	۵	درجه	شیب لایه مخزنی

جدول ۴- ماتریس طراحی آزمایش‌ها

شماره آزمایش	h	k_h	S_{wc}	P_{ct}	λ	μ_o	Dip	شماره آزمایش	h	k_h	S_{wc}	P_{ct}	λ	μ_o	Dip
۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱۷	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱
۲	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	۱۸	۱	-۱	-۱	-۱	۱	-۱	-۱
۳	-۱	-۱	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱۹	۱	-۱	-۱	۱	-۱	۱	-۱
۴	-۱	-۱	-۱	۱	۱	-۱	۱	۲۰	۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱
۵	-۱	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۲۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱	-۱
۶	-۱	-۱	۱	-۱	۱	-۱	۱	۲۲	۱	-۱	۱	-۱	۱	۱	۱
۷	-۱	-۱	۱	۱	-۱	۱	۱	۲۳	۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	۱
۸	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱	-۱	۲۴	۱	-۱	۱	۱	۱	-۱	-۱
۹	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۲۵	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	-۱
۱۰	-۱	۱	-۱	-۱	۱	-۱	۱	۲۶	۱	۱	-۱	-۱	۱	۱	۱
۱۱	-۱	۱	-۱	۱	-۱	۱	۱	۲۷	۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱
۱۲	-۱	۱	-۱	۱	۱	۱	-۱	۲۸	۱	۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱
۱۳	-۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	۱	۲۹	۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱
۱۴	-۱	۱	۱	-۱	۱	۱	-۱	۳۰	۱	۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱
۱۵	-۱	۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۳۱	۱	۱	۱	۱	-۱	۱	-۱
۱۶	-۱	۱	۱	۱	۱	-۱	۱	۳۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

می‌تواند استفاده شود. مراحل آزمون فرضیه را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد [۲۰ و ۲۱]:

- ۱- لحاظ کردن فرضیه صفر (اثر اصلی یک پارامتر برابر صفر فرض می‌شود)
- ۲- محاسبه مقدار t

$$t = \frac{ME - x_0}{s/\sqrt{n}} \quad (4)$$

که در آن ME مقدار اثر اصلی محاسبه شده، x_0 مقدار احتمالی اثر اصلی طبق فرضیه صفر که در این جا برابر با صفر است، S انحراف معیار داده‌ها و n تعداد داده‌هاست.

- ۳- محاسبه احتمال متناظر با مقدار t یا همان P -Value کمک تابع توزیع t دو طرفه

۴- پذیرش و یا رد فرضیه صفر طبق مقدار احتمال صحت آن. معیار پذیرفتن یا رد کردن فرضیه صفر را سطح معناداری^۲ می‌گویند. اگر مقدار احتمال به دست آمده کمتر از آن باشد، فرض صفر رد می‌شود و بالعکس؛ اگر بزرگ‌تر از این مقدار باشد، فرض صفر پذیرفته می‌شود. در این بررسی مقدار سطح معناداری ۱۰٪ در نظر گرفته شده است.

در انتخاب پارامترها و بازه تغییراتشان به گونه‌ای عمل شده است که اکثر مخازن نفتی متداول ایران مطابق با اطلاعات در دسترس در این محدوده قرار بگیرند [۱۹]. با اجرای ۳۲ مدل شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی مخازن (CMG/GEM, 2009)، ضریب بازیافت نفت بعد از رسیدن نسبت گاز به نفت تولیدی به ۵۰ MSCF/STB به دست می‌آید.

آنالیز ضریب بازیافت نفت از دیدگاه آماری

آنالیز اثرات اصلی پارامترها

تأثیر مستقل هر پارامتر در افزایش و یا کاهش ضریب بازیافت نفت با مفهوم "اثر اصلی" بیان می‌شود مقدار اثر اصلی هر کدام از پارامترها در تزریق هر یک از گازها به صورت جداگانه در ستون دوم جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است. برای بررسی معناداری آماری این مفهوم، مقدار اثرات هر پارامتر در آزمایش‌های مزدوج شده محاسبه می‌شود.

