

ساخت و تحلیل مدل کوپل ژئومکانیکی مخزن

مسلم مرادی*، دانشگاه صنعت نفت

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۵/۰۷/۲۶

تاریخ ارسال به داور: ۹۵/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش داور: ۹۵/۰۸/۰۹

در دهه اخیر به اهمیت ژئومکانیک به دلیل تحلیل چندجانبه در مخازن هیدروکربوری تأکید زیادی شده است. در فرایند مدیریت مخزن، ژئومکانیک نقشی بین‌رشته‌ای و چندمنظوره در مقایسه با سایر تخصص‌ها همچون زمین‌شناسی، مکانیک سیالات، مهندسی مخزن، مهندسی حفاری و بهره‌برداری، ترمودینامیک و ... ایفا می‌کند. در واقع، تحلیل ژئومکانیکی به‌طور گسترده‌ای برای توصیف دامنه وسیعی از پدیده‌های گذشته و پیش‌بینی آینده مخزن به کار گرفته می‌شود. از ابتدای امر توسعه میدان، توجه به تغییر وضعیت شرایط یک مخزن با تولید از آن و مسائل زمین‌شناسی، بر نحوه مدیریت آن تأثیر به‌سزایی داشته، تا بدانجا که استراتژی‌های توسعه میدان را می‌تواند تغییر دهد. ژئومکانیک به‌عنوان دانشی نوپا در جهت بهینه‌سازی برداشت از مخزن، کاهش ریسک‌ها و کاهش هزینه‌های توسعه در کنار جلوگیری از خسارات شدید اقتصادی، کمک زیادی به فرآیند مدیریت مخزن می‌کند. عدم توجه به پیشرفت‌های جدید علمی و تکنولوژی‌های در زمینه مرتبط با ژئومکانیک، خسارت‌های زیادی را برای کشور در برداشته و در صورت تداوم تکیه صرف بر دانش و تکنولوژی سنتی، افزایش خسارت‌های مالی سنگین در مورد میادین را به‌دنبال خواهد داشت. از نتایج کوپل چهاربُعدی مخزن، بررسی وضعیت و تغییرات تنش‌های برجا و کرنش رخ داده ناشی از تخلیه میدان و همچنین مقایسه و پیش‌بینی اثرات سناریوهای توسعه، روی آینده مخزن است. در این پژوهش با توجه به مطالعات صورت گرفته، مراحل ساخت و تحلیل مدل چهاربُعدی ژئومکانیک مخزن ارائه و انواع روش‌های کوپل تشریح شده و سپس نحوه کوپل شبیه‌ساز ژئومکانیک با مدل دینامیکی ساخته شده، بررسی خواهد شد.

واژگان کلیدی:

ژئومکانیک نفت، توزیع تنش و کرنش، شبیه‌ساز ژئومکانیکی

مقدمه

عمر یک میدان شامل اکتشاف، توسعه و حفاری، بهره‌برداری و همچنین ترک مخزن می‌باشد. بی‌توجهی به مطالعات و ابزارهای ژئومکانیکی در کشور موجب میلیون‌ها دلار هزینه اضافی در حفاری، بهینه‌سازی شبکه کاری، بهینه‌سازی برداشت، مچالگی لوله جداره و ... شده است. درحالی‌که با اندک مطالعه‌ای می‌توان هزینه‌ها را مدیریت نمود. از طرفی هزینه‌هایی وجود دارند که شاید در کوتاه‌مدت دیده نشوند اما قطعاً در طول عمر میدان خود را نشان می‌دهند. ضرر این هزینه‌ها بسیار کلان خواهد بود و صرفاً با یک نگاه بلندمدت به مدیریت مخزن می‌توان آنها را کنترل کرد. فشردگی مخزن، شکستگی پوش سنگ، ذخیره‌سازی گاز و ... از جمله مواردی هستند که اگر در کوتاه‌مدت به آنها توجه نشود در بلندمدت خسارات بسیار زیاد و غیرقابل جبرانی را به مخزن وارد می‌کنند.

۱- سطوح تحلیلی ژئومکانیک مخزن

تحلیل ژئومکانیکی برای یک مخزن در سه سطح مدل یک‌بُعدی

علم ژئومکانیک در سال‌های اخیر منجر به بهینه‌سازی فرایندها و عملیات مختلف از قبیل حفاری، ازدیاد برداشت، تحریک چاه (شکاف هیدرولیکی / اسیدزنی و...)، مکان‌یابی صحیح چاه‌های عمودی و افقی (زاویه دار) و پیش‌بینی دقیق‌تر تولید شده است. تکیه بر شبیه‌سازهای رایج دینامیکی به دلیل عدم در نظر گرفتن نقش تولید بر روی پارامترهای ژئومکانیکی مخزن موجب عدم دقت کافی نتایج به دست آمده شده و لازم است تا بر مبنای علم ژئومکانیک تأثیرات تولید و تغییرات زمین‌شناسی در مدل‌سازی یکپارچه مخزن دیده شود. طی سال‌های اخیر، شرکت‌های بین‌المللی نفتی و خدماتی همچون انی ایتالیا، توتال، بی‌پی، اکسون-موبیل، شل، شلمبرژه و ... با توجه به اهمیت مطالعات ژئومکانیک در بخش‌های مطالعات مهندسی خود اقدام به ایجاد واحدهای پژوهش و توسعه ژئومکانیک نموده‌اند. شرکت خدماتی نفتی شلمبرژه از پیشگامان مدل‌سازی ژئومکانیکی بوده که در نیم‌دهه گذشته توانسته است در نرم‌افزارهای تجاری خود، مدل‌سازی ژئومکانیکی را جای دهد. جایگاه مطالعات ژئومکانیکی به مثابه مدیریت مخزن در همه مراحل

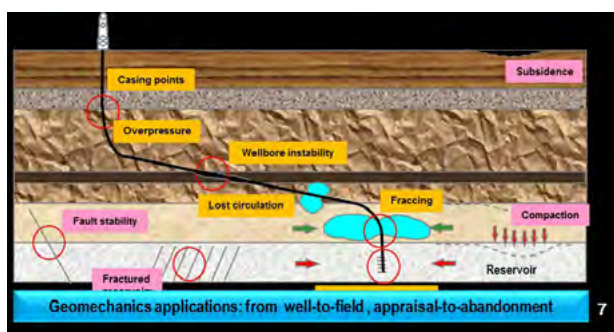
* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (moslem.moradi2@gmail.com)

بسیار پیچیده‌تر و پیشرفته‌تری را نسبت به مدل یک‌بُعدی ژئومکانیکی دارد.

