



مدل سازی رفتار ژئومکانیکی ناپیوستگی های موجود در پوش سنگ مخازن نفتی طی فرآیند تزریق گاز

محمد حیدری زاده^۱، نجف علی قویدل^۲، بهزاد مهرگینی^۳، حسین معماریان^۴، دانشگاه تهران

چکیده

مجموعه مخزن-پوش سنگ اغلب ناهمسانی ها و نقاط ضعفی از جمله ناپیوستگی ها، نواحی خردشده و گسل ها دارند. تزریق گاز در مخزن که عمدتاً با هدف افزایش بهره برداری انجام می شود ممکن است از طریق تغییر فشار منفذی سبب تغییر در میدان تنش برجا، فعال شدن مجدد ناپیوستگی ها، ایجاد ناپیوستگی های جدید، وقوع رخدادهای لرزه ای القایی و کاهش ظرفیت تراوایی پوش سنگ گردد. از این رو شناخت ویژگی های زمین شناسانه و ناپیوستگی های موجود در مجموعه مخزن-پوش سنگ در تعیین بازه ایمن فشار سیال تزریقی و محل تزریق، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به طور کلی تحلیل و بررسی مسائل و مخاطرات مرتبط با تزریق گاز از دیدگاه ژئومکانیکی شامل دو مرحله عمده است؛ نخست تحلیل میزان تغییرات تنش در اثر تزریق گاز و دوم تحلیل رفتار شاخص های زمین شناسی (لایه های سنگ مخزن و پوش سنگ، شکستگی، گسل ها و غیره) در اثر تنش القاء شده. در مجموع برای تحلیل و مدل سازی این مراحل توسط پژوهشگران سه رویکرد متفاوت ارائه شده که شامل روش های عددی، روش های نیمه تحلیلی و روش های تحلیلی است. اگرچه برای تخمین تغییرات تنش در حالت کلی می توان از روش های تحلیلی استفاده کرد اما برای بررسی جزئیات بیشتر تغییرات ناهمسان تنش های القایی در داخل و اطراف محدوده تزریق، بررسی ژئومکانیکی عددی مناسب تر است. در این مطالعه در ابتدا اثر افزایش فشار منفذی ناشی از تزریق بر ناپایداری ناپیوستگی های موجود و امکان فعالیت مجدد آنها در محیط مخزن-پوش سنگ تشریح شده و در ادامه مراحل مدل سازی رفتار ژئومکانیکی در ارتباط با فرآیند تزریق برای محیط مخزن-پوش سنگ همراه با ناپیوستگی های موجود تشریح شده است.

واژگان کلیدی: تزریق گاز، پوش سنگ، رفتار ژئومکانیکی ناپیوستگی ها، مدل سازی ژئومکانیکی

واژگان کلیدی

مقدمه

نشت گاز تزریق شده است. در عملیات اجرایی باید از درگیر شدن گسل ها یا ناپیوستگی ها به عنوان مسیر نشت گاز تزریق شده جلوگیری به عمل آید. تولید و تزریق سیال ممکن است از طریق تغییر فشار منفذی و تغییرات متناظر در میدان تنش، سبب ایجاد شکست هیدرولیکی، شکست برشی در سطوح ترک، یا فعالیت مجدد ناپیوستگی های موجود توسط کاهش تنش مؤثر گردد [۲]. بنابراین تغییر شکل زمین، لرزه های اتفاق افتاده، فعالیت مجدد ناپیوستگی ها و ظرفیت ناتراوایی سنگ های اطراف مجموعه مخزن-پوش سنگ از عوامل مهم در اجرای پروژه های دربرگیرنده تزریق گاز در فضاها و زیرزمینی محسوب می شوند [۳].

روتکوپیچ و همکاران در سال ۲۰۱۲ مطالعات جدیدی در خصوص آثار تزریق گاز در حوزه های رسوبی عمیق بر تغییرات تنش- کرنش مجموعه مخزن-پوش سنگ، ریزلرزه های القایی، عملکرد تراوایی پوش سنگ و پتانسیل فعالیت مجدد ناپیوستگی ها انجام دادند [۴]. علاوه بر این در چند مطالعه دیگر چگونگی تأثیر تزریق گاز بر زمین لرزه های القایی، هم روی

به منظور اطمینان از حفظ و پایداری یک پارچگی مرزهای ناتراوا (پوش سنگ، گسل و غیره) ضروری است در طول عملیات تولید یا تزریق مخزن مطالعات و تحلیل های ژئومکانیکی انجام پذیرد. یک پارچگی مرزهای ناتراوا ممکن است در اثر ایجاد شکستگی های القایی، فعالیت یا بازشدگی مجدد گسل ها و شکستگی های موجود در مرزها تهدید شده یا از بین برود.

پوش سنگ مخازن هیدروکربوری به عنوان مهم ترین مرز ناتراوای مخزن ممکن است شامل ناپیوستگی ها، ناهمسانی ها و همچنین دربرگیرنده نقاط ضعفی مانند گسل ها و نواحی شکسته باشند که می توانند مسیری برای مهاجرت سیال تحت فشار فراهم آورند. علاوه بر این ممکن است افزایش فشار منفذی در مجموعه مخزن-پوش سنگ، تغییرات مکانیکی غیرقابل برگشتی در پوش سنگ ایجاد کند [۱]. بنابراین ناپیوستگی های موجود در مجموعه مخزن-پوش سنگ، یکی از مسیرهای محتمل برای

* نویسنده عهده دار مکاتبات (mheidarizadeh@ut.ac.ir)

لغزش^۴، به عنوان شاخصی جهت پایداری ناپیوستگی ارائه شده است.