کاربرد آزمون فرضیه در بررسی معناداری اثرات اصلی

آزمون فرضیه^۱ که یکی از روش‌های استنباط آماری است جهت بررسی معناداری آماری اثر اصلی یک پارامتر

جدول ۵- اثر پارامترها و تحلیل آماری آنها در تزریق گاز طبیعی

پارامتر	بازیافت نهایی (%)	اثر اصلی در بازیافت نهایی (%)	واریانس	احتمال فرضیه صفر (%)	مقدار اثر
h	۴/۶۲	۴۱/۲۱	۱/۱۴	{۲/۲۸, ۰/۲۲, -۰/۲۷, ۱/۳۷, -۲/۸۶, -۱/۲۸, ۰/۸۹, ۱۷/۱۷, ۳/۸۵, ۱۸/۵۲, ۵/۸۳, ۳/۴۹, ۵/۲, ۱/۹۱, ۳/۴۹, ۱۴/۱۸}	
k_h	۸/۰۳	۳۵/۸۹	۰/۰۱	{۴/۴۷, ۶/۰۴, ۳/۷۳, ۷/۲۹, ۱/۸۹, -۰/۳۹, ۴/۶, ۱۷/۱۳, ۷/۳۹, ۷/۷۲, ۷/۴۹, ۲۰/۱, ۸/۶, ۱۹/۴, ۹/۵۴, ۳/۴۶}	
S_{wc}	-۳/۰۶	۱۶/۴۷	۰/۸۶	{-۰/۰۰۳۶, -۴/۵۱, -۳/۳۳, -۶/۹۸, -۴/۶۳, -۶/۸۲, -۵/۹۹, ۹/۴۸, ۰/۶۲, -۲/۹۲, -۲/۹۷, -۲/۶۵, -۲/۰۵, -۴/۱۷, -۴/۵۹, -۷/۴۶}	
P_{ct}	۱/۵۱	۱۶/۴۷	۱۵/۷۲	{۰/۰۰۰۶۹, ۲/۱, ۰/۱۶, -۱/۵۵, -۰/۷۷, ۱/۲۸, -۰/۹۱, -۳/۸۶, -۲/۹۵, -۱/۳, ۱/۳, -۰/۶۵, -۱/۸۳, ۰/۹۶, ۱/۲۹, ۱/۷۱}	
λ	۱/۵۳	۳۰/۵۵	۲۸/۶	{۳/۶۶, -۷/۷۴, ۴/۸۷, -۲/۴۲, ۱/۳۳, ۲/۹۶, ۶/۵۱, ۱۳/۸۶, -۸/۰۶, ۰/۱۲, ۰/۴۵, ۲/۷۵, ۶/۶۱, -۳/۱۸, -۱/۶, ۴/۳۲}	
μ_0	-۳/۱۲	۴۱/۲۱	۷/۰۷	{-۵/۴۶, -۷/۵۲, ۱/۷۸, ۰/۱۳, ۴/۳۶, ۲/۷۸, -۶/۸۶, ۹/۴۲, -۲/۳۵, -۱۷/۰۱, -۱/۹۲, -۴/۲۵, -۲/۵۴, -۵/۸۴, -۱/۹۸, -۱۲/۶۸}	
Dip	۹/۰۵	۳۰/۵۵	$9/2 \times 10^{-4}$	{۱۱/۱۹, ۶/۲۵, ۲۱/۳۸, ۱۸/۶۴, ۵/۹۲, ۴/۰۶, ۵/۱, ۷/۸۳, ۵/۷۱, ۷/۹۷, ۷/۶۴, ۱۸/۳۲, ۳/۹۷, ۸/۸۵, ۴/۳۵, ۷/۶۲}	