۱-۳- کوپل چهاربُعدی ژئومکانیک با مدل دینامیکی مخزن^۳

غایت مطالعات ژئومکانیکی زمانی است که مدل سه‌بُعدی ژئومکانیک با مدل دینامیک مخزن کوپل شده و بر اساس سناریوهای پیشنهادی، پارامترهای ژئومکانیکی مخزن محاسبه شوند. مدل چهاربُعدی کوپل ژئومکانیکی مخزن، مبنای تصمیم‌گیری بسیار مناسبی برای آینده مخزن و اجرای هر نوع سناریوی بهبود/ازدیاد برداشت از آن خواهد بود. مهمترین کاربردهای این مدل عبارت‌اند از: [۱۰ و ۳]

- فشردگی و فرونشست مخزن ناشی از تولید در بازه‌های زمانی
- پیش‌بینی بهتر اثر سناریوهای تزریق و ازدیاد برداشت در مخزن
- پیش‌بینی فشار منفذی (تفاوت این پیش‌بینی با پیش‌بینی مدل دینامیک این است که در پیش‌بینی با توجه به علم ژئومکانیک اثر پارامترهای ژئومکانیکی همچون تأثیر کرنش روی فشار دیده می‌شود).
- یکپارچگی پوش سنگ ناشی از سناریوهای تولیدی و/یا تزریقی
- مطالعه مخازن غیرمعمول^۴
- مطالعه مکان‌یابی چاه‌ها و اثرات ذخیره‌سازی گاز در مخازن
- پیش‌بینی وضعیت پارامترهای مخزن همچون نفوذپذیری و تخلخل در اثر تخلیه
- پیش‌بینی وضعیت گسله‌ها و شکاف‌ها (چنانکه تغییر وضعیت این ویژگی‌ها در تصمیم‌گیری آینده مخزن همچون سناریوهای تولیدی و تزریقی و... مؤثر خواهد بود. به‌عنوان مثال تغییر وضعیت seal بودن گسله‌ها و یا تغییر مشخصات شکاف‌های طبیعی ناشی از تولید یا تزریق روی نحوه توسعه، مؤثر خواهد بود).
- پیش‌بینی بهینه‌سازی محل چاه‌ها و مسیر حفاری چاه‌ها
- تعیین دقیق‌تر پارامترهای ژئومکانیکی مؤثر برای انجام شکاف



۱ | کاربردهای ژئومکانیک در طول عمر یک میدان

مکانیکی زمین، مدل سه‌بُعدی ژئومکانیکی و مهم‌ترین سطح آن یعنی کوپل چهاربُعدی مدل ژئومکانیکی می‌باشد:

۱-۱- مدل یک‌بُعدی ژئومکانیکی (مدل یک‌بُعدی مکانیکی زمین)^۱

رویکرد این سطح از تفسیر ژئومکانیکی در مقیاس چاه بوده و با توجه به اطلاعات مختلف آزمایشگاهی و میدانی در جهت کاهش هزینه‌ها و ریسک مدل‌سازی انجام می‌گیرد. مهمترین سرفصل‌های مطالعات در این مدل شامل مطالعات پایداری دیواره چاه، تعیین پنجره ایمن گل، مطالعات به‌منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی شکاف هیدرولیکی، انتخاب سرمرته حفاری و ... است [۱].

۱-۲- مدل سه‌بُعدی ژئومکانیکی

این مدل به بررسی پارامترهای ژئومکانیکی مخزن به‌صورت سه‌بُعدی پرداخته و این پارامترها را در مقیاس حجمی^۲ مخزن بررسی می‌کند. مهمترین تحلیل‌ها در این مدل شامل: مطالعات فشار منفذی، بررسی وضعیت گسله‌ها و شکاف‌ها، یکپارچگی پوش سنگ، سناریوهای ازدیاد برداشت، وضعیت تولید مواد جامد و ماسه، مطالعه رفتار مقاومتی-دمایی و به‌طور کلی بررسی شرایط کنونی مخزن است. به‌عبارتی می‌توان مدل سه‌بُعدی ژئومکانیکی را مقدمه‌ای برای تحلیل آینده مخزن معرفی نمود که برای کوپل چهاربُعدی به‌عنوان تفسیر ضروری نیازمند بررسی است. علاوه‌بر کاربردهای مذکور، با یک نگاه تحلیل سه‌بُعدی ژئومکانیکی می‌توان پارامترهای اساسی که توسط مدل یک‌بُعدی در مقیاس چاه مورد بررسی قرار می‌گیرند را به‌صورت مقیاس میدانی مورد مطالعه قرار داد. در این میان تعیین و بهینه‌سازی محل چاه‌ها، بهینه‌سازی مسیر حفاری چاه‌ها، پنجره ایمن گل، تعیین پارامترهای شکاف هیدرولیکی، انتخاب سرمرته حفاری و... را می‌توان به‌طور سه‌بُعدی مورد تحلیل قرار داد و با توجه به همین مدل سه‌بُعدی ژئومکانیک، در جهت کاهش هزینه‌ها، ریسک‌ها و مخاطرات گام برداشت [۲]. باید توجه داشت که این رویکرد نسبت به مدل یک‌بُعدی مکانیکی زمین، بسیار مهم‌تر بوده تا جایی که بهینه‌سازهایی که در مدل یک‌بُعدی صرفاً در چاه از پیش حفر شده قابل بررسی بوده، در اینجا در چاه‌های حفر نشده می‌تواند انجام گیرد. در واقع، در این مدل می‌توان ابتدا محل پیشنهادی چاه را تعیین و بهینه‌سازی کرد و سپس مسیر حفاری چاه و پایداری آن را بررسی نمود. واضح است که این مدل نگاه

هیدرولیکی

در محیط متخلخل روشن می‌ساخت. او همچنین ارتباط بین تخلخل مخزن و کرنش حجمی را واضح نمود. مطالعات Van der Knaap (۱۹۵۹) Geertsma را برای حالت غیرخطی اما مواد الاستیک مانند ماسه‌های چگال اما غیرسیمانی توسعه داد. Rice و Cleary (۱۹۷۶) مسائل الاستیک منفذی را با فرض اینکه فشار منفذی و تنش، متغیرهای اولیه هستند، حل کردند (برخلاف پژوهش بایوت که این پارامترها توسط ضرایب بایوت تغییر می‌کنند). Khaled et al (۱۹۸۴) تئوری بایوت برای تخلخل یگانه را با روش حل توسط عنصر محدود، به سیستم تخلخل مخزن دو گانه توسعه دادند. بعدها Valliappan و Khalili-Naghadeh (۱۹۹۶ و ۱۹۹۱) مسئله تخلخل دو گانه برای جریان تک‌فاز را با در نظر گرفتن اثر تغییر شکل سنگ روی فشار ماتریکس و شکاف بررسی و توسعه دادند [۵]. جریان چند فاز برای حالت تخلخل دو گانه توسط Lewis and Ghafouri (۱۹۹۷) به صورت رابطه در آمد؛ اما هنوز تمام کارها در چارچوب جریان تک‌فاز و خطی در محیط متخلخل محدود هستند. این پژوهش اصول کوپل شبیه‌ساز جریان سیال و ژئومکانیک را مرور و روابط و معادلات نمایانگر نحوه کوپل را بررسی خواهد نمود.

