



مقاله پژوهشی

بررسی میزان ارتباط توزیع شدت شکستگی با پارامترهای ژئومکانیکی در مخزن سروک یکی از میادین فروبار دزفول

خدیجه هاشمیان^۱؛ ولی مهدی پور^{۲*}

۱- گروه ژئومکانیک، شرکت پارس پترو زاگرس

۲- گروه علوم زمین، شرکت اکتشاف و تولید انرژی دانا

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۰۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2023.394812.1195

واژگان کلیدی	چکیده
سازند سروک، شدت شکستگی، نشانگر لرزه‌ای، مدل سه‌بعدی، تخلخل	در این مطالعه، توزیع شدت شکستگی در سازند سروک در یکی از میادین فروبار دزفول و میزان ارتباط آن با پارامترهای ژئومکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های شدت شکستگی به همراه داده‌های مخزنی نظیر تخلخل و داده‌های مربوط به خصوصیات الاستیکی سنگ مورد استفاده قرار گرفت. به منظور توزیع بهتر شدت شکستگی، نشانگرهای لرزه‌ای متعددی ساخته شدند. پس از بررسی میزان ارتباط نشانگرهای لرزه‌ای متعدد با شدت شکستگی، این نشانگرها با استفاده از شبکه عصبی ادغام و به یک پارامتر سه‌بعدی تبدیل گردید تا به عنوان داده ثانویه در توزیع شدت شکستگی مورد استفاده قرار گیرند. پس از ساخت مدل ساختمانی میدان، داده‌های توزیع شدت شکستگی و تخلخل مفید به همراه پارامترهای ژئومکانیکی درشت‌نمایی شده و مورد آنالیز واریوگرافی قرار گرفتند. نگارهای تخلخل مفید، انحراف سرعت صوت (VDL)، ضریب یانگ، ضریب پواسون و مقاومت فشاری تک‌محوری به همراه نگار شدت شکستگی با استفاده از الگوریتم‌های زمین‌آماری به صورت سه‌بعدی توزیع گردیدند تا میزان ارتباط پارامترهای ژئومکانیکی با توزیع شدت شکستگی در مدل سه‌بعدی ساخته شده، مورد بررسی قرار گیرد. این مطالعه نشان داد که ارتباط بالایی مابین پارامترهای ژئومکانیکی و تخلخل مفید وجود دارد، اما ارتباط قابل توجهی مابین پارامترهای ژئومکانیکی با توزیع شدت شکستگی ملاحظه نگردید. همچنین بخش‌های با شدت شکستگی زیاد در سروک بالایی و پایینی ارتباط مشخصی با میزان توزیع تخلخل مفید نشان نمی‌دهند. با توجه به تاثیر فرایندهای دیاژنزی مختلف (براساس نگار انحراف سرعت) در مخزن مورد استفاده، نقش آنها در تغییرات تخلخل محرز بوده و باعث تغییر رفتار سنگ در طول زمان زمین‌شناسی و کاهش ارتباط پارامترهای ژئومکانیکی (وضعیت فعلی) با توزیع شدت شکستگی (وضعیت قبلی) شده است.

منبعی جهت ذخیره و شبکه شکاف به صورت معابری جهت تولید و جریان سیالات مخزنی عمل می‌کنند. شبکه شکاف و شکستگی می‌تواند بر روی کیفیت مخزن اثر مثبت یا منفی داشته باشد. به طور مثال، در رخساره‌های ریزدانه مانند مادستون و وکستون با ایجاد مجاری عبور سیالات به طور چشمگیری تراوایی را افزایش می‌دهد. همچنین در تخلخل‌های قالبی با اتصال قالب‌های انحلالی مجزا موجب افزایش تراوایی می‌شود. با این حال، شکستگی می‌تواند به عبور

۱. پیش‌گفتار
مخازن شکاف‌دار بخش عمده‌ای از مخازن هیدروکربنی موجود در ایران را تشکیل می‌دهند. مطالعات شبکه شکاف (شکستگی) در مخازن شکاف‌دار طبیعی به دلیل نقش آنها در تولید و ایجاد مشکلاتی نظیر هرزروی گل در حین حفاری بسیار حایز اهمیت می‌باشند. وجود دو نوع تخلخل ماتریس و تخلخل شبکه شکاف از خصوصیات این نوع مخازن محسوب می‌شود. در این مخازن معمولاً زمینه و ماتریس سنگ به عنوان

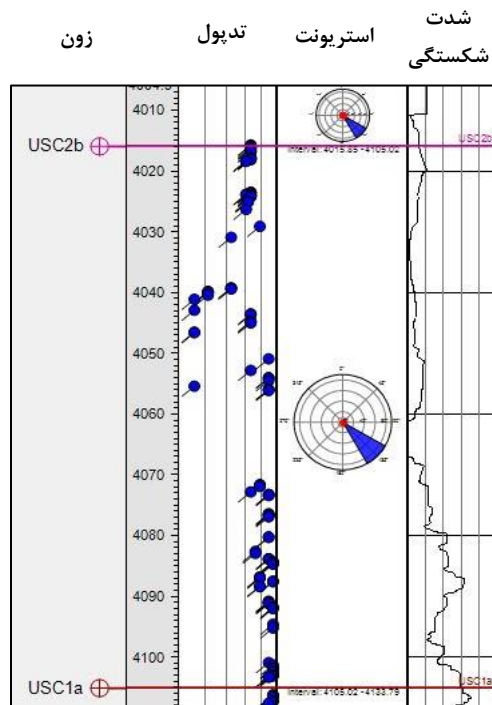
سیالات سیمان‌ساز نیز کمک کرده و موجب سیمانی شدن بیش‌ازپیش رخساره‌ها شده و تخلخل و تراوایی را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. به‌طور کلی، شکستگی‌ها به سطوح ناپیوسته در سنگ گفته می‌شود که به دلیل شکست در سطح سنگ ایجاد می‌شوند و عمدتاً بدون هیچ‌گونه جابه‌جایی یا کمترین جابه‌جایی (کمتر از ۱ سانتی‌متر) بین سطوح شکسته شده می‌باشند. این شکستگی‌ها ممکن است باز بوده یا به‌وسیله سیمان بسته شده باشند، که به همین دلیل ممکن است به‌صورت مجرای برای جریان سیال یا به‌صورت مانعی در جهت عبور سیال عمل نمایند. به‌طور کلی، شکستگی‌ها، به چهار دسته باز، نیمه‌باز، پرشده و حفره‌ای تقسیم می‌شوند که خصوصیات بازشدگی، طول و ماده پرکننده متفاوتی دارند. تراکم شکستگی‌ها در یک مجموعه سیستماتیک را می‌توان با استفاده از میانگین بازشدگی شکستگی و میانگین تعداد شکستگی‌های موجود در یک فاصله نرمال اندازه‌گیری کرد. تراکم شکستگی و شدت شکستگی از مهم‌ترین خصوصیات شبکه شکستگی محسوب می‌شوند. در مطالعات کیفی، مناطق با تراکم بالا توسط شکستگی‌های بسیاری که خوشه‌هایی از شکستگی‌ها را تشکیل می‌دهند، معرفی می‌شوند. از آنجایی که کیفیت جریان سیال در شکستگی‌ها بسیار بهتر است، مطالعه شکستگی‌های مخازن، حتی برای رفع مشکل هدر رفتن و یا نشتی سیال حفاری، حائز اهمیت است. در اکثر مطالعات، تراکم شکستگی به‌صورت تعداد شکستگی‌ها در واحد سطح یا واحد حجم معرفی می‌شود. اگرچه این تعریف قراردادی به‌صورت کیفی زون‌های با شدت شکستگی کم و یا زیاد را نمایش می‌دهد، اما بررسی کمی شکستگی صورت نمی‌گیرد. از آنجایی که شکستگی‌های بلند و یا کوتاه نقش متفاوتی در جریان سیال ایفا می‌کنند، شناسایی آنها ضرورت دارد.