1. Hypothesis Testing
2. Significance Level

جدول ۶- اثر پارامترها و تحلیل آماری آنها در تزریق گاز نیتروژن

پارامتر	اثر اصلی در بازایافت نهایی (%)	واریانس	احتمال فرضیه صفر (%)	مقدار اثر
h	۵/۶۰	۳۶/۱۹	۰/۴۳	{۶/۱۸, ۱/۸۳, ۲/۲۵, ۴/۸۳, -۹/۸۸, -۰/۲۲, ۴/۶۲, ۶/۳۷, ۱۰/۶۷, ۱۸/۶, -۰/۳۲, ۷/۷۷, ۶/۸۹, ۷/۱۱, ۸/۳۵, ۵/۸۵}
k _h	۱۲/۶۴	۴۴/۱۴	۱/۶×۱۰ ^{-۴}	{۱۰/۴۹, ۱۱/۹۶, ۶/۹۷, ۱۴/۵۹, ۰/۴, ۳/۵۸, ۲۲/۷۵, ۶/۷, ۱۱/۱۹, ۱۷/۲۴, ۱۳/۷, ۱۵/۶۱, ۲۰/۱۵, ۲۲/۴۱, ۱۷/۸۱, ۸/۱۱}
S _{wc}	-۷/۶۶	۳۴/۷۵	۰/۰۱	{-۵/۶۸, -۱۰/۸۹, -۶/۱۳, -۱۲/۱۴, -۱۶/۵۷, -۱۴/۱۹, -۸/۷۴, -۹/۶۹, -۱/۵۳, -۱۰/۲۳, -۳/۸۱, ۰/۶۱, -۴/۴۳, -۹/۱۴, ۷/۱۷, -۱۴/۲۳}
P _{ct}	۰/۹	۳۴/۷۵	۵۴/۸۹	{-۲/۳۳, ۲/۳۸, ۱/۳۹, -۵/۶۶, ۹/۸۱, ۷/۴۳, -۰/۱۷, -۱/۱۲, -۵/۲۳, ۹/۱۸, ۴/۷۵, ۳/۴۷, -۱۲/۴۳, ۴/۱۳, ۲/۴۴, -۳/۵۷}
λ	۳/۲۵	۲۵/۴	۲/۱	{۷/۸, ۲/۰۵, ۴/۶, -۱/۹۱, ۱۵/۸۹, -۰/۴۵, ۷/۱۷, -۰/۱۶, -۲/۳۷, -۰/۹, ۵/۱۵, -۰/۱۱, ۵/۵۶, -۰/۶۸, ۰/۷۹, ۹/۵۵}
μ _o	-۴/۱۹	۳۶/۱۹	۱/۳۹	{-۳/۰۶, -۷/۴۱, -۱/۳۸, -۳/۹۶, ۱۰/۷۵, ۱/۰۹, -۴/۶۳, -۲/۸۸, -۹/۸, -۱۷/۷۳, -۹/۵۶, -۱/۴۷, -۲/۳۵, -۲/۱۳, -۷/۴۸, -۴/۹۹}
Dip	۱۰/۱۲	۲۵/۴	۸/۲×۱۰ ^{-۵}	{۱۲/۰۳, ۸/۷۸, ۱۳/۴۹, ۴/۹۷, ۷/۶۷, ۶/۲, ۳/۸۳, ۶/۷۲, ۱۵/۷۵, ۱۴/۶۷, ۵/۹۸, ۱۱/۳۲, ۷/۸۱, ۲۲/۷۶, ۶/۲, ۱۳/۸۲}

ارائه رابطه تجربی

چندین مدل برای ارائه یک رابطه تجربی جهت تخمین ضریب بازایافت تزریق دو گاز با استفاده از نرم افزار MATLAB وجود دارد. این مدلها شامل: ۱- Linear, ۲- Pure Quadratic, ۳- Interaction و ۴- Quadratic می باشد. این چهار مدل براساس عبارت کلی زیر به دست می آید [۲۲, ۱۰, ۲۳]:

$$F(x) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i<j}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 \quad (5)$$

که در آن مقدار ثابت رابطه، x_i جملات خطی رابطه، $x_i x_j$ جملات تأثیر متقابل دو پارامتری، x_i^2 جملات درجه دوم و b_i , b_{ij} و b_{ii} ضرایب مربوط به این جملات هستند. با استفاده از پارامترهای آماری ضریب تعیین (R^2) و حداقل مربعات خطا (MSE) می توان کیفیت این مدلها را با یکدیگر مقایسه کرد و بهترین آنها را انتخاب نمود. R^2 نسبت مجموع توان دوم رگرسیون^۱ به مجموع توان دوم کل^۲ را نشان می دهد.

