



مقاله پژوهشی

شبیه سازی تغییرات تنش برجا، فشار منفذی و تغییر شکل ناشی از تخلیه میدان با استفاده از کوپل ژئومکانیکی

حمید قالیباف محمدآبادی^{۱*}؛ ناصر حافظی مقدس^۲؛ الهام مهدی پور^۳؛ مجتبی حیدری زاد^۴؛ حسین طالبی^۵

۱- دکتری، دپارتمان مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد، گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد

۴- پسا دکتری، دانشکده زمین شناسی دریایی، دانشگاه تونگ جی، شانگهای چین

۵- دکتری؛ دپارتمان زمین شناسی گسترشی، شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۰۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2024.449725.1232

واژگان کلیدی	چکیده
مدل شبیه سازی ژئومکانیکی، الگوریتم های یادگیری ماشین، کوپل ژئومکانیکی، VISAGE, ECLIPSE	مدل های سنتی استاتیک ژئومکانیکی به طور گسترده ای برای تجزیه و تحلیل تنش ها در مخازن نفت و گاز مورد استفاده قرار می گیرند، اما در بررسی تنش های ناهمگن، مشکلاتی مانند چرخش میدان تنش و خطاهای مرتبط ایجاد می شود. این مشکلات به ویژه در توده های نفوذی نمک، گنبد های نمکی و فعالیت دوباره گسل ها ناشی از تزریق گاز مشاهده می شوند. تغییرات فشار منفذی عمدتاً به دلیل تخلیه میدان یا تزریق گاز به صورت غیر خطی در تشکیلات ناهمگن رخ می دهد و پیش بینی این تغییرات در مدل های استاتیک مستقل از زمان، غیرممکن است. بنابراین، نیاز به یک مدل شبیه سازی فیزیکی دینامیکی برای بررسی چهار بعدی تنش ها، کرنش ها و تغییر شکل مخزن وجود دارد. هدف این مقاله ساخت مدل شبیه سازی کوپل ژئومکانیکی برای شبیه سازی تغییرات تنش، فشار منفذی و کرنش ناشی از تخلیه هیدروکربن، نشست و تغییر شکل مخزن است. برای این منظور، از داده های استاتیک و دینامیکی حاصل از نگاره های نفتی واقع بر یکی از میدان های مناطق نفت خیز جنوب ایران استفاده شده است. در ابتدا، پیش پردازش داده ها و تعیین واحدهای ژئومکانیکی با استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین و ساخت مدل یک بعدی ژئومکانیکی شامل مقاومت سنگ، مقاومت فشاری محصور نشده، مقاومت کششی، زاویه اصطکاک، پارامترهای تغییر شکل، مدول یانگ، نسبت پواسون، مدول برشی و بالک و فشار منفذی، به درستی با زبان برنامه نویسی پایتون انجام شد. تنش های برجا نیز با استفاده از روابط پورالاستیک محاسبه شدند. سپس یک مدل شبیه سازی سه بعدی استاتیک، دینامیک و ژئومکانیک طراحی و پیاده سازی شد. در این مدل، از شبیه ساز تفاضل محدود مخزن (FDM) با استفاده از داده های دینامیکی برای ارزیابی فرآیند شیمیایی، هیدرولوژیکی و حرارتی (THC) با نرم افزار «ECLIPSE» استفاده شد. همچنین، از شبیه ساز المان محدود مخزن (FEM) جهت محاسبات فرآیند حرارتی، هیدرولوژیکی و مکانیکی (THM) با نرم افزار «VISAGE» به کار گرفته شد و محاسبات به صورت کوپل یک طرفه در محیط نرم افزار «PETREL» پیاده سازی شد. در نتیجه، تغییرات تنش، کرنش، فشار منفذی و تغییر شکل مخزن در یک فاصله زمانی ده ساله از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۱ برای مخزن بنگستان به دست آمده است. بر اساس نتایج، در سال ۲۰۳۱ در بخش بالایی مخزن ایلام به دلیل تنش سرباره، حدود ۳۰ سانتی متر نشست رخ خواهد داد؛ اما این مقدار در مخزن سروک به حدود ۱۰ تا ۱۵ سانتی متر برآورد می شود.

در صنایع مهندسی نفت، از ژئومکانیک برای پیش بینی

۱. پیش گفتار

پارامترهای مهمی مانند تنش‌های برجای سنگ، مدول الاستیک و مقدار نشست مخزن استفاده می‌شود. از طرفی، پارامترهای مخزنی از قبیل تخلخل سازند، تراوایی و فشار ته چاه را می‌توان با استفاده از محاسبات ژئومکانیک به دست آورد. تعیین مکان مناسب برای چاه، انتخاب بهترین مسیر حفاری، پیش‌بینی مشکلات برای چاه، پیش‌بینی مشکلات و راه‌حل‌های حین حفاری، برنامه‌ریزی برای تکمیل چاه مناسب در انتهای حفاری و در نهایت، ارائه بهترین روش انگیزش چاه، مهم‌ترین و پرخرج‌ترین عملیات در مهندسی نفت به شمار می‌رود. این عملیات با بهره‌گیری از یک مدل ژئومکانیکی در کنار سایر مدل‌های مخزنی با اطمینان بیشتری انجام می‌شود. مدل‌های ژئومکانیک استاتیک سنتی به‌طور گسترده‌ای برای تجزیه و تحلیل تنش‌ها در مخازن نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. با این حال، زمانی که این مدل‌ها برای بررسی تنش‌های ناهمگن به کار گرفته می‌شوند، مشکلاتی از جمله خطا در هنگام چرخش میدان تنش و چندین خطای دیگر را در پی خواهند داشت. این مشکلات بیشتر در توده‌های نفوذی نمک، گنبد‌های نمکی و فعالیت دوباره گسل‌ها در اثر تزریق گاز دیده می‌شوند. بیشترین تغییرات فشار منفذی به علت تخلیه میدان یا تزریق گاز رخ می‌دهند. تغییرات فشار منفذی عمدتاً به‌صورت غیرخطی در تشکیلات ناهمجنس مشاهده می‌شود. بنابراین، در مدل‌های ژئومکانیک استاتیکی مستقل از زمان پیش‌بینی تغییرات تنش غیرممکن می‌باشد. این مشکلات بیشتر در مخازن عمیق، خیلی عمیق، مخازن نفت سنگین، مخازن تزریق گاز و برداشت از مخزن بروز می‌کنند. بنابراین، ضرورت استفاده از یک مدل فیزیکی دینامیکی جهت بررسی چهار بعدی تنش‌ها لازم است [2]. مدل‌های کوپل ژئومکانیکی فیزیکی در چندین سال اخیر به وسیله تیوفل و رهیت، چن و تیوفل توسعه یافته است [3]. کوپل مدل جریان سیال و تغییر شکل مکانیکی، با بررسی اثر تغییرات تخلخل بر روی تنش و ضرایب پورالاستیک در طی برداشت و تزریق چاه بوسیله گوتیرز، گوتیرز و لوئیس ارائه شده است [4-5]. ستاری و والتر با استفاده از یک شبیه ساز المان محدود مکانیکی و یک شبیه ساز مخزن مدل جریان سیال چند فاز را در یک کوپل کامل ارائه داده اند. در این کوپل پیش بینی تغییرات تنش بر اساس تغییرات جریال

سیال و تخلخل ارائه شده است [6]. در چندسال اخیر شبیه سازهای تجاری اتصال بین مدل جریان مخزن و مدل ژئومکانیکی بطور گسترده‌ای بوسیله راه حل‌های عددی به صورت کوپل جزئی، یک طرفه، دو طرفه و کامل بوسیله ارتباط شبیه ساز تفاضل محدود مخزن و المان محدود ژئومکانیک (FDM/FEM) بکار گرفته شده است. از میان روش‌های کامل، نرم افزارهایی مثل OpenGeoSys [7]، FEMH [8] و COMSOL برای تحلیل ارتباط بین تنش و فشار منفذی از طریق بررسی تغییرات توده سنگ بصورت الاستیک ارائه شده است [9]. در مطالعات دیگری، کوپل بین نرم افزارهای شبیه ساز مخزن TOUGH2/TOUGH با نرم افزار FLAC3D [10-11]، کوپل Eclipse با Abaqus [12]، کوپل Retraso با Codebright [12] و کوپل ATHOS با VISAGE [13] ارائه شده است که همگی کوپل‌های جزئی را تشکیل می‌دهند. نتایج حاصله از این پروتکل‌های شبیه ساز، اکثراً از اتصال بین یک شبیه ساز تفاضل محدود مخزن (FDM) با یک شبیه ساز ژئومکانیک (FEM) محاسبه می‌گردد. علاوه بر این، کوپل‌های دیگری از جمله کوپل یک طرفه و دو طرفه با استفاده از شبیه ساز Jewelsuite با Abaqus [14]، ECLIPSE با VISAGE ارائه شده است [15]. در تحقیق دیگری، کوپل‌ها با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز مخزن CMG و نرم‌افزار شبیه‌ساز ژئومکانیک Abaqus استفاده شده است. این اتصال با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار برنامه‌نویسی پایتون برقرار شده و مراحل تکمیل مدل ژئومکانیکی در نرم‌افزار Abaqus نیز از طریق کدنویسی ساب‌روتین به زبان فورترن انجام شده است. در نتیجه، این ارتباط به بررسی تنش، کرنش و پارامترهای دیگر مانند تغییرات تخلخل، نفوذپذیری، ضرایب الاستیک و پورالاستیک و تغییرات تنش پرداخته است [16]. به طور کلی، مدل‌سازی ژئومکانیکی را می‌توان به سه دسته مدل سازی یک بعدی، سه بعدی و چهار بعدی تقسیم بندی کرد [17-18]. مطالعه برای ساخت مدل‌های یک بعدی ژئومکانیکی بیش از سه دهه ی پیش آغاز شده است و امروزه به عنوان یک مدل مرسوم از میدان، ارائه می‌شوند. اما مدل سازی سه بعدی و چهار بعدی ژئومکانیکی در دو دهه ی اخیر مورد استفاده قرار گرفته اند.

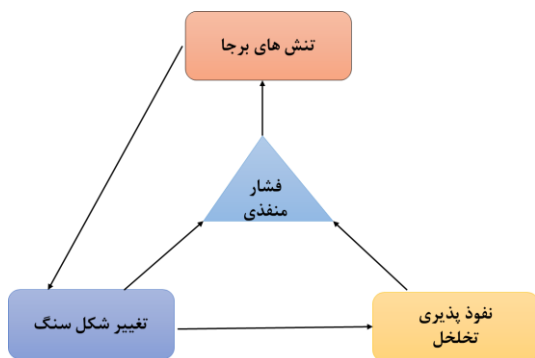
شد. در برخی موارد تا ۹۰٪ صرف تلاش برای درک، ویرایش و تفسیر آن‌ها به حالتی که برای تفسیر مناسب باشد، ۱۰ درصد باقیمانده زمانی است که تجزیه و تحلیل لاگ‌های پتروفیزیکی انجام گرفت. بر این اساس تمام داده‌های گمشده با استفاده از روشهای یادگیری ماشین بازیابی گردید. سپس مدل یک بعدی ژئومکانیکی بر اساس داده‌های ثبت شده‌ی نگاره‌های درون چاهی، شامل نمودار گیری صوتی (موج برشی و تراکمی)، چگالی، قطر سنجی، تخلخل و پرتوزایی گاما، ساخته شد و مقطعی از عمق در برابر ویژگی‌های مکانیکی و حالت‌های تنش سنگ‌های دیواره و اطراف چاه ارائه شد. با استفاده از این مدل، مبنایی برای تحلیل‌های ژئومکانیکی و بررسی تاثیرات مکانیک سنگ در دیواره و اطراف چاه و حوادثی مانند ریزش دیواره، تولید ماسه و غیره ایجاد می‌شود. مدل یک بعدی ژئومکانیکی شامل مقاومت سنگ (مقاومت فشاری محصور نشده و مقاومت کششی، زاویه اصطکاک)، پارامترهای تغییر شکل (مدول یانگ، نسبت پواسون، مدول برشی و بالک) تنش‌های برجا قائم، افقی، فشار منفذی و در نهایت ویژگیهای لازم برای پیش بینی پایداری چاه است. بعد از بررسی داده‌های موجود، منطقه از نظر پهنه بندی ژئومکانیکی مورد مطالعه قرار گرفت زیرا روابط میان مدول‌های الاستیک و دینامیک برای هر گونه‌ی سنگی متفاوت است و افتراق گونه‌های سنگی متفاوت مانند دولومیت، کلسیت، شیل، انیدریت و نمک به عنوان یک پیش نیاز مهم در محاسبه ی ویژگی‌های مکانیک سنگ در نظر گرفته می‌شود [19]. سپس، با استفاده از نمودارهای درون چاهی، پارامترهای الاستیک دینامیکی محاسبه می‌شود. در مرحله بعد، پارامترهای الاستیک استاتیکی با انجام آزمایشهای مخصوص بر روی نمونه‌های هر یک از پهنه‌های مشخص شده، به دست می‌آید. در انتهای این مرحله، با توجه به رابطه‌ی میان پارامترهای الاستیک و دینامیک برای هر پهنه، نمودار پیوسته پارامترهای الاستیک و دینامیکی به نمودار پیوسته الاستیک استاتیکی تبدیل می‌شود. فشار منفذی با استفاده از نمودارهای الکتریکی و استفاده از سرعت امواج لرزه ای، تخلخل بدست می‌آید. تنش افقی حداقل، بصورت مستقیم با استفاده از XLOT، FIT و Minifrac Tests قابل اندازه‌گیری است. بعد از محاسبه تنش افقی حداقل، با استفاده از میزان باز شدگی

بنابراین، با توجه به مطالب گفته شده، در این تحقیق از داده‌های استاتیکی و دینامیکی حاصل از نگاره‌های نفتی واقع بر یکی از میدان‌های مناطق نفت خیز جنوب برای ساخت یک مدل کوپل ژئومکانیکی استفاده شده است. ابتدا، برای همه چاه‌های این میدان یک مدل یک بعدی ساخته شد و سپس با استفاده از نتایج این مدل‌های تک بعدی برای همه پارامترهای ژئومکانیکی، یک مدل سه بعدی استاتیک و دینامیک ساخته شد. سپس بر اساس اطلاعات بدست آمده، یک مدل جریان و یک مدل ژئومکانیکی در ابعاد (8×50km×6km) ساخته شد. این ابعاد بدون در نظر گرفتن لایه‌های کناری می‌باشد بعد از این مرحله، ارتباط بین تخلخل، نفوذپذیری و تنش‌ها و غیره با استفاده از روابط موجود برای ساخت این مدل به‌کار گرفته شد. در این مدل، از شبیه‌ساز تفاضل محدود مخزن (FDM) به منظور ارزیابی فرآیند شیمیایی، هیدرولوژیکی و حرارتی (THC) با نرم‌افزار ECLIPSE استفاده شد. همچنین، از شبیه‌ساز المان محدود مخزن (FEM) جهت محاسبات فرآیند حرارتی، هیدرولوژیکی و مکانیکی (THM) با نرم‌افزار VISAGE و به وسیله کوپل یک‌طرفه در محیط نرم‌افزار PETREL 2018 استفاده گردید قابل ذکر است بخاطر دسترس نبودن داده‌های تزریق و برداشت هیدروکربن از کوپل دو طرفه استفاده نشده است. با توجه به اینکه در طول زمان با کاهش فشار سازند با شیب زیاد در نزدیکی چاه‌ها و شکستگی‌ها (اعم از هیدرولیکی یا طبیعی) رخ خواهد داد، اثر این کاهش فشار محلی، تنش‌ها را بصورت محلی تغییر خواهد داد در نتیجه، نتایج این شبه‌سازی می‌تواند برای پیش‌بینی موارد زیر مورد استفاده قرار گیرد: شکست هیدرولیکی مجدد، حفاری و طراحی مجدد چاه‌های دیگر برای شکست هیدرولیکی، تعیین سناریوی وزن گل در اثر کاهش فشار کسینگ، تغییر استرس‌های ناشی از برداشت، پیش‌بینی افزایش فشار مؤثر، کاهش تخلخل، پیش‌بینی استرین حجمی، پیش‌بینی تغییر استرس، تجزیه و تحلیل پایداری چاه‌های تزریق، و همچنین پیش‌بینی واژگونی و شکست برشی کسینگ در این مدل فیزیکی به‌دست می‌آید.