روش‌های متعددی جهت ساده‌سازی و مدل‌سازی سیستم شبکه شکاف توسعه داده شده است. مخازن شکاف‌دار طبیعی از نظر مشخصات زمین‌شناسی و رفتار جریان سیال معمولاً جزو پیچیده‌ترین مخازن هیدروکربنی محسوب می‌شوند که به‌طور مسلم این مخازن نیازمند انجام مطالعه جامع و کامل جهت درک رفتار واقعی شبکه شکاف می‌باشند. از طرف دیگر، مطالعات ژئومکانیکی نقش بسیار مهمی در ارزیابی صحیح مخازن هیدروکربنی در مرحله اکتشاف، بررسی فشار منفذی،

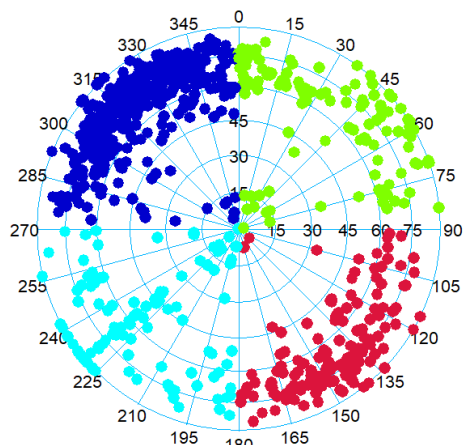
تعیین روش ازدیاد برداشت، جلوگیری از گیرکردن لوله‌های حفاری و مجاله شدن لوله‌های جداری، ایجاد شکافت هیدرولیکی، کنترل تولید ماسه، بررسی شکست پوش سنگ، طراحی چاه‌های انحرافی و غیره دارد. مطالعات ژئومکانیکی زیادی در میادین نفتی متعدد در کشورهای مختلف انجام گرفته است. معمولاً مطالعات جامع ژئومکانیکی مشتمل بر مدل‌سازی تنش‌ها، فشار منفذی، پارامترهای الاستیکی و مقاومتی سنگ می‌باشد که اغلب به دلیل نبود داده‌های کامل جهت کالیبره کردن مدل، توأم با عدم قطعیت بالا می‌باشد. اگرچه شبکه شکاف در طول زمان زمین‌شناسی ایجاد شده است ولی پارامترهای ژئومکانیکی، وضعیت فعلی را نشان می‌دهند. با این حال، تغییر پارامترهای ژئومکانیکی منجر به تغییر رفتار شبکه شکاف هم می‌شود. به‌طور کلی، توسعه شکستگی در مخازن شکاف‌دار ارتباط بالایی با انواع رخساره‌ها و خصوصیات الاستیکی سنگ دارد. مطالعات مختلف نشان می‌دهد که پارامترهای ژئومکانیکی نظیر مقاومت سنگ ارتباط بالایی با سنگ‌شناسی و میزان تأثیر فرایندهای دیاژنزی نظیر سیمان‌شدگی دارد [۱] و [۲]. فرایندهای دیاژنزی در طی زمان طولانی و به‌صورت پیچیده، باعث تبدیل رسوبات اولیه به سنگ می‌شوند و نهایتاً ویژگی‌های مکانیکی سنگ را کنترل می‌کنند [۳]. مطالعات زیادی بر روی فرایندهای دیاژنزی، توزیع شبکه شکاف و پارامترهای ژئومکانیکی به‌صورت مستقل انجام گرفته است [۴]، [۵]، [۶]، [۷]. با این حال مطالعه کاملی که بتواند ارتباط فرایند ایجاد شبکه شکاف با توزیع پارامترهای ژئومکانیکی و دیاژنزی را مورد مطالعه قرار دهد چندان مورد توجه قرار نگرفته است. برقراری ارتباط مابین شبکه توزیع شکاف و پارامترهای ژئومکانیکی هدف اصلی این مطالعه می‌باشد. از این رو در این مطالعه، پارامترهای الاستیکی ژئومکانیکی نظیر ضریب یانگ، ضریب پواسون، مقاومت فشاری تک‌محوری^۱ در مخزن سروک یکی از میادین فروربار دزفول محاسبه و سپس با استفاده از روش‌های زمین‌آماري توزیع گردیدند تا میزان ارتباط آنها با گسترش شبکه شکاف مورد بررسی قرار گیرد. در این مطالعه، سعی گردید با استفاده از الگوریتم‌های زمین‌آماري، توزیع مناسبی از خواص ژئومکانیکی و شدت توزیع شبکه شکاف انجام گیرد. شایان ذکر است استفاده از داده‌های ثانویه (به‌طور مثال داده‌های

^۱Uniaxial Compressive Strength (UCS)

داده شد (شکل ۲).



