



مقاله پژوهشی

ارزیابی کیفیت پوش سنگ سازند گچساران با استفاده از پارامترهای پتروفیزیکی، ژئومکانیکی و مکانیک سنگی در یکی از میادین جنوب غرب ایران

حسن صدر^۱؛ علی میثاقی^{۲*}؛ محمدرضا آصف^۳؛ احمدرضا لکزیابی^۴

۱- کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- دکترای ژئوفیزیک، گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۳- دکترای زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۴- کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، خوزستان، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۱۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/ggj.2026.589715.1266

واژگان کلیدی	چکیده
پوش سنگ، ژئومکانیک، مکانیک سنگ، پتروفیزیک، گچساران	پوش سنگ یک مخزن نفتی یک سازند نفوذناپذیر است که نقش اساسی در حفظ هیدروکربن ها در طول زمان زمین شناسی، در برابر تنش های وارده دارد. یک پوش سنگ موثر باید باید بصورت یکپارچه ضخامت کافی و تداوم جانبی در مقیاس میدان داشته باشد تا پنجره های نشت وجود نداشته باشند، در غیر این صورت کل ذخیره هیدروکربنی از دست می رود. به همین دلیل مطالعه پوش سنگ به جهت ارزیابی یکپارچگی، نوع رفتار ژئومکانیکی، میزان نفوذپذیری، ارتباط آن با گسل های زیر سطحی و مخاطرات حفاری از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش با استفاده از داده های لرزه نگاری سه بعدی و وارون سازی و همچنین لاگ های چاه پیمایی، لایه های متنوع اطلاعاتی مربوط به پارامترهای پتروفیزیکی، مکانیک سنگی و ژئومکانیکی پوش سنگ سازند گچساران در یکی از میادین جنوب غرب ایران بصورت مدل سه بعدی برای حجم میدان و در گستره جغرافیایی بصورت نقشه تولید شد و مورد بررسی قرار گرفت. این موارد بصورت منفرد و تلفیقی تحلیل شده و نقاط قوت و ضعف پوش سنگ گزارش شده است. این لایه ها شامل پارامترهای مقاومت صوتی، سرعت امواج لرزه ای، چگالی، تخلخل، مدول یانگ موثر، مدول برشی، مدول بالک، نسبت پواسون، شکنندگی و نسبت تنش بسته شدن می باشند. در نهایت با بررسی مشخص شد که بیشتر نواحی پوش سنگ به علت تغییرات کم در این پارامترها شکل پذیری و مقاومت مناسبی در برابر تنش دارند، اما می توان برخی نواحی را با استحکام و صلاحیت بالاتر برای برنامه های حفاری و توسعه میدان معرفی نمود.

۱. پیش گفتار

مخزن و مکانیسم تله دو مفهوم متفاوت هستند ولی باید توجه داشت که یک "سامانه پوش سنگ" (*caprock/seal system*) لزوماً فقط یک لایه سنگی نیست (Zrelli, et al. 2026)، بلکه می تواند یک ساختار کامل زمین شناسی (IEAGHG, 2011) باشد که از ترکیب لایه های ناتراوا و ساختارهای تکتونیکی مانند گسل ها و چین ها (طاق دیس ها) باشد (Song & Zhang, 2013). بررسی پوش سنگ می تواند بسیاری از هزینه های مرحله اکتشاف میدان و ریسک حفاری چاه های اکتشافی و استخراجی را از طریق نشان دادن نقاط ضعف پوش سنگ کاهش دهد. براین اساس

یک سیستم نفتی رایج معمولاً شامل سنگ منشأ (*Source rock*) مسیر مهاجرت (*Migration Path*) از سنگ منشأ به سنگ مخزن (*Reservoir Rock*)، مکانیسم تله (*Structural and Stratigraphic Trap*) و پوش سنگ (*Cap Rock*) است. پوش سنگ یک لایه یا سازند زمین شناسی است که مانع از نشت مواد هیدروکربنی به لایه های بالایی می شود. در واقع عامل اصلی ایجاد یک مخزن هیدروکربنی در کنار وجود یک سازند متخلخل، یک پوش سنگ مناسب است (شرط علی، ۱۳۸۸). البته پوش سنگ

مطالعه پوش سنگ باید در مراحل اکتشاف و توسعه میدان در دستورکار قرار گیرد و از مدل‌های خروجی آن در گزارش‌های نهایی بهره‌برداری شود به نحوی که موقعیت پیشنهادی چاه‌ها با کیفیت پوش سنگ انطباق داشته باشد.

یکپارچگی و کیفیت یک سازند می‌تواند از طریق ارزیابی مغزه‌ها، لاگ‌های چاهی و داده‌های لرزه‌ای انجام شود، که این سه روش به نوعی همدیگر را تکمیل می‌کنند. از این میان روش وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای و تبدیل مدل مقاومت بدست آمده به پارامترهای ژئومکانیکی و مکانیک سنگی نسبت به روش استفاده از مغزه‌ها و لاگ‌های چاهی (که عملاً تحلیل داده و مدلسازی فقط در امتداد مسیر حفاری انجام می‌شود) بدلیل مدلسازی سه بعدی در حجم توده سنگ پوشش‌دهی بهتری دارد و می‌تواند ویژگی‌های یک پوش سنگ را در حجم و سطح پوش سنگ تامین کند. در این پژوهش پارامترهای ژئومکانیکی شامل مدول یانگ موثر ($E_{\text{Effective}}$)، مدول برشی (G)، مدول بالک (K)، نسبت پواسون (ν) و پارامترهای پتروفیزیکی شامل چگالی، سرعت امواج لرزه‌ای (V_p , V_s)، تخلخل و پارامترهای مکانیک سنگی نسبت تنش بسته‌شدن (CSR) به منظور ارزیابی پوش سنگ مورد استفاده قرار گرفت. اساساً محدوده‌ای از مساحت پوش سنگ که مدول یانگ موثر، مدول بالک و مدول برشی پایینی داشته و همزمان مقادیر نسبت تنش بسته‌شدن و شکنندگی بالایی داشته باشد، به عنوان نواحی ضعیف شناخته می‌شوند که تحت تنش، یکپارچگی خود را سریعتر از سایر نواحی از دست می‌دهند. باید توجه داشت که این مقادیر برای هر پوش سنگ در سازندهای نواحی گوناگون متفاوت بوده و نمی‌توان حد پایین یا بالایی را برای این کمیت‌ها به شکلی قطعی تعیین نمود تا در نواحی دیگر نیز مورد استفاده قرار گیرند، بلکه هر ناحیه را باید براساس توزیع مقادیر اطراف آن تفسیر نمود.

در جنوب غرب ایران میادین گوناگون هیدروکربنی وجود دارد که این پژوهش روی میدان نفتی آغاچاری انجام شده است. بر اساس مطالعات فتحي و همکاران (۱۳۹۷) مدل ژئومکانیکی یک بعدی در این میدان با استفاده از نرم افزار IP توضیح داده شد و با مدلسازی تحلیلی امکان فعالیت مجدد گسل‌های میدان، امکان وقوع شکستگی‌ها طی عملیات تزریق و تولید، و میزان بحرانی تغییر فشار تزریق و تولید برای ایجاد شکستگیهای کششی و برشی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین سعیدی و همکاران (Saedi, 2022) تعامل بین گسل‌ها، تنش برجا و

شکستگی‌های طبیعی در مخزن آسماری را بررسی کردند. این تجزیه و تحلیل برای درک چگونگی واکنش شکستگی‌ها و گسل‌های موجود به تغییرات میدان تنش بسیار مهم است. نکته اساسی در میدان نفتی آغاچاری خطر از دست رفتن یکپارچگی پوشش سنگی به دلیل فعالیت‌های انسانی است. به این ترتیب که تولید و مهم‌تر از آن، تزریق گاز برای افزایش بازیافت نفت می‌تواند فشارهای زیرسطحی را تغییر دهد و به طور بالقوه باعث ایجاد شکستگی‌های جدید یا فعال شدن مجدد گسل‌های موجود شود. با این حال، مطالعات محدود و نسبتاً پراکنده‌ای که تاکنون انجام شده نتوانسته است تصویر کامل و مشخصی در ابعاد مختلف برای این موضوع بدست دهد. این پژوهش با انجام مطالعات سه بعدی در مقیاس میدان بخشی از این تصویرسازی برای شناخت بهتر موقعیت‌های مستعد و معرفی نقاط با استحکام و دارای صلاحیت بالاتر برای برنامه‌های حفاری و توسعه میدان را انجام می‌دهد.

