

## کاربردها و فرآیند شبیه‌سازی کوپل مدل ژئومکانیک و دینامیکی مخزن

مسلم مرادی\*، مرکز رشد واحدهای فن‌آور نفت • رضا شاه‌علی پورا، شرکت توسعه‌ی پترو ایران

### چکیده

شبیه‌سازی کوپل مدل ژئومکانیکی و دینامیکی مخزن در راستای مدیریت بهینه‌ی مخازن هیدروکربنی امری بسیار مهم و ضروری است. نتایج این شبیه‌سازی در مقیاس چاه، مخزن و میدان جهت بهینه‌سازی طراحی‌ها و عملیات، کاهش هزینه‌ها و خسارات احتمالی و در نهایت بهبود شرایط تولیدی مفید خواهند بود. پس از یکپارچه‌سازی بستر مدل‌های استاتیکی و دینامیکی در محیط نرم‌افزاری مثل پترل، فشارهای منفذی از مدل دینامیکی گرفته کالیبره می‌گردند و به‌عنوان اولین متغیرها در مدل کوپل ژئومکانیکی استفاده خواهند شد. فرآیند مدل‌سازی ژئومکانیک جهت اجرای کوپل با مدل دینامیکی، به ترتیب شامل ساخت گریدهای ژئومکانیک، وارد کردن مدل ساخت توابع و جنس مواد جهت حل معادلات ژئومکانیکی سنگ، توزیع خواص ژئومکانیکی و متغیرهای مخزنی، مدل‌سازی ناپوستگی‌ها مثل گسله‌ها و شکاف‌ها، تعریف شرایط اولیه‌ی ژئومکانیکی مخزن، تعریف شرایط مرزی و در نهایت تعریف سناریوهای شبیه‌سازی برای کوپل ژئومکانیک مخزن است. سپس با توجه به نحوه‌ی کوپل مورد نظر اعم از یک‌جانبه، تکرار شونده (دوجانبه) و ... شبیه‌سازی ژئومکانیکی به حل عددی معادلات پرداخته و فرآیند کوپل را با ارائه‌ی نتایج هر مرحله کامل می‌کند. در پژوهش حاضر کاربردهای نتایج مدل کوپل ژئومکانیکی و فرآیند مدل‌سازی آن بر اساس ماژول‌های نرم‌افزار پترل شامل ژئومکانیک (PETREL) و همچنین شبیه‌سازی ژئومکانیکی ویساج (VISAGE) تشریح می‌گردد.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۰۲/۲۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۵/۱۶

### واژگان کلیدی:

ژئومکانیک، مدل کوپل ژئومکانیکی و دینامیکی مخزن، مدل چهار بعدی ژئومکانیکی، شبیه‌سازی ژئومکانیک، توزیع تنش و کرنش

### مقدمه

افزایش ارزش خالص فعلی<sup>۲</sup> پروژه گردد. غایت مطالعات ژئومکانیکی زمانی است که مدل سه‌بعدی ژئومکانیک با مدل دینامیک مخزن کوپل شده و بر اساس سناریوهای از پیش تعیین شده، متغیرهای ژئومکانیکی مخزن در طول تخلیه‌ی مخزن محاسبه می‌شوند. مدل کوپل ژئومکانیکی مخزن، مبنای کمکی بسیار مناسب برای تصمیم‌گیری فعالیت‌های آتی مخزن و اجرای هر نوع سناریوی بهبود/ازدیاد برداشت است. واضح است که اهمیت مدل کوپل ژئومکانیکی بسیار بیشتر از مدل یک‌بعدی و سه‌بعدی ژئومکانیکی است و جهت کاهش هزینه‌ها، مخاطرات و ریسک توسعه می‌تواند مؤثرتر از دو مدل اخیرالذکر واقع گردد. اهمیت اجرای مطالعات کوپل ژئومکانیکی به اندازه‌ای است که در برخی کشورها مثل کانادا، بدون انجام مطالعاتی مانند شکستگی پوش سنگ، مجوز توسعه و بهره‌برداری از هیچ میدان هیدروکربنی صادر نمی‌شود. بنابراین تأثیر مطالعات ژئومکانیکی در ابعاد مختلف

ژئومکانیک به‌عنوان دانشی چندرشته‌ای یکی از مهم‌ترین نقش‌های مدیریت مخزن را ایفا می‌کند. در میادین نفت و گاز، علوم مثل مکانیک سنگ، زمین‌شناسی، تکنیک، پتروفیزیک و رشته‌های مهندسی مثل مهندسی حفاری و مهندسی مخزن بیشترین سهم را در ورودی و مطالعات ژئومکانیکی دارند. این دانش با وجود پیشرفت‌های گسترده در به‌کارگیری در میادین نفت و گاز جهان، هنوز در فرآیندهای اکتشاف، توسعه، بهره‌برداری و حتی ترک مخزن در میادین کشورمان از جایگاه مطلوبی برخوردار نیست.

گستره‌ی فعالیت ژئومکانیک اولین فعالیت‌های اکتشافی، توسعه، بهره‌برداری (به‌ویژه عملیات بهبود/ازدیاد برداشت) و سپس ترک مخزن را شامل می‌شود و کلید حل بسیاری از مشکلات اعم از افزایش هزینه، کاهش بازده و سرعت اجرای عملیات، ضریب بازیافت کم و ... است که در نهایت می‌تواند با کاهش هزینه‌ها و بهبود شرایط تولیدی و ضریب بازیافت نهایی، موجب

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

- پیش‌بینی وضعیت گسله‌ها و شکاف‌ها (در صورتی که تغییر وضعیت این ویژگی‌ها در تصمیم‌گیری آینده‌ی مخزن مثل سناریوهای تولیدی، تزریقی و ... مؤثر خواهد بود. مثلاً تغییر وضعیت بسته بودن (seal) گسله‌ها یا تغییر مشخصات شکاف‌های طبیعی ناشی از تولید یا تزریق، بر نحوه‌ی توسعه مؤثر خواهد بود)
- بهینه‌سازی محل چاه‌ها و مسیر حفاری آنها
- تعیین دقیق‌تر متغیرهای ژئومکانیکی مؤثر برای انجام شکاف هیدرولیکی
- تعیین پنجره‌ی ایمن گل حفاری
- مطالعات مربوط به رفتار مقاومتی دمایی مخزن
- مطالعات مربوط به انتخاب سرمته‌ی حفاری
- مطالعات مربوط به نحوه‌ی تکمیل چاه و پیش‌بینی تولید مواد جامد و ماسه
- پیش‌بینی اثرات ژئوشیمیایی تزریق گاز و سایر روش‌های ازدیاد برداشت بر مخزن و سنگ‌پوش