۲. تئوری تحقیق

در این مقاله ابتدا پیش پردازش داده‌ها صورت پذیرفت که بخش قابل توجهی از زمان صرف کار با داده‌های گزارش چاه

تغییرات فشار منفذی، تخلخل و نفوذ پذیری بر روی تنش های موثر و ارتباط آن‌ها نشان داده شده است [21-22]. مراحل ساخت مدل و دستاوردهای حاصل از مدل سه بعدی و چهار بعدی در شکل ۲ ارائه گردیده است. در این جدول ستون سمت چپ داده های مورد نیاز برای ساختن مدل، در ستون میانی مراحل مدل سازی و شبیه سازی و در ستون سمت راست دستاوردهای بدست آمده از ساخت مدل های ژئومکانیکی نشان داده شده است.



شکل ۱. ارتباط بین پارامترهای دینامیکی و تاثیر بر تنش های برجها در کوپل ژئومکانیکی [22]

۳. فرآیند ساخت کوپل مدل ژئومکانیکی و شبیه ساز

جریانی سیال

ژئومکانیک در ارتباط با صنعت نفت و گاز در سه سطح؛ مدل یک بعدی ژئومکانیکی یا مکانیک زمین، مدل سه بعدی ژئومکانیکی و کوپل مدل ژئومکانیکی با مدل دینامیکی مخزن مطرح می شود. در مدل یک بعدی، مقیاس چاه بررسی می شود، در مدل سه بعدی، مقیاس میدانی اولیه بررسی می گردد و در کوپل با مدل دینامیکی مخزن، توزیع جهت، اندازه ی تنش ها و کرنش سازندها در طول زمان و با تخلیه ی چاه ارائه می شود.

از مدل یک بعدی مکانیک زمین (DMEM) جهت کالیبراسیون عمق و فشار منفذی برای نتایج مدل سه بعدی ژئومکانیکی استفاده می گردد. نتایج مدل یک بعدی ژئومکانیکی در تعیین خطای حل معادلات عددی در مدل کوپل ژئومکانیکی نیز استفاده خواهد شد. این نتایج با توجه به بازه ی مورد نظر در حل

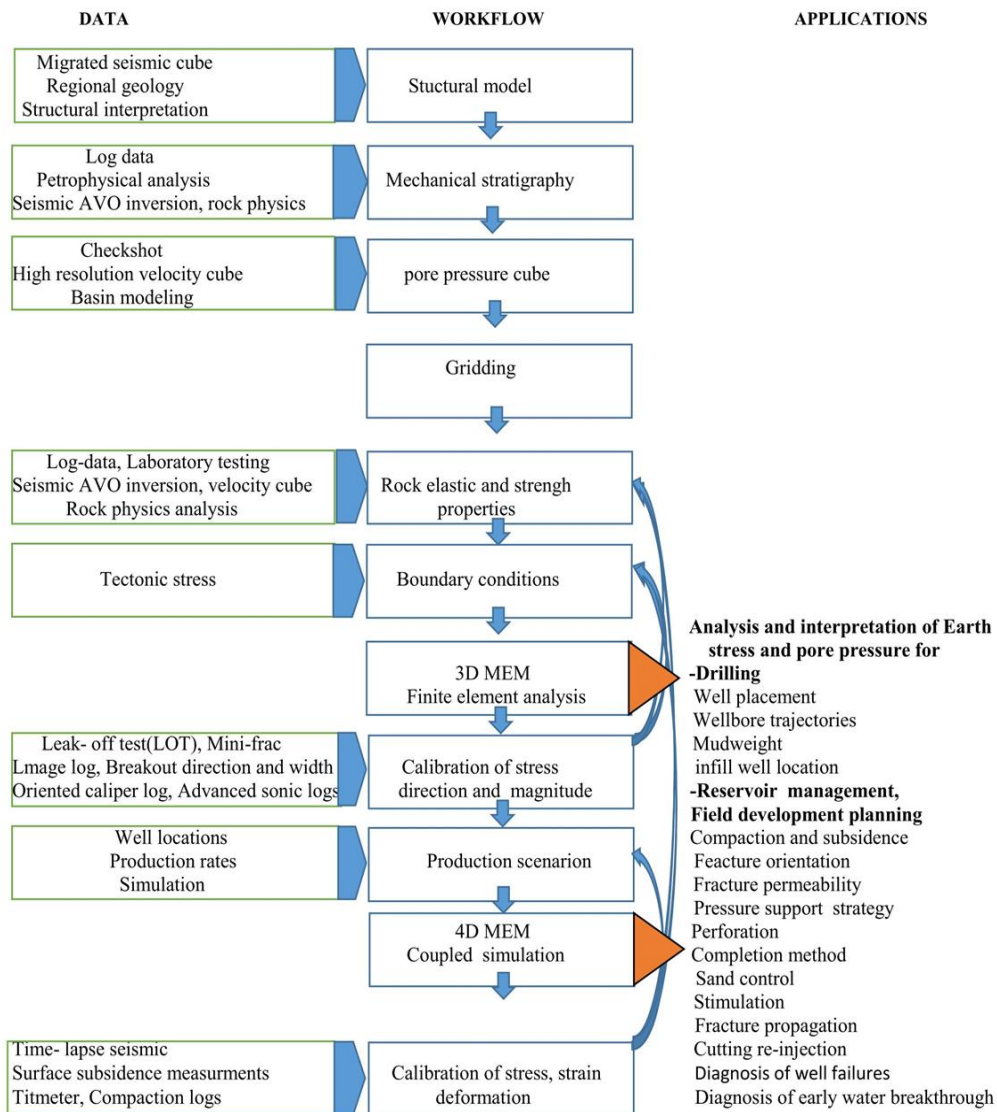
ریزش چاه در چاه های قائم، می توان تنش افقی حداکثر را محاسبه کرد. بعد از ساخت این مدل، مدل ژئومکانیکی سه بعدی را میتوان به سه روش زیر بدست آورد [20].

- استفاده از روش های عددی که بیشتر برای مدل سازی پارامترهایی مانند تنش مورد استفاده قرار می گیرد؛
- استفاده از روش مدل سازی خصوصیات مخزنی: بر اساس این روش، پارامترهای ژئومکانیکی با یکی از روش های مرسوم در مهندسی نفت زمین آمار و یا بر اساس داده های لرزه ای در سه بعد محاسبه می شود؛ این روش برای پارامترهای استاتیک و تغییر ناپذیر به کار می رود؛
- مدل لرزه ای ژئومکانیکی: در این مدل سازی، با استفاده از داده ای لرزه ای برداشت شده از میدان، ویژگی های ژئومکانیکی به طور مستقیم محاسبه و بعنوان مدل سه بعدی لرزه ای ژئومکانیکی ارائه می شود؛

برای محاسبه و ساخت مدل سه بعدی ژئومکانیکی در این تحقیق از این سه روش استفاده می شود. در مرحله آخر، شبیه سازی کوپل مدل سه بعدی ژئومکانیکی و دینامیکی مخزن در راستای مدیریت بهینه ی مخزن بدست می آید. پس از یکپارچه سازی بستر، مدل های استاتیک و دینامیکی در محیط نرم افزاری پترل، فشارهای منفذی بدست آمده از مدل دینامیکی، کالیبره می گردند و به عنوان اولین متغیرها در مدل کوپل ژئومکانیکی استفاده خواهند شد. فرآیند مدل سازی ژئومکانیک جهت اجرای کوپل با مدل دینامیکی، به ترتیب شامل ساخت گریدهای ژئومکانیک، وارد کردن مدل ساخت توابع و جنس مواد برای حل معادلات ژئومکانیکی سنگ، توزیع خواص ژئومکانیکی و متغیرهای مخزنی، مدل سازی ناپیوستگی ها مثل گسل ها و شکاف ها، تعریف شرایط اولیه ی ژئومکانیکی مخزن، تعریف شرایط مرزی و در نهایت تعریف سناریوهای شبیه سازی برای کوپل ژئومکانیک مخزن است. سپس با توجه به نحوه ی کوپل مورد نظر اعم از یک جانبه، تکرارشونده (دوجانبه) و ... شبیه ساز ژئومکانیکی به حل عددی معادلات پرداخته و فرآیند کوپل را با ارائه ی نتایج هر مرحله کامل می کند. در شکل ۱

نتایج و خروجی های عددی تنش برجا و منطقه ای و همچنین کرنش حجمی در مدل کوپل ژئومکانیکی، با نتایج تنش های حاصل از ساخت مکعب های فشار منفذی از اطلاعات لرزه ای کالیبره می شوند.

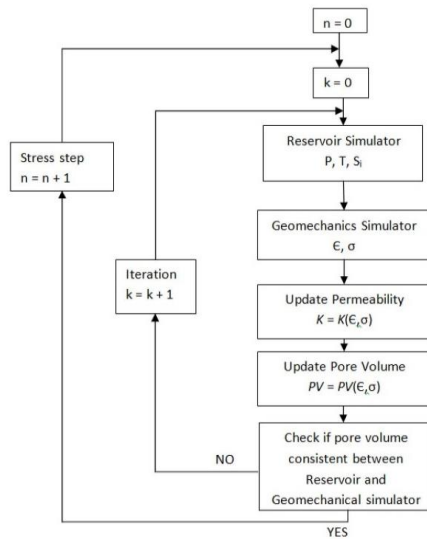
معادلات عددی در گریدهای ژئومکانیکی، به نوعی می-تواند توسط نتایج حاصل از مدل یک بعدی ژئومکانیکی بررسی گردد تا نتایج محاسبه شده در کوپل ژئومکانیکی، قابل اعتماد و استناد باشد. علاوه بر این صحت سنجی، کالیبراسیون مدل کوپل ژئومکانیکی ساخته شده، بر اساس داده های لرزه ای قابل اتکا انجام می گردد. بدین صورت که



شکل ۲. مراحل ساخت مدل سه بعدی و چهار بعدی.

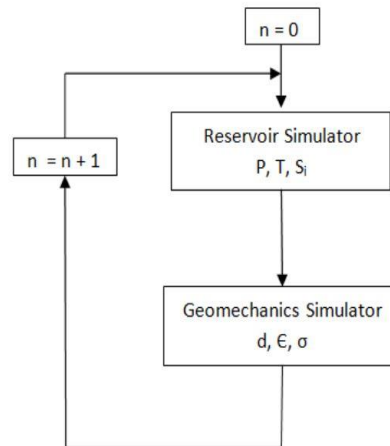
برای کوپل با مدل دینامیکی مخزن استفاده می شود. در این مرحله باید نحوه ی کوپل مدل سه بعدی

پس از ساخت مدل سه بعدی ژئومکانیکی و کالیبراسیون فشارها، این مدل به عنوان ورودی اولیه



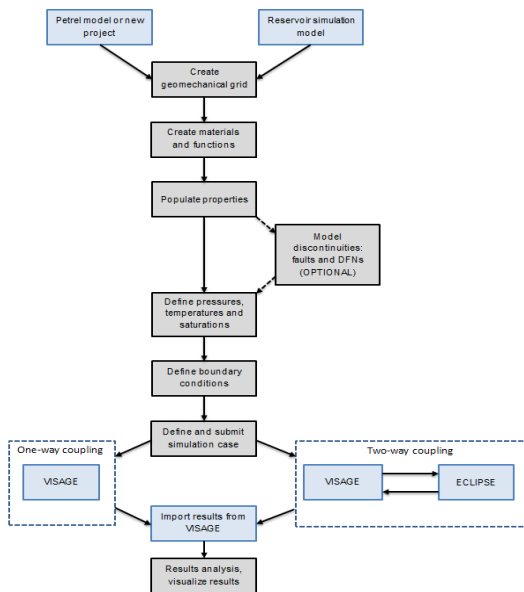
شکل ۴. نحوه ترسیم الگوریتم کوپل دوطرفه در دو حالت مختلف [23]

ژئومکانیک با مدل دینامیکی اعم از روش یکجانبه، دوجانبه و ... مشخص گردد. بنابراین در کوپل ژئومکانیک با نرم افزار ویساج، اکنون تنها می توان یکی از روشهای کوپل یکجانبه (صریح) یا کوپل دوجانبه (تکرار شونده) را بر حسب نیاز و دقت محاسبات مطابق شکل ۳ و ۴ انتخاب کرد.