شکل ۱. ساخت نگار شدت شکستگی براساس توزیع شکستگی و استریونت مربوطه در زون USC2b (شیب و آزیموت هر شکستگی با نشانگر تدپول نمایش داده می-شود).



شکل ۲. استریونت شیب و آزیموت شکستگی های موجود در سازند سروک

لرزه‌ای) و روش‌های مناسب توزیع زمین‌آماری می‌تواند در بهبود این فرایند بسیار مؤثر باشد.

۲. زمین‌شناسی میدان و مخزن مورد مطالعه

میدان مورد مطالعه در بخش فروبار دزفول ناحیه زمین‌شناسی زاگرس قرار دارد. فروبار دزفول از دیدگاه زمین‌شناسی نفت حائز اهمیت زیادی بوده و بخشی از یک پیش‌گودال در قسمت جنوب غربی تراست زاگرس است. فروبار دزفول به‌وسیله گسل بالارود در ناحیه شمال-شمال غرب و جبهه کوهستان در شمال شرق-شرق و گسل اصلی کازرون در شرق-جنوب شرق محدود گشته است. سازند سروک مخزن اصلی این میدان محسوب می‌شود. این سازند به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سنگ مخزن‌های کربناته ایران می‌باشد که در حوضه رسوبی زاگرس تا حوضه خلیج فارس دارای گسترش زیادی است و بخش قابل‌توجهی از ذخایر هیدروکربنی را در خود جای داده است. سازند آهکی سروک در زاگرس معمولاً با دو رخساره کم‌عمق و عمیق مشخص می‌شود. به لحاظ سنی سازند سروک از آلبین تا تورونین گسترش دارد [۸]. در میدان مورد مطالعه، این سازند عمدتاً آهکی با میان‌لایه‌های شیلی همراه با آثاری از دولومیت می‌باشد.

۳. روش و داده‌های مورد استفاده و مراحل

تحقیق

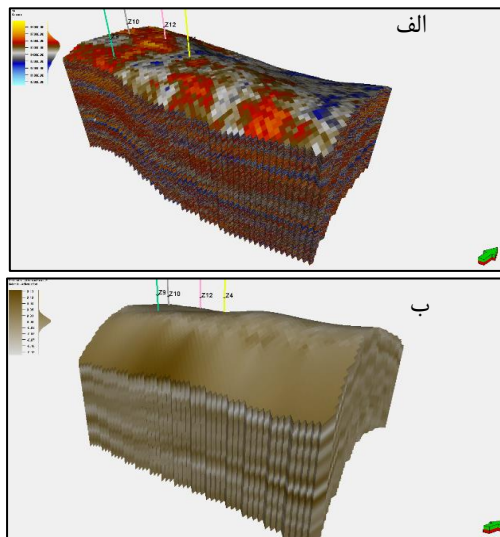
در این مطالعه، داده‌های شدت شکستگی، داده‌های مخزنی نظیر تخلخل مفید^۲ به همراه خصوصیات الاستیکی سنگ وارد نرم‌افزار پترل گردید. در این نرم‌افزار پس از ساخت نشان‌گرهای^۳ لرزه‌ای متعدد تلاش گردید توزیع زمین‌آماری این پارامترها انجام گیرد.

داده‌های شکستگی مشتمل بر شیب و آزیموت شکستگی‌ها، شدت شکستگی و میزان بازشدگی آنها براساس مطالعات نگار تصویری FMI در دو چاه می‌باشد. در این چاه‌ها شدت شکستگی در پنجره‌های ۵ متری، براساس تعداد سطح در حجم چاه (P32) محاسبه گردید (شکل ۱). پس از ساخت نگار شدت شکستگی، آنها براساس شیب و آزیموت دسته‌بندی شدند تا بتوان دسته‌های مختلف شکستگی را تعریف کرد. براساس آزیموت شکستگی‌ها، ۴ دسته شکستگی تشخیص

^۳ Attribute

^۲ Effective porosity (PHIE)

(شکل ۳). این پارامتر دارای رابطه معکوس با تخلخل به مقدار ۶۴ درصد در مخزن مورد مطالعه می‌باشد.



شکل ۳. الف: مکعب مقاومت صوتی ب: مکعب تضعیف لرزه‌ای

وارون‌سازی لرزه‌ای^۹ یا برگردان لرزه‌ای روشی است که باعث می‌شود براساس مدل‌های لرزه‌ای اولیه و موجک‌های تخمین زده شده، مدل مقاومت صوتی^{۱۰} نزدیک به مدل واقعی زمین را تخمین بزند. مقاومت صوتی به‌عنوان یک نشان‌گر لرزه‌ای عمل می‌کند [۱۰]. در وارون‌سازی لرزه‌ای سعی می‌شود تا با ترکیب داده‌های لرزه‌ای با سایر داده‌های موجود، مانند داده‌های زمین‌شناسی بزرگ‌مقیاس و داده‌های حاصل از نگاره‌های چاه، اطلاعاتی به دست آید که بتوان آنها را به خصوصیات نظیر نوع سنگ، میزان تخلخل، میزان هیدروکربن و مواردی نظیر اینها مرتبط ساخت.