میدان آغاچاری در حوضه فروافتادگی دزفول و با امتداد شمال غرب-جنوب شرق و به موازات روند کلی چین خوردگی زاگرس و در جنوب شرقی میدان‌های مارون و کوپال و در شمال غربی میدان پازنان و در جنوب غربی میدان کرنج واقع است. میدان آغاچاری در ۵ کیلومتری شهر امیدیه-آغاچاری و ۹۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر اهواز قرار گرفته است. طول میدان ۵۶ کیلومتر و عرض آن ۶ کیلومتر است. مختصات جغرافیایی آن (۲۹° و ۴۹° تا ۵۴' و ۴۹° طول شرقی و ۴۰° و ۳۰' تا ۶° و ۳۱° عرض شمالی می باشد. شکل (۱) موقعیت میدان آغاچاری را در منطقه و نسبت به میادین مجاور نشان می دهد (Ashtari et al., 2017).

سازند گچساران در منطقه جنوب غرب ایران بسیار پراهمیت می باشد و پوش سنگ برای سنگ مخزن آسماری است. قابل توجه اینکه سازند آسماری دربرگیرنده بسیاری از مخازن نفتی در این منطقه است. نام سازند گچساران از میدان نفتی گچساران (دومین میدان نفتی ایران از نظر ذخیره برجا با ۵۲ میلیارد بشکه واقع در ۲۲۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر اهواز و در محدوده شهرستان گچساران، استان کهگیلویه و بویراحمد) گرفته شده است (Darvishzadeh, 2004).

موج فشارشی می‌توان دیگر پارامترهای ژئومکانیکی و مکانیک سنگی را بدست آورد و به کمک آنها اطلاعاتی فراتر از روش مستقیم از داده‌های لرزه‌ای استخراج نمود.

به طور کلی وارون‌سازی به دو دسته پس‌برانبارش و پیش‌برانبارش تقسیم می‌شود که در ادامه روش مورد استفاده روش پس‌برانبارش است. اطلاعات ورودی به این روش، داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی پس‌برانبارش مهاجرت یافته، لاگ‌های مقاومت صوتی (حاصل ضرب لاگ چگالی در لاگ سرعت امواج لرزه‌ای) و موجک استخراجی است. خروجی این وارون‌سازی مدل مقاومت صوتی موج P است که به منظور ایجاد پارامترهای پتروفیزیکی، ژئومکانیکی و مکانیک سنگی مورد استفاده قرار گرفت. برای وارون‌سازی پس‌برانبارش روش‌های گوناگونی توسعه یافته است که در این پژوهش از روش وارون‌سازی تصادفی بهره گرفته شد.

۱.۲ وارون‌سازی

تکنیک‌های وارون‌سازی به طور کلی به دو دسته پس‌برانبارش و پیش‌برانبارش و یا قطعی و تصادفی تقسیم می‌شوند. در وارون‌سازی پیش‌برانبارش مجموعه‌ای از ویژگی‌ها شامل مقاومت صوتی موج P (Zp)، مقاومت صوتی موج S (Zs) و چگالی ایجاد می‌شود، درحالی که در وارون‌سازی پس‌برانبارش فقط یک ویژگی مقاومت صوتی موج P (Zp) تولید می‌شود که متداول‌ترین روش وارون‌سازی لرزه‌ای است (Alvez et al., 2014).

۲.۲ وارون‌سازی پس از برانبارش

مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های وارون‌سازی پس از برانبارش شامل روش بازگشتی، روش خارهای پراکنده، روش بر پایه مدل و وارون‌سازی رنگی است. اساسا روش وارون‌سازی تصادفی به علت استفاده از یک مدل توزیع اولیه مقاومت صوتی، یک روش برپایه مدل بوده لذا این روش را در ادامه شرح خواهیم داد (آقایی، ۱۳۹۹).

۳.۲ وارون‌سازی بر پایه مدل (Model based)

روش بر پایه مدل اولین بار توسط کوک^۱ و اشانایدر^۲ (۱۸۹۳) معرفی شد. در روش بر پایه مدل، نیازمند مدل اولیه‌ای است که در مقابل داده‌های لرزه‌ای بررسی شده باشد. مدل اولیه ممکن



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی میدان آغاجاری در منطقه
(Ashtari et al., 2017)

داده‌های ورودی شامل مجموعه‌ای از لاگ‌های چاه‌ی و داده لرزه‌ای سه بعدی پس‌برانبارش می‌باشد. در این پژوهش داده‌های چهار چاه استفاده شد که همگی دارای چک شات (*Check shot*) و نشانگر (*Marker*) موقعیت سازند (مارکر) بودند. چاه‌ها دارای مجموعه‌ای از لاگ‌ها بودند که از این میان لاگ‌های چگالی، سرعت موج فشارشی (Vp)، سرعت موج برشی (Vs) و تخلخل مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین داده لرزه‌ای سه بعدی پس‌برانبارش ورودی، شامل ۱۳۵۱ خط امتدادخطی (*Inline*) و ۶۹۳ خط عمودخطی (*Crossline*) می‌باشد.

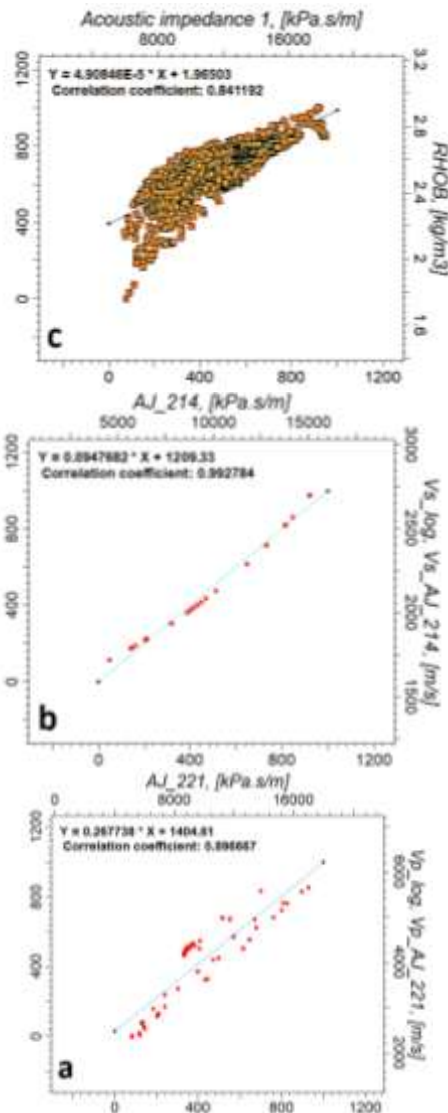
۲. مواد و روش‌ها

مطالعات لرزه‌ای به طور کلی شامل دو دسته‌بندی جامع می‌شوند، مطالعات مستقیم و مطالعات وارون. در روش مستقیم مطالعه بر روی داده لرزه‌ای پردازش شده صورت می‌گیرد، درحالی که در روش وارون به کمک تبدیل بازتاب‌های لرزه‌ای به پارامترهای پتروفیزیکی همچون مقاومت صوتی، سرعت موج برشی و سرعت