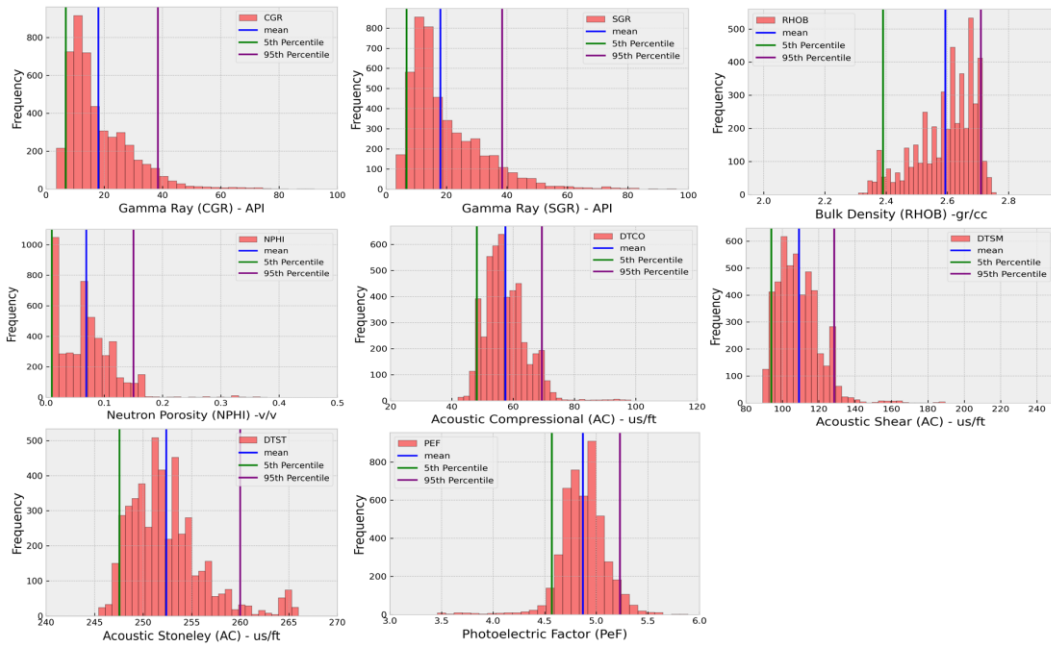


شکل ۳. نحوه تشکیل کوپل یک طرفه [23]

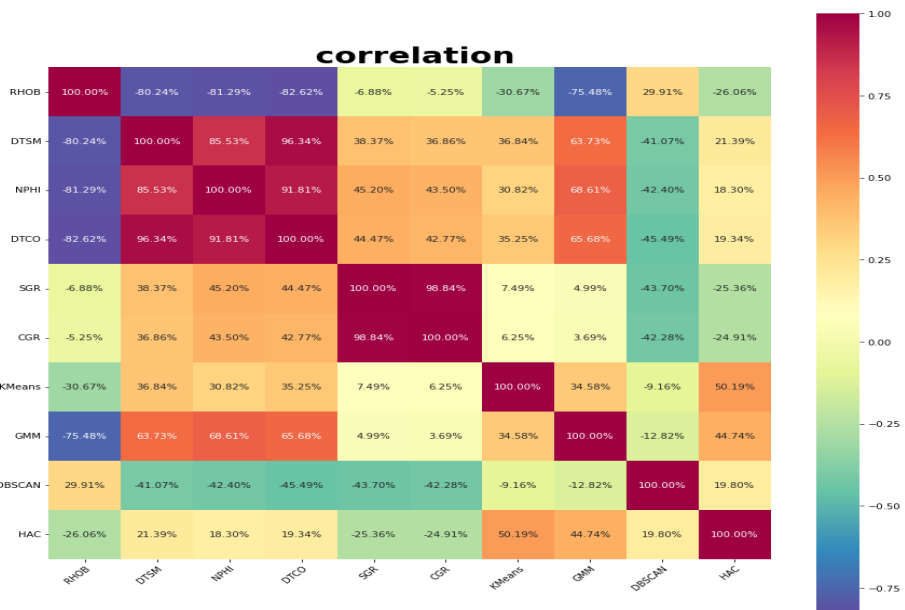
شمارتیک اجرای روش کوپل ژئومکانیک و مدل دینامیکی مخزن بصورت یک طرفه و دوطرفه نشان داده شده است (شکل ۵). مبنای مدل دینامیکی ساخته شده در این شکل، نرم افزار اکلپس بوده که این فرآیند در بستر ژئومکانیکی نرم افزار پترل انجام می شود. اساس شبیه ساز حل معادلات عددی ژئومکانیکی، حل به روش المان محدود توسط نرم افزار ویساج است. در شکل ۶ الگوریتم ارائه شده برای ساخت کوپل ژئومکانیکی در این تحقیق نشان داده شده است.



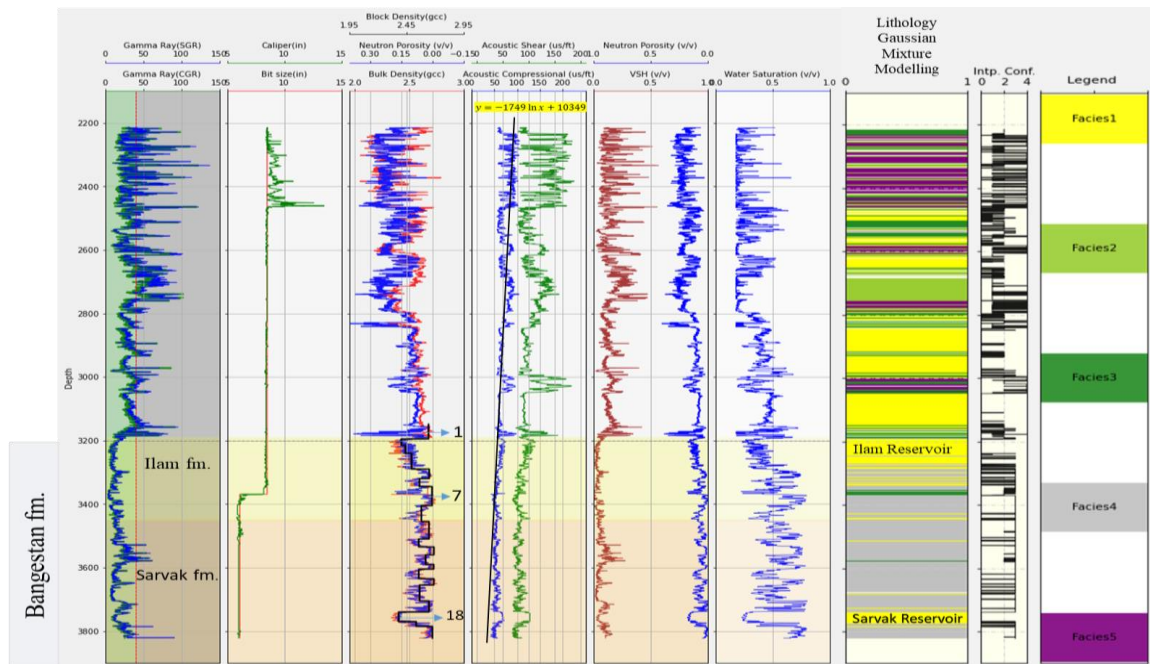
شکل ۵. روش اجرا کوپل ژئومکانیکی بصورت یک طرفه و دو طرفه در محیط نرم افزار پترل و همزمان استفاده از ماژولهای اکلپس و ویساج [23]



شکل ۷. هیستوگرام مربوط به داده‌های حاصل از چاه منتخب از عمق ۳۱۰۰ تا ۳۹۰۰ نشان داده می‌شود که مربوط به سازند ایلام و سروک یا سازند آهکی بنگستان می باشد.



شکل ۸. ارتباط بین پارامترهای ژئومکانیکی و تعیین واحدهای ژئومکانیکی با استفاده چهار الگوریتم یادگیری ماشین به وسیله نقشه حرارتی ضرایب همبستگی پیرسون نشان داده می شود.



شکل ۹. داده‌های ورودی جهت ساخت مدل ژئومکانیک (MEM) همان‌طور که مشخص است در محدوده مخزن ایلام و سروک خط Normal Compact Trend (NCT) انحراف دارد و زمان موج طولی و برشی افزایش یافته است. این محدوده نشانه مخزن فشار بیش از حد (Over pore pressure) می‌باشد.

صوت/التراسونیک) کرنش و دامنه‌های تنش مشخص ساخته شده است [26-27]. در حالی که مدول‌های استاتیک نشان‌دهنده رفتار در باند فرکانس بسیار پایین (0.01 1/s) یا دامنه‌های پایین‌تر و بزرگ‌تر هستند [27]، بر اساس Plona (Cook, 1955) & TerraTek Inc, 1998)، در این مقاله برای تطبیق بهتر مدول استاتیکی با نتایج آزمایشگاهی اصلی، مدول یانگ دینامیکی (Ed) با استفاده از معادله ۵ به مدول استاتیک (Es) تبدیل شد. [28].

$$E_s(Gpa) = 0.414E_d - 1.059 \quad Wang(2000) \quad (5)$$

این مدول با تست‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه به دست آمده از سازند کالیبره شده است. در مرحله بعد، نسبت پواسون با استفاده از کندی موج برشی و فشاری مطابق معادله ۶ به دست آمد [25]:

$$v_d = \frac{(\Delta t_s / \Delta t_p)^2 - 2}{2[(\Delta t_s / \Delta t_p)^2 - 1]}, \quad (6)$$

۱.۴ تعیین مدول الاستیسته سنگ و مقاومت فشاری سنگ

مدول دینامیک یانگ (Ed)، مدول برشی (G_{dyn})، مدول لامه (λ_{dyn})، و مدول بالک (k_{dyn}) با استفاده از روابط ۱ تا ۴ تخمین زده شده است [25] که در آن چگالی ظاهری ρ_b (gr/cm³) کندی موج فشاری (Δt_p) و کندی موج برشی است ($\mu s/ft$).

$$E_d(psi) = 1.34 \times 10^{10} \times \frac{\rho_b}{\Delta t_s^2} \frac{(3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2)}{(\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2)}, \quad (1)$$

$$G_{dyn} = \rho V_s^2, \quad (2)$$

$$\lambda_{dyn} = \rho V_s^2 - 2\rho V_p^2, \quad (3)$$

$$k_{dyn} = \rho V_p^2 - \frac{4}{3}\rho V_s^2, \quad (4)$$

مقادیر مدول‌های استاتیک با پویا متفاوت است. زیرا اندازه‌گیری‌های دینامیکی در یک باند فرکانسی (لرزه‌ای)

برای محاسبه حجم شیل از معادله ۱۲ استفاده شده است [33].

$$V_{shale} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}}, \quad (12)$$

بر اساس برآورد برای سازند بنگستان، آسماری و گچساران، در این کار، زاویه ϕ از ۲۱ تا ۴۳ درجه متغیر است و متوسط آن برای سازند گچساران ۲۳ درجه است. حد متوسط برای سازندهای مخزنی ایلام و سروک (بنگستان) ۴۰ درجه می‌باشد. این مقدار برای تعیین محدوده مدول سنگ و مقاومت استفاده شده است.

۲.۴ اندازه‌گیری فشار منفذی

اندازه‌گیری فشار منفذی معمولاً با استفاده تست تکرار سازند، آزمایش دینامیک ماژولار^۲، آنالیزهای تست چاه، و استفاده از سنسورهای اندازه‌گیری فشار در حین حفاری انجام می‌پذیرد اما از آنجایی که فشار منفذی سازند مخزنی پرفشار و غیر مخزنی مسئله‌دار (گچساران) بیش‌ازحد غیرعادی است و نفوذپذیری آن به علت میان لایه‌های آهک نازک لایه دارای شکستگی بسیار زیاد است، در فواصل زمانی کم (با درصد انیدریت بالا، گچ یا نمک) اندازه‌گیری مستقیم عملاً انجام نشد. برای تعیین فشار منفذی اندازه‌گیری‌های مستقیم در طی پدیده فوران گل در زون‌های تبخیری انجام گرفته است [34-35]. در این تحقیق اندازه‌گیری فشار منفذی در واحدهای مخزنی سروک با استفاده از تست تکرار سازند (RFT) به‌دست آمده است. در نتیجه با این تست نگاشت فشار منفذی در زون‌های مخزنی کالیبره شده است. به‌طور کلی، برخی از روابط همبستگی فشار منفذی شامل توان حفاری، داده‌های لرزه‌ای [۳۶]، ثبت صوتی با استفاده از روش Eaton یا Bowers (Bower 1994; Zhang 2011) یا ثبت مقاومت [۳۷-۳۸] جهت تعیین فشار منفذی تا به حال ارائه شده است. ایتون (Eaton, 1975) رابطه تجربی را برای پیش‌بینی گرادیان فشار منفذی از طریق زمان عبور موج فشاری ارائه داد. بعد از کالیبره کردن روش ایتون، با داده‌های تست تکرار سازند در چاه‌های مختلف ضریب n بین ۰/۵ تا ۱/۵ ($0.5 \leq n \leq 1.5$) تعیین شده است. این مقدار حد واسط برای عمق‌های مختلف

با فرض یک محیط الاستیک، ضرایب تغییر شکل برشی غیرالاستیک در نظر گرفته نمی‌شوند. بنابراین، نسبت پواسون پویا و استاتیک برابر هستند ($V_s = V_d$) همبستگی‌های مختلف مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) شامل: بردفورد برای انواع سنگ‌ها [۳۰]، زوبک برای نمونه‌های سنگ‌های مخازن آهکی و دولومیتی، و چانگ برای مخازن آهک و دولومیت خاورمیانه دارای شکستگی‌های بریکوت است [۳۱]. هر چهار رابطه ۷ تا ۱۰ با مقایسه مقاومت فشاری تک‌محوری آزمایشگاهی و میدانی ارتباط خوبی دارند

$$UCS(MPa) = 2.28 + 4.1089E_s, \quad (Bradford et al., 1988), \quad (7)$$

$$UCS(MPa) = 13.8E_s^{0.51} \quad (Zobak, 2007), \quad (8)$$

$$UCS(MPa) = 135.9e^{-4.8E_s} \quad (Zobak, 2007), \quad (9)$$

$$UCS(MPa) = 143.8e^{-6.980} \quad (Chang et al., 2006), \quad (10)$$

در این مطالعه مقاومت کششی سنگ یک‌دهم مقاومت فشاری در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد زاویه اصطکاک داخلی برای تعیین فشار شکست برشی/ وزن گل معادل مورد نیاز است که از رابطه همبستگی ۱۱ (Plumb, 1994) استفاده شده است [32].