همه‌ی کاربردهای بالا و کاربردهای رایج دیگر، تنها بخشی از کاربردهای کوپل مدل چهاربعدی ژئومکانیکی مخزن است. همان‌طور که واضح است اهمیت مدل کوپل چهاربعدی ژئومکانیکی بسیار بیشتر از مدل یک‌بعدی و سه‌بعدی ژئومکانیکی است و جهت کاهش هزینه‌ها، مخاطرات و ریسک توسعه می‌تواند مؤثرتر از آنها واقع گردد [۱].

مدل‌سازی ژئومکانیکی در برگیرنده‌ی همه‌ی سازندها از جمله مخزن، سنگ‌های اطراف آن و لایه‌های بالایی تا سطح زمین است. رفتار ژئومکانیکی همه‌ی سازندها از جمله رفتار الاستیک، پوروالاستیک و الاستو پلاستیک، رفتار بعد از شکست سنگ، رفتارهای متغیر با زمان مانند خزش و ... در این مدل‌سازی دیده می‌شود. با به‌دست آوردن میدان تنش برجا و مسیر تنش در مدل ساخته شده می‌توان رفتار سنگ مخزن را با تخلیه و تولید از مخزن بررسی کرد و سناریوهای توسعه/بازتوسعه‌ی مخزن را به‌نحوه‌ی اقتصادی مدیریت نمود.

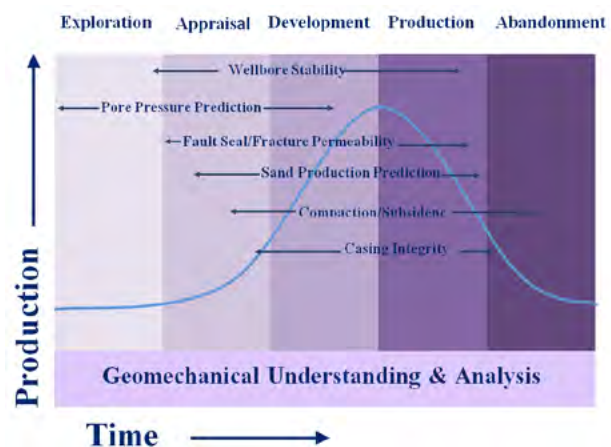
کاربردهای مدل کوپل ژئومکانیکی طیفی وسیع‌تر از سطح مدل‌های یک‌بعدی و سه‌بعدی ژئومکانیکی دارد و می‌تواند تمامی نتایج مطالعات یک‌بعدی و سه‌بعدی را در بر داشته باشد. تحلیل نتایج مطالعات کوپل مدل ژئومکانیکی و دینامیکی می‌تواند بر تعیین و بهینه‌سازی سناریوهای توسعه و بهره‌برداری از یک میدان تأثیر به‌سزایی داشته باشد و طرح جامع توسعه را به‌روزرسانی کند. بنابراین از آغازین روزهای فعالیت‌های اکتشافی، مطالعات ژئومکانیکی گسترده‌ای لازم است و تا پایان ترک مخزن نیز ادامه می‌یابد. شکل ۱- گسترده‌ی دامنه‌ی فعالیت‌های ژئومکانیکی را نشان می‌دهد.

فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و ... در فرآیندهای بهره‌برداری از میادین نفت و گاز امری اجتناب‌ناپذیر است.

### ۱- کاربردهای کوپل مدل ژئومکانیکی و دینامیکی مخزن

امروزه ثابت شده که کوپل مدل ژئومکانیکی با مدل دینامیکی مخزن می‌تواند امکان پیش‌بینی‌های دقیق‌تر مقدار ذخیره و تولید سیال هیدروکربنی را فراهم نماید. علاوه بر آنکه امکان تعیین تغییر خصوصیات سنگ مخزن و عوامل ژئومکانیکی مؤثر بر تولید نیز وجود دارد. بنابراین ساخت مدل کوپل ژئومکانیکی متناسب با سناریوهای برنامه‌ریزی شده، بهبود و تصحیح<sup>۳</sup> ویژه‌ای برای تحلیل شرایط استاتیکی و دینامیکی مخزن خواهد بود و علاوه بر کاهش هزینه‌ها و خسارات احتمالی، موجب تصحیح و ارتقاء سناریوهای برنامه‌ریزی توسعه/بازتوسعه‌ی مخزن می‌گردد. این امر در نهایت منتج به افزایش سودآوری و افزایش ارزش خالص فعلی پروژه خواهد شد. مهم‌ترین کاربردهای این مدل عبارتند از:

- فشرده‌گی و فرونشست مخزن ناشی از تولید در بازه‌های زمانی
- پیش‌بینی بهتر اثر سناریوهای تزریق و ازدیاد برداشت در مخزن
- پیش‌بینی فشارمنفذی (تفاوت این پیش‌بینی با پیش‌بینی مدل دینامیک اینست که در پیش‌بینی براساس به علم ژئومکانیک اثر متغیرهای ژئومکانیکی مثل تأثیر کرنش روی فشار دیده می‌شود).
- یکپارچگی پوش سنگ ناشی از سناریوهای تولیدی و/یا تزریقی
- مطالعه‌ی مخازن غیرمتعارف
- مطالعه‌ی مکان‌یابی چاه‌ها و اثرات ذخیره‌سازی گاز در مخازن
- بررسی وضعیت متغیرهای مخزن مثل نفوذپذیری و تخلخل در اثر تخلیه



۱ | گسترده‌ی مطالعات ژئومکانیکی طی عمر یک میدان



## ۲- تاریخچه‌ی پژوهش و ادبیات موضوع

علم ژئومکانیک طبق رابطه‌ی Terzaghi و بر اساس مفاهیم تنش مؤثر و استحکام سنگ‌های تراکم ناپذیر ارائه شد. سپس بایوت، کوپل بین تنش و فشار منفذی را در یک محیط متخلخل بررسی کرد و با توجه به اصول مکانیک پیوسته، رابطه‌ی عمومی سه‌بعدی تئوری استحکام سنگ را توسعه داد [۲].