اندازه گیری تأثیر متقابل بین پارامتری و بررسی معناداری آن از دیدگاه آماری

هنگامی که اثر مجزای یک پارامتر در مقادیر متفاوت (کمینه یا بیشینه) از پارامتر دیگری تغییر کند، به تأثیر متقابل پارامتری تعبیر می شود. در این بخش تنها به بررسی تأثیر متقابل دو پارامتری پرداخته می شود. برای اندازه گیری تأثیر متقابل و احتمال معناداری آن، دوباره از مجموعه داده های مقدار اثر یک پارامتر که از مزدوج سازی آزمایشها به دست آمده اند، استفاده می شود. به عنوان نمونه یک مورد از این محاسبه ها در جدول ۷ برای بررسی اثر متقابل نفوذپذیری مطلق افقی ($k_{h\parallel}$) بر ضخامت لایه مخزنی (h) در تزریق گاز نیتروژن نشان داده شده است. در این حالت نیز فرضیه صفر که در اینجا به معنی برابر بودن میانگین اثر h در $k_{h\parallel} = 35$ md با میانگین اثر h در $k_{h\parallel} = 500$ md است، لحاظ می شود و سپس با کمک تابع توزیع t احتمال صحت این فرضیه به دست می آید. اگر احتمال فرضیه از مقدار سطح معناداری کمتر باشد، فرض صفر پذیرفته می شود. اختلاف اثر اصلی پارامتر h با میانگین هر یک از این دو زیرمجموعه برابر تأثیر متقابل این دو پارامتر است.

1. Sum of Square Regression

2. Sum of Square Total

جدول ۷- تأثیر متقابل نفوذپذیری مطلق افقی بر ضخامت لایه مخزنی در تزریق گاز نیتروژن

اثر متقابل k_h بر h										اثر متقابل (%)	احتمال (%)
$k_h = 500 \text{ mD}$	۶/۱۸	۱/۸۳	۲/۲۵	۴/۸۳	-۹/۸۸	-۰/۲۲	۴/۶۲	۶/۳۷	۱/۹۹	-۳/۰۶	۳/۶۶
$k_h = 30 \text{ mD}$	۱۰/۶۷	۱۸/۶	۰/۳۲	۷/۷۷	۶/۸۹	۷/۱۱	۸/۳۵	۵/۸۵	۸/۱۲		

بحث و نتایج

و سایر تأثیرات متقابل اهمیت چندانی ندارند. مطابق جدول ۶ هرچه نفوذپذیری افقی بیشتر باشد، تزریق گاز نیتروژن برای تثبیت فشار مخزن عملکرد بهتری دارد اما تأثیر متقابل ضخامت مخزن و نفوذپذیری افقی به همراه تأثیر متقابل شیب مخزن و نفوذپذیری افقی می‌تواند این نتیجه کلی را به چالش بکشد.

با توجه به جداول ۵ و ۶ و نتایج به دست آمده از بررسی‌های آماری، ۵ پارامتر که بیش‌ترین تأثیر را بر ضریب بازیافت نفت طی تزریق هر یک از گازها دارند به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار برای ساخت مدل ریاضی در نظر گرفته می‌شود. پس از ساخت چهار مدل برای هر یک از گازها و مقایسه مقادیر R^2 و MSE (جدول ۹)، مدل Interaction به‌عنوان بهترین مدل برای پیش‌بینی عملکرد تزریق هر دو گاز انتخاب می‌شود. ضرایب و جملات روابط به دست آمده از این مدل برای هر کدام از گازها به صورت مجزا در جدول ۱۰ ارائه شده است.

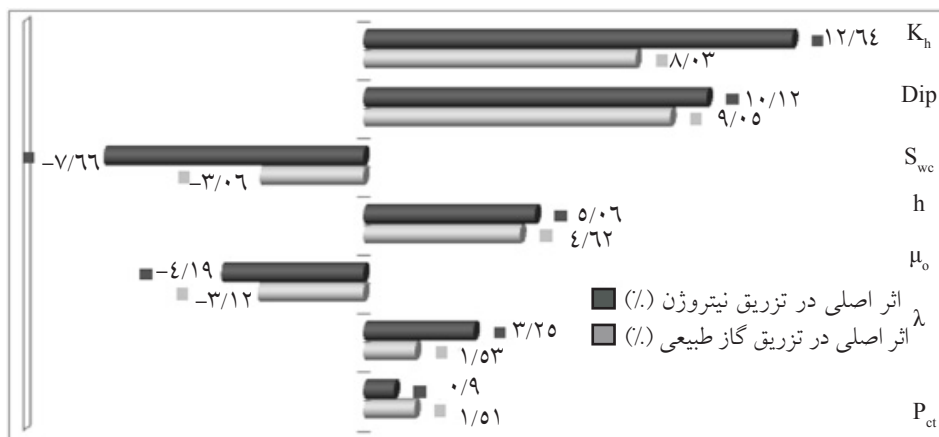
اطلاعات مربوط به پنج پارامتری که بیشترین تأثیر را در تزریق گاز نیتروژن و گاز طبیعی دارند برای چهار مخزن نفتی در جدول ۱۱ ارائه شده است [۱۹]. براساس این اطلاعات و با به کارگیری روابط به دست آمده جهت پیش‌بینی ضریب بازیافت نفت، می‌توان مقدار بازیافت نهایی نفت را بعد از تزریق هر یک از گازها در هر کدام از مخازن به دست آورد که مقادیر مربوط به هر کدام در جدول ۱۲ نشان داده شده است. براساس مقادیر میزان افزایش بازیافت طی تزریق هر یک از گازها، این چهار مخزن رتبه‌بندی می‌شوند و بهترین مخزن را برای تزریق هر یک از گازها تعیین می‌کنند که در جدول ۱۳ برای این چهار مخزن این کار انجام شده است.