۳- کوپل شبیه‌سازهای دینامیک و ژئومکانیک

کوپل شبیه‌ساز مخزن با ژئومکانیک در صنعت نفت کاربرد گسترده‌ای دارد. در شبیه‌سازهای رایج مخزن به عنوان مثال، فرونشست غالباً با استفاده از یک رابطه ساده بدون دانستن کامل پاسخ‌های ژئومکانیکی قابل تخمین است و تنها پارامتر ژئومکانیکی که در این مورد لحاظ می‌شود، تراکم‌پذیری حفرات است که شاخص کامل و کافی برای نشان دادن تغییر حجم حفرات به دلیل تغییر فشار و دما نیست. با این وجود در برخی مسائل مانند تولید اولیه در مخازن با شرایط جنس الاستیک-خطی، محاسبه فرونشست توسط شبیه‌ساز مخزن به تنهایی ممکن است نتایج مشابه راه‌حل کوپل ژئومکانیک را ارائه دهد؛ اما وقتی نوع مواد غیرخطی باشد، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازهای رایج مخزن با نتایج حاصل از شبیه‌سازهای کوپل جریان سیال با ژئومکانیک تفاوت خواهد داشت. علت اصلی این است که در شبیه‌سازی کوپل، جریان بسیار وابسته به توزیع تنش و کرنش است که منجر به تغییر تخلخل و نفوذپذیری می‌شود. اگرچه در شبیه‌سازهای رایج این وابستگی به تنش، کاملاً نادیده گرفته می‌شود؛ بنابراین نتایج به دست آمده توسط مدل دینامیک الزاماً نمی‌تواند

تعیین پنجره ایمن گل حفاری
 ■ مطالعات مربوط به رفتار مقاومتی-دمایی مخزن
 ■ مطالعات مربوط به انتخاب سرمت حفاری
 ■ مطالعات مربوط به نحوه تکمیل چاه و پیش‌بینی تولید مواد جامد و ماسه^۵
 ■ پیش‌بینی اثرات ژئوشیمیایی که تزریق گاز و سایر روش‌های ازدیاد برداشت روی مخزن و سنگ‌پوش خواهند گذاشت.
 و کاربردهای رایج دیگر، تنها بخشی از کاربردهای کوپل مدل چهاربُعدی ژئومکانیکی مخزن است. چنانکه واضح است اهمیت مدل کوپل چهاربُعدی ژئومکانیکی بسیار بیشتر از مدل یک‌بُعدی و سه‌بُعدی ژئومکانیکی است و نسبت به آنها در جهت کاهش هزینه‌ها، مخاطرات و ریسک توسعه می‌تواند موثرتر واقع گردد. به‌طور کلی محدوده مطالعات و بررسی‌های ژئومکانیکی برگرفته از مطالعات بخش ژئومکانیک شرکت شلمبرژر در شکل ۱- مشخص شده است.
 چنانکه در شکل نشان داده شده، ژئومکانیک گستره‌ای به وسعت اولین فعالیت‌های اکتشافی، توسعه، بهره‌برداری و حتی ترک مخزن و ذخیره‌سازی را دارد تا جایی که قاطعانه می‌توان ادعا نمود هر طرح جامع توسعه بدون مطالعات ژئومکانیک با نقصان جدی همراه است.

۲- ادبیات موضوع

ماهیت ژئومکانیک بر اساس مفاهیم تنش مؤثر و استحکام سنگ‌های تراکم‌ناپذیر با رابطه‌ای توسط Terzaghi (۱۹۳۶) ارائه گردید. بایوت بر اساس مفهوم تنش مؤثر ارائه شده توسط Terzaghi، کوپل بین تنش و فشار منفذی را در یک محیط متخلخل بررسی و با توجه به اصول مکانیک پیوسته، رابطه عمومی سه‌بُعدی تئوری استحکام سنگ را توسعه داد. وی همچنین تئوری الاستیک منفذی را برای مواد ناهمسانگرد و غیرخطی توسعه داد [۴]. تئوری بایوت به مکانیک سنگ بیش از مکانیک سیالات معطوف است. به‌همین دلیل تئوری بایوت کمتر با اصول جریان سیال (بدون در نظر گرفتن ملاحظات ژئومکانیکی) از لحاظ درک مفاهیم و تفسیر فیزیکی پارامترهایی مانند تراکم‌پذیری سنگ انطباق دارد. Skempton (۱۹۶۰) رابطه‌ای بین تنش کل و فشار منفذی سیال تحت شرایط عدم‌ریزش اولیه ارائه داد که به ضرایب فشار منفذی Skempton به A و B موسوم شدند. Geerstma (۱۹۵۷) شمای بهتری از رابطه بین فشار، تنش و حجم ارائه داد که مفهوم تراکم‌پذیری را

همچنین تغییرات افقی تنش را توسط ارتباط با تخلخل و تنش محاسبه می‌کند.