در بسیاری از کارهای علمی، از داده‌های لرزه‌ای برای کالیبراسیون مدل ژئومکانیک استفاده می‌شود. در واقع به‌جای آنکه مدل سه‌بعدی و کوپل ژئومکانیکی بر پایه‌ی داده‌ها و اطلاعات نه‌چندان دقیق و با وضوح کم لرزه‌ای ساخته و تحلیل شود، بسیار بهتر است این داده‌ها برای کالیبراسیون تنش‌های حاصل از مدل کوپل ژئومکانیکی به کار گرفته شوند. بدیهی است که برای کالیبراسیون نتایج مدل کوپل ژئومکانیکی به‌وسیله‌ی داده‌ها و اطلاعات لرزه‌ای، استناد به مدل سرعت لرزه‌ای<sup>۴</sup> بسیار ضروری است [۳].

آنالیزهای بزرگ‌نمایی<sup>۵</sup> برای ساخت هرچه واقعی‌تر مدل‌ها به کار می‌رود. این کار برای هرچه دقیق‌تر شدن نتایج کوپل مدل ژئومکانیکی و دینامیکی مخزن انجام می‌شود [۴و۵]. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد مدل‌های ژئومکانیکی با در نظر گرفتن تغییرات دما و جریان سیال، برای شبیه‌سازی بهتر سناریوهای تولیدی و تزریقی سیال استفاده می‌شوند. بدین صورت که مدل دینامیکی مخزن با شبیه‌سازی حل عددی ژئومکانیکی، بر اساس روش‌ها و مکانیزم‌های مختلف کوپل شده و به‌وسیله‌ی داده‌ها و نتایج یکدیگر (دو مدل ژئومکانیکی و دینامیکی) به‌روز رسانی می‌شوند [۶]. انواع روش کوپل بین دو مدل دینامیکی و شبیه‌سازی ژئومکانیکی در منبع [۷] به تفصیل تشریح شده‌اند. این روش‌های کوپل بین شبیه‌سازی حل عددی ژئومکانیکی و شبیه‌سازی دینامیکی، در قالب روش‌های زیر هستند:

- روش کوپل جدا
- روش شبه کوپل<sup>۶</sup>
- روش کوپل یک‌جانبه<sup>۷</sup>
- روش کوپل دوجانبه<sup>۸</sup> (تکرار شونده)
- روش کوپل کامل<sup>۹</sup>

پژوهش‌های بسیاری در زمینه‌ی کوپل مدل دینامیکی و شبیه‌سازی حل معادلات عددی ژئومکانیک انجام شده است. اغلب پژوهش‌ها توجه ویژه‌ای به حل معادلات عددی و روش‌های کوپل دو مدل دینامیکی و ژئومکانیکی داشته‌اند و بسیاری دیگر با تأکید بر مدل‌سازی کوپل ترموهیدرومکانیک مخازن (که تغییرات دمایی محسوس در مدل سیال دارد) بر کاربردهای کوپل ژئومکانیکی متمرکز شده‌اند. در جدول ۱- برخی پژوهش‌ها در این زمینه به اختصار ذکر شده‌اند که

مهم‌ترین آنها به مرجع مورد نظر ارجاع داده شده است. از طرف مدل کوپل ژئومکانیکی جایگاه ویژه‌ای در مطالعات صنعتی نفت و گاز دارد. مثلاً در بین شرکت‌های نفتی و خدماتی بین‌المللی سه شرکت زیر به‌همراه نام مهم‌ترین نرم‌افزارهای ژئومکانیکی اختصاصی خود، توجه قابل توجهی به این مطالعات دارند:

- شلمبرژه<sup>۱۱</sup> (نرم‌افزار Visage)
- هالیبرتون<sup>۱۳</sup> (نرم‌افزار Drillworks)
- بیکر هیوز<sup>۱۴</sup> (نرم‌افزار Jewel Suite)

این شرکت‌ها بیشترین تلاش خود را جهت به‌کارگیری مطالعات ژئومکانیکی در ارائه‌ی خدمات دارند و تیم‌های متخصص و متبحر گسترده‌ای جهت توسعه‌ی نرم‌افزاری و پژوهشی در اختیار گرفته‌اند.

۱ | برخی پژوهش‌های مهم در زمینه‌ی مدل کوپل ژئومکانیکی

پژوهشگران و سال پژوهش	ادبیات موضوع
Albinali, Kazemi, & Alghamdi, 2011	مدل‌سازی جریان سیال و ژئومکانیک با استفاده از روش حل عددی [۸]
Gu et al., 2011	مطالعه‌ی آزمایشی جهت مدل‌سازی کوپل شبیه‌سازی ژئومکانیکی و مدل‌سازی جریان سیال [۹]
Hosseini & Chalaturnyk, 2013	مطالعه‌ی خطوط جریانی طبق کوپل شبیه‌سازی ژئومکانیکی و دینامیکی برای مدل‌سازی هیدرومکانیکی ذخیره‌ی دی‌اکسید کربن در آبدده‌ها <sup>۱۰</sup> [۱۰]
Kim, Moridis, Yang, & Rutqvist, 2012	مطالعه‌ی حل عددی کوپل دوجانبه شبیه‌سازی جریان سیال و ژئومکانیکی در مخازن هیدرات‌ها [۱۱]
Koutsabeloulis & Zhang, 2009	مدل‌سازی سه‌بعدی ژئومکانیکی مخزن در تولید از میادین نفتی و گازی [۱۲]
A. Setari & Walters, 2001	پیشرفت‌های مدل‌سازی کوپل ژئومکانیکی و دینامیکی با رویکرد کاربرد فشرده‌ی مخزن [۱۳]
Thomas, Chin, Pierson, & Sylte, 2003	کوپل شبیه‌سازی ژئومکانیک و شبیه‌سازی دینامیکی مخزن [۱۴]
Zakaria, Elbanbi, & Abdelwaly, 2011	کوپل کامل شبیه‌سازی ژئومکانیکی و مدل جریانی سیال جهت مدل‌سازی عملکرد چاه <sup>۱۱</sup> در مخازن گازی که تولید وابستگی زیادی به تنش دارد [۱۵]
Varavei, Johns, Sepehrnoori, & Moinfar, 2013	کوپل شبیه‌سازی دینامیک و ژئومکانیکی برای یک مدل گسسته‌ی شکاف [۱۶]
Yale, 2002	مدل کوپل شبیه‌سازی جریانی و ژئومکانیکی و اثرات متعاقب در انعطاف‌پذیری و تغییرات نفوذپذیری سنگ مخزن [۱۷]