مطابق جداول ۵ و ۶، از دیدگاه غربال‌گری و بر اساس فرضیه‌های صفر و مقابل می‌توان نتیجه گرفت پارامترهایی که دارای احتمال بیش از ۱۰٪ هستند (مانند پارامتر فشار موئینگی آستانه و نیز توزیع اندازه منافذ) پارامترهای اثرگذاری در فرآیند تزریق گاز طبیعی و نیتروژن نیستند و تغییرات آن‌ها در محدوده مقدار کمینه و بیشینه آنها (مطابق جدول ۳) تأثیر چندانی در موفقیت و یا عدم موفقیت مکانیسم تثبیت فشار مخزن ندارد.

اثر اصلی دو پارامتر اشباع آب همزاد و ویسکوزیته نفت در تزریق هر دو گاز منفی است؛ این بدان معنی است که با افزایش این دو پارامتر از مقدار کمینه به بیشینه‌شان، مقدار ضریب بازیافت نفت به طور متوسط به اندازه اثر اصلی آنها در تزریق هر کدام از گازها کاهش می‌یابد. مقدار اثر اصلی هر کدام از پارامترهای موثر در تزریق دو گاز متفاوت است. شکل ۲ میزان اثر اصلی پارامترها را در تزریق دو گاز با یکدیگر مقایسه می‌کند.

کاهش گرانیوی نفت جهت ازدیاد برداشت، یکی از روش‌های مهمی است که در فرایندهای ازدیاد برداشت حرارتی دنبال می‌شود. افزایش گرانیوی، اثری منفی بر فرآیند تزریق گاز طبیعی و نیتروژن دارد. تأثیر لاندی در تزریق گاز طبیعی مثبت است یعنی هرچه سیستم یکنواخت‌تر باشد و دامنه توزیع اندازه منافذ (یا توزیع اندازه دانه‌ها) کمتر باشد موجب می‌شود میزان اشباع باقی‌مانده و فشار موئینگی در منافذ کمتر شود و در نتیجه به بازیافت نفت کمک می‌کند. اثر نیروی موئین در کارایی بازیافت به نرخ تولید بستگی دارد.

جدول ۸ نشان می‌دهد که برای تزریق گاز نیتروژن تأثیر متقابل k_h-h ، k_h-S_{wc} ، $k_h-\mu_o$ ، $k_h-\mu_o$ ، μ_o-S_{wc} و k_h-Dip و برای تزریق گاز طبیعی تنها $k_h-\mu_o$ از لحاظ آماری معنادار بوده



شکل ۲- مقایسه اثر اصلی پارامترها در تزریق نیتروژن و گاز طبیعی.