$$\phi = 26.5 - 37.4(1 - NPHI - V_{shale}) + 62.1(1 - NPHI - V_{shale})^2, \quad (11)$$

در این رابطه ϕ زاویه اصطکاک داخلی، NPHI مقدار تخلخل خوانده شده از نمودار نوترون و V_{shale} حجم شیل به‌دست آمده از نمودار پرتو گاما می‌باشند. از آنجایی که زاویه اصطکاک داخلی سنگ میزان ارتباط و همبستگی بین دانه‌ها در سنگ را نشان می‌دهد، با زیاد شدن شیل در نمودار، مقدار زاویه اصطکاک داخلی سنگ کمتر شده و با کم شدن مقدار شیل، زاویه اصطکاک داخلی سنگ نیز افزایش می‌یابد. در صورتی که NPHI در دسترس نباشد، می‌تواند آن را با استفاده از همبستگی با UCS و با در نظر گرفتن لیتولوژی به دست آورد [31]. با توجه به اینکه تخلخل نوترونی موجود است

الاستیکی دینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دوم آنکه چگالی به‌دست‌آمده تخمین مناسبی از تنش قائم برای نواحی که از نظر تکتونیکی کمتر فعال بودند در اختیار می‌گذارد. در این نواحی تنش قائم به‌عنوان یک تنش اصلی مطرح می‌شود و برابر با تنش روباره خواهد بود. اما از آنجاکه نگار چگالی هر چاه تنها برای چند صد متر در دسترس است، برای تعیین تنش قائم لازم است تا چگالی برای اعماق مدنظر برون‌یابی شود. با در نظر گرفتن این شرایط، مقدار تنش روباره یا تنش عمودی (σ_v) توسط انتگرال‌گیری چگالی سنگ‌ها از سطح تا عمق موردنظر از رابطه ۱۴ زیر به دست می‌آید.

$$\sigma_v = \int_0^Z \rho(z)gz \cong \bar{\rho}gz, \quad (14)$$

در رابطه بالا $\rho(z)$ چگالی سنگ در عمق Z و $\bar{\rho}$ چگالی متوسط لایه‌های سنگی می‌باشد. بنابراین، انداز تنش قائم (σ_v) در واقع برابر است با انتگرال چگالی سنگ از سطح تا عمق مورد نظر می‌باشد. از آنجاکه نگار چگالی از سطح تا عمق مدنظر در دسترس نمی‌باشد با استفاده از برون‌یابی نگار دانسیته یا از طریق نگاره‌های دیگر می‌توان مقدار چگالی را تعیین کرد. چگالی ظاهری برای بخش‌های این مخزن توسط لاگ‌های مربوط به چاه ارزیابی شده است. باین‌حال، برای بخش‌هایی که چگالی ندارند. برای تخمین فشار روباره می‌توان از سرعت لرزه‌ای v_p استفاده کرد [39]. برای گردایان فشار روباره در خاورمیانة 1.13-1.15psi/ft به‌دست‌آمده است.

حداقل تنش افقی از طریق داده‌های آزمایش نشستی گل (Leak off test)، شکست هیدرولیکی^۴، آزمایش ایجاد ریزشکاف^۵ و داده‌های هرز روی گل^۶ برای نقاط خاصی از چاه و به‌صورت گسسته به دست می‌آید. در صورتی که داده‌های حاصل از این آزمایشات محدود باشند، جهت تعیین پیوسته این تنش از روابط تجربی استفاده می‌گردد. بریکلز و وان ایکن برای تخمین تنش افقی حداقل رابطه تجربی بر مبنای اطلاعات شکست هیدرولیکی را بر اساس اطلاعات چندین منطقه مختلف، به صورت روابط ۱۵ تا ۱۶ ارائه داده‌اند [40].

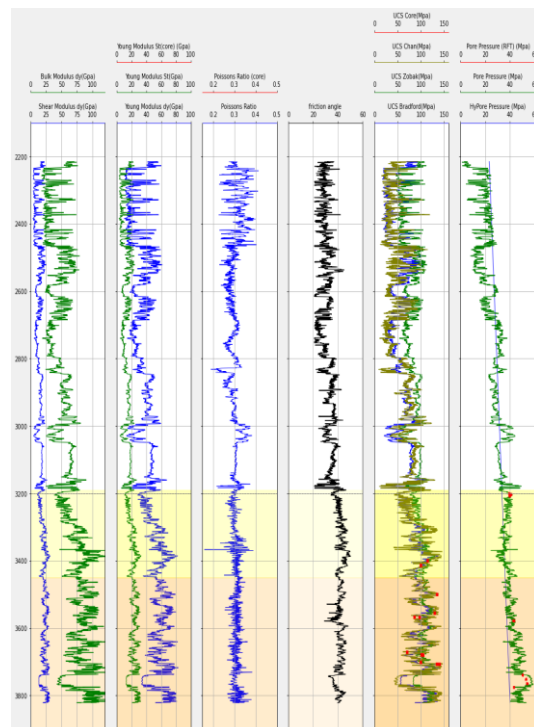
$$\sigma_h = 0.0053D^{1.145} + 0.46(P_f - P_{fn}), \quad D < 3500 \text{ m} \quad (15)$$

$$\sigma_h = 0.0264D - 31.7 + 0.46(P_f - P_{fn}), \quad D > 3500 \text{ m}, \quad (16)$$

مخزن و با مقایسه با تست‌های تعیین فشار منفذی، عدد مناسب انتخاب شده است که در رابطه ۱۳ ارائه شده است.

$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{ng}) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t} \right)^{0.5 \leq n \leq 1.5}, \quad (13)$$

در رابطه بالا Δt_n زمان عبور موج یا کند شدگی در فشار نرمال، Δt زمان عبور موج به‌دست‌آمده از نگار صوتی چاه می‌باشد. در شکل ۱۰ پارامترهای ژئومکانیکی با استفاده از روابط کالیبره با داده‌ها تعیین شده است.



شکل ۱۰. تعیین پارامترهای ژئومکانیکی با استفاده از روابط کالیبره شده با داده‌های تست‌های آزمایشگاهی.

۳.۴ تعیین تنش‌های عمودی، افقی حداکثر و حداقل

برای تعیین تنش روباره مقدار چگالی مورد نیاز است. تکنیک مورد استفاده در چاه‌نگاری برای تعیین چگالی سازند، ابزار اشعه گاما فعال است بر اساس اثر پراکندگی کامپتون^۳ چگالی سازند را تعیین می‌کند و در اکثر موارد با چگالی توده سنگ برابر است. چگالی برای تعیین خواص مکانیکی سنگ‌ها از دو جنبه مفید است. اول آنکه چگالی برای تعیین مدل‌های

Mini- Fracture Test^۴
Mud loss^۶

Compton scattering^۳
Hydraulic Fracturing^۴

این نسبت در محدوده $0.7 \leq \alpha \leq 1$ در نظر گرفته شد ضریب بایوت به توجه به جنس آهکی مخزن بنگستان ۰/۷ در نظر گرفته شد. در این چاه در شرایط تکتونیکی فعال، تغییرات تنش افقی حداقل با استفاده از مطابقت با داده‌های اندازه‌گیری شده واقعی (معمولاً داده‌های آزمایش نشت) انجام می‌پذیرد. این روش کرنش اصلاح شده نامیده می‌شود [41]. جایگزینی معادلات معادل برای تنش‌های زمین‌ساختی در معادلات ۲۰ تا ۲۱ شامل ضرایب کرنش تکتونیکی در جهت حداقل تنش افقی، ϵ_x و در جهت تنش افقی حداکثر، ϵ_y می‌باشد [41].

$$S_h = \frac{v}{1-v}(S_V - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E}{1-v^2} \epsilon_x + \frac{vE}{1-v^2} \epsilon_y, \quad (20)$$

$$S_H = \frac{v}{1-v}(S_V - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E}{1-v^2} \epsilon_y + \frac{vE}{1-v^2} \epsilon_x, \quad (21)$$

در رابطه بالا a ضریب بایوت، v نسبت پواسون، p_p فشار منفذی، ϵ_x, ϵ_y کرنش در جهت تنش افقی حداکثر و حداقل می‌باشند که از رابطه ۲۲ تا ۲۳ محاسبه می‌گردد [42]. این رابطه یک پیش‌بینی اولیه برای تعیین این پارامترها را می‌دهد. برای اطمینان کامل باید با وزن بهینه گل حفاری اجرا شده در مخزن کالیبره گردد. با استفاده از آزمون نشت (LOT)، نتایج آزمایش ایجاد ریزشکاف یا نتایج فشار گل جایی که باعث (Mud loss) شده است. می‌توان مقادیر تنش افقی حداقل (σ_h) را کالیبره کرد [43]. در این تحقیق با استفاده از آزمون نشت و هرز روی گل (Mud Loss) تنش افقی حداقل کالیبره شده است. می‌توان کرنش‌های تکتونیکی را با انطباق با تنش افقی حداقل که کالیبره شده به دست آورد. خاطر نشان می‌شود روش دیگری برای همبستگی بین تنش افقی حداقل و تنش افقی حداکثر ارائه شده است. در این روش با استفاده از مدول برشی عمودی و افقی تنش‌های افقی در سازندهای ناهمسانگرد به دست آمده است [44-45]. در نهایت، پس کالیبره کردن نتایج، مدول سنگ، مقاومت، فشار منفذی و محدوده تنش‌های برجا در محدوده سازندهای آسماری، ایلام و سروک تعیین شد. با مقایسه بزرگای تنش‌ها مشخص است در محدوده سازندهای گچساران و آسماری رژیم تنش نرمال تا امتداد لغز $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ تا $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ و در محدوده سازند ایلام و سروک معکوس $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ می‌باشد. قابل ذکر است با بررسی لاگ‌های تصویری و شکستگی‌های برشی در این چاه جهت تنش حداقل در امتداد

در روابط بالا، D عمق برحسب متر، P_f فشار منفذی، و σ_h مقدار تنش افقی حداقل برحسب مگاپاسکال هستند. از آنجایی که سنگ‌های رسوبی متخلخل و حاوی سیال می‌باشند، فشار منفذی در عمق H برابر وزن ستون سیال بالایی در همان عمق خواهد بود. بنابراین، فشار منفذی نرمال (P_{pn}) از طریق رابطه ۱۷ تعیین می‌گردد.

$$P_{pn} = \int_0^H \rho_f(z) g dz \cong \bar{\rho} g z, \quad (17)$$

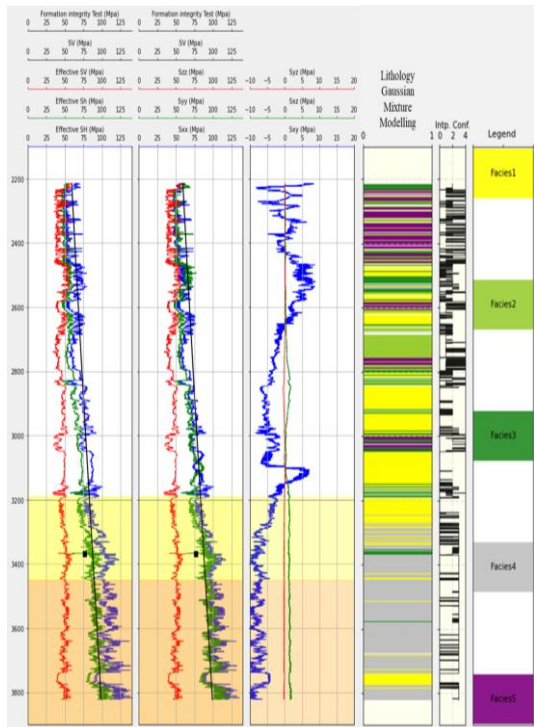
چگالی سیال منفذی برای آب‌شور در بازه $1.03-1.07 \text{ g/cm}^3$ متغیر می‌باشد. بنابراین گرادیان فشار منفذی با هر کیلومتر عمق تقریباً 10 MPa تغییر خواهد کرد. در بیشتر موارد، فشار منفذی از مقدار نرمال (P_{pn}) منحرف می‌شود که به آن فشار منفذی غیر نرمال^۷ گفته می‌شود. بریکلز و وان ایکلن به این نکته اشاره کردند که رابطه بالا با درجه اعتماد نسبتاً مناسبی در نواحی با خصوصیات زمین‌شناسی مختلف به کار گرفته شود. این روابط برای مناطقی که عمق نفوذ آب کم و یا صفر باشد کاربرد دارد. تمامی این روابط تجربی ارائه شده برای تعیین تنش حداقل افقی تخمین خاصی را ارائه می‌کنند که باید از طریق داده‌های آزمایشات برجا بررسی و کالیبره گردند. در یک حوضه تکتونیکی فعال، روش عملی برای تخمین تنش افقی حداقل (σ_h) و تنش افقی حداکثر (σ_H) با توجه به شرایط تنش زمین‌ساختی استفاده از روابط پورالاستیک است [41]. بنابراین در این پژوهش با توجه به قرارگیری مخزن در جنوب ایران از روابط ۱۸ تا ۱۹ پورالاستیک برای تعیین تنش‌های افقی استفاده شده است.

$$\sigma_h = \frac{v}{1-v}(\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + S_{tecth}, \quad (18)$$

$$\sigma_H = \frac{v}{1-v}(\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + S_{tectH}, \quad (19)$$

در اینجا P_p, α, σ_v, v و S_{tecth} به ترتیب نسبت پواسون، تنش روباره، ضریب بایوت و تنش زمین‌ساختی می‌باشد. ضریب بایوت از طریق آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین و مقدار آن از صفر (برای سنگ‌های سخت با تخلخل صفر) تا یک (برای سنگ‌های متخلخل در حوضه‌های رسوبی کم‌عمق) تغییر می‌کند. معمولاً در مطالعات ژئومکانیکی مخازن نفت و گاز، به دلیل سخت بودن اجرای آزمون‌ها، از انجام آن‌ها صرف‌نظر می‌شود. در این تحقیق، با توجه به اینکه این میدان هم دارای مخزن ماسه‌سنگی و هم آهک - دولومیتی متخلخل می‌باشد،

فرایند حرارتی، هیدرولوژیکی و مکانیکی (THM) با استفاده از نرم افزار VISAGE و به وسیله ی کوپل یک طرفه یا دوطرفه در محیط نرم افزار PETREL 2018 استفاده شد.