در ادامه بخش‌های مختلف شماتیک شکل ۳- تشریح خواهد شد.

#### ۴-۱- متدولوژی مدل سازی ژئومکانیکی و کوپل با مدل دینامیک مخزن

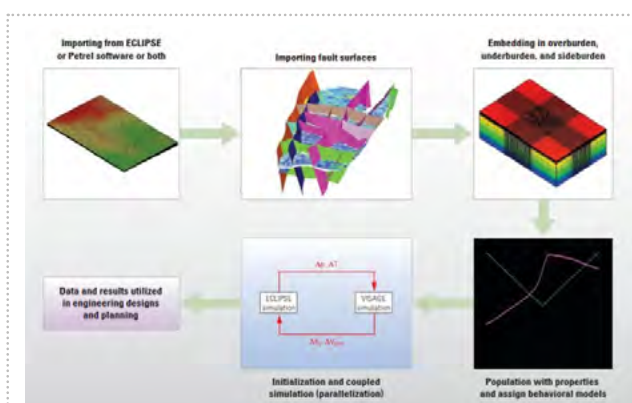
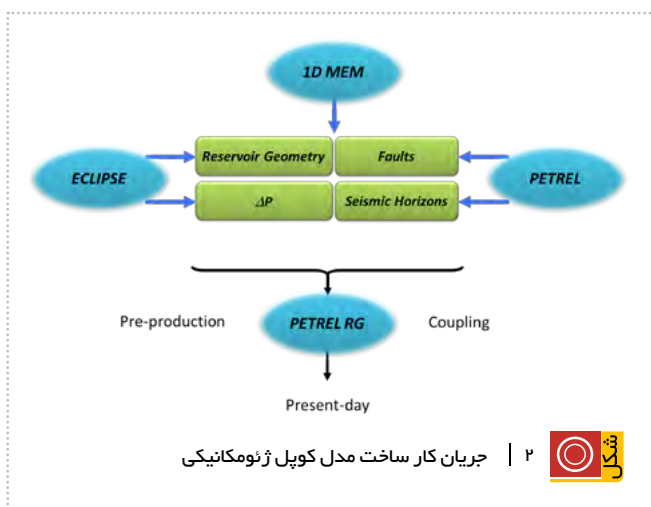
جزئیات فرآیند و مراحل ساخت مدل کوپل ژئومکانیکی با نرم افزار پترل در گام‌های زیر تشریح می‌گردد.

##### ۴-۱-۱- ساخت گریدهای ژئومکانیکی

اولین مرحله در ساخت مدل ژئومکانیکی، ساخت گریدهای ژئومکانیک است. با داشتن مدل‌های استاتیک و دینامیک مخزن و همچنین داده‌های مورد نیاز مدل ژئومکانیک، می‌توان مدل سه‌بعدی را ساخت. شکل ۴-۱ مراحل ساخت گریدهای ژئومکانیکی را به ترتیب تشریح می‌کند. ابعاد و اندازه‌ی گریدها می‌تواند بر حسب نیاز و دقت انجام محاسبات متفاوت باشد [۲۱].

#### ۴-۲- وارد کردن مدل ساخت توابع و جنس مواد جهت حل معادلات ژئومکانیکی سنگ

در این بخش نوع جنس تغییرات ژئومکانیکی سنگ و نحوه‌ی به‌روز



مراجع [۱۹ و ۱۸] به تشریح، بسیاری از خدمات ژئومکانیکی این شرکت‌ها را نشان می‌دهند.

#### ۳- فرآیند کوپل مدل ژئومکانیکی<sup>۱۴</sup> و شبیه‌ساز جریانی سیال<sup>۱۵</sup>

ژئومکانیک در ارتباط با صنعت نفت و گاز در سه سطح؛ مدل یک‌بعدی ژئومکانیکی یا مکانیک زمین، مدل سه‌بعدی ژئومکانیکی و کوپل مدل ژئومکانیکی با مدل دینامیکی مخزن مطرح می‌شود. در مدل یک‌بعدی، مقیاس چاه بررسی می‌شود، در مدل سه‌بعدی، مقیاس میدانی اولیه بررسی می‌گردد و در کوپل با مدل دینامیکی مخزن، توزیع جهت، اندازه‌ی تنش‌ها و کرنش سازندها در طول زمان و با تخلیه‌ی مخزن نشان داده خواهد شد.

در شکل ۲- جریان کار ساخت مدل سه‌بعدی و چهاربعدی نشان داده شده است. خروجی نرم‌افزار پترل از مدل سه‌بعدی ژئومکانیکی، فشارهای منفذی تصحیح شده توسط مدل یک‌بعدی ژئومکانیکی است.

از مدل یک‌بعدی مکانیک زمین (IDMEM) جهت کالیبراسیون عمق و فشار منفذی برای نتایج مدل سه‌بعدی ژئومکانیکی ساخته شده استفاده می‌گردد. نتایج مدل یک‌بعدی ژئومکانیکی تعیین خطای حل معادلات عددی در مدل کوپل ژئومکانیکی نیز استفاده خواهد شد. این نتایج با توجه به بازه‌ی مورد نظر در حل معادلات عددی در گریدهای ژئومکانیکی، به‌نوعی می‌تواند توسط نتایج حاصل از مدل یک‌بعدی ژئومکانیکی بررسی گردد تا نتایج محاسبه شده در کوپل ژئومکانیکی، قابل اعتماد و استناد باشد [۲۰].