^۲ Schneider

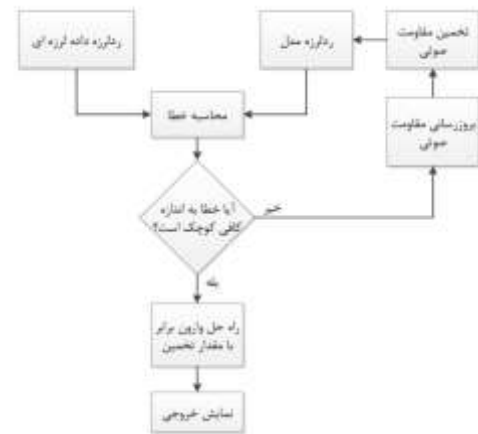
^۱ Cooke

تحقق‌های گوناگون مقاومت براساس روند توزیع مقاومت (واریوگرام) است و به‌منظور محدودکردن مدل‌های ایجادیه به مدل مطلوب از نقاط کنترلی همچون مقاومت چاه‌ها استفاده می‌شود. در روش‌های تصادفی امکان تولید خروجی‌های متعدد که همگی به داده‌های چاهی مقید شده‌اند، وجود دارد. در نتیجه امکان بررسی عدم قطعیت با آمارهای اولیه مانند واریانس وجود دارد. ویژگی دوم این روش حجم محاسباتی بسیار بالاتر نسبت به روش‌های قطعی می‌باشد (Alvez et al., 2014). نحوه انجام وارون‌سازی تصادفی در نرم افزار پترل در پیوست آمده است.



شکل ۳. (a) برازش سرعت موج P در برابر مقاومت صوتی (b) برازش سرعت موج S در برابر مقاومت صوتی (c) برازش چگالی در برابر مقاومت صوتی

است از درون‌یابی داده‌های چاه (اجرای یک فیلتر پایین‌گذر بر روی داده‌های چاه برای بدست آوردن مدل اولیه در اغلب موارد ضروری است) بدست آید. ابتدا یک مدل زمین‌شناسی فرضی برای منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود و سپس با استفاده از موجک لرزه‌ای، رد لرزه (به معنی منحنی ثبت‌شده، واژ ثبت شده در فرهنگستان برای Seismic trace) مصنوعی حاصل از این مدل ساخته می‌شود و با رد لرزه واقعی مقایسه می‌شود. این مقایسه در یک روند تکرار قرار می‌گیرد و با هر تکرار مدل اولیه بروزرسانی می‌شود. این بروزرسانی تا زمانی ادامه می‌یابد که بهترین تطابق بین مدل و رد لرزه واقعی ایجاد گردد. شکل ۲ الگوریتم وارون‌سازی بر پایه مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۲. الگوریتم وارون‌سازی بر مبنای مدل (Russell, 1988)

با توجه به اینکه در این روش، عمل وارون‌سازی مستقیماً روی داده لرزه‌ای ثبت شده انجام نمی‌شود امکان ارائه نتایج خارج از انتظار وجود دارد. به عبارت دیگر، ممکن است نتیجه وارون‌سازی، یک مدل با تطابق بسیارخوب با داده لرزه‌ای ثبت شده باشد اما این مدل با مدل واقعی زمین مغایرت داشته باشد. دلیل این پدیده این است که سری‌های مقاومت صوتی مختلف میتواند منجر به تولید سری‌های زمانی مشابه گردند. بنابراین در روش وارون‌سازی بر پایه مدل با نوعی عدم یکتایی روبرو هستیم (Russell, 1988).

۴.۲. وارون‌سازی تصادفی

در روش‌های قطعی وارون‌سازی هدف کمینه‌سازی یک تابع میان مدل‌های مصنوعی و واقعی لرزه‌ای می‌باشد، ولی در روش‌های تصادفی که برپایه اصول زمین‌آماري هستند، هدف ایجاد

۳. ایجاد و بررسی مدل‌ها

در گام بعدی مدل‌های توزیع مقادیر پارامترهای پتروفیزیکی، ژئومکانیکی و مکانیک سنگی در حجم و نیز در گستره جغرافیایی منطقه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. خروجی این تحلیل‌ها بصورت مدل‌های سه بعدی و نقشه‌هایی است که توزیع حجمی و مکانی (جغرافیایی) نقاط دارای استحکام و صلاحیت (برای حفر چاه‌های بهره برداری جدید) کمتر در پوش سنگ را نشان می‌دهد. البته برای احراز صلاحیت حفاری، خواص مکانیکی مناسب برای پوش سنگ به تنهایی کافی نیست و مکانیسم تله نیز در منطقه مورد نظر باید قابل قبول باشد.

جدول ۱. روابط استفاده شده برای محاسبه پارامترهای

ژئومکانیکی و مکانیک سنگی

پارامترها	روابط
مدول برشی	$G = \rho V_s^2$
مدول بالک	$K = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$
نسبت پواسون	$PR = \frac{1}{2} \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)}$
مدول یانگ و مدول یانگ موثر	$E_{dyn} = \frac{\rho V_s (3V_p^2 - V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}$ $E_{effective} = \frac{E_{dyn}}{1 - PR}$
نسبت تنش بسته شدن	$CSR = \frac{PR}{1 - PR}$

در این مقاله موضوع دوم یعنی مکانیسم تله برای هر یک از نقاط مذکور مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین تعیین نقاط مستعد پوش سنگ و پیشنهاد حفاری در این نقاط لزوماً به معنی امکان پذیری حفاری در این نقاط نخواهد بود. چرا که ناهمواری‌ها و دسترسی‌ها در سطح زمین، امکان انجام عملیات حفاری جهت دار، تکنولوژی حفاری موجود، پنجره ایمن گل و سایر عوامل لزوماً این امکان را فراهم نمی‌نماید.

۱.۳. ایجاد مدل‌های پتروفیزیکی در حجم

پوش سنگ

تمام مدل‌های ژئومکانیکی و مکانیک سنگی که در ادامه به آنها اشاره خواهیم کرد به سه پارامتر پتروفیزیکی سرعت موج

فشارشی (V_p)، سرعت موج برشی (V_s) و چگالی ($Density$) وابسته هستند. بنابراین اولین قدم ایجاد این مدل‌ها می‌باشد. این مدل‌ها از برازش منحنی‌های این سه پارامتر با مقاومت صوتی ایجاد شدند. شکل (۳) این منحنی‌ها را به همراه روابطی که از برازش‌ها به دست آمده نشان می‌دهد. روابط بدست آمده از برازش منحنی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. روابط بدست آمده از برازش منحنی برای پارامترهای

ژئومکانیکی، مکانیک سنگی و پتروفیزیکی

پارامترها	روابط بدست آمده از برازش به همراه میزان انطباق
سرعت موج P	$V_p = 0.267738AI + 1404.61$ ($R^2 = 0.896$)
سرعت موج S	$V_s = 0.094768AI + 1209.33$ ($R^2 = 0.993$)
چگالی	$Density = 4.90846 \times 10^{-5} AI + 1.9650$ ($R^2 = 0.841$)
نسبت پواسون	$PR = 5.1098 \times 10^{-5} AI + 7.308 \times 10^{-10} AI^2$ ($R^2 = 0.824$)
مدول یانگ	$E = 0.00155908AI + 4.35805$ ($R^2 = 0.916$)

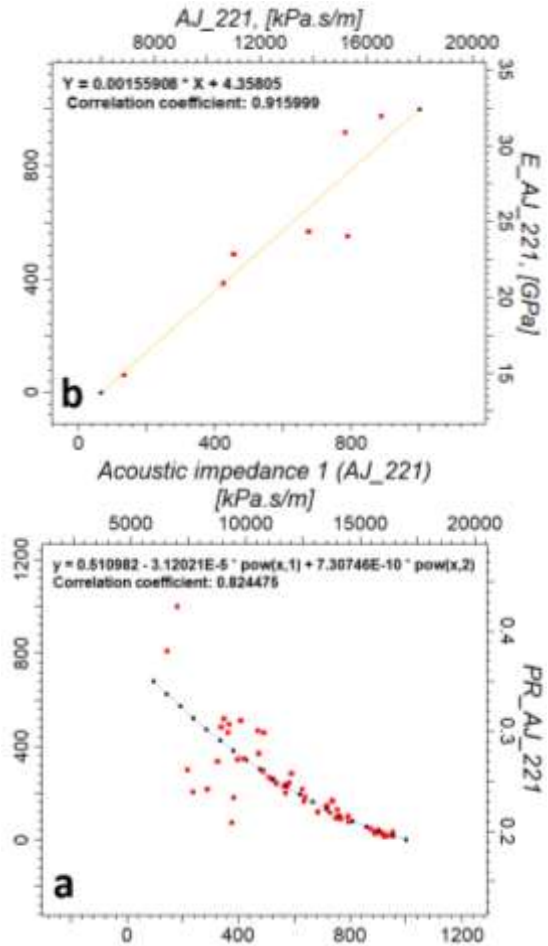
پس از وارد کردن لاگ‌های سرعت موج فشارشی، برشی و چگالی به داخل نرم‌افزار و اعمال فرآیند بزرگ‌مقیاس‌سازی بر روی آنها، مدل‌های سه‌بعدی این پارامترها در حجم مدل ایجاد شد.