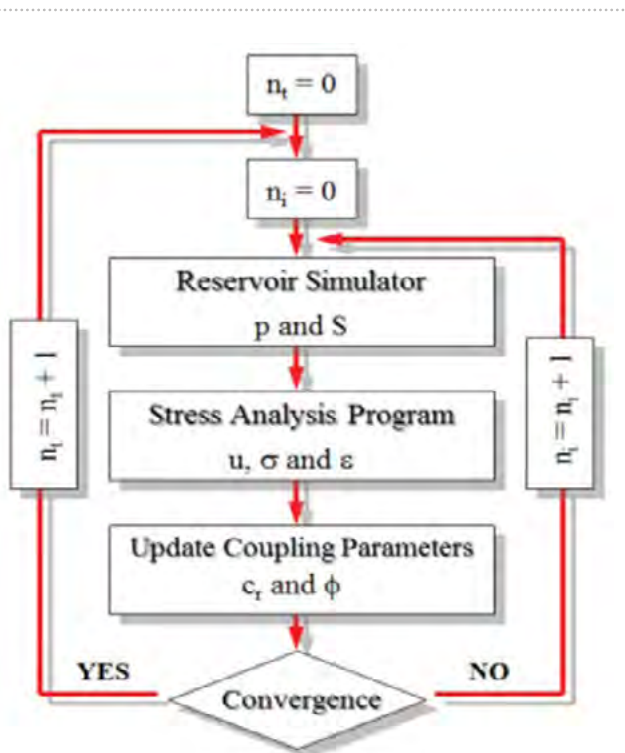
در این روش یک رابطه تجربی به صورت جدول تخلخل و نفوذپذیری بر حسب فشار به شبیه‌ساز جریان سیال داده می‌شود. به عبارتی با تغییر فشار، تغییر تخلخل و نفوذپذیری بررسی می‌شود که این پارامترها در گام‌های بعدی در شبیه‌سازی دینامیک تغییر پیدا می‌کنند. این روش به حالت واقعی خیلی نزدیک نیست، اما در مواردی که هزینه مطالعات کوپل کامل زیاد باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد [7].

۳-۳- کوپل جزئی^۲

شامل دو نوع کوپل یک‌طرفه و دو طرفه است که هر کدام از شبیه‌سازهای ژئومکانیک و دینامیکی به‌طور جداگانه عمل شبیه‌سازی را انجام داده و به شبیه‌ساز دیگر نتایج ارسال می‌گردد.

۳-۳-۱- کوپل صریح یا کوپل یک‌طرفه^۸

در این روش که کوپل یک‌طرفه نیز نامیده می‌شود، اطلاعات از شبیه‌ساز مخزن به مدل ژئومکانیک ارسال می‌شود اما نتایج به شبیه‌ساز مخزنی جهت تصحیح فشار و تخلخل و نفوذپذیری ارجاع داده نمی‌شود. در واقع، مدل جریان سیال مخزن تحت



۳ | شماتیک کوپل دو طرفه [۷]



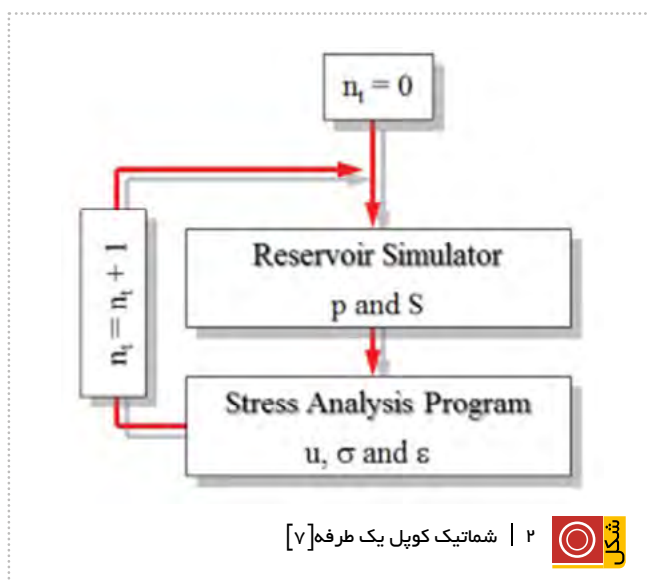
پیش‌بینی مناسبی داشته باشد، همچنانکه مخازن شکافدار طبیعی و مخازن با فشردگی کم، بسیار در معرض تغییر اندازه و جهت تنش، حساس هستند و با تولید نفت و در نتیجه خالی شدن مخزن، جهت و اندازه تنش تغییر پیدا خواهد کرد؛ بنابراین نقش ژئومکانیک در مخازن شکافدار طبیعی نسبت به مخازن بدون شکاف بسیار حساس‌تر خواهد بود [6]. به منظور کوپل بین شبیه‌ساز دینامیکی و شبیه‌ساز ژئومکانیک نیاز است تا روش‌های کوپل بین نتایج و یا معادلات بین دو شبیه‌ساز معرفی شود. سطوح مختلفی برای کوپل جریان سیال با ژئومکانیک وجود دارد:

۳-۱- روش کوپل جدا

این روش ساده‌ترین تکنیک در بین روش‌های کوپل است. در این روش، اثر تغییرات تنش توسط برخی پارامترها مانند تراکم‌پذیری و نفوذپذیری در قالب مدل جریانی سیال دیده می‌شود. بعد از شبیه‌سازی مدل دینامیکی، تغییر شکل سنگ‌ها در قالب یک مدل ژئومکانیکی محاسبه می‌شود که تاریخچه فشاری به‌عنوان یک پارامتر خارجی در آن دخیل می‌شود. این فرایند تا زمانی که به یک تخمین مناسب از فشار و دما نینجامد، تکرار می‌شود [7].

۳-۲- روش شبه کوپل^۶

این نوع کوپل بر مبنای یک مدل تجربی بر حسب نفوذپذیری مطلق و تخلخل به‌عنوان توابعی از فشار انجام می‌پذیرد. در طول فرآیند، شبیه‌ساز رایج مخزن برخی پارامترهای ژئومکانیکی مانند فشردگی را به کمک رابطه‌ی با تخلخل و جابه‌جایی عمودی و



۲ | شماتیک کوپل یک طرفه [۷]



ژئومکانیکی که توسط مدل ژئومکانیکی در مرحله پیشین محاسبه شده‌اند، تحت تأثیر قرار می‌گیرند. در طول کوپل شبیه‌سازی توسط تکرار شونده غیرخطی، شبیه‌سازی، محاسبات را برای جریان چندفازی محیط متخلخل و جابه‌جایی‌های مکانیکی سنگ‌ها به‌طور پی‌درپی انجام می‌دهد. محاسبات جریان و جابه‌جایی مکانیکی سنگ‌های مخزن در پایان هر بار تکرار غیرخطی از طریق محاسبه حجم حفرات (تخلخل مخزن) برگشت می‌شود. در واقع در پایان هر بار چرخه تکرار غیرخطی اثر پارامترهای ژئومکانیکی روی حجم حفرات محاسبه می‌شود.

جریان کار کوپل دو طرفه در شکل ۳- نشان‌دهنده رفت و برگشت داده‌ها و نتایج بین دو شبیه‌سازی است.