۱- اثر فشار منفذی بر پایداری ناپیوستگی ها

بسیاری از آزمون‌های آزمایشگاهی مؤید این امرند که افزایش فشار سیال منفذی در سنگ‌ها و ناپیوستگی‌های آنها مقاومت سنگ‌ها را کاهش داده و می‌تواند سبب بروز گسیختگی ترد شوند. افزایش فشار سیال منفذی (P_f) منجر به کاهش تنش‌های مؤثر $\sigma' = \sigma - P_f$ می‌شود. تنش مؤثر نرمال مثبت ($\sigma_n - P_f$) دو قطعه تشکیل دهنده گسل را به یکدیگر می‌فشارد و در مقابل حرکت لغزشی در امتداد سطح گسل (که می‌تواند با تنش برشی اعمالی (τ) در موازات گسل ایجاد شود) مقاومت می‌کند (شکل-۱) و از این رو افزایش فشار سیال منفذی مقاومت در برابر لغزش را کاهش می‌دهد. نمودار موه‌ر در شکل-۱-ب تأثیرات افزایش فشار سیال را بر پایداری گسل به تصویر می‌کشد.

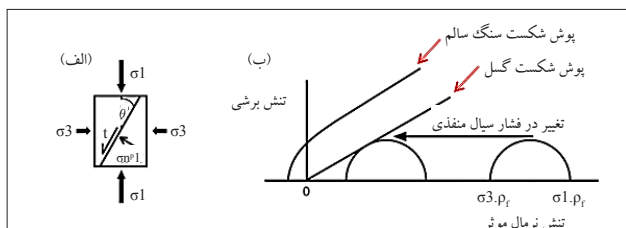
دایره موه‌ر ابزار مناسبی برای نمایش وضعیت تنش است که در واقع تفاضل بین تنش اصلی بیشینه مؤثر (σ'_1) و تنش اصلی کمینه مؤثر (σ'_3) را به تصویر می‌کشد. بنابراین قطر دایره موه‌ر تنش تفاضلی ($\sigma'_1 - \sigma'_3$) را نشان می‌دهد در حالی که اندازه بعد افقی آن به تنش‌های مؤثر σ'_1 و σ'_3 بستگی دارد.

افزایش فشار سیال که تنش نرمال مؤثر را کاهش می‌دهد دایره موه‌ر را به سمت پوش شکست گسل منتقل می‌کند. این اندازه‌گیری معمولاً در آزمایشگاه و از طریق تعدادی آزمایش مقاومت برشی انجام می‌شود. در واقع برخورد دایره موه‌ر با پوش شکست به منزله لغزش گسل است و قبل از شکست ماده سنگ نسبتاً مقاوم که پوش شکست دارد اتفاق می‌افتد [۱۷ و ۱۶].

پوش فعالیت مجدد برای گسل را می‌توان به صورت کلی زیر نوشت [۱۸]:

$$\tau_r = c + \mu(\sigma_n - p_f) \quad (1)$$

که در آن τ_r تنش برشی است که باعث لغزش گسل می‌شود و μ ضریب اصطکاک استاتیکی است. c نشان‌دهنده مقاومت برشی ذاتی سطح گسل



شکل ۱ | (الف) تنش‌های اعمال شده روی گسل (ب) اثر افزایش فشار منفذی بر پایداری گسل

گسل‌های اصلی [۷-۵] و هم روی گسل‌های فرعی [۸] بررسی شد. در سال ۲۰۰۳ سیسون نشان داد که برش خوردن مجدد ناپیوستگی‌های موجود با چسبندگی صفر و ناپیوستگی‌های دارای جهت گیری مناسب برای لغزش، مرز پایینی فرافشار را تعیین می‌کنند. علاوه بر این بیشترین فرافشار قابل تحمل برای پوش سنگ به رژیم تنش برجا (بزرگی و جهت تنش‌های برجا) بستگی دارد [۹ و ۱].

در سال ۲۰۰۵ روتکوپیچ و تسانگ نشان دادند که در رژیم تنش کششی ($S_{II} = 0.7S$) فعالیت مجدد ناپیوستگی‌های به شدت شیب‌دار، محتمل‌تر است. در حالی که در رژیم تنش فشاری ($SH = 1.5S$) احتمال فعالیت مجدد ناپیوستگی‌های با شیب کمتر و در فشار تزریقی زیاد، بیشتر است [۱۰]. بنابراین جهت جلوگیری از ناپایداری ناپیوستگی‌ها، بررسی شکست برشی و کششی جهت طراحی عملکرد تزریق گاز در مجموعه مخزن-پوش سنگ ضروری است [۱۰ و ۱].

بررسی شکست برشی و کششی با استفاده از روش‌های تحلیلی ساده و همچنین با استفاده از روش‌های عددی پیچیده امکان‌پذیر است. روش‌های تحلیلی بر مبنای مطالعه لرزه‌ای و اثرات فعالیت مجدد ناپیوستگی‌ها بر ذخیره‌سازی هیدروکربن توسعه یافته و به کار برده شده اما برای ارزیابی پایداری ناپیوستگی‌ها همراه با تزریق گاز نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. هرچند روش‌های تحلیلی جهت ارائه تخمین اولیه بیشینه تنش قابل تحمل تزریق برای تعیین جهت بحرانی گسل در مجموعه مخزن-پوش سنگ مفید است اما روش‌های عددی ژئومکانیکی نشان می‌دهند که میدان تنش برجا طی تزریق ثابت نبوده و تزریق در طول زمان و مکان توسط تغییرات فشار منفذی مجموعه مخزن-پوش سنگ و هندسه ساختاری خاص میدان کنترل می‌شود [۱۰ و ۱۲]. بنابراین اگرچه روش‌های تحلیلی برای تخمین تغییرات تنش در حالت کلی مفید است اما یک بررسی ژئومکانیکی عددی می‌تواند برای بررسی جزئیات بیشتر تغییرات ناهمسان تنش القایی در داخل و اطراف محدوده تزریق مناسب‌تر باشد [۱]. از مطالعات انجام شده در زمینه مدل‌سازی ژئومکانیکی مجموعه مخزن-پوش سنگ طی چند سال اخیر می‌توان به مطالعات روتکوپیچ در سال ۲۰۰۶ [۱۳]، سفدرخان در سال ۲۰۱۱ [۱۴]، بودان اورلیک و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۱۵]، کانو و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۲] و رینالدی و روتکوپیچ در سال ۲۰۱۳ [۳] اشاره کرد.