۲.۳. ایجاد مدل ژئومکانیک و مکانیک سنگ در

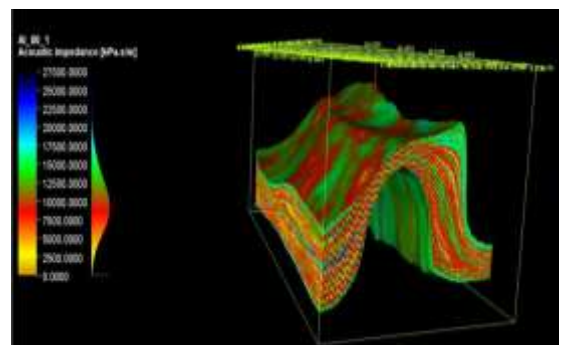
حجم پوش سنگ

به علت نبود مقادیر آزمایشگاهی (بدست آمده از مغزه‌ها) از پارامترهای ژئومکانیکی و مکانیک سنگی، برای ایجاد این مدل‌ها باید از روابط اصلی که میان پارامتر ژئومکانیکی و مکانیک سنگی با مقادیر سرعت و چگالی تعریف شده است، استفاده کرد. اما در برخی موارد که این روابط طولانی باشند، محاسبات در محیط ماشین حساب نرم‌افزار پترل می‌تواند با خطا همراه بوده و خروجی نامطلوبی را ایجاد کنند که در این صورت استفاده از روش برازش منحنی تنها روش در دسترس است. در این روش، به وسیله برازش بر یک نمودار خطی یا غیرخطی، یک رابطه میان متغیر مورد نظر و مقاومت صوتی بدست می‌آید که از این رابطه برای تبدیل حجم مقاومت صوتی به حجم متغیر مورد نظر استفاده

می‌شود. محیط مورد استفاده برای این تبدیل ماشین حساب نرم افزار پترل بود که قابلیت تعریف روابط ریاضی مختلف را دارد.



شکل ۴. (a) برازش نسبت پواسون در برابر مقاومت صوتی (b) برازش مدول یانگ در برابر مقاومت صوتی



شکل ۵. مدل سه بعدی مقاومت صوتی موج P

جدول (۱) روابط ژئوفیزیک و مکانیک سنگی استفاده شده برای این تبدیل‌ها را نشان می‌دهد که به‌طور کامل از پژوهش چیبوزه و همکاران (۲۰۲۱) آورده شده است. از میان پارامترهای بیان شده در جدول (۱) مدول برشی، مدول بالک، مدول یانگ موثر و نسبت تنش‌بسته‌شدن با استفاده از روابط بالا برای حجم مدل بدست آمدند و پارامترهای نسبت پواسون و مدول یانگ از روش برازش بر نقاط این پارامترها در برابر مقاومت صوتی آنها در چاه بدست آمدند. منحنی‌های بدست آمده از برازش به همراه روابطی که از برازش‌ها به دست آمده در شکل (۴) قابل مشاهده‌اند. به کمک آنچه که در بخش قبل برای هر پارامتر شرح داده شد، ابتدا مدل (سه بعدی) مقاومت صوتی موج P (شکل ۵) به وسیله وارون‌سازی تولید شد. سپس مدل‌های سرعت موج P و S و چگالی بدست آمد که در شکل (۶) مقطع سه‌بعدی این مدل‌ها ارائه شده است. در ادامه به کمک روابط بین این سه پارامتر و شاخص‌های ژئومکانیکی و مکانیک سنگی، مقادیر این شاخص‌ها در حجم میدان (میان دو افق گچساران-۷ و آسماری) بدست آمد. مقطعی از شاخص‌های مدول برشی، مدول بالک، مدول یانگ موثر، نسبت پواسون و نسبت تنش بسته‌شدن را در شکل (۷) مشاهده می‌کنید.

۴. بررسی نقشه‌های پتروفیزیکی، ژئومکانیکی و مکانیک سنگی

به منظور بررسی مستقیم ویژگی‌های ژئومکانیکی، مکانیک سنگی و پتروفیزیکی پوش سنگ با استفاده از افق تفسیری پوش سنگ، نقشه میانگین از هر پارامتر برای پوش سنگ ایجاد گردید. باید توجه داشت که یک گسل با راستای تقریبی شمال غرب به جنوب شرق را که در انتها به سمت جنوب گرایش دارد و در تمام نقشه‌ها به شکل دو خطواره مشاهده می‌شود، به وسیله نقاط سفید رنگ در تمام نقشه‌ها علامت گذاری شده است. نواحی میان این دو خطواره بخشی از پوش سنگ نبوده و مورد بررسی قرار نگرفته است. در ادامه با ایجاد و بررسی دقیق نقشه‌ها، گزارشی از نواحی ضعف و قوت پوش سنگ ارائه شده است. جدول ۲ محدوده تغییرات و میانگین هر پارامتر را به صورت خلاصه نشان می‌دهد.

استحکام هم مربوط به ناحیه‌ای در شرق است که با رنگ زرد مشخص شده و کمترین مقدار مقاومت را دارد.

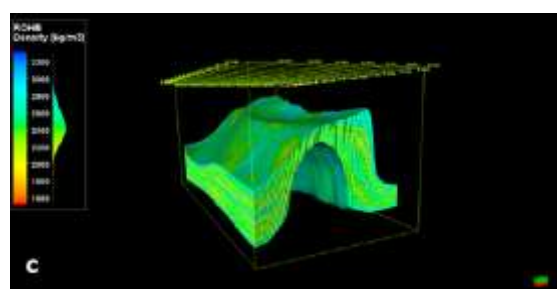
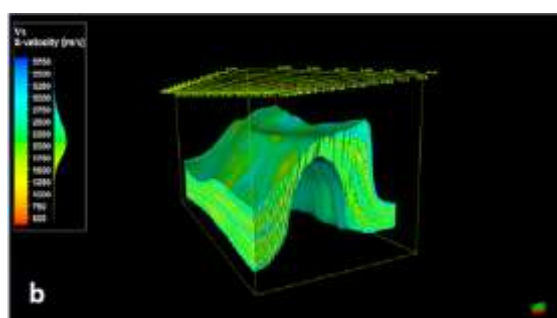
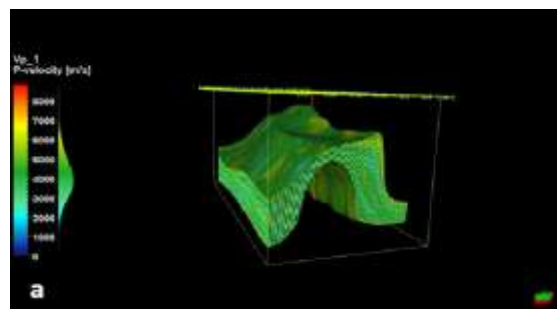
شکل (b۸) توزیعی از مقادیر سرعت موج P را نشان می‌دهد. نواحی که سرعت پایینی دارند و نشان‌دهنده تراکم پایین‌تر و مقاومت کمتر در برابر تنش است. این نواحی به وسیله خطوط قرمز جدا شده‌اند. با توجه به این توزیع می‌توان گفت که بیشترین ضعف در شرق پوش سنگ است که کمترین سرعت را دارد. شکل (c۸) سرعت موج K را در سطح پوش سنگ نشان می‌دهد. در نواحی با سرعت موج K کمتر، استحکام سنگ در برابر تنش‌های جانبی کمتر می‌باشد و براین اساس این نواحی تحت تنش جانبی سریعتر شکسته و تغییر شکل می‌دهند. بنابراین نواحی که با خطوط نارنجی جدا شده‌اند و با طیف رنگ‌های زرد تا قرمز نشان داده شده‌اند، نسبت به سایر نواحی ضعیف‌تر بوده و استحکام پایین‌تری دارند.