مهم‌ترین ویژگی این نوع کوپل، انعطاف‌پذیری است. یعنی هر دو شبیه‌سازی می‌توانند توسط روش‌های عددی مختلفی معادلات خود را حل کنند و صرفاً خروجی شبیه‌سازها بین دو شبیه‌سازی رفت و برگشتی باشد. به‌علاوه اینکه یک شبیه‌سازی رایج مخزن می‌تواند با یک ماژول ژئومکانیکی با تغییر اندکی در کدهای شبیه‌سازی عمل کوپل را انجام دهد که این تغییر اندک همان الگوریتمی خواهد بود که صرفاً خروجی‌های هر دو شبیه‌سازی را

تأثیر پاسخ‌های ژئومکانیکی به‌دست آمده توسط ماژول ژئومکانیکی، قرار نمی‌گیرد.

اما تغییر متغیرهای جریانی سیال مخزن روی پارامترهای ژئومکانیکی تأثیر می‌گذارد. این روش کوپل برای مشکلات فرونشست مخزن رویکردی مؤثر و سریع می‌باشد زیرا محاسبات ژئومکانیکی برای تحلیل فرونشست در بازه‌های زمانی کوتاه چندان پاسخ‌روشنی را نداده و صرفاً در مقیاس زمانی بلندمدت می‌توان وضعیت فرونشست زمین را تحلیل نمود. انتشار جریان سیال عموماً در چارچوب بازه‌های زمانی کوتاه در شبیه‌سازی مخزن صورت می‌گیرد، در صورتی که پدیده تغییر شکل فرونشست در بازه زمانی بلندمدت رخ می‌دهد، در مقیاس زمانی بسیار کوتاه قابل مشاهده نیست و هر زمانی که نیاز باشد می‌توان پدیده فرونشست را بررسی نمود [۷]. شکل ۲- نحوه کوپل یک‌طرفه شبیه‌سازی دینامیک به ژئومکانیک را نشان می‌دهد.

بنابراین با استفاده از نتایج کوپل در بازه‌های زمانی متفاوت، نتایج دقیق‌تری از شبیه‌سازی حاصل خواهد شد. این روش یک تکنیک انعطاف‌پذیر و ساده بوده که می‌تواند از شبیه‌سازی‌های دینامیکی و ژئومکانیکی موجود به‌طور هم‌زمان استفاده کند. به‌عبارتی نیاز به شبیه‌سازی مخزنی پیچیده برای شبیه‌سازی هم‌زمان دینامیک و ژئومکانیک نخواهد بود.

از طرفی یکی از بزرگ‌ترین مشکلات این تکنیک، پایداری کوتاه و عدم دقت بالای آن است که برخی محدودیت‌ها در تعیین بازه‌های زمانی اجرای شبیه‌سازها ایجاد کرده است. به‌هر حال خیلی از چالش‌های فرونشست در مخازن و محاسبات جریانی سیال، نیازمند تعداد بازه‌های کوچک زمانی بیشتری است؛ به‌عبارت دیگر برای حل مشکل دقت پایین این تکنیک کوپل، باید تعداد بازه‌های زمانی برای اجرای شبیه‌سازی دینامیکی را بالا برد، در نتیجه تعداد مراحل اجرای شبیه‌سازی ژئومکانیکی بیشتر خواهد شد و همین مورد باعث خواهد شد که برای بالا بردن دقت نتایج، زمان اجرای کوپل دینامیکی با ژئومکانیک بالا برود.

۳-۲- کوپل تکرار شونده یا کوپل دو طرفه^۹

این روش تحت عنوان کوپل دو طرفه نیز شناخته شده است. اطلاعات محاسبه شده در شبیه‌سازی مخزن و مدل ژئومکانیکی به‌صورت رفت و برگشتی در هر بازه زمانی توسط چرخه‌ای تکرار شونده غیرخطی تبادل می‌شوند؛ بنابراین ورودی‌های مراحل بعدی شبیه‌سازی جریان دینامیکی توسط پارامترهای

۱۱ داده‌های ورودی برای ساخت مدل سه‌بعدی ژئومکانیک [۱۰]

| توضیح | نوع داده مورد نیاز |
|--|---|
| نقشه گسله‌ها | هندسه مخزن (گسله‌ها و لیتولوژی مرزها) |
| نقشه‌های کانتور عمقی | |
| مدل استاتیک و دینامیک مخزن | پارامترهای جنس مواد (خواص مکانیکی سنگ‌ها و گسله‌ها) |
| برای هر لیتولوژی؛ مدول یانگ، ضریب پواسون و... | |
| خواص گسله‌ها (چسبندگی، زاویه داخلی اصطکاک و ...) | |
| تنش عمودی | شرایط مرزی (تنش ناحیه‌ای میدان) |
| جهت‌گیری و اندازه حداکثر تنش افقی و عمودی | |
| مقادیر محلی تنش (جهت و اندازه) که از منابع مختلف همچون نگاره‌های تصویری (FMI و ...) به‌دست آمده‌اند. | داده‌های کالیبراسیون |

توسعه کدنویسی بسیار پیچیده تری نسبت به روش های دیگر می باشد. سرعت بسیار پایین و زمان بر بودن این تکنیک نسبت به روش صریح و چرخه تکرار شونده در برخی مسائل، از مشکلات دیگر تکنیک کوپل کامل است و به کامپیوترها و پردازنده های بسیار پرسرعت و پیشرفته نیاز دارد. علیرغم زمان بر بودن این روش در بین روش های عددی کوپل، بهترین نتایج به دست می آید [۷۸]. توسعه این نوع روش کوپل هنوز انجام نگردیده است و تاکنون در حد تئوری و نحوه حل معادلات عددی است. در سال های اخیر شرکت هایی همچون شلمبرژر و کامسول به دنبال توسعه نرم افزاری و حل عددی این نوع روش کوپل هستند.

به هر حال با بررسی اصول و انواع روش های کوپل شبیه سازی های ژئومکانیکی و دینامیکی، شرایط کوپل تشریح گردیده و لذا مزایا و معایب هر کدام از این روش ها، انتخاب روش مناسب و بهینه را تسهیل می کند.

۴- داده های مورد نیاز ساخت مدل سه بُعدی ژئومکانیک

ساخت مدل سه بُعدی ژئومکانیکی و کوپل با جریان سیال نیازمند برخی داده های آزمایشگاهی و شبیه سازی است. برخی از داده ها در آزمایشگاه اندازه گیری شده و برخی با توجه به مدل سازی استاتیکی مخزن به دست می آید. در مواردی که آزمایشگاه های مورد نظر در دسترس نباشد، از برخی روابط تجربی موجود در مقالات علمی با در نظر گرفتن شرایط معادلات می توان استفاده نمود. به عنوان مثال روابط تجربی مختلفی تاکنون برای ارتباط بین نفوذپذیری و کرنش حجمی توسعه شده است که برخی از مطالعات، مربوط به H. F. Wang (۲۰۰۰) است [۹۱ و ۹۰]. به منظور ساخت مدل سه بُعدی ژئومکانیکی یک مخزن، داده های جدول ۱- مورد نیاز می باشد.