در این پژوهش ابتدا مراحل مختلف مدل‌سازی ژئومکانیکی ناپیوستگی‌های موجود در مجموعه مخزن-پوش سنگ مخازن نفتی طی تزریق گاز و سپس داده‌های مورد نیاز و نرم‌افزارهای مورد استفاده در مدل‌سازی ژئومکانیکی تشریح شده است. همچنین اثر تغییرات فشار منفذی بر پایداری ناپیوستگی‌های مجموعه مخزن-پوش سنگ همراه با معرفی عامل تمایل



رخدادهای لرزه‌ای اتفاق افتد. بنابراین T به عنوان شاخص پایداری در تزریق سیال در نظر گرفته می‌شود و مقادیر بیشتر از ۰/۶ به عنوان حد محتمل لغزش فرض می‌شود [۱۷ و ۱۹].

۱- مراحل مختلف مدل‌سازی ژئومکانیکی ناپیوستگی‌های موجود در

پوش سنگ مخازن نفتی

در عملیات تزریق ضروری است فشار بهینه تزریق هم از دید یک پارچگی پوش سنگ و هم از دید گاه اقتصادی ایمن باشد. تخمین این فشار بهینه و ایمن عملیاتی به چند عامل کلیدی بستگی دارد که شامل خواص مکانیکی سنگ، مقاومت سنگ، تنش‌های برجا و تغییرات در خواص سنگ مخزن مثل تغییر در تخلخل، تراوایی، اشباع آب و تغییرات تنش ناشی از تزریق (تنش القایی) است. به منظور امکان تخمین دقیق این عوامل، داده‌های زیر لازم است [۲۰]:

■ چاه‌نگارهای صوتی به همراه عوامل ناهمسان‌گردی موجود و چاه‌نگارهای پتروفیزیکی دیگر

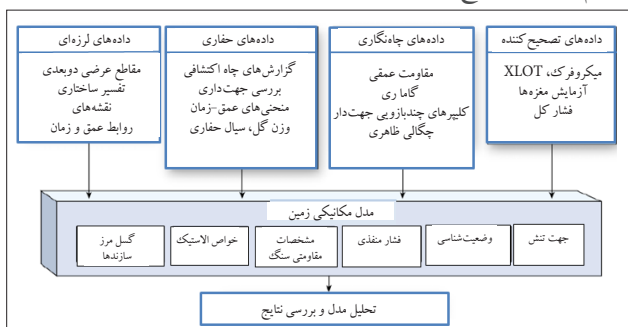
■ چاه‌نگارهای تصویری (جهت شناسایی شکستگی‌ها)

■ آزمون ریزشکاف^۵ یا آزمون نشت LOT^۶ (به دست آوردن فشار شکست حداقل^۷ و تنش بسته شدن ترک^۸)

■ اندازه‌گیری فشار سازند

■ آزمایش‌های انجام شده روی مغزه‌های سنگی (خواص مکانیکی سنگ و مقاومت سنگ، رابطه دمای زیاد با تراوایی در کنار آزمایش‌های رایج روی مغزه) برای سنگ مخزن و پوش سنگ و مقاومت برشی پوش سنگ از عوامل مهم مورد نیاز است.

داده‌های حاصل از این منابع جهت تخمین تنش‌های القایی و تغییرات مقاومت سنگ (ناشی از تزریق) با داده‌های مدل‌سازی ژئومکانیکی-مخزنی توأم^۹ و ادغام می‌شوند. این تغییرات در نهایت برای تعیین شکست برشی یا شکست کششی در پوش سنگ استفاده می‌شوند. روند کامل برای ادغام داده‌ها از منابع مختلف در شکل‌های ۲-۳ ارائه شده است. این روند



شکل ۳ | دسته‌بندی اجزای لازم در فرآیند ساخت یک مدل ژئومکانیکی مجموعه مخزن-پوش سنگ [۲۵-۲۲]

است که برای گسل‌هایی با چسبندگی کم ممکن است نتیجه پیوستگی بین سطوح زبر مقابل در گسل باشد. برای چسبندگی کم، مقاومت برشی ذاتی ناچیز است و لغزش زمانی اتفاق می‌افتد که نسبت مقاومت برشی به تنش نرمال مؤثر برابر با ضریب اصطکاک استاتیکی گسل باشد [۱۸]:

$$\frac{\tau_f}{(\sigma_n - p_f)} = \mu \quad (2)$$

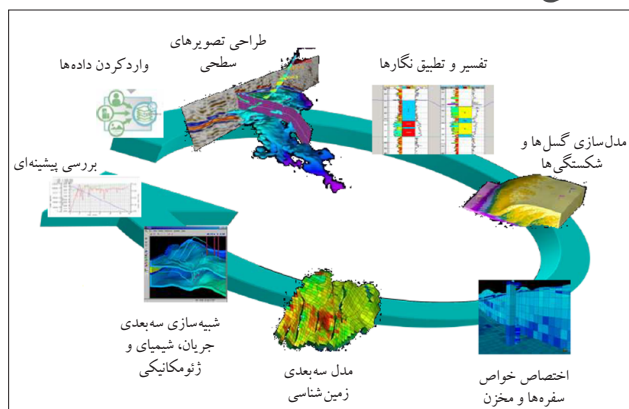
ضریب اصطکاک استاتیکی برابر با شیب پوش شکست گسل در شکل ۱-ب است. تنش‌های نرمال و برشی که بر لغزش گسل مؤثرند تابعی از جهت یافتگی گسل بوده و در حالت دو بعدی از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۸]:

$$\tau = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta \text{ \& } \sigma' = 0.5(\sigma'_1 - \sigma'_3) - 0.5(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\theta \quad (3)$$