در شکل (d۸) نقشه توزیع چگالی پوش سنگ نمایان است. نواحی که به رنگ زرد تا قرمز چگالی پایین‌تر از مقدار $۲/۴۴$ نشان می‌دهند، را می‌توان نواحی ضعف در نظر گرفت زیرا چگالی پایین نشان‌دهنده صلیبت و استحکام پایین‌تر است. این نواحی ضعیف به وسیله خطوط آبی مشخص شده‌اند. کمینه چگالی که ضعیف‌ترین ناحیه را دربر می‌گیرد در ناحیه‌ای در شرق میدان با رنگ قرمز نشان داده شده است.

جدول ۲. مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین پارامترهای

ژئومکانیکی، پتروفیزیکی و مکانیک سنگی در سطح پوش سنگ

پارامترها	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین
مقاومت صوتی موج P	KPas/m	۷۸۲۶/۹	۱۲۲۷۱/۴	۱۰۰۴۹/۲
سرعت موج P	m/s	۳۵۰۰	۴۶۹۰	۴۰۹۵
سرعت موج S	m/s	۱۹۵۱/۱	۲۳۷۲/۳	۲۱۶۱/۷
چگالی	g/cm3	۲/۳۵	۲/۵۷	۲/۴۶
مدول برشی	GPa	۹/۸	۱۵/۵	۱۲/۶۵
مدول یانگ موثر	GPa	۳۹/۸	۵۷/۸	۴۸/۸
مدول بالک	GPa	۲۱/۶	۴۳/۱	۳۲/۳
نسبت پواسون	-	۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۲۹
نسبت تنش بسته‌شدن	-	۰/۳۴	۰/۵۳	۰/۴۳

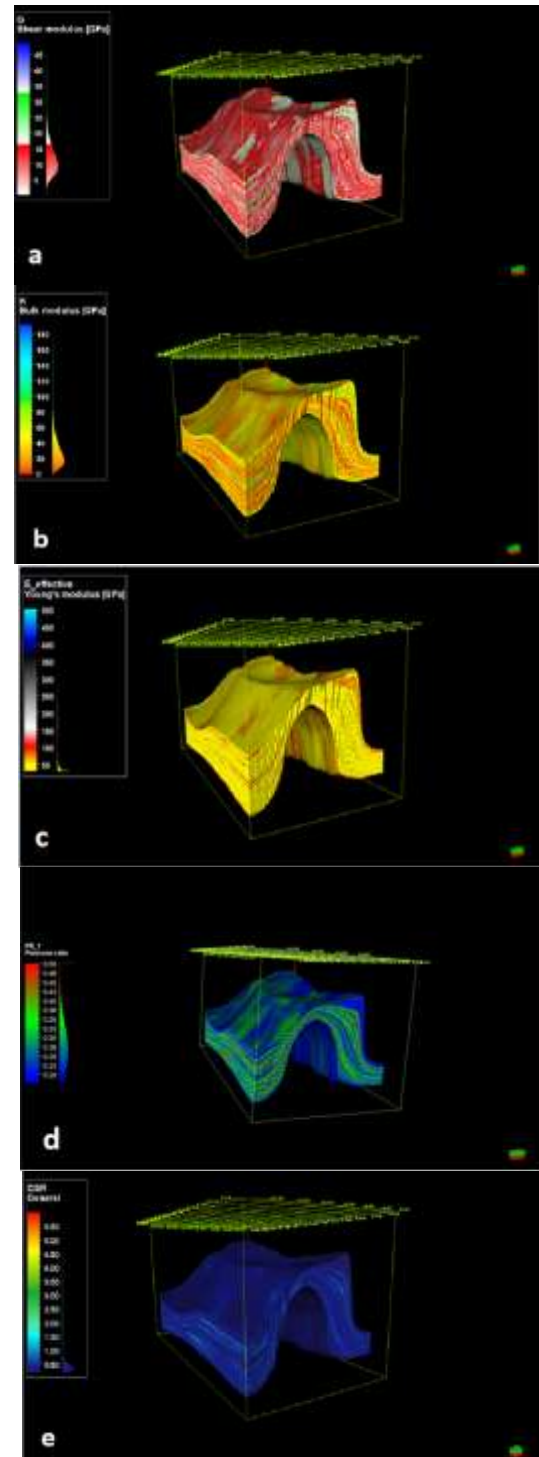
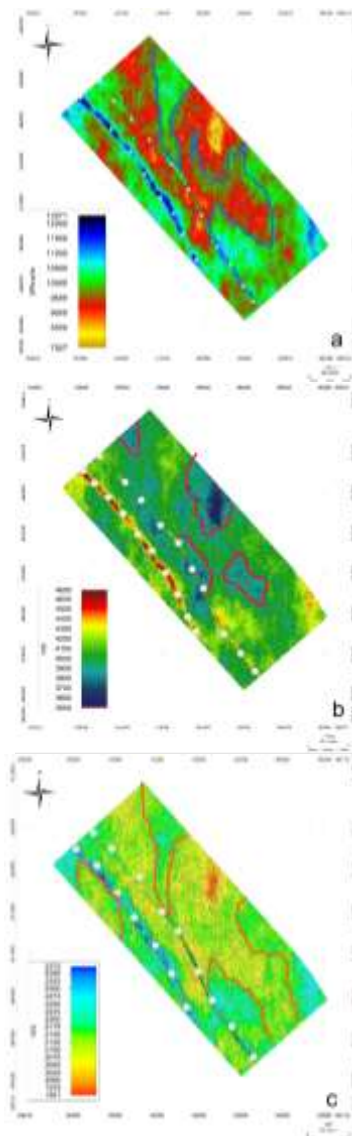


شکل ۶. (a) مدل سه بعدی سرعت موج P (b) مدل سه بعدی سرعت موج S (c) مدل سه بعدی چگالی