نشان‌گر تضعیف موج لرزه‌ای یک خاصیت ذاتی برای سنگ‌ها است که باعث ائتلاف انرژی موج لرزه‌ای هنگام عبور از لایه‌های زیرسطحی و در نتیجه باعث کاهش تضعیف دامنه موج لرزه‌ای می‌شود [۱۱]. میزان تضعیف موج لرزه‌ای معمولاً با اندازه‌گیری فاکتور کیفیت سنگ^{۱۱} که عبارت است از نسبت انرژی ذخیره شده به انرژی تلف‌شده در هر دوره تناوب،

در مدل‌سازی شبکه شکاف، وجود داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی و نشان‌گرهای مناسب استخراج شده از آن به‌عنوان داده‌های ثانویه بسیار حائز اهمیت است. نشان‌گرهای لرزه‌ای توابع ریاضی مشتق شده از داده‌های لرزه‌نگاری هستند که در حوزه‌های زمان و فرکانس از داده‌های لرزه‌ای استخراج می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر، نشان‌گر لرزه‌ای عبارت از همه اطلاعاتی می‌باشد که از داده‌های لرزه‌ای با اندازه‌گیری‌های مستقیم و استدلال‌های منطقی به دست می‌آید [۹]. این نشان‌گرها ما را در شناخت بهتر خصوصیات یک مخزن کمک می‌کنند. مطالعه و تفسیر نشان‌گرهای لرزه‌ای اطلاعات کیفی با ارزشی درباره پارامترهای هندسی و کیفی زیر سطح زمین، اعم از تخمین ساختار زیرسطحی، تشخیص بخش‌های گازدار، تفکیک گسل‌ها و کانال‌ها، تعیین خصوصیات مخزنی و غیره را نشان می‌دهند. نشان‌گرهای لرزه‌ای به دو دسته نشان‌گرهای فیزیکی و نشان‌گرهای هندسی تقسیم می‌شوند. نشان‌گرهای فیزیکی مانند فرکانس، فاز و دامنه نشان‌گرهایی هستند که به خصوصیات سنگ‌شناسی و پارامترهای فیزیکی وابسته هستند اما نشان‌گرهای هندسی مانند شیب، آزیموت و ناپیوستگی به خصوصیات هندسی وابسته هستند و ارتباط مکانی و لحظه‌ای را با تمام نشان‌گرهای دیگر توصیف می‌کنند. در این مطالعه، نشان‌گر تضعیف موج لرزه‌ای^۴ (شکل ۳)، نشان‌گر ردیابی مورچه‌ای^۵، نشان‌گر بی‌نظمی^۶، نشان‌گر واریانس^۷ و نشان‌گر انحنای^۸ در حیطه عمق مورد استفاده قرار گرفتند. این نشان‌گرها با هم ادغام و به یک نشان‌گر تبدیل شدند تا در توزیع شدت شکستگی به‌عنوان پارامتر ثانویه مورد استفاده قرار گیرد. به‌منظور تلفیق این نشان‌گرها از شبکه عصبی در نرم‌افزار پترل استفاده گردید. با استفاده از شبکه عصبی و استفاده از داده شدت شکستگی در محل چاه‌ها و نشان‌گرهای فوق، آنها با همدیگر ادغام شده و به یک پارامتر تبدیل شدند تا بتوان به‌عنوان یک عامل کنترل‌کننده در توزیع شدت شکستگی در فضای سه‌بعدی از آنها استفاده کرد. همچنین نشان‌گر مقاومت صوتی لرزه‌ای در توزیع تخلخل مفید و پارامترهای ژئومکانیکی مورد استفاده قرار گرفت

^۸ Curvature

^۹ Inversion

^{۱۰} Acoustic impedance

^{۱۱} Q factor

^۴ Attenuation

^۵ Ant tracking

^۶ Chaos

^۷ Variance

است که در انحصار شرکت شلمبرژه بوده و به منظور شناسایی و استخراج خودکار گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در یک داده لرزه‌ای پردازش شده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹]. الگوریتم ردیابی مورچه نه تنها باعث بهبود شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در داده‌های لرزه‌ای می‌شود، بلکه دیگر ناپیوستگی‌ها مثل واکنش‌های بی‌نظمی، تغییرات دامنه داخلی، پردازش اثر کانال‌های مرزی را نیز نشان می‌دهد [۲۰].

نگار انحراف سرعت (VDL)

نگار VDL از ترکیب نگار صوتی و تخلخل محاسبه شده بر اساس نگارهای نوترون یا چگالی حاصل می‌شود. این نگار قابل استفاده جهت تشخیص گسترش فرآیندهای دیاژنزی و روند تراوایی می‌باشد. نگار مصنوعی VDL اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با فرآیندهای دیاژنزی موثر بر مخزن، انواع تخلخل غالب و روند تراوایی در یک چاه ارائه می‌دهد [۲۱]. سرعت امواج صوتی تنها حاصل عملکرد مقدار تخلخل نمی‌باشد، بلکه نوع تخلخل موجود، این رابطه را تغییر می‌دهد. برای ساخت نگار VDL، نخست با استفاده از رابطه واپلی، نگار تخلخل به نگار سرعت مصنوعی تبدیل می‌شود [۲۲]. اختلاف سرعت واقعی به دست آمده از نگار صوتی و سرعت مصنوعی به دست آمده از نگار تخلخل، به عنوان نگار VDL بیان می‌شود [۲۳].

بر اساس نگار VDL سه زون قابل تشخیص خواهد بود: بازه‌های عمقی با مقادیر VDL صفر: بخش‌های با انحراف‌های کوچک (± 500 m/s یا کمتر) در اثر تخلخل‌های بین‌دانه‌ای، بین بلورین و ریز تخلخل‌ها ایجاد می‌شوند. این تخلخل‌ها معمولاً ارتباط خوبی باهم دارند و در صورت ریز نبودن آنها، باعث ایجاد تراوایی بالا می‌شوند.

بازه‌های عمقی با مقادیر VDL منفی: بخش‌های با مقادیر منفی معمولاً در اثر ریختگی دیواره چاه، وجود شکستگی و یا آثار گاز ایجاد می‌شوند. این زون‌ها معمولاً تراوایی بالاتری از زون‌های دیگر نشان می‌دهند.

بازه‌های عمقی با مقادیر VDL مثبت: بخش‌های با مقادیر مثبت مؤید تخلخل‌های قالبی (ناشی از انحلال دیاژنزی) و درون فسیلی با تراوایی کم می‌باشند.