جدول ۸- تاثیر متقابل پارامترها و نتایج تحلیل آماری آنها

نیتروژن		گاز طبیعی		اثر متقابل دو پارامتری
مقدار اثر متقابل (%)	احتمال فرضیه صفر (%)	مقدار اثر متقابل (%)	احتمال فرضیه صفر (%)	
-۳/۰۶	۳/۶۶	-۲/۴۳	۱۳/۳۵	$k_h \rightarrow h$
-۱/۴۲	۳۶/۲۶	۰/۲۱	۸۹/۹۷	$S_{wc} \rightarrow h$
-۰/۰۹	۹۵/۴۷	۱/۱۴	۴۹/۵۴	$P_{ct} \rightarrow h$
۱/۴۶	۳۴/۸۹	۲/۳۲	۱۶/۵۹	$\lambda \rightarrow h$
-۰/۷۵	۶۳/۵۶	-۱/۲۵	۴۵/۵۳	$Dip \rightarrow h$
-۳/۰۶	۶/۵۸	-۲/۴۳	۱۰/۵۶	$h \rightarrow k_h$
۰/۵۶	۷۹/۷۴	۱/۱۴	۴۶/۵۸	$P_{ct} \rightarrow k_h$
-۰/۱۱	۹۴/۸۱	۲/۰۷	۱۸/۷۷	$\lambda \rightarrow k_h$
۲/۷۵	۹/۸۱	۲/۹۵	۵/۱۵	$\mu_o \rightarrow k_h$
-۲/۱۶	۲۰/۲۴	-۱/۰۲	۵۱/۶۳	$Dip \rightarrow k_h$
-۲/۳۲	۳۵/۳۷	۰/۲۱	۸۴/۳۴	$h \rightarrow S_{wc}$
-۲/۸۶	۵/۱۳	-۰/۲۲	۸۳/۸۸	$k_h \rightarrow S_{wc}$
-۲/۳۲	۱۱/۹۲	-۰/۱۹	۸۵/۸	$\lambda \rightarrow S_{wc}$
۲/۶۱	۷/۵	۱/۴۵	۱۶/۴۲	$\mu_o \rightarrow S_{wc}$
-۱/۸۳	۲۲/۸۱	۰/۷۶	۴۷/۵۲	$Dip \rightarrow S_{wc}$
۰/۵۶	۷۱/۷	۱/۱۴	۲۸/۶۱	$k_h \rightarrow P_{ct}$
۱/۱۳	۴۶/۵۳	۱/۳۵	۲۰/۳۶	$\lambda \rightarrow P_{ct}$
۱/۱۳	۳۹/۱۴	۱/۳۵	۳۴/۶۵	$P_{ct} \rightarrow \lambda$
۲/۷۵	۶/۴۵	۲/۹۵	۶/۳۲	$k_h \rightarrow \mu_o$
۱/۴۶	۳۴/۸۹	۲/۳۲	۱۵/۳۸	$Dip \rightarrow \mu_o$
-۲/۱۶	۹/۱	-۱/۰۲	۴۷/۹۳	$k_h \rightarrow Dip$
-۱/۸۳	۱۵/۲۹	۰/۷۶	۵۹/۹۷	$S_{wc} \rightarrow Dip$
۱/۵۵	۲۲/۴۱	۲/۳۲	۱۰/۴۹	$\mu_o \rightarrow Dip$

جدول ۹- مقایسه مقادیر MSE و R² برای مدل‌های مختلف

مدل				پارامتر	نوع گاز تزریق
Linear	Pure Quadratic	Quadratic	Interaction		
۱/۲۳۸	۵۸/۸۹	۶۲/۷۱	۱۴/۳۴	MSE	گاز طبیعی
۰/۷۶	۰/۳۷	۰/۶۵	۰/۸۸	R ²	
۲۲/۰۱	۸۱/۲۳	۴۰/۷۹	۱۲/۶۵	MSE	نیترژن
۰/۸۴	۰/۵۱	۰/۸۷	۰/۹۴	R ²	

جدول ۱۰- ضرایب و جملات رابطه پیشنهادی

ضرایب		جملات رابطه
نیترژن	گاز طبیعی	
۴۴/۷۹	۷۵/۵۴۸	مقدار ثابت
۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	h
۰/۰۴۳	۰/۰۱۸	K _h
-۱۴/۰۵۸	-۲۱/۵۴۳	S _{wc}
-۶/۵۱۳	-۶/۴۳۸	μ _o
۰/۴۱۱	۰/۱۹۹	Dip
-۱/۶۱×۱۰ ^{-۵}	-۱/۲۸×۱۰ ^{-۵}	h* K _h
-۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	h* S _{wc}
۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	h* μ _o
-۵/۲۱×۱۰ ^{-۵}	-۸/۷۱×۱۰ ^{-۵}	h*dip
-۰/۰۴۱	-۰/۰۰۳	K _h *S _{wc}
۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	K _h *μ _o
-۲/۶	-۱/۲×۱۰ ^{-۴}	K _h *dip
۷/۳۷۳	۴/۱۰۸	S _{wc} *μ _o
-۰/۳۴۹	۰/۱۴۵	S _{wc} *dip
۰/۰۳۵	۰/۰۵۶	μ _o *dip