۱.۴. بررسی نقشه‌های پتروفیزیکی

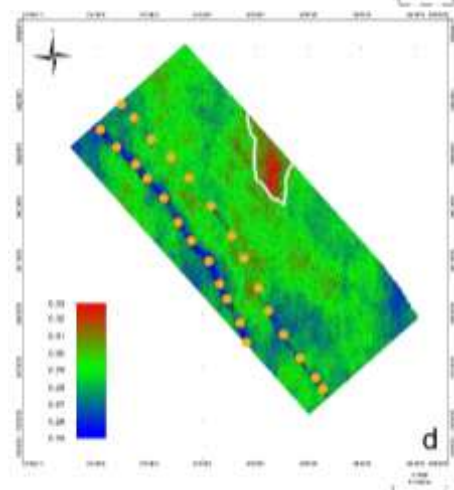
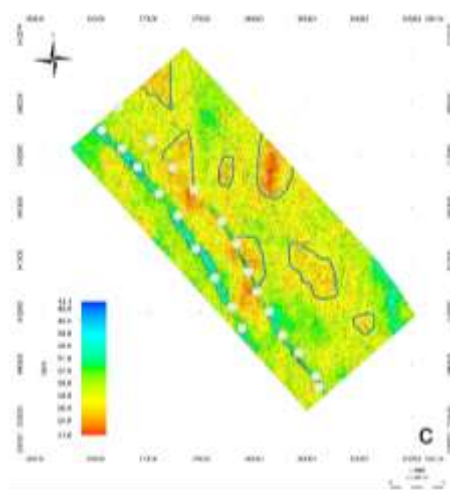
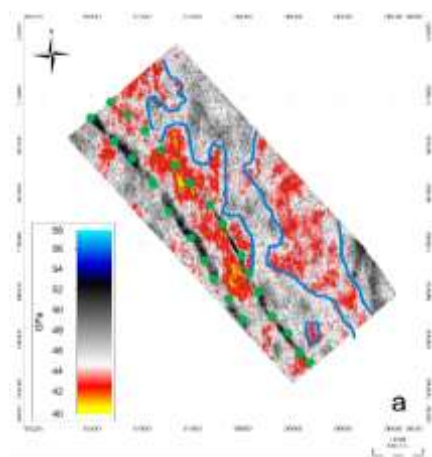
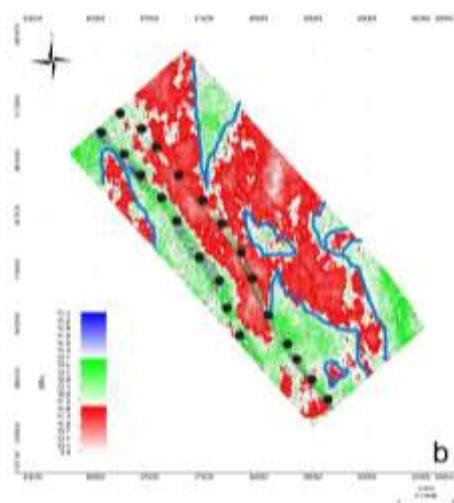
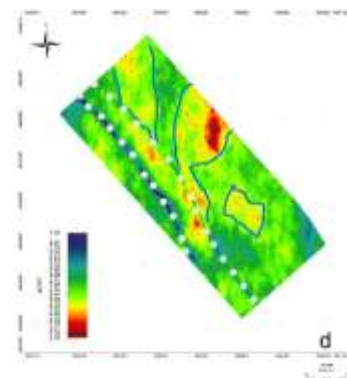
شکل (a۸) نقشه توزیع مقاومت صوتی موج P را در سطح پوش سنگ نشان می‌دهد. نواحی که مقادیر کمتری از مقاومت صوتی را دارا باشند می‌توانند به معنی وجود توده سنگ‌هایی با چگالی و یا سرعت موج P کمتر باشند که به معنی مقاومت کمتر آنها در برابر تنش است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در شکل (a۸) نواحی با سرعت پایین‌تر نواحی ضعف پوش سنگ هستند که در زمان اعمال تنش، سریعتر شکسته شده و یکپارچگی خود را از دست می‌دهند. بر همین اساس نواحی که با خطوط آبی مرزبندی شده‌اند نواحی ضعف پوش سنگ هستند و می‌توان گفت که دو ناحیه عمده یکی در شمال شرق و دیگری در نواحی جنوب و جنوب غرب پوش سنگ استحکام بیشتری دارند. کمترین

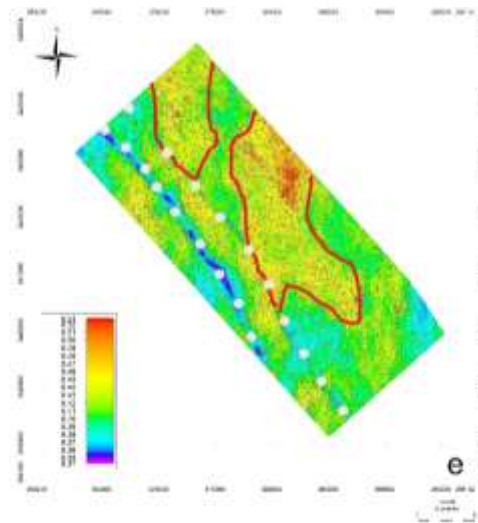
(c) مدول یانگ موثر (d) نسبت پواسون (e) نسبت
تنش بسته شدن



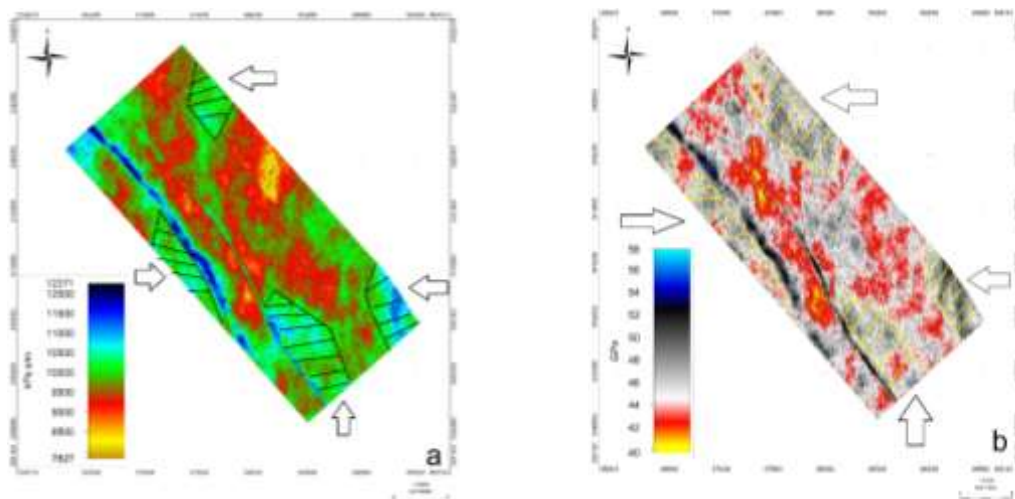
شکل ۷. مدل سه بعدی پارامترها: (a) مدول برشی (b) مدول یانگ موثر (c) نسبت پواسون (d) نسبت تنش بسته شدن (e) نسبت تنش بسته شدن

شکل ۸. نقشه توزیع پارامترهای (a) مقاومت صوتی موج P
(b) سرعت موج P (c) سرعت موج S (d) چگالی در سطح
پوش سنگ





شکل ۹. نقشه توزیع پارامترهای ژئومکانیکی در سطح پوش سنگ (a) مدول یانگ موثر (b) مدول برشی (c) مدول بالک (d) نسبت پواسون (e) نسبت تنش بسته شدن در سطح پوش سنگ



شکل ۱۰. نواحی دارای صلاحیت و استحکام در نقشه توزیع برای دو پارامتر اساسی در سطح پوش سنگ (a) مقاومت صوتی موج (b) مدول یانگ موثر

که به معنی مقاومت و همزمان شکل پذیری مناسب در برابر تنش در آن ناحیه است. در شکل (۹a) نواحی که با خطوط آبی جدا شده‌اند و طیف رنگی قرمز تا زرد را دارند، کمینه مدول یانگ موثر را دارا بوده و کمترین استحکام را در مواجهه با تنش دارند. بر اساس این توضیحات این نواحی شکل (۹a) در مواجهه با تنش، سریعتر از سایر نواحی مستعد شکستگی بوده و زودتر یکپارچگی خود را از دست می‌دهند.

۲.۴. بررسی نقشه‌های پتروفیزیکی

مدول یانگ موثر می‌تواند نشانگری مناسب برای نشان دادن نواحی با یکپارچگی کمتر نسبت به سایر نواحی باشد. درواقع این نشانگر در نواحی بیشینه است که همزمان مقدار مدول یانگ و نسبت پواسون در آن بیشینه باشد، و در نواحی کمینه است که این دو کمیت در آن کمینه باشند. بنابراین اگر ناحیه‌ای مدول یانگ و نسبت پواسون بالایی داشته باشد، مدول یانگ موثر بالایی دارد

محدوده تغییرات مدول برشی در سطح پوش سنگ بالا نبوده و می توان گفت بیشتر نواحی پوش سنگ در مواجه با تنش برشی رفتار یکسانی دارند، با این حال برخی از نواحی که در شکل (b۹) با طیف رنگی سبز تا آبی نشان داده شده اند و به وسیله خطوط آبی جداسازی شده اند، مدول برشی بالاتری داشته و نسبت به تنش های برشی مقاومت بالاتری از خود نشان می دهند و استحکام بالاتری نسبت به سایر نواحی دارند.