شکل ۱۱. محدوده تنش های برجا در محدوده سازندهای گچساران، آسماری، ایلام و سروک و نتایج تست یکپارچگی سازند (FIT)

۵. شبکه بندی

شبکه بندی مدل زمین ساختاری با مقیاس مناسب دومین مرحله مدلسازی سه بعدی می باشد. در این مرحله، محیط مورد مطالعه براساس موقعیتهای X, Y, Z به بلوک هایی تقسیم بندی می شود. در این صورت، هر بلوک بازگو کننده مقدار میانگینی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی تمام نقاط خود می باشد که با سایر سلولها متفاوت می باشد [35]. به عبارت دیگر تمامی خواص هر بلوک مانند خواص پتروفیزیکی و سنگ شناسی در تمام حجم آن یکسان است و با توجه به فاصله بلوک ها از یکدیگر و میزان داده های هر یک از آنها، میتوان خواص مشابه موجود در بلوکهایی که فاقد هر گونه اطلاعات هستند را برآورد کرد. بدیهی است که هر چه میزان این اطلاعات بیشتر باشد این تخمین ها به واقعیت نزدیکتر خواهد بود. در صورتی که ابعاد بلوک ها بزرگ باشند، نتیجه مطلوبی به دست نمی آید و در صورت کوچک بودن

زاگرس و با آزیموت ۳۲۰ می باشد. در شکل ۱۱، تغییرات تنش های برجا در میدان، تنش های اصلی و فرعی دیواره چاه و آزمایش یکپارچگی سازند (Formation Integrity Test) نشان داده شده است. این تست معمولاً ۵ تا ۱۰ مگاپاسکال قبل از نقطه LOT به دلیل عدم شکست دیواره چاه متوقف می شود. همان طور که مشاهده می شود، تنش حداقل افقی (Leak of Test) دقیقاً کمی جلوتر از این نقطه قرار گرفته است. بنابراین، نتایج کاملاً صحیح می باشند.

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_v \times v}{E_s} \times [(1/1 - v) - 1] \quad (22)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_v \times v}{E_s} \times [1 - (v^2/1 - v)] \quad (23)$$

$$\sigma_x = (\sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha) \cos^2 \varphi + \sigma_v \sin^2 \varphi, \quad (24)$$

$$\sigma_y = (\sigma_H \sin^2 \alpha + \sigma_h \cos^2 \alpha), \quad (25)$$

$$\sigma_z = (\sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha) \sin^2 \varphi + \sigma_v \cos^2 \varphi, \quad (26)$$

$$\tau_{xz} = \frac{1}{2} (\sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha - \sigma_v) \sin 2\varphi, \quad (28)$$

$$\tau_{xz} = \frac{1}{2} (\sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha - \sigma_v) \sin 2\varphi, \quad (28)$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} (\sigma_h - \sigma_H) \sin 2\alpha \cos \varphi, \quad (29)$$

۵. ساخت مدل های شبیه سازی ساختاری استاتیک،

دینامیک، و ژئومکانیک

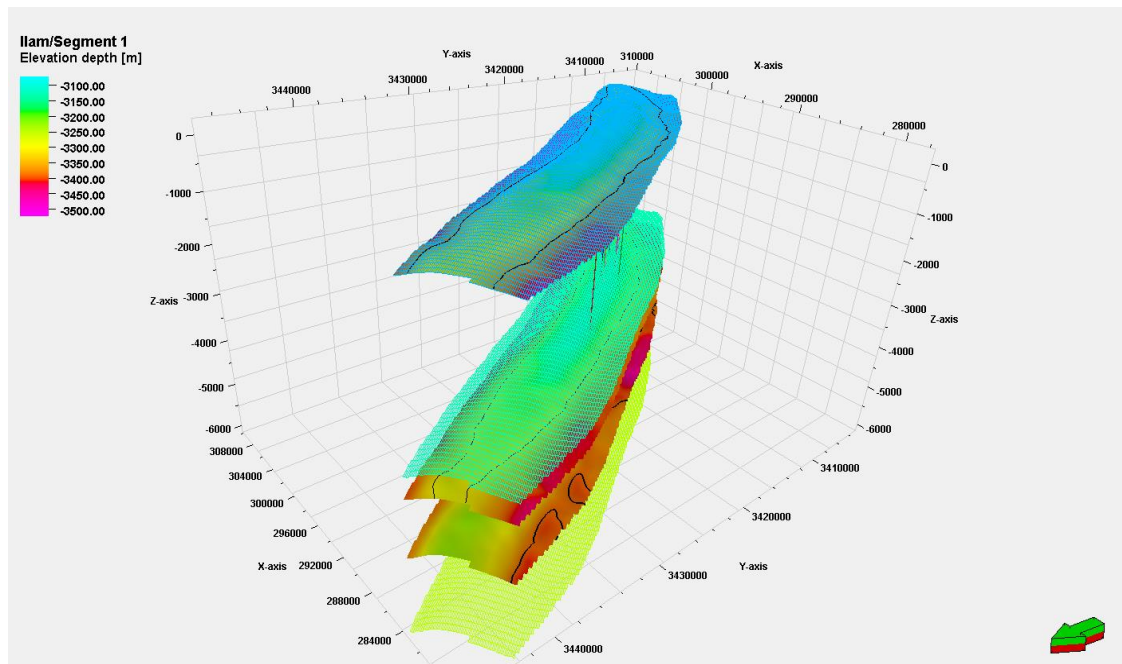
ابتدا بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی محاسبه شده در مدل تک بعدی برای همه چاهها، یک مدل شبیه سازی یکپارچه سه بعدی استاتیک و دینامیک ساخته شد. سپس یک مدل شبیه سازی کوپل ژئومکانیکی چهار بعدی زمین شناسی ساخته شد. برای این منظور، بر اساس اطلاعات بدست آمده از این چاه ها این مدل شبیه سازی در ابعاد (6 km × 8 km × 50 km) ساخته شد. با استفاده از روابط موجود ارتباط بین تخلخل و نفوذپذیری و تنشها و غیره ... برای ساختن این مدل شبیه سازی بکار گرفته شد. در این مدل، با استفاده از داده های دینامیکی در یک شبیه ساز تفاضل محدود مخزن (FDM)، ارزیابی فرایند شیمیایی، هیدرولوژیکی و حرارتی (THC) با استفاده از نرم افزار ECLIPSE انجام شد. همچنین، از یک شبیه ساز المان محدود مخزن (FEM) برای محاسبات

عنوان سازند بنگستان عنوان شده است مشخص گردید. در نتیجه سطح بالا و پایین این سازند ها مشخص کننده مخزن بنگستان است که در مدل سازی استاتیک و دینامیک بکار گرفته شد. برای مدل سازی ابتدا باید گرید بندی درستی از مخزن داشته باشیم. با توجه به اینکه مخزن بصورت تاقدیس می باشد در شبکه گرید جهت z و i در امتداد محور تاقدیس و عمود بر محور انتخاب گردید. این انتخاب به این دلیل می باشد که جریان سیال در جهت شیب لایه ها حرکت می کند. بنابراین، در انجام مدل سازی بیشترین انطباق را دارا می باشد که در شکل ۱۲ گرید بندی نهایی از مخزن نشان داده شده است. به طور کلی، تفاوت بین مدل های دینامیکی و استاتیکی این است که به دلیل محاسبات جریان سیال در گریدها، معمولاً حجم المان ها را بزرگ تر در نظر می گیرند تا زمان محاسبات کاهش یابد.

ابعاد، مدت اجرای برنامه بسیار طولانی و وقت گیر خواهد بود و خطای کار را زیاد می کند به طور کلی دو نوع سلول در شبکه بندی مخزن استفاده می شود: ۱- شبکه بندی با سلول های منظم: این نوع سلول ها همواره دارای طول و عرض یکسان بوده و به صورت مکعب مستطیل هستند. ۲- شبکه بندی با سلول های نقطه ای (نقطه مرزی): این نوع سلول ها بسیار انعطاف پذیر هستند و می توانند به راحتی آثار گسل خوردگی را در خود نمایان سازند.

۲.۵ مراحل ساخت مدل شبیه سازی سه بعدی استاتیک و دینامیک

برای ساخت شبیه ساز استاتیکی و دینامیکی نتایج حاصل از این لاگ ها جهت مدل سازی همه چاه ها در نرم افزار پترل بدرستی وارد گردید. ابتدا بر اساس داده های پتروفیزیکی (Well tops)، سطح بالا و پایین سازند ایلام و سروک که تحت



شکل ۱۲. نحوه گریدبندی میدان بنگستان: z در جهت محور تاقدیس و i در جهت عمود بر محور تاقدیس

در مدل سازی، دامنه تاثیر کم در نظر گرفته شد. از طرفی، نظر به اینکه تغییرات در جهت افقی ساختار تاقدیس یکسان می باشد، دامنه تاثیر در حد طول و عرض میدان در نظر گرفته شد تا پیوستگی میدان، برای مدل سازی نمایش داده شود. همچنین روش درون یابی کریجینگ که بهترین

در ادامه این تحقیق، بر روی این لاگ ها فرایند درشت نمایی (Well log upscaling) انجام گرفت. سپس تجزیه و تحلیل داده ها (Data analysis) صورت انجام شد. با توجه به اینکه، تغییرات لایه ها و سازند های زمین شناسی در جهت قائم در حد میلیون سال می باشد و تغییرات متفاوت است، در نتیجه

کامپیوتری Gslib کنترل تنظیمات پیشرفته را به کاربر می دهند؛

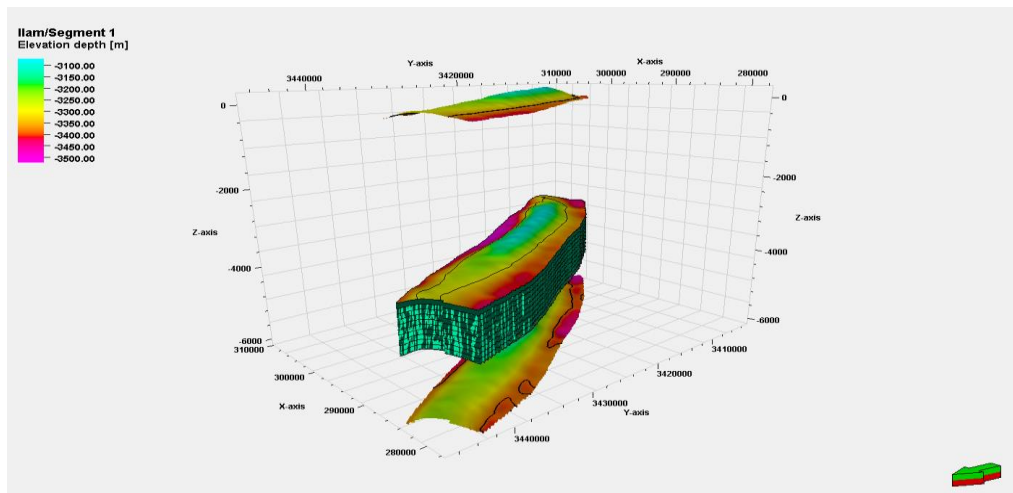
در نتیجه این مراحل جهت شبیه سازی، تمام پارامترهای ژئومکانیکی استخراج شده بصورت مدل های شبیه سازی شده ساختاری سه بعدی استاتیک و دینامیک برای استفاده در مدل ژئومکانیکی بدست آمد.

۶. مراحل ساخت مدل شبیه سازی کوپل ژئومکانیکی میدان بنگستان

بطور کلی فرق بین مدل های شبیه سازی شده استاتیک و دینامیک با ژئومکانیک این است که در مدل سازی ژئومکانیک فشار لایه های بالای مخزن (Over burden)، فشار لایه پایینی مخزن (Under burden)، فشار لایه های کناری مخزن (Side burden) و صفحات پیرامون مدل (Plate elasticity model) جهت مدل سازی عددی در نظر گرفته می شود. در شکل ۱۳ موقعیت مخزن نسبت به سطح زمین و زیر سطح مخزن جهت مدل سازی نشان داده می شود. در شکل ۱۴ موقعیت مخزن نسبت به لایه های بالای، زیرین، کناری و صفحات محدود کننده نشان داده شد.

تخمینگر خطی نارایب به شمار می رود برای میان یابی مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس داده های اندازه گیری شده چاه های مشاهده ای مورد مطالعه در این میدان، یک واریوگرام تئوری بر داده های واریوگرام تجربی برازش داده شد. بدین منظور الگوریتم برنامه کامپیوتری GSLIB برای مدل کردن روش کریجینگ مورد استفاده قرار گرفت. بطور کلی، الگوریتم درون یابی کریجینگ^۸ از روشی مشابه با الگوریتم کریجینگ^۹ توسط الگوریتم Gslib استفاده می کند. با این حال، درون یابی کریجینگ و کریجینگ بوسیله الگوریتم Gslib به روش های زیر متفاوت است:

- درون یابی کریجینگ در محورهای XYZ به جای محورهای IJK برای کریجینگ کار می کند. این درون یابی مشابه روش کریجینگ بوسیله الگوریتم Gslib کار می کند؛
- درون یابی کریجینگ فقط داده ها را در محدوده واریوگرام در نظر می گیرد؛
- درون یابی کریجینگ و کریجینگ بسیار سریعتر هستند زیرا نیازی به انتقال به الگوریتم های خارجی نیستند؛
- درون یابی کریجینگ و کریجینگ بوسیله برنامه



شکل ۱۲. در این تصویر لایه بالای سطح زمین و قسمت میانی مخزن مورد مطالعه تحت عنوان بنگستان و لایه زیر مخزن جهت مدل سازی عددی نشان داده می شود.