که در آن θ زاویه بین گسل و σ_1 (شکل ۱-الف) است. بنابراین تنش نرمال و برشی به θ وابسته هستند. از این رو وضعیت بعضی گسل‌ها برای لغزش مطلوب‌تر از سایر گسل‌هاست. جهت نسبی تانسور تنش برجا و گسل‌های از پیش موجود یکی از عوامل اساسی در تحلیل تمایل لغزش گسل است. عامل تمایل لغزش (T) برای پایداری گسل توسط بسیاری از محققان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این عامل با استفاده از نسبت تنش برشی به مقاومت برشی طبق رابطه ۴- محاسبه می‌شود [۲]:

$$T = \frac{\tau}{c + \mu(\sigma_n - P_p)} \quad (4)$$

تنش برشی و تنش نرمال در سطح گسل از رابطه ۳- به دست می‌آید. وقتی فشار منفذی طی تزریق گاز افزایش می‌یابد، مقاومت لغزش کاهش و عامل تمایل لغزش افزایش می‌یابد. اگر مقدار T از یک تجاوز کند لغزش برشی رخ می‌دهد یا گسل در آستانه لغزش قرار می‌گیرد و ممکن است



شکل ۲ | روند مدل‌سازی ژئومکانیکی مجموعه مخزن-پوش سنگ [۲۱]

۱-۳- توأم‌سازی^{۱۳} مدل ژئومکانیک - مخزنی

به منظور بررسی تغییرات کمی تنش‌های برجای ناشی از تزریق باید از مدل‌سازی ژئومکانیکی-مخزنی توأم شده استفاده کرد. برای هر سناریوی تزریق، تغییرات دما (ΔT) و فشار (ΔP) در یکی از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز مخزن مانند ECLIPSE یا TOUGH2D محاسبه می‌شود. متناظر با هر تغییر در فشار و دمای مخزن، تغییرات در تنش‌ها ($\Delta \sigma$) و کرنش‌های حجمی ($\Delta \epsilon$)، تخلخل ($\Delta \theta$) و تراوایی (ΔK) در یک نرم‌افزار شبیه‌ساز ژئومکانیکی مانند VISAGE که مبتنی بر المان محدود سه بعدی است یا ABAQUS و FLAC محاسبه می‌شوند. مقادیر $\Delta \theta$ و Δk برای محاسبه ΔP و ΔT جدید به نرم‌افزار شبیه‌ساز مخزن (ECLIPSE و TOUGH2D) بازگشت داده می‌شوند. توأم‌سازی مدل ژئومکانیک-مخزنی برای شبیه‌ساز هم‌زمان TOUGH-FLAC در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۴ و ۲۰].

در مرحله نخست برای انجام طرح تزریق پیشنهادی معمولاً مدل‌سازی ژئومکانیکی-مخزنی توأم انجام می‌شود. در مرحله بعد حالت تنش‌های جدید به دست آمده و با معیارهای شکست کششی، برشی و دیگر حالات شکست ترکیبی مقایسه می‌شود. از مسیر تنش و کرنش‌های محاسبه شده، برای تخمین امکان وقوع و محل شکست‌های مکانیکی در پوش سنگ اولیه استفاده می‌کنند و در صورتی که هر نوع گسل اصلی نیز در منطقه موجود باشد امکان فعالیت مجدد آن در این مرحله بررسی می‌شود [۱۴ و ۲۰]. شایان ذکر است که داده‌های لرزه‌ای چهاربعدی^{۱۴} برای اعتبارسنجی مدل توأم ژئومکانیک-مخزنی طی زمان مفید است.

۱-۴- مدل‌سازی گسل‌های منطقه

اغلب مسائل ژئومکانیکی مربوط به اثرات متقابل ساختارهای خاک (نظیر مباحث تحلیل پایداری) با المان‌های مشترک انجام می‌شود. برای مثال قابوسی و همکاران [۲۷] استفاده از جابه‌جایی نسبی به عنوان درجه آزادی مستقل در المان سطح مشترک جهت مدل‌سازی درزه



۵ | فرآیند ساخت یک مدل ژئومکانیکی [۲۸]

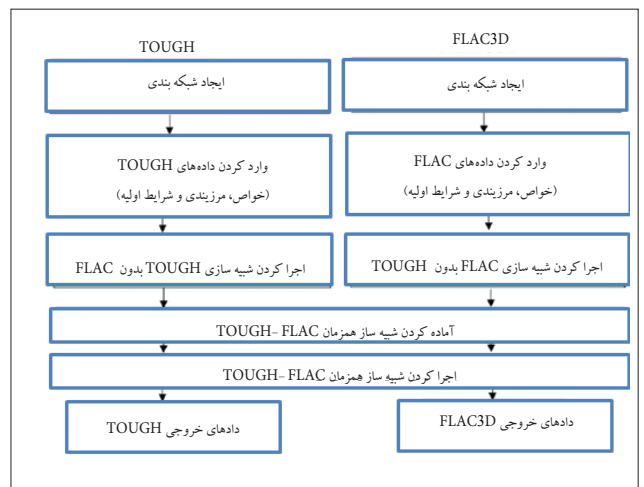
در ادامه به طور خلاصه تشریح می‌شود.