چالش اصلی، تعیین و نحوه توزیع تنش های برجای نواحی مختلف مخزن است. غایت شبیه سازی ژئومکانیک ساخت و تحلیل مشکلات ژئومکانیکی بر اساس مدل چهار بُعدی ژئومکانیکی مخزن می باشد. چنانکه بر اساس کوپل مدل ژئومکانیک و مخزن در زمان های مختلف، آنچه از مدل های یک بُعدی و سه بُعدی با عدم قطعیت و محدودیت های زیاد بدست می آمد را به راحتی می توان به طور جامع با این مدل تحلیل نمود [۱۰]. لذا مدل کوپل به دلیل مزایای فراوانی که نسبت به مدل سه بُعدی دارد، اهمیت بیشتری داشته و مورد توجه بسیاری از متخصصان ژئومکانیک است؛ اگرچه هنوز دانش تحلیل این مدل ها در کشور نهادینه نشده است. در بخش های زیر جریان کار کوپل مدل دینامیک و شبیه سازی ژئومکانیک بر اساس ماژول ژئومکانیک نفت نرم افزار پترل ارائه می گردد.

برای شبیه سازی دیگر ارسال می کند و از این طریق کوپل انجام گیرد.

این روش برای مسائل پیچیده مقداری مشکل خواهد بود چرا که نیازمند تعداد بسیار زیاد تکرار چرخه خواهد بود که این به دلیل میزان همگرایی کم در هر چرخه تکرار شونده ی غیرخطی که به صورت معادله دیفرانسیلی مرتبه اول بررسی می شود، است و لذا تعداد دورهای بیشتر و زمان بیشتری طول خواهد کشید تا کوپل کامل شود. چالش دیگر تکنیک این است که در هر بار تکرار چرخه، فقط میزان نسبتاً کمی تغییر حجم حفرت (تخلخل مخزن) توسط تولید بخش قابل توجهی از سیال مخزن انجام شده و متعاقباً تخلیه مخزن طبق اصل بقای جرم، باعث فشردگی مخزن خواهد شد. به عبارتی باید میزان تخلیه مخزن قابل توجه باشد تا فرایندی مانند فشردگی مشاهده شود. در صورتی که هر دو تکنیک از میزان تورانس کمی برای همگرایی چرخه تکرار شونده استفاده نمایند، نتایج روش کوپل توسط چرخه تکرار شونده می تواند مشابه روش کوپل کامل باشد. همگرایی بدین صورت است که اختلاف تنش به دست آمده در چرخه جدید و سپس نفوذپذیری و تخلخل به روز شده با میزان به دست آمده از چرخه قبل باید از یک تورانس مشخص تجاوز نکند. لذا چرخه، کامل شده و همگرایی رخ داده است. در واقع، اثر تغییرات مکانیکی زمین در شبیه سازی سیال جریان روی پارامترها دیده می شود [۸].

۳-۴- کوپل کامل^{۱۰}

در این روش محاسبات جریان سیال و جابه جایی مکانیکی به صورت یک سیستم پیوسته انجام می شود که عموماً روش حل عددی به شکل عنصر محدود بوده و برنامه حل کننده خطی باید متغیرهای جریانی سیال و متغیرهای مکانیکی زمین را به طور هم زمان حل نماید. مزیت اولیه روش کوپل کامل نسبت به تکنیک های دیگر، پایدارتر بودن این روش است که مرتبه دوم بودن معادله غیرخطی را حفظ نموده و در واقع، معادله دیفرانسیلی مرتبه دوم را به روش عنصر محدود حل می کند. (برخلاف روش های قبل که معادله غیرخطی و دیفرانسیلی مرتبه دوم را بر اساس معادلات مرتبه اول حل می کردند). اعتبار نتایج این روش بیشتر بوده و می تواند معیاری برای دیگر تکنیک ها قرار گیرد. اشکالات تکنیک کوپل کامل شامل: دشوار بودن کوپل جریان سیال در محیط متخلخل و شبیه سازی ژئومکانیک است که نیازمند

۵-۱- ساخت مدل کوپل چهاربُعدی ژئومکانیک مخزن

چنانکه پیش تر نیز مطرح شد، مدل چهاربُعدی ژئومکانیکی دامنه وسیعی از چالش‌های موجود در مخازن اعم از فشردگی مخزن، وضعیت پوش سنگ، وضعیت فعال شدن گسله‌ها و شکاف و ... را در زمان‌های موردنظر حل می‌کند. ساخت مدل چهاربُعدی به‌عنوان یکی از جدیدترین اقدامات در زمینه ژئومکانیک در سال‌های اخیر بسیار موردتوجه متخصصان و شرکت‌های توسعه‌دهنده نرم افزارهای نفتی قرار گرفته است. در این بخش نحوه ساخت مدل کوپل ژئومکانیک تشریح می‌گردد. در ادامه، جریان کار کوپل مدل دینامیکی بین شبیه‌ساز دینامیک اکلپس و شبیه‌ساز ژئومکانیکی ویساج از نرم‌افزارهای شرکت شلمبرژر نشان داده شده است (شکل-۴).

با توجه به این جریان کار، در اینجا مراحل ساخت مدل بررسی می‌شود:

۵-۱-۱- ساخت گریدهای ژئومکانیک

با داشتن مدل دینامیک مخزن و همچنین، داده‌های موردنیاز مدل ژئومکانیک، می‌توان مدل سه‌بُعدی را ساخت. ابعاد و اندازه گریدها بر حسب نیاز و دقت انجام محاسبات می‌تواند متفاوت باشد.

۵-۲- وارد کردن مدل ساخت توابع و جنس مواد به منظور حل

معادلات ژئومکانیکی سنگ

در این بخش نوع جنس تغییرات ژئومکانیکی سنگ و نحوه به‌روز کردن داده‌ها وارد می‌گردد. پارامترهای مکانیکی سنگ نیز در این بخش به‌عنوان ورودی موردنیاز هستند.