علاوه بر این کالیبراسیون، کالیبراسیون مدل کوپل ژئومکانیکی ساخته شده، بر اساس داده‌های لرزه‌ای قابل اتکا انجام می‌گردد. بدین صورت که نتایج و خروجی‌های عددی تنش برجا و منطقه‌ای و همچنین کرنش حجمی در مدل کوپل ژئومکانیکی، با نتایج حاصل از ساخت مکعب‌های فشار منفذی و متعاقباً تنش‌های حاصل از اطلاعات لرزه‌ای کالیبره می‌شوند.

پس از ساخت مدل سه‌بعدی ژئومکانیکی و کالیبراسیون فشارها، مدل سه‌بعدی به‌عنوان ورودی اولیه جهت کوپل با مدل دینامیکی مخزن استفاده می‌شود.

در شکل ۳- شماتیک اجرای روش کوپل ژئومکانیک و مدل دینامیکی مخزن نشان داده شده است. مبنای مدل دینامیکی ساخته شده در این شکل، نرم‌افزار اکلیپس بوده که این فرآیند در بستر ژئومکانیکی نرم‌افزار پترل<sup>۱۶</sup> انجام می‌شود. اساس شبیه‌ساز حل معادلات عددی ژئومکانیکی، حل به روش عناصر محدود توسط نرم‌افزار ویساج<sup>۱۸</sup> است [۱].

زده شوند. در این مرحله از مطالعه، مدل سه بعدی متغیرها که از مدل MEM یک بعدی در چاهها محاسبه شده‌اند، با استفاده از روش‌های زمین آماری به همراه داده‌های سرعت و نشانگرهای مرتبط لرزه‌ای، به عنوان متغیر ثانویه توزیع خواهند شد و در نهایت نتایج این توزیع توسط چاه‌ها ارزشیابی خواهند شد. مثلاً برای مواد آیزوتروپیک، ماتریس رابطه‌ی تنش و کرنش خلاصه شده و به صورت ماتریسی با قطر اصلی مانند زیر خواهد بود.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & & & \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & & & \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & & & \\ & & & \frac{1}{G} & & \\ & & & & \frac{1}{G} & \\ & & & & & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ماتریس بالا ماتریس تنش و کرنش برای مواد آیزوتروپیک با رفتار الاستیک است [۲۲] که در آن،  $x$  و  $y$  و  $z$  نشان‌دهنده‌ی جهت  $\epsilon$ ،  $\gamma$  نشان‌دهنده‌ی کرنش برشی و نرمال  $\sigma$  نشان‌دهنده‌ی تنش هستند. متغیرهای مستقل شامل مدول یانگ ( $E$ )، ضریب پواسون ( $\nu$ ) و مدول برشی ( $G$ ) است که رابطه‌ی ۲- بین آنها صادق است [۲۲]:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

حل ماتریس‌های تنش-کرنش با روش‌های مختلفی مانند روش حذفی گوس<sup>۲۲</sup>، روش حل تکرار<sup>۲۳</sup> و ... قابل انجام است.

#### ۴-۴- مدل سازی ناپوستگی‌ها مثل گسله‌ها و شکاف (اختیاری)

پس از تعیین نحوه‌ی توزیع خواص ژئومکانیکی در صورت وجود گسل یا شکاف در مخزن، باید متغیرهای ژئومکانیکی آنها در این بخش بررسی شده و جهت تکمیل ساخت مدل سه بعدی ژئومکانیکی وارد و تصحیح گردند [۲۱] که شامل دو بخش است:

- ایجاد گسله‌ها<sup>۲۴</sup> و مدل سازی
- مدل سازی شبکه‌ی گسسته‌ی شکاف‌ها<sup>۲۵</sup>

#### ۴-۵- تعریف شرایط اولیه‌ی مدل ژئومکانیکی

در این مرحله شرایط اولیه به عنوان برای شبیه سازی مدل ژئومکانیکی تعریف می‌شود. همچنین برای گریدهای تعریف شده در مدل دینامیکی، باید محاسبات عمق مینا، فشار و ... تعریف شود تا هیچ گریدی بدون فشار اولیه در مدل ژئومکانیکی وارد نگردد. مثلاً برای تعیین فشار می‌توان مینا را گرادیان قرار داده و فشار را محاسبه کرد.

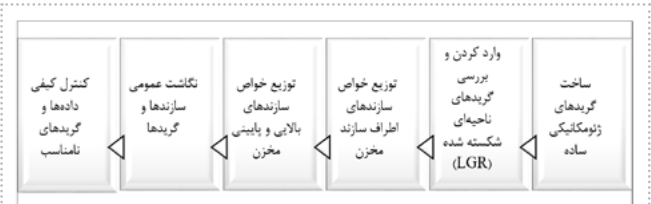
کردن داده‌ها وارد می‌گردد. متغیرهای مکانیکی سنگ نیز به عنوان ورودی مورد نیاز هستند [۲۱].

#### ۴-۳- توزیع خواص ژئومکانیکی و متغیرهای مخزنی

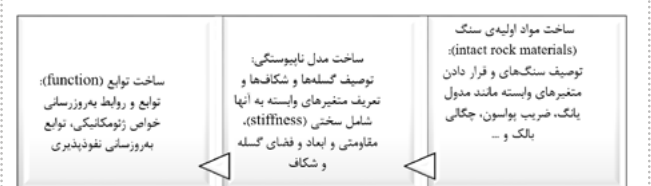
در این مرحله نحوه‌ی توزیع خواص ژئومکانیکی مدنظر است. باید بر حسب شرایط و ویژگی‌های مخزن، متغیرهای ژئومکانیکی در مخزن توزیع شوند تا مدل سه بعدی ژئومکانیکی ساخته شود. باید نحوه‌ی به روز کردن داده‌های ژئومکانیکی و مخزن که به دلیل تغییرات ژئومکانیکی تغییر کرده‌اند تعیین گردد [۲۲].

مدل‌هایی که برای اعمال رفتار مواد وجود دارد شامل موارد زیر است. برای هریک، مقادیر متغیرها تغییر کرده و بنابراین حل روابط ژئومکانیک متفاوت خواهد بود [۲۱].