۱-۱- ساخت مدل مکانیکی یک بعدی

بعد از به دست آوردن داده‌های مربوطه، قدم اول ساختن یک مدل مکانیکی یک بعدی^{۱۱} برای حداقل سه چاه خارج از مرکز است. مدل 1-D MEM خواص مکانیکی ضروری سنگ، مقاومت سنگ و تنش‌ها را به صورت یک نیم‌رخ در امتداد محور چاه و با وضوح مقیاس چاه‌نگار ارائه می‌دهد [۲۱]. چاه‌نگارهای تصویری، آزمون فشار شکست حداقل یا آزمون شکست هیدرولیکی، فشار سازند و آزمایش‌های مغزه برای کالیبره کردن^{۱۱} مدل 1-D MEM ضروری است.

۱-۲- توسعه مدل یک بعدی به مدل سه بعدی ژئومکانیکی

بعد از یک بار همبسته کردن مدل 1-D MEM، در صورت در دسترس بودن سرعت صوت سه بعدی، خواص سنگ در یک مدل زمین‌شناسی برای کل محدوده مورد مطالعه توزیع می‌شود. این مدل شامل ویژگی‌های ساختاری زمین‌شناسی و همه شکستگی‌ها و گسل‌های موجود در این منطقه است [۲۱]. سپس یک مدل سه بعدی مکانیکی زمین^{۱۲}، کل منطقه‌ای که پروژه در آن انجام می‌شود را می‌پوشاند. این مدل سه بعدی شامل مخزن، روبراه تا سطح زمین، لایه‌های زیرین مخزن و سنگ‌های اطراف تا فاصله مناسب (برای حذف تأثیر مرزها) است. بررسی تنش‌ها برای مدل اولیه ساخته شده بر مبنای تنش‌های برجای دست‌نخورده انجام می‌گیرد (مدل قبل از هر برداشت و تزریق). این مدل تنش با استفاده از نیم‌رخ تنش در مدل یک بعدی (1-D MEM)، در طول مسیر هر چاه خارج از مرکز کالیبره می‌شود [۲۱].



۴ | نمایشی از توأم‌سازی مدل ژئومکانیک-مخزنی برای شبیه‌ساز TOUGH-FLAC [۲۶]

پیشنهاد شد که بعداً توسط محققان دیگر با المان‌های بدون ضخامت جایگزین گردید. اخیراً با هدف تعدیل تنش روی سطح مشترک، یک رویکرد تماسی مرکب برای گسل‌های کم عمق (در حالی که هر دو عامل تنش و جابجایی از یکدیگر مجزا می‌شوند) توسعه داده شده است [۲۷].

قوانین بنیادی به کار رفته در بررسی رفتار مکانیکی سطح مشترک به طبیعت تماس و مقیاس فرآیند بستگی دارد. مدل‌های پلاستیسیته پیچیده شامل زبری، اتساع، سخت‌شدگی و نرم‌شدگی برای شبیه‌سازی نزدیک به واقعیت درزه‌های سنگی در مقیاس کوچک ارائه شده‌اند. در حالی که در مقیاس بزرگ عموماً معیار مقاومت موهر-کولمب جهت تعریف تنش برشی بیشینه ترجیح داده می‌شود است [۲۷].

به‌منظور بررسی و مطالعه اندرکنش ژئومکانیکی و تعیین تغییرات تنش- کرنش تحقیقات و فعالیت‌های گسترده و متمرکزی روی فرآیندهای ژئومکانیکی انجام شد تا پیوستگی تغییرات ژئومکانیکی مجموعه مخزن-پوش سنگ را تأیید نماید. شکل‌های ۳-۴ و ۳-۴ نمای کلی از مراحل لازم جهت یک بررسی ژئومکانیکی دقیق را نشان می‌دهند. در این راستا خواص ژئومکانیکی و تنش‌های برجادر مخزن-پوش سنگ تعیین می‌شود. همچنین آزمون‌های آزمایشگاهی ژئومکانیکی، آنالیز لاگ، آزمون‌های تنش سنجی برجا و مدل‌سازی عددی، فشار آستانه تزریق را مشخص می‌کنند تا از یک پارچگی سراسری مجموعه اطمینان حاصل شود. آزمایش‌هایی که برای تعیین متغیرهای مقاومتی و الاستیکی لازم است می‌تواند شامل آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره و سه‌محوره، آزمایش‌های خواص الاستیک استاتیکی و دینامیکی، قابلیت تراکم‌پذیری منافذ، نفوذپذیری وابسته به تنش و سرعت امواج برشی و فشاری در سطح تنش مقاومت و آزمایش برشی مستقیم روی مغزه‌های با درزه طبیعی جهت تعیین متغیرهای مکانیک سنگی ناپیوستگی‌ها باشد. مراحل ضروری که در یک مدل‌سازی ژئومکانیکی باید رعایت شوند در شکل ۵- آورده شده‌اند [۲۸].

۲- داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی ژئومکانیکی ناپیوستگی‌ها

ساخت یک مدل ژئومکانیکی دقیق نیازمند داده‌های واقعی از محیط مدل‌سازی است. همچنین اگر داده‌های در دسترس به اندازه کافی برای ساخت مدل ژئومکانیکی موجود باشند می‌توان نتایج دقیق تری از مدل‌سازی ژئومکانیکی به دست آورد. علاوه بر این می‌توان نتایج مدل‌سازی انجام شده را با داده‌های واقعی گزارش شده مقایسه کرد و اصلاحات لازم را مدل‌سازی انجام داد. از این رو فهرست داده‌های مورد نیاز برای انجام یک مدل‌سازی دقیق در جدول ۱- ارائه شده است.