مدول بالک که میزان مقاومت توده سنگ را در برابر تراکم پذیری نشان می دهد، در بیشتر نواحی شکل (c۹) مقادیر متوسط تا بالایی را در برمی گیرد، با این حال در نواحی با رنگ قرمز که به وسیله خطوط آبی جدا شده اند کمینه است. این نواحی کمترین مقاومت را در برابر تراکم پذیری داشته و تحت تنش سریعتر از سایر نواحی متراکم شده و تغییر شکل می دهند.

با توجه به شکل (d۹) محدوده تغییرات نسبت پواسون در سطح پوش سنگ بالا نیست اما یک محدوده بیشینه نسبت پواسون در شرق پوش سنگ با طیف رنگی قرمز دیده می شود که به وسیله خطوط سفید جداسازی شده است. پوش سنگ به طور کلی مقادیر مناسبی از نسبت پواسون را داراست، اما بیشینه بودن نسبت پواسون در یک ناحیه نشان از ضعف آن ناحیه در برابر تنش است زیرا تحت تنش دچار تغییر شکل بیشتری شده و یکپارچگی پوش سنگ در آن ناحیه را تحت تاثیر قرار می دهد.

۳.۴. بررسی پارامتر نسبت تنش بسته شدن (CSR)

به طور کلی می دانیم که در شرایط مطلوب، پوش سنگ باید مقادیر متوسط تا پایینی از نسبت تنش بسته شدن را داشته باشد، که با توجه به نقشه نشان داده شده در شکل (e۹)، بیشتر نواحی پوش سنگ مقادیر متوسط تا پایینی از این شاخص را دارند. مقدار بالای این شاخص در یک ناحیه نشانه ضعف محسوب می شود، زیرا در این نواحی شکل پذیری و تمایل به بسته شدن شکستگی ها بیشتر بوده که می توانند منجر به تغییر شکل شدید در این نواحی و از بین رفتن یکپارچگی پوش سنگ شوند. بنابراین در ناحیه ای که به رنگ قرمز تا زرد نشان داده شده و به وسیله خطوط قرمز جدا شده، شکل پذیری و تمایل به بسته شدن شکستگی بیشتر است. این ناحیه در شرق پوش سنگ واقع است.

۵. نتیجه گیری

براساس ارزیابی مدل های سه بعدی و نقشه های پتروفیزیکی،

ژئومکانیکی و مکانیک سنگی مشاهده شد که تغییرات در اغلب این شاخص ها کمینه است، با این وجود می توان برای برخی از نواحی پوش سنگ صلاحیت (استحکام) بالاتری را لحاظ کرد. با توجه به بیشینه بودن پارامترهای پتروفیزیکی در نواحی شمال شرق، غرب، جنوب غرب و جنوب پوش سنگ و همچنین کمینه بودن نسبت تنش بسته شدن و مقادیر متوسط نسبت پواسون در کنار مقادیر بالاتر مدول یانگ موثر، مدول بالک و مدول برشی در این نواحی، می توان گفت این نواحی بالاترین استحکام و صلاحیت (برای حفر چاه های بهره برداری جدید) در پروژه های آتی توسعه میدان را دارا می باشند. اما باید توجه کرد که یک گسل در راستای شمال غرب به جنوب شرق که در انتها به سمت جنوب تمایل پیدا می کند، وجود داشته که پیوستگی و یکپارچگی پوش سنگ را تحت شعاع قرار می دهد. بنابراین نواحی اطراف گسل محل مناسبی برای برنامه های حفاری و توسعه میدان نمی باشد. با تجمیع خروجی مدل ها، نواحی دارای استحکام در دو شکل a_{10} و b_{10} که به ترتیب نقشه مقاومت صوتی موج P و مدول یانگ موثر هستند، نشان داده شده اند. نواحی میان ۲ خط گسل بخشی از پوش سنگ نبوده و به همین دلیل در نظر گرفته نشده اند.

۶. سپاس گذاری

از شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب برای در اختیار قرار دادن داده مورد نیاز کمال تشکر و قدردانی بعمل می آید.

۷. مراجع

- [1] Alves, F., Almeida, J. A., & Silva, A. P. (2014). Simulation of acoustic impedance images by stochastic inversion of post-stack seismic reflection amplitudes and well data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 121, 52-65.
- [2] Al-Najm, F. M., Al-Shahwan, M. F., & Al-Beyati, F. M. (2017). Petrophysical Characteristics and Reservoir Modeling of Mishrif Formation at Noor Oil Field, South of Iraq. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 7(1), 210-235.
- [3] Ashtari, A., Lekzai, A. R., Mehdipour, Z., (2017), Interpretation of Ilam and Skhadami horizons of 3D seismic data of Aghajari field, National Company for Southern Oil-rich Regions.

Basin: A. Zrelli et al. Pure and Applied Geophysics, 183(3), 971-991.

[14] Saedi, G., Soleimani, B., Samani, B., & Arzani, A. (2022). The interaction between faults and in-situ stress on the kinematic and subsurface natural fracture of Aghajari oilfield in southwest of Iran. Journal of Petroleum Science and Engineering, 208.

[۱۵] شرطعلی، د.، (۱۳۸۸)، ارزیابی توالی پوش سنگ (بخش ۱ سازند گچساران) مخزن آسماری میدان نفتی کرنج، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

[۱۶] امین زاده، سیدعلی، میرجردوی، نوید، نوری طالقانی، مرتضی (۱۳۹۲) مدل سازی استاتیک مخازن نفت و گاز و تفسیر ساینمیک با استفاده از نرم افزار PETREL. (کتاب) نشر آژاده.

[۱۷] فتحی حسن، پورکرمانی محسن، آبدیده محمد، بوذری سهیلا، الماسیان محمود. (۱۳۹۷). تغییرات میدان تنش و رژیم گسلش جهت تعیین امکان فعالیت مجدد گسل ها در پوش سنگ و مخزن بر اثر تولید و فشارافزایی در میدان نفتی آغاجاری جنوب غرب ایران. دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۲۳۵-۲۵۱.

[۱۸] زهرا آقایی خیرآبادی (۱۳۹۸). تعیین لیتولوژی و محتوای سیال با استفاده از داده های لرزه ای پیش از برانبارش و داده های چاهنگاری در یکی از میادین جنوب غرب ایران. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خوارزمی.

۸. ضمیمه (پیوست)

۱.۸. وارون سازی تصادفی در نرم افزار پترل

اساس روش وارون سازی تصادفی در نرم افزار پترل، شبیه سازی گوسی متوالی (SGS) است. در این روش ابتدا پیوستگی فضایی پارامتر مورد نظر توسط نمودارهای واریوگرام مدل می شود. سپس این مدل ها به عنوان ورودی شبیه سازی زمین آماری مورد استفاده قرار می گیرند. در ادامه نرم افزار بر اساس شبیه سازی گوسی متوالی، ابتدا از یک سلول خاص (مقادیر مشخص شده از قبل همچون مقادیر چاه) شروع کرده و در آن سلول با توجه به مقایسه منحنی احتمال حضور داده در آن نقطه و داده واقعی، بخشی از داده را غیر قابل قبول تشخیص داده و بقیه را که احتمال بالاتری دارند را تایید می کند و سپس به صورت تصادفی به

[4] Ugbor, C. C., Odong, P. O., & Akpan, A. S. (2021). Application of pre-stack seismic waveform inversion and empirical relationships for the estimation of geomechanical properties in Ruby field, central swamp depobelt, Onshore Niger Delta, Nigeria. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 11(6), 2389-2406.