محاسبه پارامترهای ژئومکانیکی

در بخش مطالعات ژئومکانیکی، پارامترهای ضریب یانگ،

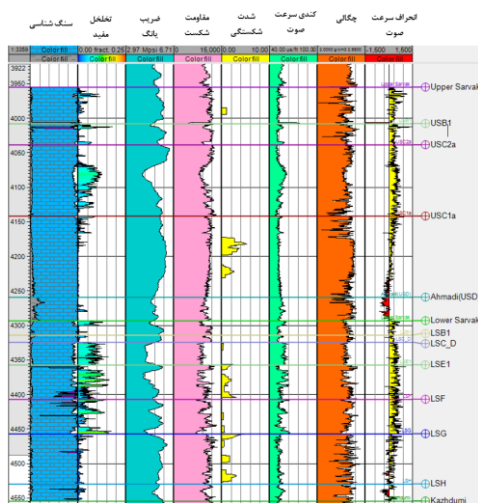
محاسبه می‌شود [۱۲]. این پارامتر با شدت شکستگی در مخزن مورد مطالعه دارای رابطه معکوس ($-0/3$) بوده و با تخلخل رابطه مستقیم ضعیفی نشان می‌دهد.

نشان‌گر واریانس در مدل‌سازی شبکه شکاف بسیار حائز اهمیت است. طی عملکرد توابع محاسباتی در این نشان‌گر مناطق هم‌دامنه به خوبی از هم متمایز می‌شوند. به عبارت دیگر در یک برش زمانی یا عمقی از مکعب به دست آمده تداوم جانبی یک سازند به خوبی قابل مشاهده است. بنابراین شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌های بزرگ از دیگر نتایج استفاده از توابع واریانس است [۱۳]. گسل‌ها و کانال‌ها به دلیل اینکه ممکن است سبب ناپیوستگی در توده‌های سنگی مجاور هم شوند، با به کارگیری این نشان‌گر در داده‌های سه‌بعدی لرزه‌ای قابل شناسایی هستند [۱۴].

نشان‌گر بی‌نظمی بیانگر میزان عدم سازماندهی شیب و آزمون در روش تخمین است. در واقع، این نشان‌گر یک الگوریتم سه‌بعدی است که ناپیوستگی را با استفاده از تحلیل بردار گرادیان و محاسبه بیشترین مقدار بردار ویژه در ماتریس کوواریانس به عنوان جهت غالب به دست می‌آورد. هر چقدر اختلاف مابین بیشترین مقدار بردار ویژه با دیگر مقادیر ویژه بیشتر باشد، پیوستگی در داده‌های لرزه‌ای بیشتر است. در صورتی که هر چقدر میزان این اختلاف کمتر یا برابر باشند، نشان‌دهنده وجود ناپیوستگی در داده‌های لرزه‌ای می‌باشد [۱۵]. به طور کلی، این نشان‌گر توانایی شناسایی بخش‌های بهم‌ریخته را در داده‌های لرزه‌ای دارد که می‌تواند به طور مستقیم موقعیت بازتاب‌دهنده‌های مختل شده را برجسته نماید. بر اساس خصوصیات گسسته‌ی رسوبات دانه‌درشت در کانال‌های پر شده، این نشان‌گر حاوی الگوی سیگنال آشفته در داده‌های لرزه‌ای است. زون‌های حاوی حداکثر آشفستگی بیانگر بازتاب‌دهنده‌های ناپیوسته نظیر زون‌های گسلی، ناپیوستگی‌های زاویه‌دار، کانال و زون‌ها شکاف‌دار هستند [۱۶].

نشان‌گر لرزه‌ای ردیابی مورچه‌ای در ردیابی و تشخیص شکاف‌ها و گسل‌ها در داده‌های سه‌بعدی لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷]. الگوریتم ردیابی مورچه که اولین بار در سال ۱۹۹۷ توسط دوریگو مطرح شد [۱۸]، یک الگوریتم تکاملی شبیه‌سازی شده است که با الهام از رفتار گروهی مورچه‌ها توسعه یافته است. الگوریتم ردیابی مورچه تکنولوژی

می‌گردد. فرآیند مدل‌سازی ساختمانی شامل مراحل مدل‌سازی گسل، ساخت مدل ژئوسولار سه‌بعدی، ساخت افق‌های مخزنی، ساخت زون‌ها و لایه‌بندی است [۲۶]. در این مطالعه، به‌منظور فراهم کردن بستر مناسب نرم‌افزاری جهت توزیع سه‌بعدی پارامترهای شکستگی و ژئومکانیکی، مدل ساختمانی با شبکه‌بندی ۱۰۰×۱۰۰ متر ساخته شد و مدل‌سازی افق‌ها با استفاده از نقشه‌های سطوح عمقی انجام گرفت. پس از ساخت مدل ساختمانی، پارامترهای مورد نظر با استفاده از روش‌های مناسب میانگین‌گیری نخست درشت‌نمایی^{۱۲} شدند و سپس مورد آنالیز واریوگرافی^{۱۳} قرار گرفتند. پیش از مدل‌سازی توزیع شدت شکستگی، داده‌های تخلخل مفید با استفاده از روش توزیع گوسین متوالی^{۱۴} مدل شدند. در توزیع تخلخل از نقشه‌های روندی ساخته شده با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و داده‌های وارون‌سازی (به‌عنوان داده ثانویه) و روش کریجینگ توأم^{۱۵} استفاده گردید تا میزان عدم قطعیت توزیع آن کاهش یابد (شکل ۵).



شکل ۴. نمایی از نگارهای ستون سنگ‌شناسی، تخلخل مفید، ضریب یانگ، مقاومت شکست سازند، شدت شکستگی، کندی سرعت صوت، چگالی و انحراف سرعت صوت در بخش‌های سروک بالایی و پایینی

همچنین به‌منظور توزیع صحیح داده‌های شدت شکستگی، از مکعب تلفیقی ساخته شده از نشان‌گرهای لرزه‌ای واریانس،

ضریب پواسون و مقاومت فشاری تک‌محوری سازند با استفاده از روابط زیر محاسبه گردید.

ضریب پواسون (دینامیک) با استفاده از نگارهای کندی موج تراکمی و برشی با در نظر گرفتن رابطه زیر محاسبه گردید:

$$v_{dyn} = \frac{1}{2} \frac{(DTS/DTC)^2 - 1}{(DTS/DTC)^2 + 1} \quad (1)$$

که v_{dyn} ضریب پواسون، DTC کندی موج تراکمی و STS کندی موجی برشی می‌باشد.