۴ | کوپل چهاربُعدی مدل ژئومکانیک مخزن با استفاده از نرم افزار پترل [۱۱]



۵-۳- توزیع خواص ژئومکانیکی و پارامترهای مخزنی

نحوه توزیع خواص ژئومکانیکی در این مرحله موردنظر است. بر حسب شرایط و ویژگی‌های مخزن، پارامترهای ژئومکانیکی باید در مخزن توزیع شوند تا بتوان مدل سه‌بُعدی ژئومکانیکی ساخته شود. همچنین نحوه به‌روز کردن داده‌های ژئومکانیکی و مخزنی (که به دلیل تغییرات ژئومکانیکی تغییر نموده‌اند)، باید در این مرحله تعیین گردد.

۵-۴- مدلسازی ناپیوستگی‌ها همچون گسله‌ها و شکاف: (در صورت وجود)

در صورت وجود گسل یا شکاف در مخزن، باید پارامترهای ژئومکانیکی آنها را در این بخش وارد و بررسی نمود.

۵-۵- تعریف شرایط اولیه مدل ژئومکانیکی

شرایط اولیه در اینجا به‌عنوان ورودی به مدل ژئومکانیکی داده می‌شود. برای گریدهای تعریف نشده در مدل دینامیکی باید مبنای محاسبات فشار و ... تعیین گردد؛ به‌عنوان مثال مبنای فشار را گرادیان می‌توان قرار داد. همچنین نحوه کوپل مدل سه‌بُعدی ژئومکانیک با مدل دینامیکی باید در این بخش تعیین گردد. قابل ذکر است که روش کوپل کامل هنوز توسط شرکت شلمبرژر در حال توسعه و مطالعه می‌باشد و بنابراین، در کوپل ژئومکانیک می‌توان یکی از روش‌های کوپل یک طرفه (صریح) یا کوپل دوطرفه (تکرار شونده) را بر حسب نیاز و دقت محاسبات، انتخاب نمود. روش‌های کوپل پیش تر تشریح شده است.

۵-۶- تعریف شرایط مرزی

شرایط مرزی شامل: مشخصات و ویژگی‌های بالاسری، کناری و پایینی مخزن که برای به‌دست آوردن شرایط در مرزهای مخزن و همچنین محاسبات تغییرات ژئومکانیکی مخزن مورد نیاز هستند.

۵-۷- تعریف سناریوهای شبیه‌سازی مدل دینامیک برای کوپل با شبیه‌ساز ژئومکانیک مخزن

سناریوهای شبیه‌سازی در این بخش وارد می‌گردد. انتخاب بازه‌های زمانی که پارامترهای ژئومکانیکی و مخزنی باید به‌روز شوند، تعیین تلورانس در کوپل دو طرفه و به‌روز کردن پارامترهای مدل دینامیکی از مراحل این بخش می‌باشد.

۵-۸- اجرای کوپل مدل جریانی سیال و مدل ژئومکانیک ساخته شده به‌منظور کوپل مدل دینامیکی مخزن با شبیه‌ساز ژئومکانیکی،

Equation 5-Porosity updating in a dynamics model

$$\phi = \phi^0 [1 + c_r (p - p^0)]$$

معادله دیفرانسیلی ۶ در شبیه‌ساز معادله‌ای است که توسط شبیه‌سازهای دینامیکی، پارامترهای مختلف را محاسبه می‌کند.

Equation 6-diffusivity equation for dynamic model

$$[c_r \phi^0 + c_r \phi^0] \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{k}{\mu} \nabla^2 p = 0$$

معادله ۷- ضعف شبیه‌سازهای دینامیکی که عدم تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی در به‌روز کردن پارامترهای مدل دینامیکی است را پوشش داده و نحوه به‌روز نمودن این پارامترها در تخلخل را نشان می‌دهد [۷ و ۱۲].

Equation 7-porosity updating with reservoir geomechanical parameters

$$\phi = \phi^0 + \alpha (\varepsilon_v - \varepsilon_v^0) + \frac{1}{Q} (p - p^0)$$

Equation 8-pressure gradient

$$G \nabla^2 u + \frac{G}{1-2\nu} \nabla \nabla u = \alpha \nabla p$$

معادله ۹- جامع‌ترین معادله برای حل هم‌زمان پارامترهای دینامیکی و ژئومکانیک است. حل این معادله با استفاده از روش‌های عددی بوده که در شرایط مشابه نسبت به کوپل یک‌طرفه و دوطرفه بسیار زمان بیشتری را صرف اجرا خواهد نمود.

Equation 9-diffusivity equation for reservoir geomechanical model

$$[c_r \phi^0 + c_r (\alpha - \phi^0)] \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{k}{\mu} \nabla^2 p = -\alpha \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}$$

کوپل کامل ژئومکانیک توسط معادله ۹- صورت خواهد گرفت. در کوپل یک‌طرفه و دوطرفه ابتدا ماتریس ۴- حل می‌شود. سپس با توجه به معادله ۷- تخلخل به‌دست آمده برای مدل دینامیکی به‌روز می‌شود. در حالتی که مطالعات ژئومکانیکی صورت نگیرد صرفاً معادله ۵- و معادله ۶- در مدل دینامیکی حل می‌شود و پارامترهای مخزنی به‌دست می‌آید. تغییری که مطالعه ژئومکانیکی روی مدل اعمال می‌کند، به‌روز کردن تخلخل و نفوذپذیری تغییر یافته ناشی از تغییرات ژئومکانیکی مخزن است. اکنون تفاوتی که بین حل معادلات در کوپل یک‌طرفه و دوطرفه وجود دارد این است که در کوپل یک‌طرفه پارامترهای مدل مخزنی به‌روز نمی‌شوند

از روش‌های کوپل استفاده می‌شود. کوپل را می‌توان توسط یکی از روش‌های کوپل جدا، شبه کوپل، کوپل صریح، کوپل تکرارشونده و کوپل کامل انجام داد. تعیین نوع کوپل وابسته به موضوع مورد مطالعه و چالشی است که ژئومکانیک در صدد است تا به آن پاسخ دهد. دقت هر کدام از روش‌های کوپل متفاوت است به‌نحوی که کوپل دو طرفه به‌دلیل به‌روز نمودن اطلاعات مدل دینامیکی اطلاعات دقیق‌تری در اجراهای بعدی^{۱۱} به‌دست می‌دهد. معادلاتی که در اجرای کوپل مدل ژئومکانیکی حل می‌شوند براساس تأثیر پارامترهای تنش و کرنش در مدل دینامیکی است. در واقع از آنجایی که ضعف شبیه‌سازهای دینامیکی موجود در بازار در عدم تأثیر تغییرات تنش و کرنش حجمی است، شبیه‌ساز ژئومکانیک، این محاسبات را براساس معادلات انجام داده و با شبیه‌ساز دینامیک کوپل می‌کند.