سنگ با بهره‌گیری از فرمول‌بندی که توسط پانده و شارما ارائه شده بود را تأیید کردند [۲۷]. بلوک‌های صلبی که اجازه بازشدگی، لغزش و چرخش لبه به لبه خطی را می‌دهند برای تحلیل پایداری مغارهای حفر شده در سنگ‌های درزه‌دار (محلی که جابجایی‌های سنگ در مقیاسه با جابجایی درزه‌ها قابل اغماض است) پیشنهاد می‌شوند. برای شبیه‌سازی اندرکنش سازه-خاک در آغاز المان‌های لایه نازک

۱ | داده‌های استفاده شده برای ساخت یک مدل و تعدیل کردن آن [۲۲-۲۵].

| اطلاعات عمومی خواص | نگارهای مرجع | دیگر منابع |
|---|--|---|
| ساختار مکانیکی | اشعه گاما، چگالی، مقاومت ویژه، سرعت موج فشاری (vp) | ریزه حفاری‌ها، ساختمان دنبال لایه |
| فشار منفذی (pp) | Vp، مقاومت ویژه | آزمون‌های پارچگی سازند، آزمون RFT۱، MDT۲، DST۳ |
| فشار روباره (σv) | چگالی بالک | خرده برش‌ها |
| جهت تنش | قطر سنجی، چندبازویی، نگارهای تصویری | نقشه‌های ساختاری، داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی |
| تنش افقی حداقل (σh) | Vp، سرعت موج برشی (vs)، ابزار تنش سنجی | Pp، تست LOT۵، تست گسترشی LOT، میکرو شکاف، تست HFT۶، داده‌های محلی، گزارش حفاری روزانه |
| تنش افقی حداکثر (σH) | نگارهای چاه | Pp، σh، مقاومت سنگ، داده‌های میدان، مدل تنش چاه |
| متغیرهای الاستیک (مدول یانگ (E)، مدول برشی (G)، ضریب پواسون (ν)) | VP، VS، چگالی بالک | داده‌های میدان، آزمون‌های آزمایشگاهی روی مغزه‌ها |
| متغیرهای مقاومتی (سنگ (تنش فشاری غیرمحصور (UCS)، زاویه اصطکاک)) | VP، VS، چگالی بالک، ساختار مکانیکی | داده‌های میدان، آزمون‌های آزمایشگاهی روی مغزه‌ها، حفرها |
| مکانیسم‌های شکست | تصاویر چاه، کلیبرهای چند بازویی | گزارش‌های روزانه |
| خواص ناپیوستگی‌ها (سختی نرمال (Kn)، سختی برشی (KS)، زاویه اصطکاک (θ)، زاویه اتساع (ψ)، چسبندگی (C)) | VP، VS، داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی | آزمون‌های آزمایشگاهی روی مغزه‌های گرفته شده از ناپیوستگی‌ها، مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها |

۳- نرم افزارهای مورد استفاده در مدل سازی ژئومکانیکی

توده سنگ اغلب به شکل ناهمگن و دربرگیرنده بدنه سنگ و ناپیوستگی هاست. توده سنگ ها ممکن است در محیط های پیچیده^{۱۵} مانند محیط های مکانیکی، هیدرولیکی و میدان های حرارتی و حالت توأمان آنها باشند. مطالعه فرآیند هم زمان گرمایی-هیدرولیکی-مکانیکی (THM) کلید اصلی درک رفتار فیزیکی پیچیده در توده سنگ هاست. در دهه های گذشته پیشرفت چشم گیری در زمینه فرآیند هم زمان THM در محیط زمین شناسی توسط برنامه های کامپیوتری رخ داده است. براساس تئوری بایوت، چندین شبیه ساز مانند THAMES (اهنیشی و همکاران ۱۹۹۶)، MOTIF (گواناسن و چان ۱۹۹۵)، FRACON (نگوین ۱۹۹۶) و ROCMAS (نوریشد و همکاران ۱۹۸۴) توسعه داده شد. شبیه سازهای دیگر مانند FEMH (باور ۱۹۹۰)، FRACTure (کوهل ۱۹۹۵)، GeoSys/Rockflow (وانگ ۲۰۰۷)، GEOCRACK (سئونسون ۱۹۹۷) نیز عموماً در زمینه انرژی زمین گرمایی سنگ-خشک-گرم کاربرد دارند. بعضی کدهای رایج مانند ABAQUS (برگسون ۱۹۹۶)، FLAC (ایسرالسون ۱۹۹۶)، UDEC (ایسرالسون ۱۹۹۶) در مکانیک خاک و سنگ کاربرد دارند. در زمینه مکانیک خاک COMOASS (توماس ۱۹۹۵) و CODE-BRIGHT (الیولا ۱۹۹۴) برای شبیه سازی هم زمان جریان سیال دوفازی (گاز و سیال) و رفتار ترمومکانیکی در خاک تقریباً اشیاع شده و سیال چندفازی ایزوترمال آب شور و گاز در محیط های نمکی به کار می روند. TOUGH2 که در سال ۱۹۹۹ توسط پروس و همکاران توسعه داده شد یک روش عددی مناسب برای شبیه سازی شرایط غیرایزوترمال جریان چندفازی است. روتکوپیچ و تسانگ (۲۰۰۲) و روتکوپیچ و همکاران (۲۰۰۲) پیشگامان این روش توسط هم زمان سازی TOUGH2 و FLAC3D برای مدل سازی جریان سیال، انتقال حرارت و ژئومکانیک بودند [۲۹].