ضریب یانگ (دینامیک) با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$E_{dyn} = 2G_{dyn} (1 + \nu) \quad (2)$$

که در آن E_{dyn} ضریب یانگ و $2G_{dyn}$ مدول برشی است. مقاومت تک‌محوری (دینامیک) با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید. [۲۴].

$$UCS = 3.3 \times 10^{-20} \times \rho^2 \times V_p^4 \times [(1 + Vs)/(1 - Vs)]^2 \times (1 - 2Vs) \times [1 + 0.78 \times Vclay] \quad (3)$$

که UCS مقاومت فشاری تک‌محوری، ρ چگالی، Vp سرعت موج تراکمی، Vs سرعت موج برشی، و $Vclay$ حجم شیل می‌باشد. مقادیر حاصل سپس از حالت دینامیک به استاتیک تبدیل شدند [۲۵].

در شکل ۴ نمایی از نگارهای ستون سنگ‌شناسی، تخلخل مفید، ضریب یانگ، مقاومت شکست سازند، شدت شکستگی، کندی سرعت موج صوتی، چگالی و نگار انحراف سرعت صوت نشان داده شده است.

۴. بحث

نرم‌افزارهای مدل‌سازی زمین‌آماری سه‌بعدی نظیر پترل یک دید سه‌بعدی از زمین‌شناسی و ساختمان مخزن و نیز نحوه توزیع پارامترهای مخزنی به کاربر ارائه داده و امکان محاسبه حجم مخزن را فراهم می‌کند. انجام مدل‌سازی زمین‌شناسی مخزنی معمولاً با آماده کردن داده‌های مختلف با فرمت‌های متناسب و وارد کردن آنها به نرم‌افزار شروع می‌شود. پس از وارد نمودن داده‌های مختلف، ساخت مدل ساختمانی آغاز

۱۴ Sequential Gaussian Simulation (SIS)

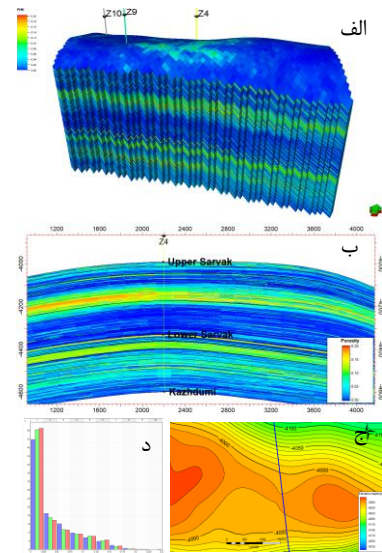
۱۵ Co-kriging

۱۲ Scale up

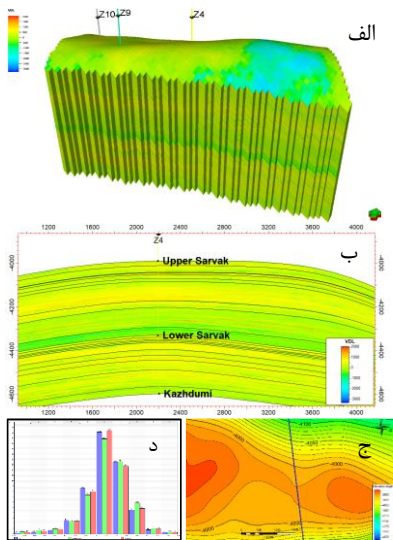
۱۳ Variography

انحنای ساختمان، ردیابی مورچه‌ای و غیره استفاده گردید. در ساخت مدل شکستگی از پارامتر تلفیقی ساخته شده به‌عنوان داده ثانویه روش کریجینگ توام استفاده گردید (شکل ۶).

مدل انحراف سرعت صوت به‌عنوان شاخص فرایندهای دیاژنزی و شکستگی به‌صورت سه‌بعدی مدل گردید. در ساخت این مدل از پارامتر تخلخل ساخته شده به‌عنوان داده ثانویه در روش کریجینگ توام استفاده گردید (شکل ۷).



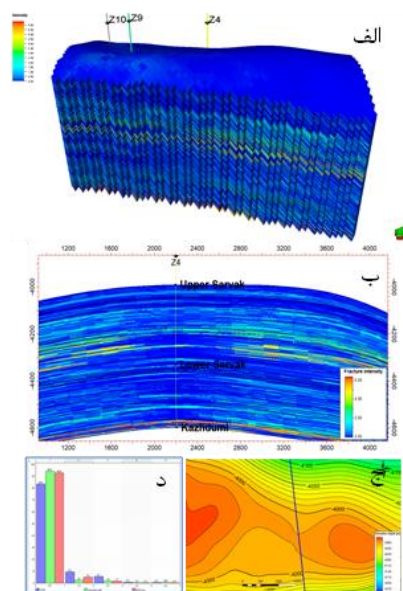
شکل ۵. نمایی از مدل توزیع تخلخل مفید در پنجره سه‌بعدی (الف) به همراه دید مقطع عرضی (ب) و مسیر آن (ج) با هیستوگرام مربوطه (د)



شکل ۷. نمایی از مدل سه‌بعدی نگار انحراف سرعت در پنجره سه‌بعدی (الف) به همراه دید مقطع عرضی (ب) در مسیر مشخص (ج) و هیستوگرام مربوطه (د)

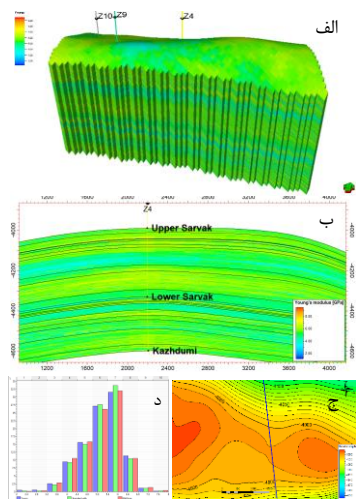
به‌منظور بررسی میزان ارتباط پارامترهای ژئومکانیکی با مدل توزیع شکستگی، پارامترهای الاستیکی ضریب یانگ و ضریب پواسون به همراه داده مقاومت فشاری تک‌محوری در مخزن مدل گردیدند. توزیع مدل‌های سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار پترل و مازول مدل‌سازی پتروفیزیکی انجام گرفت. در توزیع زمین‌آماري این پارامترها از روش شبیه‌سازی گوسین متوالی استفاده گردید. لازم به ذکر است، مدل تخلخل به‌دلیل ارتباط بالا با پارامترهای ژئومکانیکی به‌عنوان داده ثانویه با استفاده از روش کریجینگ توأم در توزیع آنها مورد استفاده قرار گرفت (شکل‌های ۸ و ۹). بررسی ارتباط شدت شکستگی با پارامترهای مدل شده نشان می‌دهد به دلیل تأثیر بالای دیاژنزی بر روی مخزن، ارتباط بالایی مابین شدت شکستگی و مدل انحراف سرعت وجود دارد (جدول ۱).