جدول ۱۱- اطلاعات مربوط به چهار مخزن نفتی

نام میدان	K _h (md)	Dip (درجه)	h (ft.)	S _{wc} (%)	μ _o (cp.)
A	۸۸	۸	۶۵۰	۰/۲۲	۷
B	۳۵	۱۰	۸۰۰	۰/۳۰	۲/۹
C	۴۶	۱۲	۶۸۰	۰/۲۴	۲/۱
D	۵۳	۹	۹۰۰	۰/۲۷	۵

جدول ۱۲- ضریب بازیافت نهایی به دست آمده طی تزریق گاز طبیعی و نیترژن

نام میدان	RF تولید طبیعی (%)	RF تزریق نیترژن (%)	RF تزریق گاز طبیعی (%)
A	۱۳	۲۸/۸۷	۵۵/۵۱
B	۲۹/۰۶	۴۲/۶۷	۶۸/۸۲
C	۳۰/۱۸	۴۵/۳۶	۷۱/۰۶
D	۲۳/۹۱	۳۸/۳۶	۶۵/۱۸

جدول ۱۳- رتبه‌بندی مخازن جهت تزریق گاز طبیعی و نیتروژن براساس میزان افزایش بازیافت

نام میدان	میزان افزایش بازیافت طی تزریق نیتروژن (%)	نام میدان	میزان افزایش بازیافت طی تزریق گاز طبیعی (%)
A	۱۵/۸۷	A	۴۲/۵۱
C	۱۵/۱۸	D	۴۱/۲۷
D	۱۴/۴۵	C	۴۰/۸۸
B	۱۳/۶۱	B	۳۹/۷۶

نتیجه‌گیری

بررسی آماری پارامترهای غربال‌گری نشان داد که برای تزریق نیتروژن، به ترتیب نفوذپذیری مطلق افقی، شیب لایه مخزنی، اشباع آب همزاد، ضخامت لایه مخزنی، ویسکوزیته نفت و پارامتر توزیع اندازه منافذ و برای تزریق گاز طبیعی نیز به ترتیب شیب لایه مخزنی، نفوذپذیری مطلق افقی، ضخامت لایه مخزنی، ویسکوزیته نفت و اشباع آب همزاد به ترتیب بیشترین اثر را بر ضریب بازیافت نفت دارند. دو پارامتر توزیع اندازه منافذ و فشار موئینگی آستانه در تزریق گاز طبیعی و پارامتر فشار موئینگی آستانه در تزریق گاز نیتروژن در عمل تأثیر چشم‌گیری بر ضریب بازیافت نفت ندارند.

بررسی‌های آماری نشان داد که در تزریق نیتروژن اثرات متقابل $k_h - \mu_o$ ، $k_h - S_{wc}$ ، $k_h - \mu_o$ ، $k_h - S_{wc}$ ، $k_h - h$ و $k_h - Dip$ و در تزریق گاز طبیعی اثر $k_h - \mu_o$ از لحاظ آماری معنادار و مهم هستند. در نتیجه تأثیرات متقابل فوق را باید در بررسی‌های غربال‌گری و بهبود مدل‌های ریاضی پیشنهادی جهت پیش‌بینی عملکرد تزریق گاز در نظر گرفت.

مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی ضریب بازیافت نفت طی تزریق نیتروژن و گاز طبیعی جهت تثبیت فشار در مخازن معمولی مدل Interaction است که می‌تواند عملکرد مخزن را با کیفیتی قابل رقابت با شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای زمان‌بر و پرهزینه پیش‌بینی کند. با به‌کارگیری این مدل می‌توان

مراجع

- [1]. Taber J. J., Martin F. D. and Seright R. S., "EOR screening criteria revisited- parts 1 and 2", SPE Reservoir Evaluation and Engineering, Aug., 1997.
- [2]. Manrique E. J., Muci V. E. and Gurfinkel M. E., "EOR field experiences in carbonate reservoirs in the united states", SPE Reservoir Evaluation & Engineering journal, Dec. 2007.

از بین مخازن کاندیدای تزریق گاز نیتروژن و گاز طبیعی عملیات غربال‌گری اولیه را انجام داد.