- رفتار الاستیک: مواد ناهمسانگرد<sup>۱۹</sup>، مواد آیزوتروپیک، مواد همسانگرد عرضی<sup>۲۰</sup>
- رفتار پلاستیک: موهر کلمب، دراگر-پراگر، کلاسیک حالت بحرانی<sup>۲۱</sup>
- جهت محاسبه‌ی تنش افقی، متغیرهای مختلف سنگ مانند مدول‌های حجمی، یانگ و ضریب ثابت پواسون باید در مدل سه بعدی تخمین



شکل ۴ | مراحل ساخت گریدهای ژئومکانیکی



شکل ۵ | گام‌های ساخت توابع ژئومکانیکی



شکل ۶ | مراحل توزیع خواص ژئومکانیکی

نحوه‌ی به‌روز کردن این متغیرها در تخلخل نشان می‌دهد که در آن  $\alpha$  و  $Q$  ضرایب بایوت هستند. رابطه‌ی ۳- به‌روزرسانی و محاسبه‌ی تخلخل با لحاظ کردن تغییرات ژئومکانیکی است.

$$\phi = \phi^0 + \alpha(\varepsilon_v - \varepsilon_v^0) + \frac{1}{Q}(p - p^0) \quad (3)$$

### ۵- مبانی محاسبه‌ی متغیرهای ژئومکانیکی مخزن در مدل کوپل

جهت محاسبه‌ی تنش عمودی (فشار روباره)، تنش مؤثر، فشار منفذی، محاسبه و توزیع تنش افقی و سپس کالیبراسیون نهایی تنش‌ها در مدل کوپل ژئومکانیکی به‌صورت زیر عمل می‌شود:

#### ۵-۱- تنش عمودی

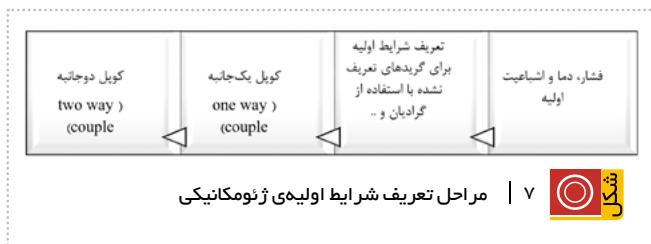
در این مرحله داده‌های تهیه شده‌ی سرعت در مقطع مقطعی با اطلاعات چگالی، در هر ناحیه نمایش داده شده و تطابق برای تبدیل داده‌های سرعتی به داده‌های چگالی در هر ناحیه انجام خواهد شد. در مرحله‌ی بعدی مکعب چگالی تهیه شده به‌طور عمودی برای محاسبه‌ی فشار روباره استفاده خواهد شد.

#### ۵-۲- محاسبه‌ی تنش مؤثر

با نگاهی به مدل‌های یک بعدی MEM در دسترس چاه‌ها، تطابق امواج سرعتی فشارشی و فشار مؤثر تهیه خواهد شد. در حال حاضر برخی تطابقات مشهور مانند Eaton و Bowers برای اهداف استاندارد صنعتی استفاده می‌شوند. با اعمال تطابق در مکعب سرعتی تصحیح شده، مکعب تنش مؤثر محاسبه می‌شود.

#### ۵-۳- محاسبه‌ی فشار منفذی

فشار منفذی از تفاوت فشار کل و فشار مؤثر حاصل می‌شود. با



شکل ۷ | مراحل تعریف شرایط اولیه‌ی ژئومکانیکی



شکل ۸ | مراحل نهایی کوپل ژئومکانیکی مخزن

در این مرحله باید نحوه‌ی کوپل مدل سه‌بعدی ژئومکانیک با مدل دینامیکی اعم از روش یک‌جانبه، دوجانبه و ... مشخص گردد. اگرچه از نظر دقت نتایج حاصل، روش کوپل کامل بهترین روش است اما این روش هنوز توسط شرکت شلمبرژه در حال توسعه و مطالعه است و بنابراین در کوپل ژئومکانیک با نرم‌افزار ویساج، اکنون تنها می‌توان یکی از روش‌های کوپل یک‌جانبه (صریح) یا کوپل دوجانبه (تکرار شونده) را بر حسب نیاز و دقت محاسبات انتخاب کرد [۲۱].

### ۴-۶- تعریف شرایط مرزی

تعیین شرایط مرزی همواره یکی از کلیدی‌ترین چالش‌ها در مدل‌سازی دینامیکی و ژئومکانیکی است که غالباً با توجه به شرایط تکتونیکی و زمین‌شناسی در نواحی مرزی ساختار ژئومکانیکی معین می‌شوند. تعیین این شرایط مرزی در مدل نرم‌افزاری بر اساس مدل گراویتی یا فشار یا بر اساس کرنش و ... نیز امکان‌پذیر است که البته استفاده از هر یک از مدل‌ها بر حسب ضرورت انجام می‌شود. این شرایط مرزی بازه‌ی گسترده‌ای داشته و شامل مشخصات و ویژگی‌های سازنده‌های روباره<sup>۲۶</sup>، کناری<sup>۲۷</sup> و پایینی<sup>۲۸</sup> مخزن است که برای بدست آوردن شرایط در مرزهای مخزن و هم چنین محاسبات تغییرات متغیرهای ژئومکانیکی مخزن مورد نیاز است [۲۱].

### ۴-۷- تعریف سناریوهای شبیه‌سازی برای کوپل ژئومکانیکی مخزن

آخرین مرحله از نهایی‌سازی مدل کوپل ژئومکانیکی، تعریف سناریوهای شبیه‌سازی است که در این بخش وارد می‌شوند. در این گام، انتخاب بازه‌های زمانی جهت به‌روزرسانی متغیرهای ژئومکانیکی در مدل دینامیک، تعیین بازه در کوپل دوجانبه و روابط به‌روزرسانی متغیرهای مخزنی از مراحل این بخش هستند [۲۱].