همان‌طوری که شکل ۸ مشاهده می‌شود، تخلخل با ضریب یانگ همبستگی معکوس ۶۴ درصد دارد. به‌طور کلی کاهش تخلخل در اثر سیمانی شدن، تراکم یا هر عامل دیگری باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود [۲۷]. این ارتباط

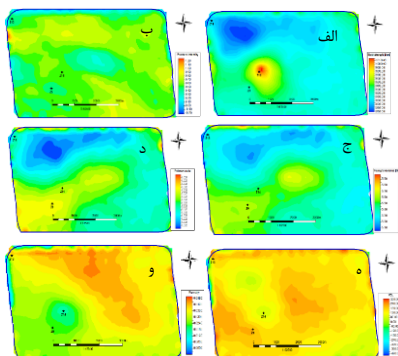


شکل ۶. نمایی از مدل توزیع شدت شکستگی در پنجره سه‌بعدی (الف) به همراه دید مقطع عرضی (ب)، مسیر آن (ج) و هیستوگرام مربوطه (د)

که مقادیر این پارامترها بیشتر می‌باشند، میزان توزیع شدت شکستگی کم می‌باشد. میزان کم شکستگی در بخش‌های مرکزی با افزایش انحراف سرعت مطابقت دارد که مؤید مثبت بودن آن و تأثیر فرایندهای دیازنزی می‌باشد. شدت شکستگی در سروک پایینی نسبت به سروک بالایی کم می‌باشد. مقادیر ضریب یانگ، ضریب پواسون و نگار انحراف سرعت در قسمت‌های شمالی میدان نسبتاً زیاد می‌باشد. به‌طور کلی، بر اساس نقشه‌های میانگین تهیه شده بخش‌های با شدت شکستگی زیاد در سروک بالایی و پایینی ارتباط مشخصی با میزان توزیع تخلخل مفید نشان نمی‌دهند که نشان‌دهنده تأثیر فرایندهای دیازنزی در تغییر میزان تخلخل در طول زمان زمین‌شناسی می‌باشد (شکل ۱۲).

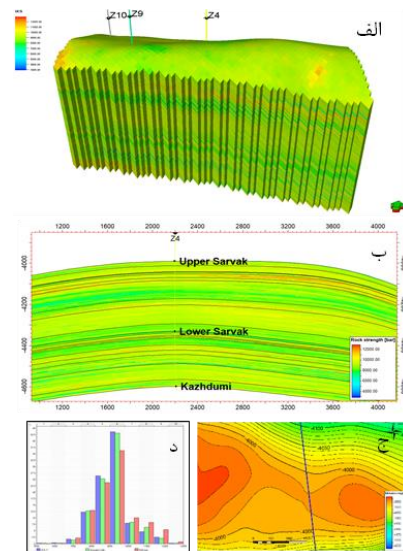


شکل ۹. نمایی از مدل سه‌بعدی مقاومت فشاری تک‌محوری در پنجره سه‌بعدی به همراه دید مقطع عرضی و هیستوگرام مربوطه



شکل ۱۰. الف: نقشه میانگین توزیع مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، ب: شدت شکستگی، ج: ضریب یانگ، د:

معکوس برای مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ برابر ۵۴ درصد و برای ضریب پواسون ۵۷ درصد می‌باشد. از این رو مدل تخلخل ساخته شده به‌عنوان داده ثانویه در توزیع آنها مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۸. نمایی از مدل سه‌بعدی ضریب یانگ (الف) در پنجره سه‌بعدی به همراه دید مقطع عرضی (ب) و مسیر مربوطه (ج) به همراه هیستوگرام مربوطه (د)

جدول ۱. ضریب همبستگی مابین شدت شکستگی و پارامترهای مورد استفاده

ضریب همبستگی	پارامتر	
	سروک زیرین	سروک بالایی
تخلخل مفید	-۰/۲۲	۰/۳۶
مقاومت فشاری تک‌محوری	-۰/۲۸	-۰/۴۶
ضریب یانگ	۰/۰۷	۰/۲۶
ضریب پواسون	-۰/۲۶	-۰/۴۲
انحراف سرعت	-۰/۶۴	-۰/۳۲

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نقشه میانگین تهیه شده از میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، ضریب یانگ، ضریب پواسون به همراه مدل شدت شکستگی برای سروک بالایی و پایینی نمایش داده شده است. مقادیر ضریب یانگ، ضریب پواسون و مقاومت تک‌محوری در بخش سروک بالایی در قسمت‌های شمالی میدان کم می‌باشد. در بخش‌های مرکزی

مورد مطالعه می‌باشد. علیرغم ارتباط ضعیف پارامترهای ژئومکانیکی ضریب یانگ و مقاومت فشاری تک‌محوری با شدت شکستگی، این پارامترها، همبستگی معکوس قابل ملاحظه‌ای با تخلخل دارند. بنابراین مدل تخلخل ساخته شده به‌عنوان داده ثانویه در توزیع آنها مورد استفاده قرار گرفت. تخلخل با ضریب یانگ همبستگی معکوس ۶۴ درصد دارد. این ارتباط معکوس برای مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ برابر ۵۴ درصد و برای ضریب پواسون ۵۷ درصد می‌باشد. شدت شکستگی در سروک پایینی نسبت به سروک بالایی کم می‌باشد. همچنین میزان کم شکستگی در بخش‌های مرکزی با افزایش انحراف سرعت صوت مطابقت دارد که مؤید مثبت بودن آن و تأثیر فرایندهای دیاژنزی می‌باشد.