معادلات زیر معادلات حاکم بر شبیه‌سازی ژئومکانیکی است:

Equation 1-Terzaghi Equ.

$$\sigma = S - P_p$$

Equation 2-Developed Terzaghi Equ.

$$\Delta \sigma = \Delta S - \Delta P_p$$

Equation 3-Stress-strain relationship

$$\sigma = D \varepsilon$$

معادلات ۱- و ۲ برای کوپل یک‌طرفه و دوطرفه استفاده می‌شوند. سپس خروجی‌ها با توجه به نوع کوپل، به شبیه‌ساز دینامیک ارجاع داده می‌شوند. معادله ۳- به‌صورت یک ماتریس درآمده که از این ماتریس میزان کرنش محاسبه می‌شود. این ماتریس یک ماتریس با ۸۱ درایه است که در بیشترین ناهمگنی، یک ماتریس با ۲۱ درایه به‌دست می‌آید. معادله ۴- حالت کلی این ماتریس را نمایش می‌دهد [۷ و ۱۷].

Equation 4-Stress-strain matrix

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix}$$

معادله ۵- رابطه ای است که در شبیه‌سازهای دینامیکی تخلخل را محاسبه می‌کند. اساس این معادله صرفاً اثر دادن تراکم پذیری است.

ترک مخزن را شامل می‌شود. با انجام مطالعات ژئومکانیکی می‌توان از هزینه‌های بسیار زیادی که متوجه توسعه و بهره‌برداری از میدان می‌شود، جلوگیری نمود. در این بین مطالعات یک‌بُعدی ژئومکانیک به صورت چاه‌محور و مطالعات سه‌بُعدی و کوپل چهاربُعدی در مقیاس مخزن انجام می‌شود. با انجام مطالعات سه‌بُعدی و کوپل چهاربُعدی می‌توان پیش‌بینی دقیق‌تری از اثرات سناریوهای توسعه‌ای در مخزن را بررسی نمود. علم ژئومکانیک در بررسی پایداری دیواره چاه، مکان‌یابی بهینه چاه، شکاف هیدرولیکی، مدیریت تولید ماسه، فشردگی مخزن و فرونشست زمین، مطالعات یکپارچگی پوش سنگ، فعالیت مجدد گسله‌ها، بررسی وضعیت شکاف‌ها، بررسی اثرات گنبد نمکی و... کاربردهای فراوانی دارد. اهمیت مطالعات ژئومکانیکی در مخازن غیرمعمول چند برابر است تا بدانجا که بدون مطالعه ژئومکانیکی امر توسعه مخزن با عدم قطعیت و ریسک‌های بسیاری مواجه است. در این پژوهش نحوه ساخت مدل کوپل ژئومکانیکی مخزن براساس نرم‌افزارهای اکتیپس و ویساج ساخت شرکت شلمبرژر تشریح گردید که از جمله مهمترین کاربردهای این مدل در پیش‌بینی‌های آینده مخزن می‌باشد. ■

(فشار و اشباعیت ناشی از تغییرات ژئومکانیکی به‌روز نخواهند شد). در صورتی که در کوپل دوطرفه پارامترهای مدل دینامیکی شامل فشار و... نیز در یک سیکل تکرار شونده تغییر پیدا می‌کنند و لذا نتایج اجرای مدل دینامیکی ناشی از تغییر پارامترهای دینامیکی تغییر خواهند نمود. مهمترین نتایج شبیه‌ساز ژئومکانیکی تنش‌ها و کرنش در مخزن بوده که اساس مطالعات ژئومکانیک را تشکیل می‌دهد. با توجه به نتایج خروجی از شبیه‌ساز، موارد مهمی همچون فشردگی مخزن، یکپارچگی پوش سنگ، تحلیل وضعیت شکاف‌ها و گسله‌ها و... با نتایج واقعی‌تری قابل ارزیابی و توصیف هستند.

نتیجه‌گیری

امروزه مدیریت صحیح مخازن هیدروکربوری مستلزم شناخت و توصیف دقیق‌تر مخزن می‌باشد و تغییرات تنش‌های برجای مخزن ناشی از تخلیه کمک بسیار زیادی در توصیف هرچه بهتر مخزن می‌کند. علم ژئومکانیک مخزن گستره فعالیت بسیار زیادی از اکتشاف منابع هیدروکربوری، حفاری چاه‌ها، بهره‌برداری و حتی

پانویس‌ها

- | | | |
|-------------------------------------|---------------------|----------------------|
| 1. 1D MEM | 5. Sand production | 9. Iterative two-way |
| 2. Bulk | 6. Pseudo coupling | 10. Full Coupling |
| 3. Couple of reservoir Geomechanics | 7. Partial coupling | 11. Time step |
| 4. Unconventional reservoirs | 8. One way coupling | |

منابع

- [1]. Zoback, M.D., "Reservoir Geomechanics.", Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007
- [2]. K. Fischer and A. Henk, "A workflow for building and calibrating 3-D geomechanical models- a case study for a gas reservoir in the North German Basin", Solid Earth, 4, 347-355, 2013
- [3]. A. Settari and V. Sen, "The Role of Geomechanics in Integrated Reservoir Modeling," The Leading Edge, pp. 622-627, May 2007.
- [4]. Terzaghi, K. "Theoretical soil mechanics", John Wiley and Sons, Inc., 1943.
- [5]. Biot, M. A., "General Theory of Three-Dimensional Consolidation", Journal of Applied Physics Vol. 12, No. 2, pp. 155-164. 1941.
- [6]. Settari, A. and Mourits, F. M., "Coupling of Geomechanics and Reservoir Simulation Models, Computer Methods and Advances in Geomechanics", (Ed. Siriwardane & Zanan), pp. 2151-2158, Rotterdam, The Netherlands, 1994.
- [7]. N. Inoue et.al. , "Reservoir Geomechanics Workflow", 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014
- [8]. David Tran et.al., "Aspects of Coupling Between Petroleum Reservoir Flow and Geomechanics", American Rock Mechanics Association, ARMA 09-89, 2009
- [9]. H. F. Wang, "Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology". Princeton University Press, 2000
- [10]. K. Fischer, A. Henk, "Geomechanical reservoir models for the prediction of tectonic stress fields in deep geothermal reservoirs", paper conference, 2013.
- [11]. Schlumberger, "Petrel Reservoir Geomechanics, technical manual", petroleum Geomechanics, 2013
- [12]. L. Thomas, L. Chin, R. Pierson, and J.E. Sylte, "Coupled Geomechanics and Reservoir Simulation," SPE Journal, pp. 350-358, December 2003.