Kriging^۹

Kriging interpolation^۸

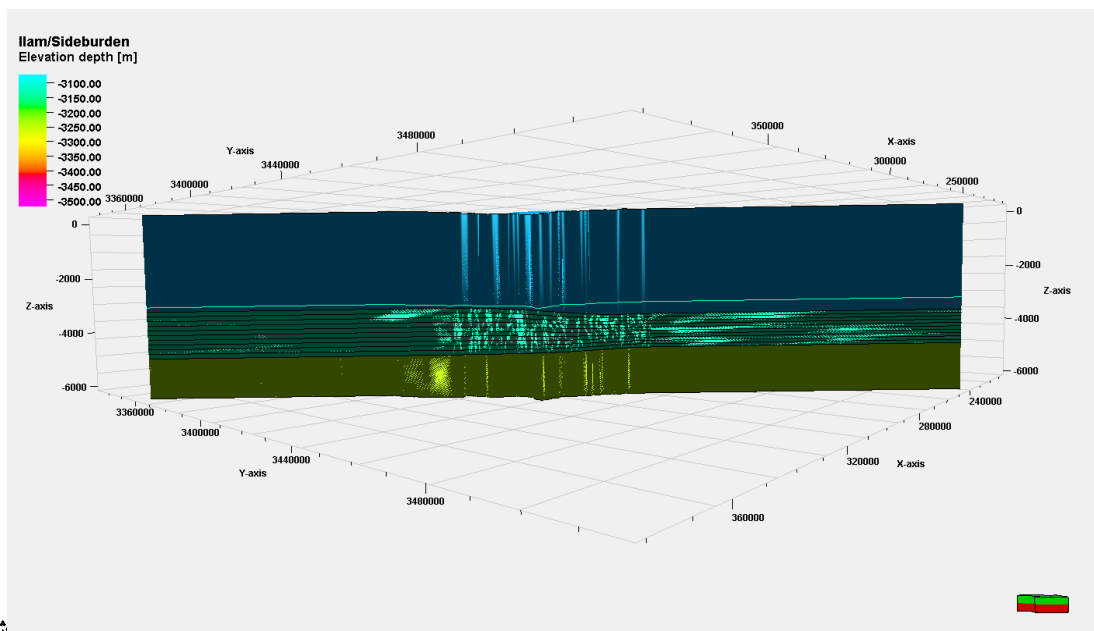
ایجاد شده بطور یکنواخت تری در مدل توزیع گردد. مدول یانگ این صفحات باید ۱/۵ تا ۲ برابر بیشتر از مدول یانگ سنگ های مخزن در نظر گرفته شود. شکل ۱۴ نیمرخ مدل ژئومکانیک و شکل ۱۵ مدل ژئومکانیک نهایی نشان داده می شود.

بعد از این مرحله با توجه به مطالب گفته شده، ابتدا پارامترهای ژئومکانیکی مخزن و محیط پیرامون مخزن (Side burden) لایه های بالای مخزن (Over burden)، و لایه های زیر مخزن (Under burden) را با استفاده از داده های آزمایشگاهی منطبق بر لاگ چاهها در مدل وارد شده است. بعد از این مرحله شرایط اولیه مخزن شامل فشار منفذی، دما و اشباع آب را برای شبیه سازی مدل ژئومکانیکی در یک زمان مشخص وارد می کنیم در اینجا سال ۲۰۲۱ بوده است و سپس شرایط مرزی تنش به وسیله روش تانسور تنش در شبیه ساز اعمال می کنیم.



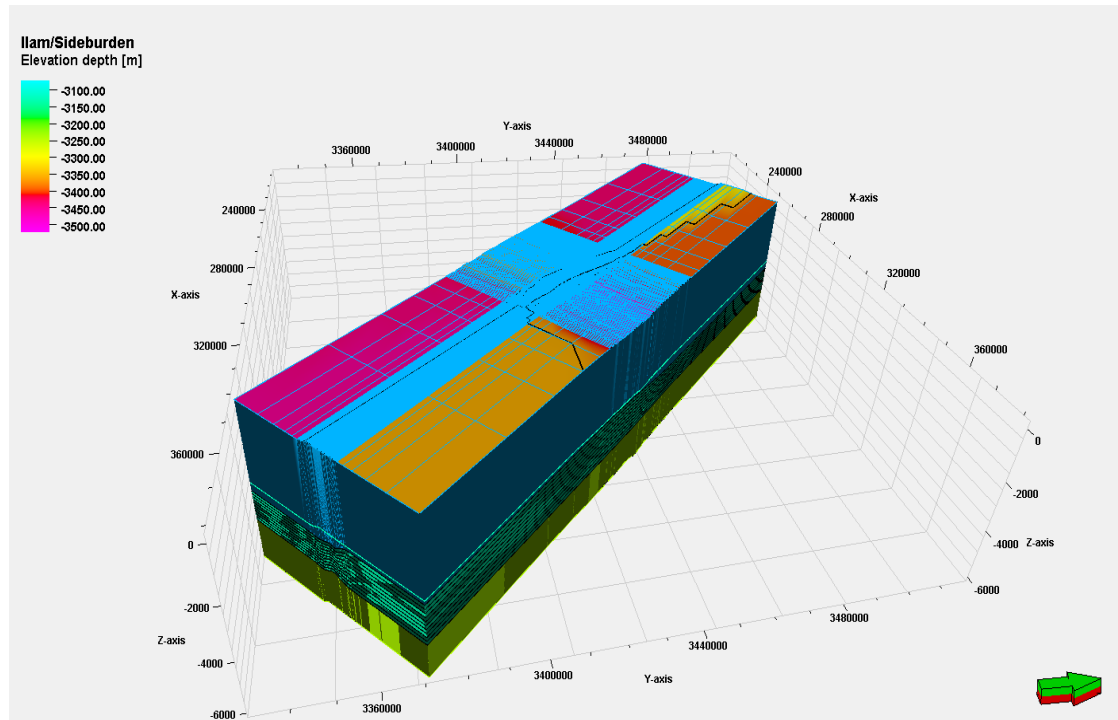
شکل ۱۳. موقعیت مخزن نسبت به لایه های بالایی، زیرین، کناری و صفحات محدود کننده در یک مدل ژئومکانیکی

همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده می شود هنگامی که تنش به مدل وارد می شود به دلیل گرادیان فشاری که در شرایط مرزی اعمال شده است، مدل تغییر شکل می دهد. در نتیجه سنگها در قسمت زیر مخزن فشرده تر شده و می توانند استرس بیشتری قبل از تغییر شکل تحمل کند. بنابراین، برای جلوگیری از این تغییر شکل دو صفحه سفت به کناره های مدل اضافه می شود. این صفحات در واقع سنگهای ناکارآمدی هستند تا در هنگام فشرده سازی تغییر شکل ندهند تا تنش



شکل

۱۴. نیمرخ مدل ژئومکانیک میدان مورد مطالعه در این مدل مخزن در قسمت میانی، شامل لایه های کناری در چهار طرف مخزن تحت عنوان (Side burden)، فشار لایه بالای مخزن (Over burden) و لایه زیر مخزن (Under burden) نشان داده می شود.



شکل ۱۵. مدل شبیه‌سازی شده نهایی ژئومکانیکی مخزن بنگستان. در این تصویر قسمت وسط مدل مخزن، لایه‌های کناری، لایه‌های بالایی و لایه‌های زیرین نشان داده شده است.

برای مشکلات جریان چند فازی بسیار دشوار و زمان بر است. در نتیجه، روشهای کوپلینگ مختلفی توسعه یافته اند که شامل حل سیال و تنش می باشد. ابتداء معادلات در شبیه سازهای جداگانه بطور مثال در این تحقیق در کوپل یک طرفه، معادلات با استفاده از یک شبیه ساز مخزن (ECLIPSE) نتایج فشار منفذی، دما، درجه اشباع به شبیه ساز ژئومکانیک در نرم افزار ویساج (VISAGE) ارسال می شود. در نتیجه این فرایند استرس و کرنش ناشی از افت فشار محاسبه می گردد. الگوریتم مورد استفاده در این کوپل یکطرفه در شکل ۳ ارائه شده است. قابل ذکر است در این تحقیق بدلیل عدم دسترسی به تاریخچه مخزن، برداشت، تزریق و تراوایی از کوپل یکطرفه استفاده شده است. ابتدا شرایط اولیه مخزن بدست آمد و در یک دوره ۱۰ ساله از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۱ با افت فشار مخزن به اندازه یک مگا پاسکل برای هر سال طبق رابطه ۳۰ نتایج تنش و کرنش مخزن در یک مدل چهار بعدی بدست آمد.

$$P_t = P_0 - \sum_{i=1}^t n_i \cdot \Delta P_i \quad (30)$$

One-Way Coupled^{۱۱}

۱.۶ معادلات هیدرومکانیکی جفت شده^{۱۱} به طور کلی آنالیزهای استاتیکی را می توان در شرایط زهکشی شده و غیرزهکشی حل کرد. با این حال، رفتار واقعی سنگها مربوط به زمان هستند. با تغییر فشار منفذی و شرایط مرزی هیدرولیک مخزن ضروری است که جهت بررسی این اثرات ترکیب معادلات حاکم بر جریان سیال در اسکلت خاک/سنگ با استفاده از معادلات تعادلی و ترکیب شده در محیط متخلخل توده سنگ استفاده گردد. این تئوری کوپل کامل نامیده می شود که جریان سیال منفذی و رفتار تنش/کرنش سنگها را جفت می کند. معادلات ارائه شده بعنوان معادلات تثبیت شده بایوت (Biot) نامیده می شود که میتوان معادلات برای جریان چند فازی چند جزئی گسترش داد.

۲.۶ ارزیابی اثرات مربوط به برداشت هیدروکربن از طریق شبیه سازی ژئومکانیکی کوپل یک طرفه^{۱۱}

بطور کلی معادلات کوپل کامل فوق را می توان برای تنش و جریان سیال به طور همزمان حل کرد. این مسیر به خصوص

Coupled Hydro-Mechanical Equations^{۱۱}

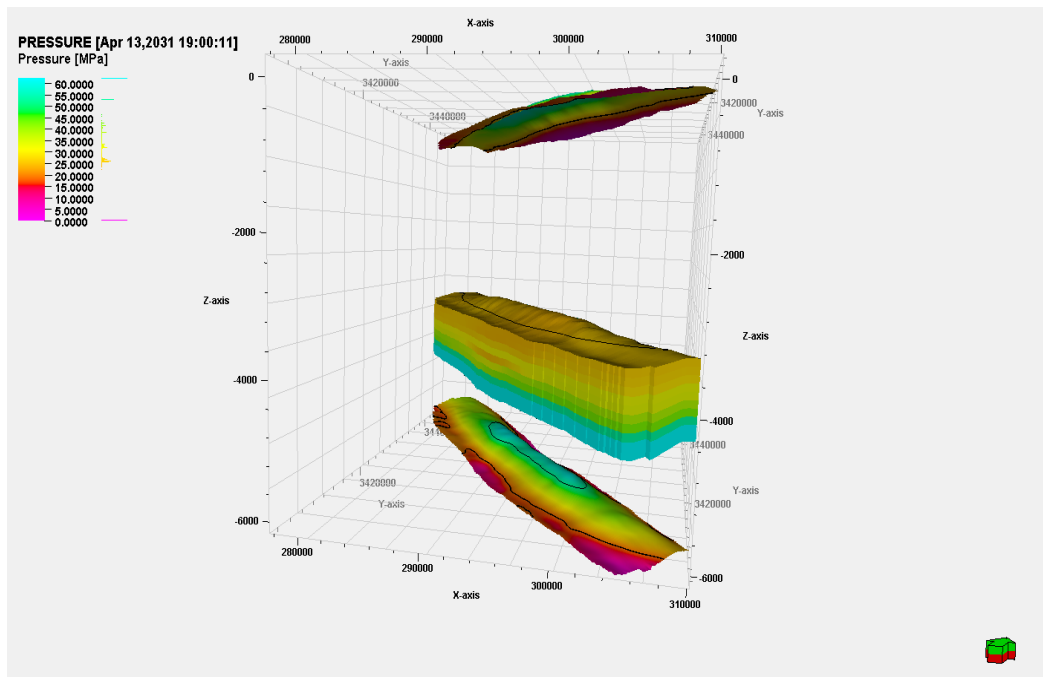
که در اینجا:

- P_t فشار در زمان t (سال مورد نظر)
- P_0 فشار اولیه (در سال ابتدایی)
- i کاهش فشار در سال n_i
- ΔP کاهش فشار در هر سال (در اینجا ۱ مگا پاسکال)

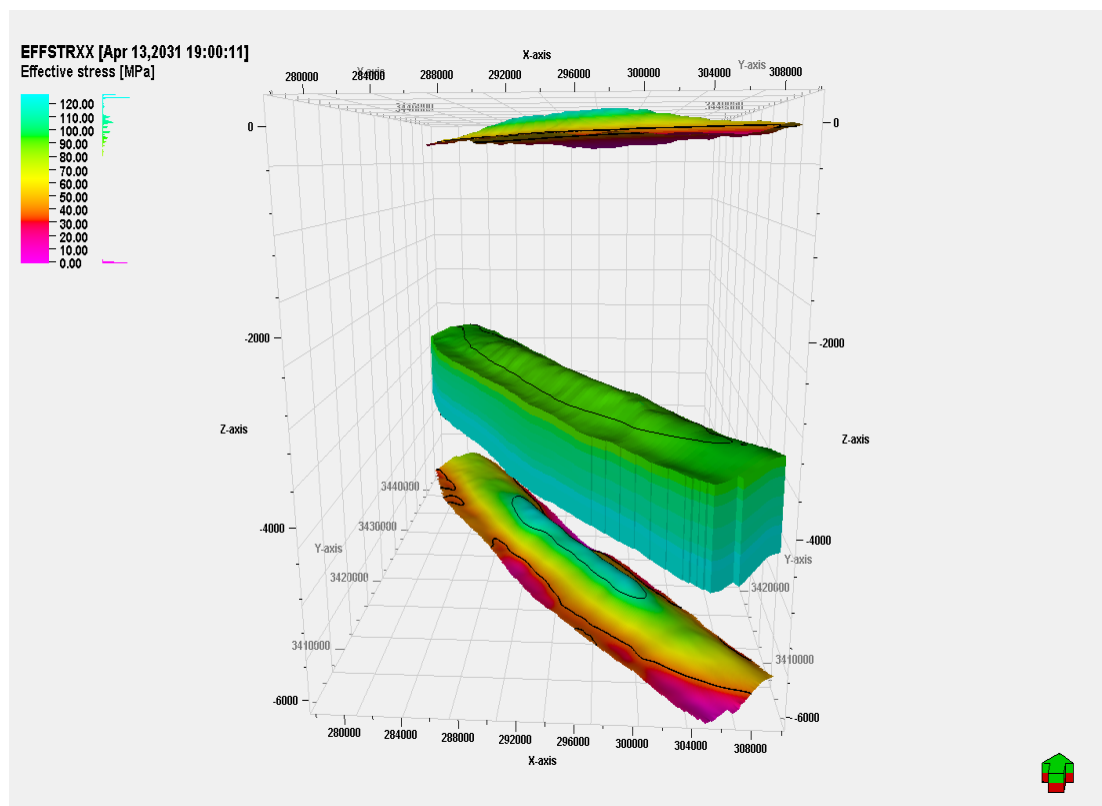
با توجه به مطالب ارائه شده در این مقاله در یک کوپل ژئومکانیکی، ابتدا تمام پارامترهای ژئومکانیکی مخزن بصورت لاگ در محیط نرم افزار پترل وارد شد. در نتیجه شبیه ساز ساختاری استاتیک و دینامیک از مخزن بنگستان ساخته شد. در ادامه این تحقیق، بوسیله روابط پورالاستیک تنش های مخزن محاسبه گردید و مشخص گردید رژیم تنش در محدوده سازند ایلام و سروک معکوس $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ می باشد. قابل ذکر است با بررسی لاگهای تصویری و شکستگیهای بریکوت در این میدان جهت تنش حداقل در امتداد زاگرس و با آزیموت ۳۲۰ محاسبه شد. سپس با استفاده پارامترهای استاتیک و دینامیکی از این میدان یک مدل استاتیک و دینامیک ساخته شد. در ادامه برای ساخت یک شبیه ساز چهار بعدی لازم است در مدل سازی عددی ژئومکانیک فشار لایه های بالای مخزن (Over burden)، فشار لایه پایینی مخزن (Under burden)، فشار لایه های کناری مخزن (Side burden) و صفحات پیرامون مدل (Plate elasticity model) در نظر گرفته شود. برای ساخت این شبیه ساز تمام پارامترهای ژئومکانیکی لازم در مدل وارد گردید. بعد از این مرحله، فشار منفذی، درجه زمین گرمایی و درجه اشباع تحت شرایط اولیه وارد شد. همچنین شرایط مرزی بوسیله روش تانسور تنش در شبیه ساز پیاده سازی شد. برای ساخت مدل چهار بعدی در یک گام زمانی ده ساله،