پس از اجرای مراحل بالا و تأیید نهایی اجرای کوپل<sup>۲۹</sup>، با توجه به هدف مطالعه‌ی ژئومکانیکی، یکی از مکانیزم‌های کوپل اعم از کوپل یک‌جانبه، کوپل جریان رفت و برگشتی (دوجانبه)، کوپل کامل و ... بر اساس حل عددی معادلات ژئومکانیکی اجرا خواهد شد. مثلاً اگر کوپل یک‌جانبه مبنا باشد برای هر گام اجرای<sup>۳۰</sup> شبیه‌سازی، جریان یک‌جانبه‌ی فشار منفذی، دما و انبساط از مدل دینامیکی به مدل ژئومکانیکی انجام خواهد شد که در ادامه در مدل ژئومکانیکی پاسخ‌های متناظر را به‌دست می‌دهد.

به‌طور کلی رابطه‌ی حاکم بر به‌روزرسانی متغیر تخلخل طبق رابطه‌ی ۳- خواهد بود. این رابطه ضعف شبیه‌سازهای دینامیکی (عدم تأثیر متغیرهای ژئومکانیکی در به‌روز کردن متغیرهای مدل دینامیکی) را پوشش داده و بر مبنای اعمال تغییرات ژئومکانیکی،

همان‌طور که پیش‌تر مطرح شد کاربرد این نتایج در مطالعه و تحلیل فشردگی و فرونشست مخزن ناشی از تولید در بازه‌های زمانی مختلف، پیش‌بینی بهتر اثر سناریوهای تزریق و ازدیاد برداشت در مخزن، پیش‌بینی فشار منفذی، یکپارچگی پوش سنگ ناشی از سناریوهای تولیدی و/یا تزریقی، مطالعه‌ی مخازن غیرمتعارف، مطالعه‌ی مکان‌یابی چاه‌ها و اثرات ذخیره‌سازی گاز در مخازن، پیش‌بینی و با به‌روزرسانی متغیرهای مخزن مثل نفوذپذیری و تخلخل، پیش‌بینی وضعیت گسله‌ها و شکاف‌ها، پیش‌بینی بهینه‌سازی محل چاه‌ها و مسیر حفاری چاه‌ها، تعیین دقیق‌تر متغیرهای ژئومکانیکی مؤثر برای انجام شکاف هیدرولیکی و ... به کار گرفته خواهد شد.

### نتیجه‌گیری

مدل‌سازی کوپل ژئومکانیکی در برگزیده‌ی همه‌ی سازندها از جمله مخزن و سنگ‌های اطراف آن و لایه‌های بالایی تا سطح زمین است. رفتار ژئومکانیکی همه‌ی سازندها از جمله رفتار الاستیک، پوروالاستیک و الاستوپلاستیک، رفتار بعد از شکست سنگ، رفتارهای متغیر با زمان مانند خزش و ... در این مدل‌سازی دیده می‌شود و بنابراین می‌توان آنرا اعمال رویکرد جامع تری نسبت به مدل‌سازی دینامیکی مخزن و حتی سازندهای اطراف محدوده‌های مخزن دانست. با به‌دست آوردن تغییرات تنش و مسیر آن در مدل ساخته شده، می‌توان رفتار سنگ مخزن را با تخلیه و تولید از مخزن بررسی کرد. بنابراین نتایج شبیه‌سازی مدل کوپل ژئومکانیکی تأثیر تغییر متغیرهای ژئومکانیکی مخزن از جمله تنش و کرنش را در به‌روزرسانی متغیرهای مخزنی مثل تخلخل و نفوذپذیری اعمال می‌کند و در نتیجه می‌توان به مدل واقعی‌تر و دقیق‌تری از مخزن دست یافت. با تحلیل نتایج حاصل از کوپل مدل ژئومکانیکی و دینامیکی، مطالعات گسترده‌ای در مقیاس چاه، مخزن و میدان قابل انجام است که منتج به بهینه‌سازی فرآیندها و عملیات، کاهش زمان و هزینه، کاهش خسارات احتمالی و در نهایت موجب بهبود شرایط تولید و افزایش ارزش خالص فعلی پروژه خواهد شد.

داشتن مکعب فشار مؤثر و فشار روباره در محل مطالعه، مکعب فشار منفذی محاسبه می‌گردد. جهت افزایش دقت در مکعب فشار منفذی، نتایج مدل یک‌بعدی MEM با استفاده از ابزارهای زمین‌آزمایی چندمتغیره کالیبره خواهد شد.

### ۴-۵- محاسبه و توزیع تنش افقی

در حوزه‌های تکتونیک فعال، کرنش‌ها و تنش‌های تکتونیک وارده، از سوی حرکت صفحه‌ی تکتونیک است. با اعمال کرنش‌های تکتونیک بر سازند سنگی، تنش‌ها در الاستیک سنگ افزایش می‌یابد. مدل کرنش افقی پوروالاستیک، کرنش‌های تکتونیک را گرفته و به تنش‌های افقی ناهمسان تبدیل می‌کند. برای محاسبه‌ی بزرگی تنش افقی، مدل تنش افقی پوروالاستیک به‌نحو زیر ساخته می‌شود:

در این معادلات تنش عمودی ( $\sigma_v$ )، نسبت پوآسون ( $\nu$ ) و فشار منفذی ( $P_p$ ) توسط پترل ساخته شده که در اینجا دو تنش افقی  $\epsilon_x$  و  $\epsilon_y$  ممکن است فشارشی یا کششی باشند و بنابراین می‌توانند از طریق مدل MEM ساخته شد و عوامل کالیبراسیون مناسبی جهت تخمین کمترین تنش افقی باشند.

### ۵-۵- کالیبراسیون نهایی تنش‌ها

برای مدل تنش، تنش‌های محاسبه شده باید سازگار با تنش‌های مدل یک‌بعدی MEM در طول مسیر چاه باشند. زمانی که بین تنش‌های تهیه شده در مدل یک‌بعدی و سه‌بعدی تطابق مناسبی ایجاد شود از تحلیل نتایج تنش سه‌بعدی می‌توان در محل‌های بدون چاه استفاده کرد. خاطر نشان می‌شود که نحوه‌ی حل معادلات در گریدهای ژئومکانیکی مخزن نیز بر اساس روش‌های حل معادلات عددی است تا متغیرهای ژئومکانیکی برای تمام گریدهای فعال محاسبه گردد. نتیجه‌ی نهایی کوپل ژئومکانیکی، محاسبه‌ی تنش‌های کالیبره شده در گریدهای ژئومکانیکی با گذشت زمان و تخلیه‌ی مخزن است.