[5] Darvishzadeh, A. (2009). Geology of Iran: stratigraphy, tectonic, metamorphism, magmatism. Amir Kabir Publication Institute, Tehran.

[6] Hao, S., Huang, Z., Liu, G., & Zheng, Y. (2000). Geophysical properties of cap rocks in Qiongdongnan Basin, South China Sea. Marine and Petroleum Geology, 17(4), 547-555.

[7] Nazari Sarem, M., & Riahi, M. A. (2020). Geomechanical unit modeling using seismic and well log data in one of the southwestern Iranian oilfields. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 10(7), 2805-2813.

[8] Mehrgini, B., Memarian, H., Dusseault, M. B., Ghavidel, A., & Heydarizadeh, M. (2016). Geomechanical characteristics of common reservoir caprock in Iran (Gachsaran Formation), experimental and statistical analysis. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 34, 898-907.

[9] Wali, S. T., & Baqer, H. A. (2020). A practical method to calculate and model the petrophysical properties of reservoir rock using petrel software: A case Study from Iraq. Iraqi J. of Science, 2640-2650.

[10] Fukugawa, N. (2022). Effects of the quality of science on the initial public offering of university spinoffs: evidence from Japan. Scientometrics, 127(8), 4439-4455.

[11] Song, J., & Zhang, D. (2013). Comprehensive review of caprock-sealing mechanisms for geologic carbon sequestration. Environmental science & technology, 47(1), 9-22.

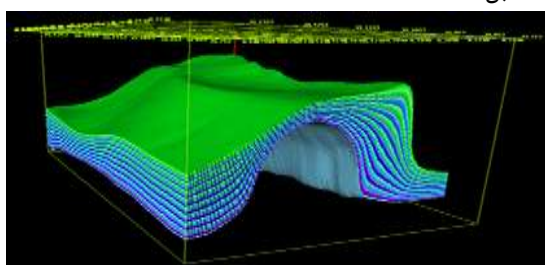
[12] IEAGHG (2011) "Caprock Systems for CO₂ Geological Storage", Technical Report.

[13] Zrelli, A., Amiri, A., Sebei, K., Abidi, O., Barhoumi, N., & Inoubli, M. H. (2026). Integrated Seismic Inversion and Stratigraphic Modeling for Trap-Seal System and Reservoir Characterization: A Case Study of the Acacus Formation, Ghadames

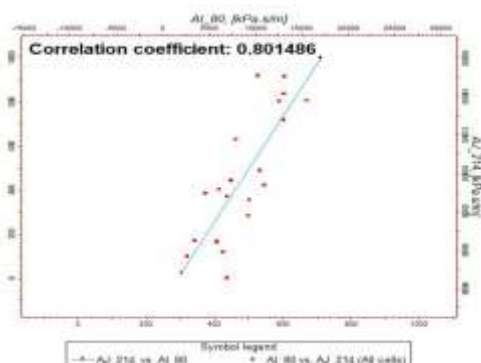
چاه‌ها و رد لرزه‌ای مجاور این چاه، موجک انطباقی در پنجره تولید موجک نرم‌افزار پترل ایجاد گردید.

۷. تولید واریوگرام: به منظور تفهیم روند توزیع مقادیر مقاومت صوتی، واریوگرام مقاومت صوتی موج فشارشی باید ایجاد شود. با توجه به تولید یک روند مدل، می‌توان واریوگرام را از خود این روند مدل استخراج نمود.

۸. وارد کردن داده‌ها و انجام وارون‌سازی: مقادیر ورودی در وارون‌سازی تصادفی در نرم‌افزار پترل، روند مدل، شبکه سه‌بعدی (گرید)، مکعب‌لرزه‌ای پس‌برآینارش، موجک، واریوگرام و نقاط کنترلی چاه (لاگ مقاومت در چاه‌ها) می‌باشد. درنهایت با تنظیم تعداد مدل‌های خروجی در هر وارون‌سازی، تعداد مسیرهای تصادفی و تعداد تحقق‌های قابل تولید با یک مقدار (دانه) و تکرار وارون‌سازی، مدلی با انطباق بالا با لاگ مقاومت صوتی چاه‌ها ایجاد گردید. میزان انطباق به کمک نمودار میان مقاومت موج P در چاه با مدل مقاومت موج P بررسی گردید و انطباق ۸۰ درصد مشاهده شد. از این مدل برای ایجاد سایر مدل‌های ژئومکانیکی، پتروفیزیکی و مکانیک سنگی استفاده گردید. این نمودار در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.



شکل ۱۱. شبکه سه‌بعدی ایجاد شده میان دو افق
گچساران-۷ و آسماری



شکل ۱۲. میزان انطباق مدل مقاومت صوتی موج P با مقدار آن در چاه

سلول‌های بعدی می‌رود که در آنجا با توجه به مقدار تعیین شده برای سلول قبلی (دانه) و داده‌های موجود، عدد جدیدی در نظر می‌گیرد و تا انتها پیش می‌رود. در این روش تصادفی به دلیل بهره‌گیری از روش شبیه سازی گوسی متوالی جواب‌ها تصادفی بوده و هر جواب یا تحقق قدری با دیگری متفاوت است زیرا نقطه آغاز محاسبات یا همان دانه (سلول) تغییر می‌کند. روش درون‌بایی در این نوع وارون‌سازی مبتنی بر روش کریجینگ است که از واریوگرام نیز برای اصلاح توزیع مقادیر بهره می‌گیرد. در نهایت با مقایسه مقادیر ردلرزه‌ای مصنوعی با رد لرزه‌ای واقعی بهترین خروجی‌ها را ارائه می‌کند (امین زاده و همکاران، ۱۳۹۲). به منظور انجام وارون‌سازی تصادفی بر روی داده‌های لرزه‌ای در نرم‌افزار *Petrel* ۲۰۱۸ مراحل زیر به ترتیب اجرا شد:

۱. وارد کردن و آماده‌سازی داده‌ها
۲. یکسان‌سازی بعد داده‌های لرزه‌ای و چاهی (به منظور تبدیل چاه‌ها از بعد مکان به زمان از چک‌شات استفاده شد)
۳. تفسیر افق‌ها: دستیابی به هندسه پوش سنگ و محدود سازی زمانی حجم داده لرزه‌ای (میان دو افق گچساران-۷ و آسماری) از نیازهای این پژوهش بود.
۴. ساخت مدل ساختمانی: اولین مرحله در ایجاد مدل ساختمانی، تعریف ابعاد و موقعیت مدل به کمک افق‌های تفسیری و حجم مکعب لرزه‌ای است. به کمک یک مرز که قبلاً به دور مکعب لرزه‌ای رسم شده و افق‌های تفسیری که در بالا گچساران-۷ و در پایین آسماری می‌باشد، شبکه در بعد زمانی (راستای z) و در راستای x و y محدود شده است. در مرحله بعد با توجه به تنوع ساختاری و زمین‌شناسی محدوده و متناسب با ظرفیتهای کامپیوتر مورد استفاده و حجم داده‌ای که تولید می‌شود ابعاد سلول‌ها ۵۰ در ۵۰ متر و تعداد لایه‌ها ۵۰ لایه تعریف شد و یک مدل ساختمانی با تعداد سلول‌های ۶۶۶ در راستای x و ۶۹۵ در راستای y ایجاد گردید. شکل (۱۱) نمایی از این شبکه ایجاد شده را نشان می‌دهد.

۵. ساخت مدل روند مقاومت صوتی: بر اساس لاگ مقاومت صوتی تولید شده در چاه‌ها (در نتیجه ضرب کردن لاگ چگالی در لاگ صوت)، یک مدل روند (توزیع اولیه مقاومت در سراسر میدان) ایجاد شد، که در قسمت داده‌های ورودی در وارون‌سازی تصادفی مورد استفاده قرار گرفت.

۶. استخراج موجک: با استفاده از لاگ بازتاب‌لرزه‌ای در یکی از