پارامتر فشاری منفذی با توجه به برداشت هیدروکربن به ازای هر سال یک مگاپاسکال کاهش در نظر گرفته شد. در نتیجه این افت فشار، نتایج تغییرات تنش، کرنش، فشار منفذی، درجه زمین گرمایی و تغییر شکل مخزن برای یک فاصله زمانی ده ساله از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۱ بدست آمده است. قابل ذکر است بدلیل تعداد زیاد تصاویر نتایج فقط برای سال ۲۰۳۱ نشان داده شده است. در نتیجه، همانطور که مشخص است در سال ۲۰۳۱ مخزن ایلام در قسمت بالایی مخزن بدلیل تنش سرباره در حدود ۳۰ سانتی متر نشست رخ خواهد داد ولی این مقدار در مخزن سروک حدود ۱۰ الی ۱۵ سانتی متر اتفاق خواهد افتاد. قابل ذکر است چون این کاهش فشار از فشار منفذی بیش از حد (over pore pressure) صورت پذیرفته است این مقدار نشست برای پیش بینی سالهای بعد از ۲۰۳۱ بیشتر خواهد شد.

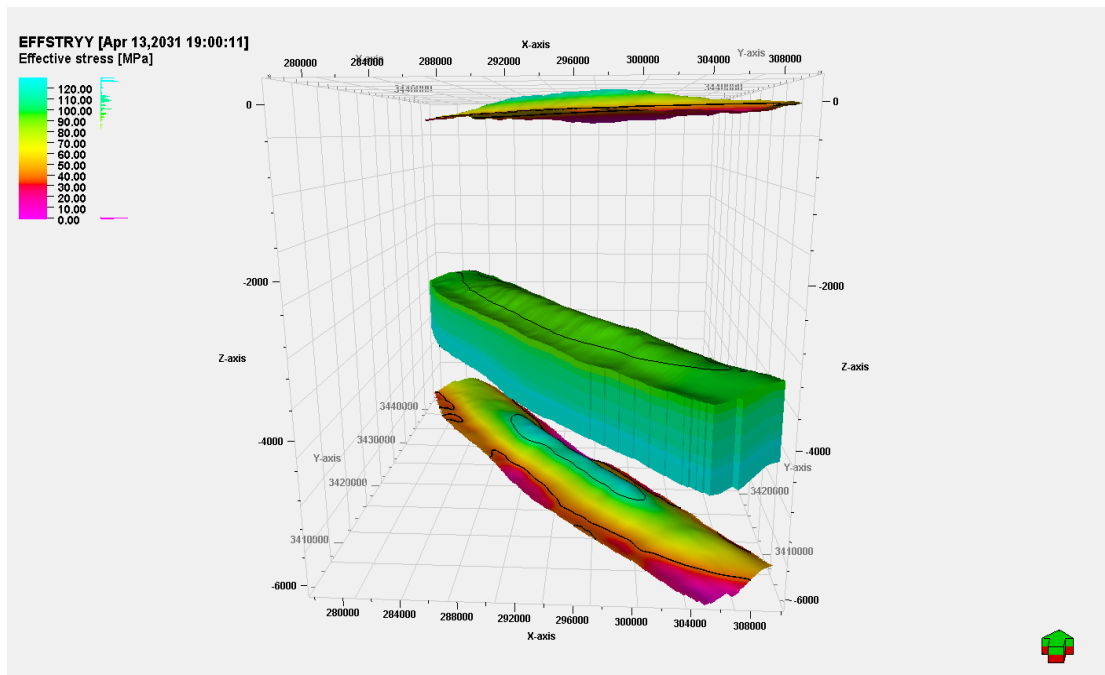
با توجه به الگوریتم بکار گرفته شده کوپل یکطرفه، تعداد محدودی از نتایج شامل تغییرات تنش، کرنش ناشی از تخلیه مخزن و مقدار فرونشست در جهت محور عمودی (Z) در شکل های ۱۶ تا ۲۱ نشان داده می شود. مزایای کوپل یکطرفه ژئومکانیکی در مدل سازی مخازن نفت و گاز شامل کاهش پیچیدگی محاسبات، افزایش سرعت محاسبات، سهولت پیاده سازی، کاهش هزینه های شبیه سازی است. این نوع کوپلینگ به جای تعامل دوطرفه، تنها از یک جهت تأثیر مدل ژئومکانیکی بر مدل جریان را بررسی کرده و به همین دلیل زمان و هزینه های محاسباتی را کاهش می دهد. یکی از مزایای بارز این نوع کوپل، ارزیابی نشست و تغییر شکل مخزن است این ویژگی به پیش بینی دقیق تر عملکرد مخازن و برنامه ریزی بهتر برای عملیات تولید کمک می کند.



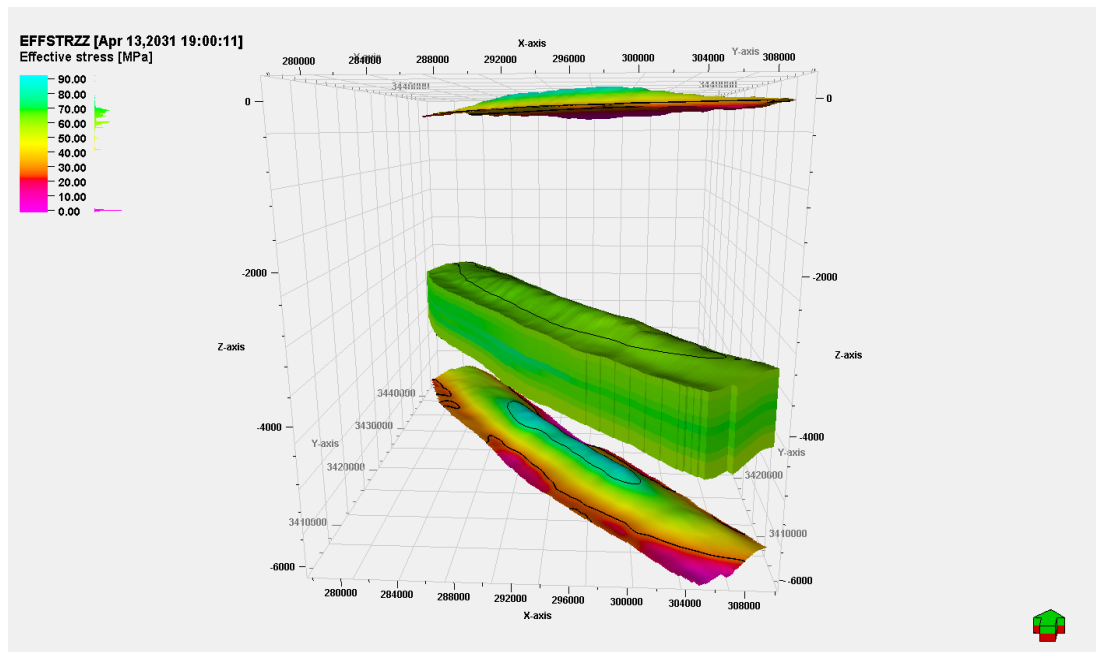
شکل ۱۶. مدل شبیه سازی ژئومکانیکی فشار منفذی در سال ۲۰۳۱



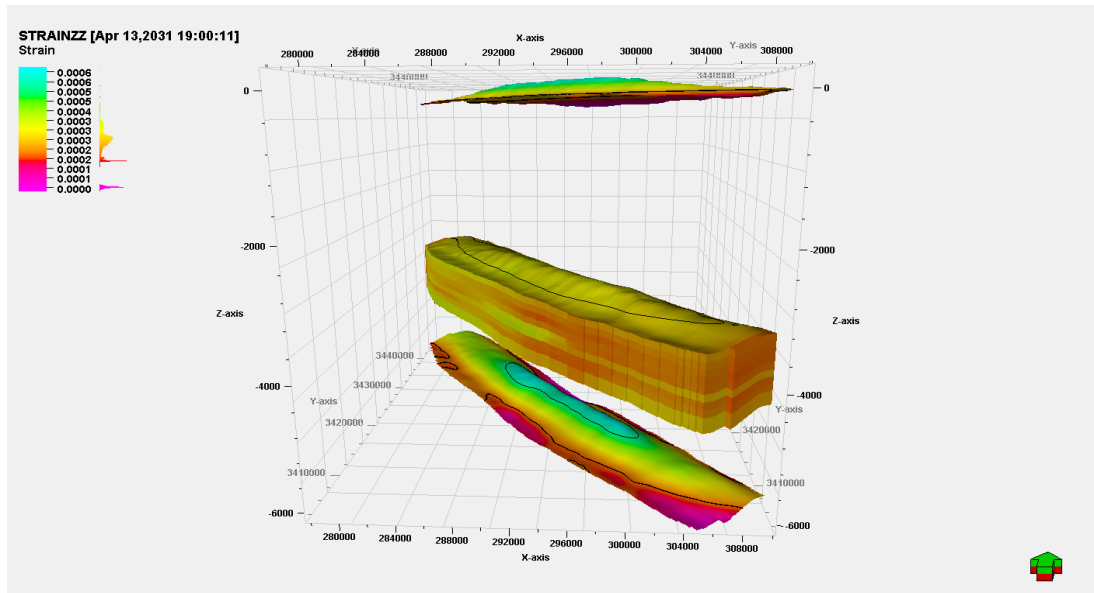
شکل ۱۷. مدل شبیه سازی ژئومکانیکی تنش افقی حداکثر در امتداد محور X در سال ۲۰۳۱



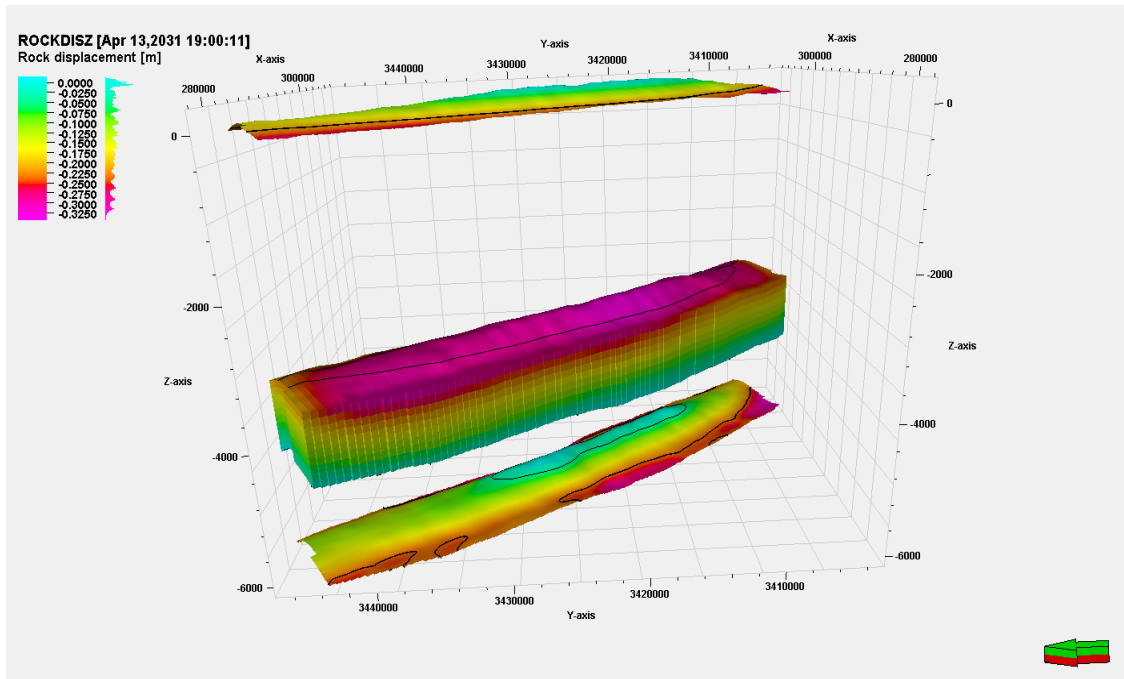
شکل ۱۸. مدل شبیه سازی ژئومکانیکی تنش افقی حداقل در امتداد محور Y در سال ۲۰۳۱



شکل ۱۹. مدل شبیه سازی ژئومکانیکی تنش عمودی در امتداد محور Z در سال ۲۰۳۱



شکل ۲۰. مدل شبیه سازی ژئومکانیکی کرنش عمودی در امتداد محور z در سال ۲۰۳۱



شکل ۲۱. تغییر شکل مخزن در بازه زمانی ده ساله (۲۰۲۱ تا ۲۰۳۱) نشان می دهد که در سال ۲۰۳۱، در قسمت بالایی مخزن ایلام به دلیل تنش سرباره حدود ۳۰ سانتی متر نشست خواهد داشت، در حالی که این مقدار در مخزن سروک بین ۱۰ تا ۱۵ سانتی متر خواهد بود.