ساخت این مدل کوپل ژئومکانیکی و کالیبراسیون نهایی تنش‌ها و در ادامه تحلیل نتایج ناشی از کوپل، کمک شایانی به بهبود طراحی‌های مهندسی در مقیاس چاه و مخزن می‌کند.

### پانویس‌ها

- |                                 |                     |                      |
|---------------------------------|---------------------|----------------------|
| 1. gh.shahalipour@petroiran.com | 5. Up scaling       | 9. Fully couple      |
| 2. Net Present Value(NPV)       | 6. Pseudo- couple   | 10. Aquifer          |
| 3. Correction                   | 7. One way coupling | 11. Well performance |
| 4. Velocity model               | 8. Two way coupling | 12. Schlumberger     |

13. Halliburton	19. Orthotropic Material	25. DFN
14. Baker Hughes	20. TIV Material(Transversely Isotropic material)	26. Overburden
15. Geomechanics simulator	21. critical state cap	27. Sideburden
16. Fluid flow simulator	22. Gaussian Elimination Method	28. Underburden
17. Petrel reservoir geomechanics (Petrel RG)	23. Iterative method	29. Run
18. VISAGE finite element simulator	24. Fault mapping	30. Time steps

## منابع

- [1] Schlumberger Geomechanics services, "www.slb.com/services/characterization/geomechanics.aspx "
- [2] Zoback, M.D. (2007), "Reservoir Geomechanics." Cambridge University Press, Cambridge, UK
- [3] Fischer, K., & Henk, A. (2013). 3-D geomechanical modelling of a gas reservoir in the North German Basin: workflow for model building and calibration. *Solid Earth Discussions*, 5, 767-788. doi:10.5194/sed-5-767-2013.
- [4] Chalon, F. Mainguy, M., Longuemare, P., & Lemonnier, P. (2004). Upscaling of elastic properties for large scale geomechanical simulations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(11), 1105-1119. doi: 10.1002/nag379.
- [5] Settari, Antonin, Sen, Vikram, & Al-Ruwaili, Khalid. (2013). Upscaling of Geomechanics in Heterogeneous Compacting Reservoirs. Paper presented at the 2013 SPE Reservoir Simulation Symposium, The Woodlands, TX, USA
- [6] Bostrom, Bard. (2009). Development of a Geomechanical Reservoir Modelling Workflow and Simulations. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana.
- [7] Jalali. M.R. and Dusseault. M.B., (2008), Coupled fluid-flow and geomechanics in naturally fractured reservoirs, 5th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS5), 24-26 November 2008 Tehran, Iran.
- [8] Albinali, Ali, Kazemi, Hossein, & Alghamdi, Bander. (2011). Geomechanics and Fluid Flow Modeling Using Finite-Difference Method. Paper presented at the SPE Reservoir Characterization and Simulation Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE.
- [9] Gu, Edward Wei Hua, Sammon, Peter H., et al. ((2001), " Study examining coupled geomechanics and reservoir fluid flow modeling", paper presented at the Canadian unconventional resources conference, alberta, Canada.
- [10] Hoseini, Behrooz k., Chalaturnyk, rick, (2013), " stream line based coupled geomechanics and reservoir simulation for hydro-mechanical modeling of CO2 storage in saline aquifers", paper presented at the 2013 SPE heavy oil conferences, Calgary, Canada.
- [11] Kim, jihoon. Modiris, George. et al, (2012), " Numerical studies on two way coupled fluid flow and geomechanics in hydrate deposits", *SPE journal*, 17(2), pp. 485-501. Doi: 10.2118/141304-pa.
- [12] Koutsabeloulis, nick, Zhang, xing. (2009), " 3D reservoir Geomechanical modeling in oil and gas field production. Paper presented at the SPE Saudi Arabia section technical symposium, Alkhobar, Saudi Arabia.
- [13] Settari, A., & Walters, Dale A. (2001). Advances in Coupled Geomechanical and Reservoir Modeling With Applications to Reservoir Compaction. *SPE Journal*, 6(3), 334-342. doi: 10.2118/774142-pa.
- [14] Thomas, L.K., Chin, L.Y., Pierson, R.G., & Sylte, J.E. (2003). Coupled Geomechanics and Reservoir Simulation. *SPE Journal*, 8(4), 350-358. Doi: 10.2118/87339-pa.
- [15] Zakaria, Ahmed Salah El Deen, Elbanbi, Ahmed Hamdy, & Abdelwaly, Abdelwaly. (2011). A Fully Coupled Geomechanics and Fluid Flow Model for Well Performance Modeling in Stress-dependent Gas Reservoirs. Paper presented at the SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, Vienna, Austria.
- [16] Varavei, Abdoljalil, Johns, Russell, Sepehrnoori, Kamy, & Moinfar, Ali. (2013). Coupled Geomechanics and Flow Simulation for an Embedded Discrete Fracture Model. Paper presented at the 2013 SPE Reservoir Simulation Symposium, The Woodlands, TX, USA
- [17] Yale, D.P. (2002). Coupled Geomechanics-Fluid Flow Modeling. Effects of Plasticity and Permeability. Alteration. Paper presented at the SPEISRM Rock Mechanics Conference, Irving, Texas.
- [18] Baker Hughes Geomechanics services, " www.bakerhughes.com/products-and-services/reservoir-development-services/reservoir-software/rs-geomechanics "
- [19] Halliburton Geoemchanics, "http://www.halliburton.com/en-US/ps/consulting/petroleum-geomechanics.page?node-id=hkv12s6j "
- [20] Inoue, N. et.al. (2014), "Reservoir Geomechanics Workflow", 8th Asian Rock Mechanics Symposium
- [21] Schlumberger, (2013) "Petrel Reservoir Geomechanics, technical manual", petroleum Geomechanics.
- [22] Jones, R.M., (1975), *Mechanics of Composite Materials*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, p.1.