کدها و روش های عددی ذکر شده در بالا برای مدل سازی هم زمان فرآیند THM هستند. در هر حال توانایی مدل سازی رفتار ناپیوستگی و غیرخطی در توده سنگ شامل گسترش ترک تحت جریان چندفازی و شرایط غیرایزوترمال، هنوز نیاز به تقویت دارد. توده سنگ های ناهمسان گرد اغلب دربرگیرنده مواد مختلف، درزه ها و شکستگی هاست. در چنین شرایطی رفتار توده سنگ می تواند با هم زمان کردن فرآیند THM ناپیوسته

و غیرخطی باشد. بنابراین نیاز به یک مدل عددی مناسب که بتواند به اندازه کافی نشان دهنده ناهمسانی و رفتار ناپیوسته سنگ بوده و فرآیند شکست را تحت هم زمان سازی شرایط THM شبیه سازی کند، ضروری است [۲۹].

نتیجه گیری

تزریق گاز در مخزن باعث تغییر در فشار منفذی محیط تزریق می شود که این امر می تواند سبب تغییر در میدان تنش برجا، فعال شدن مجدد ناپیوستگی ها، ایجاد ناپیوستگی های جدید، وقوع رخداد های لرزه ای و کاهش ظرفیت تراوایی پوش سنگ شود. وقتی فشار منفذی طی تزریق گاز افزایش می یابد مقاومت لغزش کاهش و عامل تمایل لغزش (T) افزایش می یابد. اگر مقدار T از یک تجاوز کند لغزش برشی رخ می دهد یا گسل در آستانه لغزش قرار گرفته و ممکن است رخداد های لرزه ای اتفاق بیافتد. بنابراین T به عنوان شاخص پایداری در تزریق سیال در نظر نمی گیرند و مقادیر بیشتر از ۰/۶ به عنوان حد محتمل لغزش فرض می شود. اگر چه روش های تحلیلی برای تخمین تغییرات تنش در حالت کلی مفید است اما یک بررسی ژئومکانیکی عددی ممکن است برای بررسی جزئیات بیشتر تغییرات ناهمسان تنش رخ داده در داخل و اطراف محدوده تزریق مناسب باشد. فشار بهینه تزریق در عملیات تزریق باید از دیدگاه یک پارچگی پوش سنگ و همچنین از نظر اقتصادی ایمن باشد. تخمین این فشار بهینه و ایمن عملیاتی به چندین عامل کلیدی از جمله خواص مکانیکی سنگ، مقاومت سنگ، تنش های برجا و تغییرات در خواص سنگ مخزن (تخلخل، تراوایی، اشیاع آب) و تغییرات تنش القایی ناشی از تزریق بستگی دارد. ساخت یک مدل ژئومکانیکی، دقیق نیازمند داده های واقعی از محیط مدل سازی است. همچنین توأم سازی مدل سازی مخزنی-ژئومکانیکی، معادلات الاستیک منفذی و دینامیک سیال را به طور هم زمان برای تعیین مقادیر مجهول فشار منفذی و جابجایی محیط به کار می گیرد. همچنین اگر داده های کافی برای ساخت مدل ژئومکانیکی موجود باشد نتایج دقیق تری از مدل سازی ژئومکانیکی به دست خواهد آمد. علاوه بر این می توان نتایج مدل سازی را با داده های واقعی گزارش شده مقایسه کرده و اصلاحات لازم را روی مدل سازی انجام داد. ■

پانویس ها

¹Ali.qavidel@ut.ac.ir

²Mehrgini@ut.ac.ir

³Memarian@ut.ac.ir

⁴Slip Tendency

⁵Mini Frac Test

⁶Leak Off Test

⁷break down pressure

⁸closure stress

⁹coupled

¹⁰One-Dimensional Mechanical Earth Model (1-D MEM)

¹¹calibration

¹²Three-Dimensional Mechanical Earth Model (3-D MEM)