علائم و نشانه‌ها

k_h : نفوذپذیری مطلق افقی (mD)

k_v : نفوذپذیری عمودی (mD)

P_b : فشار نقطه حباب، Psi

Pct : فشار موئینگی آستانه، Psi

R^2 : ضریب تعیین

S_{gc} : اشباع بحرانی گاز

S_{or} : اشباع نفت باقی‌مانده

S_{wc} : اشباع آب همزاد

GOR : نسبت گاز به نفت تولیدی، SCF/STB

h : ضخامت لایه مخزنی، ft

ME : اثر اصلی

MSE : حداقل مربعات خطا

Q : دبی تولیدی، STBD

RF : ضریب بازیافت

s : انحراف معیار

نمادهای یونانی

μ_o : ویسکوزیته نفت، (cP)

λ : پارامتر توزیع اندازه منافذ

- [3]. White C. D. and Royer S. A., "Experimental design as a framework for reservoir studies", pp. SPE 79676, presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston, Texas, 3–5 Febr. 2003.
- [4]. Li B. and Friedmann F., "Novel multiple resolutions design of experiment/response surface methodology for uncertainty analysis of reservoir simulation forecasts", pp. SPE 92853, presented at the 2005 SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston, Texas, 31 January – 2 Febr. 2005.
- [5]. Manrique E. J. and Pereira C. A., "Identifying viable EOR thermal processes in canadian Tar sands", Petroleum Society's 8th Canadian International Petroleum Conference (58th Annual Technical Meeting), Calgary, Alberta, Canada, pp. 12 – 14 Jun., 2007.
- [6]. Adepoju O., Olufemi O., and Djuro N., "Improving production forecasts through the application of design of experiments and probabilistic analysis: a case study from chevron", Nigeria, SPE 128605, 33rd Annual SPE International Technical Conference and Exhibition, Abuja, Nigeria, pp. 3-5 Aug., 2009.
- [7]. Amudo C., Graf T., Dandekar R., and Randle J. M., "The pains and gains of experimental design and response surface applications in reservoir simulation studies", SPE 118709, presented at the 2009 SPE Reservoir Simulation Symposium, The Woodlands, Texas, pp. 2-4 Febr., 2009.
- [8]. Vanegas Prada J. W. and Cunha L. B., "Prediction of SAGD performance using response surface correlations developed by experimental design techniques", Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 47, No. 9, pp. 58-64, Sept., 2008.
- [9]. Sawyer D. N., Cobb W. M., Stalkup F. I. and Braun P. H., "Factorial design analysis of wet-combustion drive", SPE Journal, Vol. 14, No. 1, pp. 25-34, Febr., 1974.
- [10]. Chu C., "Prediction of steam-flood performance in heavy oil reservoirs using correlations developed by factorial design methods", SPE 20020, SPE California Regional Meeting, Ventura, CA, pp. 4-6 Apr., 1990.
- [11]. Moradi S., Ganjeh Ghazvini M., Dabir B. and Emadi M. A., "Statistical inference approach for identification of dominant parameters in immiscible nitrogen injection" Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 26 Dec., 2010.
- [12]. GEM user's guide: advanced oil/gas reservoir simulator, Version 2009. Computer Modeling Group Ltd, Calgary, 2009.
- [13]. Golf—Racht, and Van T. D, *Fundamentals of fractured reservoir engineering*, Elsevier scientific publishing company, Amsterdam - Oxford - New York, 1982.
- [14]. Box G. E. P., Hunter W. G., and Hunter S. J., *Statistics for experimenters*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1978.
- [15]. Montgomery D. C., *Design and analysis of experiments*, Fifth ed., John Wiley & Sons, New York, NY, 2000.
- [16]. Lazic Z. R, *Design of experiments in chemical engineering*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004.
- [17]. Hinkelmann K. and Kempthorne O., "Design and Analysis of Experiments", Vol. 1, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2008.

- [18]. Nist/Sematech, e-Handbook of Statistical Methods, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, 2006.
- [۱۹]. کتابچه اطلاعات آمار و ذخائر مخازن شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب، ۱۳۸۸.
- [20]. Larsen R. J. and Marx M. L., *An Introduction to Mathematical Statistics and Its Applications*, fourth edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey, NJ, 2006.
- [21]. Wonnacott T. H. and Wonnacott R. J., *Introductory Statistics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1969.
- [22]. Hahn B. and Yalentine D., *Essential MATLAB for Engineers and Scientists*, Third Edition, Published by Elsevier Ltd, 2007.
- [23]. Larsen E. A., Kristoffersen S., and Egeland T., "*Functional Integration in Design and Use of a Computer-Based System for Design of Statistical, SPE European Petroleum Computer Conference*", Aberdeen, Scotland, 15-17 March, 1994.