داده های استاتیکی و دینامیکی حاصل از نگاره های نفتی در یکی از میدان های مناطق نفت خیز جنوب استفاده شده است. ابتدا پیش پردازش داده ها و تعیین واحدهای ژئومکانیکی به وسیله الگوریتم های یادگیری ماشین به درستی انجام گرفت.

۷. نتیجه گیری

هدف این مقاله ساخت یک مدل شبیه سازی استاتیک، دینامیک و کوپل ژئومکانیکی می باشد. برای این منظور از

داشت؛ اما این مقدار در مخزن سروک حدود ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر خواهد بود. مزایای کوپل یک‌طرفه ژئومکانیکی در مدل‌سازی مخازن نفت و گاز شامل کاهش پیچیدگی محاسبات، افزایش سرعت محاسبات، تحلیل دقیق‌تر فشار، مدیریت بهتر داده‌ها، سهولت پیاده‌سازی و کاهش هزینه‌های شبیه‌سازی است. یکی از مزایای بارز این نوع کوپل، ارزیابی نشست و تغییر شکل مخزن است که به پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد مخازن و برنامه‌ریزی بهتر برای عملیات تولید کمک می‌کند. برای حفظ و نگهداری داده‌های تریق و برداشت هیدروکربن در مدل کوپل یک‌طرفه مخزن نفتی، پیشنهاد می‌شود یک سیستم جامع پایش داده ایجاد شود که شامل جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و تحلیل داده‌ها باشد، همچنین به‌روزرسانی منظم داده‌ها تا ساخت کوپل یک‌طرفه و دوطرفه دقیق انجام گیرد.

مراجع

- [1] Zoback, M. D., (2007). Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [2] Royer, J.J., Mejia, P., Caumon, G., Collon, P., (2015). 3D and 4D Geomodelling Applied to Mineral Resources Exploration-An Introduction, in 3D, 4D and Predictive Modelling of Major Mineral Belts in Europe. 2015, Springer International Publishing: Cham.73-89.
- [3]Chen, H., Teufel, L.W., (2000).Coupling fluid-flow and geomechanics in dual-porosity modeling of naturally fractured reservoirs-Model description and comparison. In: the 1999 SPE Reservoir Simulation Symposium & the 2000 SPE International Petroleum Conference and Exhibition. Villahermosa, Mexico: Society of Petroleum Engineers: 2000.
- [4]Gutierrez, M., (1994). Fully coupled analysis of reservoir compaction and subsidence. In: the European Petroleum, Conference. London, U. K: Society of Petroleum Engineers: 1994.
- [5]Gutierrez, M., Lewis R.W., (1998). The role of geomechanics in reservoir simulation. In: SPE/ISRM Eurock'98. Trondheim, Norway: Society of Petroleum Engineers: 1998.
- [6]Settari, A., Walters, D.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.
- [7]Kolditz, O., Görke, U.J., Shao, H., Wang, W.,(2012) Thermo-hydro-mechanical-chemical processes in porous media: benchmarks and examples. Lecture Notes in Computational Science and Engineering. Vol.

بعد از این مرحله، مدل یک‌بعدی ژئومکانیکی شامل مقاومت سنگ (مقاومت فشاری محصور نشده و مقاومت کششی، زاویه اصطکاک)، پارامترهای تغییر شکل (مدول یانگ، نسبت پواسون، مدول برشی و بالک) و فشار منفذی ساخته شد و تنش‌های برجای میدان با استفاده از روابط پورالاستیک تعیین شدند. که رژیم تنش در محدوده سازند ایلام و سروک (مخزن بنگستان) معکوس $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_H$ می باشد. قابل ذکر است که تمام مراحل این مدل‌سازی یک‌بعدی به‌وسیله زبان برنامه‌نویسی پایتون انجام گرفته است. در ادامه این پژوهش، یک مدل شبیه‌سازی سه‌بعدی استاتیک، دینامیک و ژئومکانیک ساخته شد. برای این منظور، بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از این چاه‌ها، یک مدل شبیه‌سازی با ابعاد (50) $km \times 8 km \times 6 km$ ساخته شد. در این مدل از یک شبیه‌ساز تفاضل محدود مخزن (FDM) با استفاده از داده‌های دینامیکی برای ارزیابی فرآیند شیمیایی، هیدرولوژیکی و حرارتی (THC) با نرم‌افزار ECLIPSE استفاده شده است. همچنین از یک شبیه‌ساز المان محدود مخزن (FEM) برای محاسبات فرآیند حرارتی، هیدرولوژیکی و مکانیکی (THM) با نرم‌افزار VISAGE و به‌وسیله کوپل یک‌طرفه در محیط نرم‌افزار PETREL 2018 استفاده گردید. با توجه به اینکه هدف این مقاله ساخت یک شبیه‌ساز چهار بعدی ژئومکانیکی مخزن می‌باشد، لازم است در مدل‌سازی ژئومکانیک، فشار لایه‌های بالای مخزن (Over burden)، فشار لایه پایینی مخزن (Under burden)، فشار لایه‌های کناری مخزن (Side burden) و صفحات پیرامون مدل (Plate elasticity model) برای مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شود. برای ساخت این مدل شبیه‌سازی، تمام پارامترهای ژئومکانیکی لازم این لایه‌ها در مدل وارد گردید. بعد از این مرحله، فشار منفذی، درجه زمین گرمایی و درجه اشباع تحت شرایط اولیه وارد شد، همچنین شرایط مرزی به‌وسیله روش تانسور تنش در شبیه‌ساز وارد گردید. جهت ساخت مدل در یک گام زمانی ده‌ساله، پارامتر فشار منفذی با توجه به برداشت هیدروکربن به ازای هر سال یک مگاپاسکال کاهش در نظر گرفته شد. در نتیجه، تغییرات تنش، کرنش، فشار منفذی و تغییر شکل مخزن در یک فاصله زمانی ده‌ساله از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۱ به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که در سال ۲۰۳۱، مخزن ایلام در قسمت بالایی به‌دلیل تنش سرباره، در حدود ۳۰ سانتی‌متر نشست خواهد

- Depthing with multi-well constrained depth imaging — On shore case study in Kuwait: 81st Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, this issue.
- [19] Plumb, R., Edwards, S., Piddock, G., Lee, D. and Stacey, B. (2000). The mechanical earth model concept and its application to high-risk well construction projects. IADC/SPE Drilling Conference.
- [20] Sengputa, M., Dai, J., Volterrani, S., Dutta, N., Rao, N., Al-Qadeeri, B., Kidambi, V., (2011). Building a seismic-driven 3D geomechanical model in a deep carbonate reservoir- SEG, Vol. Annual Meeting.
- [21] Josenilda Nascimento Lonardelli, Rafael de Oliveira da Silva, Flávia de Oliveira Lima Falcão, Marco Antonio Cetale Santos, Carlos Eduardo Borges de Salles Abreu., (2017). Evaluation of oil production related effects through geomechanical modeling: A case study from Marimbá field, Campos Basin, Brazil” *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 10 August 2017.
- [22] Falcão, F. O. L., (2013). Simulação Hidromecânica de Reservatório Carbonático de Petróleo através de Pseudoacoplamento. Rio de Janeiro. 204 p. These (Doutorado em Engenharia Civil) – PUC-Rio Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [23] Schlumberger (2018) Real-time drilling geomechanics. http://www.slb.com/~media/Files/dcs/product_sheets/geomechanics/geomechanics_rt_ps.pdf. Checked on 18 Nov 2016.
- [24] Ghalibaf, H., Hafezi Moghaddas, N., Lashkaripour, G.R., Raouf G., Hossin T., (2022). Determination of geomechanical zones based on evaluation of Unsupervised Machine Learning algorithm methods “*JOURNAL OF PETROLEUM GEOMECHANICS (JPG)*”: (DOI) 10.22107/jpg.2022.329417.1158.
- [25] Fjaer E., Holt R.M., Hordrud P., Raaen A.M. and R. Risnes. (2008). “Petroleum related rock Rock Mechanic”, *Developments in Petroleum Science*, Elsevier.
- [26] Barton N (2006) Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Taylor and Francis, Oxford
- [28] Holt RM (2013) Static and dynamic moduli—so equal, and yet so different. Presented at the 47th US rock mechanics symposium held in San Francisco, CA, USA, 23–26 June
- [29] Wang Z (2000) Dynamic vs. static properties of reservoir rocks. In: Wang Z, Nur A (eds) *Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks*, vol 3: recent developments. SEG, Tulsa.
- [30] Larsen I, Fjaer E, Renlie L (2000) Static and dynamic Poisson’s ratio of weak sandstones. In: 86. 2012, Springer Berlin Heidelberg. 1-404.
- [8] Bower K.M., Zyvoloski G., (1997) A numerical model for thermo-hydro-mechanical coupling in fractured rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 1997; 34(8): 1201-1211.
- [9] Li, Q., Ito, K., Wu, Z., Lowry, C.S., Loheide, (2009) II S.P. COMSOL Multiphysics: A novel approach to ground water. modeling. *Ground Water* 2009; 47(4): 480-487.
- [10] Taron, J., Elsworth, D., Min, K., (2009). Numerical simulation of thermal-hydrologic-mechanical-chemical processes in deformable, fractured porous media. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2009; 46(5): 842-854.
- [11] Rutqvist, J., Tsang, C., (2002). A study of caprock hydromechanical changes associated with CO₂-injection into a brine formation. *Environmental Geology* 2002; 42(2): 296-305.
- [12] Fei, W.B., Li, Q., Wei, X.C., Song, R.R., Jing, M., Li, X.C., (2015). Interaction analysis for CO₂ geological storage and underground coal mining in Ordos Basin, China. *Engineering Geology* 2015; 196: 194-209.
- [13] Longuemare, P., Mainguy, M., Lemonnier, P., Onaisi, A., Gérard, C., Koutsabeloulis, N., (2002). Geomechanics in reservoir simulation: Overview of coupling methods and field case study. *Oil & Gas Science and Technology* 2002; 57(5): 471-483.
- [14] Nakaten, B., Kempka, T., (2014). Workflow for fast and efficient integration of Petrel-based fault models into coupled hydro-mechanical TOUGH2-MP - FLAC3D simulations of CO₂ storage. *Energy Procedia* 2014; 63: 3576-3581.
- [15] Olden, P., Pickup, G., Jin, M., Mackay, E., Hamilton, S., Somerville, J., (2012). Use of rock mechanics laboratory data in geomechanical modelling to increase confidence in CO₂ geological storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2012; 11: 304-315.
- [16] Haiyan, Z., Xuanhe, T., Qingyou, L., Kuidong, L., Jialin, X., Shu Jiang, J., (2020) 4D multi-physical stress modelling during shale gas production: A case study of Sichuan Basin shale gas reservoir, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering* Received Date 2019.
- [17] Liu, J., Ding, W., Yang, H., Wang, R., Yin, S., Ang, Fu, F., (2017). 3D geomechanical modeling and numerical simulation of in-situ stress fields in shale reservoirs: A case study of the lower Cambrian Niutitang formation in the Cen'gong block, South China. *Tectonophysics* 712–713 (2017) 663–683.
- [18] Yang, S. L., Lu, J., Dai, S., Volterrani, K., (2011).

Vol. 141, pp. 38-51, 2016.

[43] Zoback M (2010) Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, Cambridge

[44] Sinha BK, Vissapragada B, Renlie L, Skomedal E (2006) Horizontal stress magnitude estimation using the three shear moduli—a norwegian sea case study. Soc Petrol Eng. <https://doi.org/10.2118/103079-MS>

[45] Sayers C, Nagy Z, Vasudev S, Tagbor K, Hooyman P (2009) Determination of in situ stress and rock strength using borehole acoustic data. SEG Technical Program

ARMA-2000-0077, 4th North American rock mechanics symposium, 31 July–3 August, Seattle, Washington.

[31] Bradford I.D.R., Fuller J., Thompson P.J and Walsgrove T.R.: “Benefits of Assessing Solids Production Risk In A North Sea Reservoir Using Elastoplastic Modelling,” SPE/ISRM 47360, SPE/ISRM Eurock '98 held in Trondheim, Norway, 8-10 July 1998.

[33] Chang C, Zoback M, Khaksar A (2006) Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. J Pet Sci Eng 51(3–4):223–237

[34] Ashena, R., Elmgerbi, A., Rasouli, V., Ghalambor, Rabiei, M., Bahrami, A., (2020). Severe wellbore instability in a complex lithology formation necessitating casing while drilling and continuous circulation system, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology (2020) 10:1511–1532 <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00834-3>.

[35] Schlumberger (2016) Real-time drilling geomechanics. http://www.slb.com/~media/Files/dcs/product_sheets/geomechanics/geomechanics_rt_ps.pdf. Checked on 18 Nov 2016.

[36] Dugan B, Flemings PB (1998) Pore pressure prediction from stacking velocities in the Eugene Island 330 Field (Offshore Louisiana). Gas Research Institute, Chicago, p 23

[37] Zhang J (2011) Pore pressure prediction from well logs: methods, modifications, and new approaches. Earth Sci Rev 108(1–2):50–63.

[38] Mouchet JP, Mitchell A (1989) Abnormal pressures while drilling: origins, prediction, detection, evaluation. Elf EP-Editions, Editions Technip, Paris.

[39] Mavko G, Mukerji T, Godfrey N (1995) Predicting stress-induced velocity anisotropy in rocks. Geophysics 60:1081–1087. <https://doi.org/10.1190/1.1443836>.

[40] Breckels, I. M. and Van Eekelen, H. A. M. (1981). “Relationship between horizontal stress and depth in sedimentary basins: Paper SPE10336, 56th Annual Fall Technical Conference.” Society of Petroleum Engineers of AIME, San Antonio, Texas, October 5–7.

[41] Blanton TL, Olson JE (1997) Stress magnitudes from logs: effects of tectonic strains and temperature. SPE-38719-MS, Presented at SPE annual technical conference and exhibition, 5–8 October, San Antonio, Texas.

[42] Kidambi, T., Kumar, G. S., “Mechanical Earth Modeling for a vertical well drilled in a naturally fractured tight carbonate gas reservoir in the Persian Gulf”, Journal of Petroleum Science and Engineering,