¹³coupling

¹⁴4D seismic

¹⁵complex



- [1] J. Rutqvist, J. Birkholzer, And C.-F. Tsang, "Coupled Reservoir-Geomechanical Analysis Of The Potential For Tensile And Shear Failure Associated With Co₂ Injection In Multilayered Reservoir-Caprock Systems," *International Journal Of Rock-mechanics And Mining Sciences*, Vol. 45, Pp. 132-143, 2008.
- [2] Y. Kano, T. Funatsu, S. Nakao, K. Kusunose, T. Ishido, X.-L. Lei, And T. Tosha, "Fault Stability Analysis Related To Co₂ Injection At Tomakomai, Hokkaido, Japan," *Energy Procedia*, Vol. 37, Pp. 4946-4953, 2013.
- [3] A. Rinaldi, J. Rutqvist, P. Jeanne, And F. Cappa, "Geomechanical Effects On Co₂ Leakage Through Fault Zones During Large-Scale Underground Injection," 2013.
- [4] J. Rutqvist, "The Geomechanics Of Co₂ Storage In Deep Sedimentary Formations," *Geotechnical And Geological Engineering*, Vol. 30, Pp. 525-551, 2012.
- [5] F. Cappa And J. Rutqvist, "Impact Of Co₂ Geological Sequestration On The Nucleation Of Earthquakes," *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, P. L17313, 2011.
- [6] F. Cappa And J. Rutqvist, "Modeling Of Coupled Deformation And Permeability Evolution During Fault Reactivation Induced By Deep Underground Injection Of Co₂," *International Journal Of Greenhouse Gas Control*, Vol. 5, Pp. 336-346, 2011.
- [7] F. Cappa And J. Rutqvist, "Seismic Rupture And Ground Accelerations Induced By Co₂ Injection In The Shallow Crust," *Geophysical Journal International*, Vol. 190, Pp. 1784-1789, 2012.
- [8] A. Mazzoldi, A. P. Rinaldi, A. Borgia, And J. Rutqvist, "Induced Seismicity Within Geological Carbon Sequestration Projects: Maximum Earthquake Magnitude And Leakage Potential From Undetected Faults," *International Journal Of Greenhouse Gas Control*, Vol. 10, Pp. 434-442, 2012.
- [9] R. H. Sibson, "Stress Switching In Subduction forearcs: Implications For Overpressure Containment And Strength Cycling On Megathrusts," *Tectonophysics*, 2013.
- [10] J. Rutqvist And C.-F. Tsang, "Coupled Hydromechanical Effects Of Co₂ Injection," *Developments In Water Science*, Vol. 52, Pp. 649-679, 2005.
- [11] J. Streit, A. Siggins, And B. Evans, "Predicting And Monitoring Geomechanical Effects Of Co₂ Injection, Carbon Dioxide Capture For Storage In Deep Geologic Formations—Results From The Co₂ Capture Project, V. 2: Geologic Storage Of Carbon Dioxide With Monitoring And Verification, Sm Benson," *Geologic Storage Of Carbon Dioxide With Monitoring And Verification*, London, 2005.
- [12] J. Rutqvist And C.-F. Tsang, "A Study Of Caprock Hydromechanical Changes Associated With Co₂-Injection Into A Brine Formation," *Environmental Geology*, Vol. 42, Pp. 296-305, 2002.
- [13] J. Rutqvist, J. Birkholzer, And C.-F. Tsang, "Modeling Of Geomechanical Processes During Injection In A Multilayered Reservoir-Caprock System And Implications On Site Characterization," 2006.
- [14] S. Khan, H. Han, S. Ansari, And N. Khosravi, "Geomechanical Modeling To Assess Caprock Integrity In Oil Sands," In *Recovery Cspg Cseg Cwls Convention*, 2011.
- [15] B. Orlic, J. T. Heege, And B. Wassing, "Assessing The Integrity Of Fault-And Top Seals At Co₂ Storage Sites," *Energy Procedia*, Vol. 4, Pp. 4798-4805, 2011.
- [16] J. Handin, R. V. Hager, M. Friedman, And J. N. Feather, "Experimental Deformation Of Sedimentary Rocks Under Confining Pressure; Pore Pressure Tests," *Aapg Bulletin*, Vol. 47, Pp. 717-755, 1963.
- [17] J. E. Streit And R. R. Hillis, "Estimating Fault Stability And Sustainable Fluid Pressures For Underground Storage Of Co₂ In Porous Rock," *Energy*, Vol. 29, Pp. 1445-1456, 2004.
- [18] J. C. Jaeger, N. G. Cook, And R. Zimmerman, *Fundamentals Of Rock Mechanics*: Wiley. Com, 2009.
- [19] J. Rutqvist, J. Birkholzer, F. Cappa, And C.-F. Tsang, "Estimating Maximum Sustainable Injection Pressure During Geological Sequestration Of Co₂ Using Coupled Fluid Flow And Geomechanical Fault-Slip Analysis," *Energy Conversion And Management*, Vol. 48, Pp. 1798-1807, 2007.
- [20] S. Khan, H. Han, M. Vishteh, And N. Khosravi, "Caprock Integrity Analysis In Thermal Operations: An Integrated Geomechanics Approach," In *Whoc-609, Proceedings For The 2011 World Heavy Oil Congress*, Edmonton, Ab, 2011.
- [21] S. Khan, H. Han, S. Ansari, And N. Khosravi, "An Integrated Geomechanics Workflow For Caprock-Integrity Analysis Of A Potential Carbon Storage," In *Spe International Conference On Co₂ Capture, Storage, And Utilization*, 2010.
- [22] A. Correa, R. Newman, V. Naveira, A. L. De Souza, T. Araujo, A. A. Da Silva, A. Soares, J. Herwanger, And G. Meurer, "Integrated Modeling For 3d Geomechanics And Coupled Simulation Of Fractured Carbonate Reservoir," *Otc Brasil 2013*, 2013.
- [23] T. Hu, F. Fournier, And J. Royer, "Are Uncertainties On The Spatial Distribution Of Rock Properties Influential In Coupled Reservoir/Geomechanical Modeling?," In *Thermo-Hydromechanical And Chemical Coupling In Geomaterials And Applications: Proceedings Of The 3rd International Symposium Geoproc'2008*, 2013, P. 465.
- [24] N. Koutsabeloulis And X. Zhang, "3d Reservoir Geomechanical Modeling In Oil/Gas Field Production," In *Spe Saudi Arabia Section Technical Symposium*, 2009.
- [25] N. S. Rao, B. Al-Qadeeri, And V. K. Kidambi, "Building A Seismic-Driven 3d Geomechanical Model In A Deep Carbonate Reservoir," 2011.
- [26] J. Rutqvist, "Status Of The Tough-Flac Simulator And Recent Applications Related To Coupled Fluid Flow And Crustal Deformations," *Computers & Geosciences*, Vol. 37, Pp. 739-750, 2011.
- [27] M. Ferronato, G. Gambolati, C. Janna, And P. Teatini, "Numerical Modelling Of Regional Faults In Land Subsidence Prediction Above Gas/Oil Reservoirs," *International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics*, Vol. 32, Pp. 633-657, 2008.
- [28] S. A. Smith, P. McLellan, C. Hawkes, E. N. Steadman, And J. A. Harju, "Geomechanical Testing And Modeling Of Reservoir And Cap Rock Integrity In An Acid Gas Eor/Sequestration Project, Zama, Alberta, Canada," *Energy Procedia*, Vol. 1, Pp. 2169-2176, 2009.
- [29] P.-Z. Pan, J. Rutqvist, F. Yan, And X. Feng, "An Approach For Modeling Rock Discontinuous Behavior Under Multiphase Fluid Flow Conditions