۶. سپاس‌گزاری

از شرکت‌های انرژی دانا و پارس پترو زاگرس به‌دلیل مهیا نمودن داده‌های لازم برای تهیه این مقاله تشکر و قدردانی می‌شود.

۷. مراجع

[1] Bernabé, Yves, D. T. Fryer, and J. A. Hayes. "The effect of cement on the strength of granular rocks." *Geophysical Research Letters* 19.14 (1992): 1511-1514.

[2] Khaksar, Abbas, et al. "Rock strength from core and logs, where we stand and ways to go." EUROPEC/EAGE Conference and Exhibition. OnePetro, 2009.

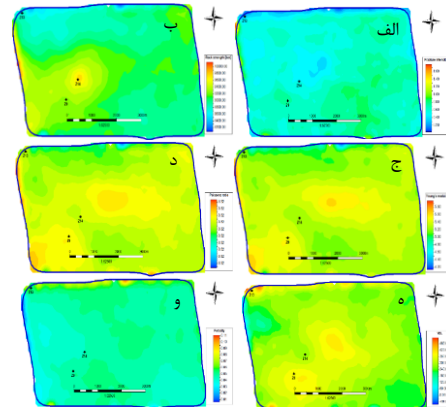
[3] Fjaer E., Holt R. M., Horsrud P., Raaen A. M. and Risnes R., "Petroleum related rock mechanics," Amsterdam, Elsevier, 2008.

[۴] جوادی اصطهباناتی، مرتضی. (۱۳۹۷). شیشه‌سازی سه‌بعدی جریان نفت درون شکستگی‌های سنگی دارای سطوح زبر و مقایسه آن با روابط هندسی کلاسیک. نشریه علمی ژئومکانیک نفت ۲(۱)، ۱-۱۷.

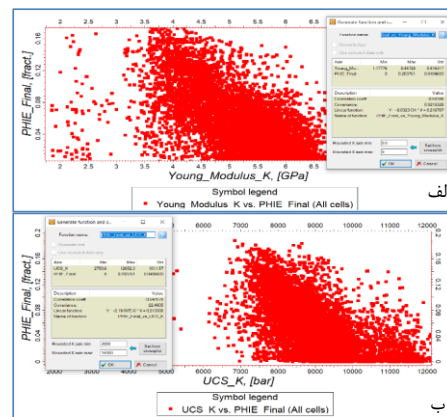
[5] Fu, G. M., Qin, X. L., Qing, M., Zhang, T. J., and Yang, J. P, 2009, Division of diagenesis reservoir facies and its control-case study of Chang-3 reservoir in Yangchang formation of Fuxian exploration area in northern Shaanxi. *Mining Science and Technology*, v. 19, p. 537-543.

[6] Hajikazemi, E., Al-Aasm, I.S., Mario, C., 2017. Diagenetic history and reservoir properties of the Cenomanian-Turonian carbonates in southwestern Iran

ضریب پواسون، ه: انحراف سرعت و: تخلخل مفید در سروک بالایی



شکل ۱۱. الف: نقشه میانگین توزیع مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، ب: شدت شکستگی، ج: ضریب یانگ، د: ضریب پواسون، ه: انحراف سرعت و: تخلخل مفید در سروک پایینی



شکل ۱۲. ضریب همبستگی مابین تخلخل و ضریب یانگ (الف) و ضریب همبستگی مابین تخلخل و مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ (ب)

۵. نتیجه‌گیری

بر اساس این مطالعه، بخش‌های با شدت شکستگی زیاد در سروک بالایی و پایینی ارتباط مشخصی با میزان توزیع تخلخل مفید نشان نمی‌دهند که نشان‌دهنده تأثیر فرایندهای دیاژنزی در تغییر میزان تخلخل و در نتیجه پارامترهای مقاومتی سنگ در طول زمان زمین‌شناسی می‌باشد. ارتباط بالای شدت شکستگی و نگار انحراف صوت مؤید تأثیر دیاژنزی بر روی مخزن

system: a cooperating learning approach to the traveling salesman problem, IEEE transactions on evolutionary computation 1 (1), 1-24.

[19] Pedersen, S. I., Randen, T., Sønneland, L., & Steen, Ø. (2002, October). Automatic fault extraction using artificial ants. In 2002 SEG Annual Meeting. OnePetro.

[20] Pedersen, S.I., Skov, T., Randen, T., and Sønneland, L., 2005, Automatic 3D fault extraction using artificial ants, Mathematical methods and modelling in hydrocarbon exploration and production, Iske, A. and Randen, T., eds, Springer-Verlag.

[21] Eberli, G. R., Anselmetti, F. S. and Incze, M. L., 2003, "Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks", The Leading Edge, Vol. 22 (7): 654-660.

[22] Anselmetti, F.S., Eberli, G.P., 1999. The velocity – deviation log: A tool to predict pore type permeability trends in carbonates drill holes from sonic & porosity or density logs. AAPG Bulletin 83, 450-466.

[23] Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., Gardner L. W., 1956. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media: Geophysics. 21 (1): 41-70.

[24] Fjaer E., Holt R.M., Horsrud P., Raaen A.M. & Risnes R. (1992); Petroleum Related Rock Mechanics Developments in Petroleum Science, 33; Elsevier.

[25] Elkhatatny, S., Mahmoud, M., Mohamed, I. et al. Development of a new correlation to determine the static Young's modulus. J Petrol Explor Prod Technol 8, 17–30 (2018).

[۲۶] مهدی پور، ولی، و ربانی، احمد رضا، و کدخدایی، علی، ۱۴۰۱، "مدل سازی تخلخل با استفاده هم‌زمان نشان‌گرهای لرزه‌ای و رخساره‌های الکتریکی در مخزن سروک در یکی از میادین نفتی ایران" مجله پژوهش نفت، شماره ۱۲۵.

[27] Charsky, Alyssa, David Pyles, and Steve Sonnenberg. "Integrating Mineralogy, Process Sedimentology and Geomechanics for Development of a Mechanical Stratigraphy Model of the Bakken Formation." SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference. OnePetro, 2017.

and the Persian Gulf. Marine and Petroleum Geology 88, 845- 857.

[7] Fang Xiang, Yao Guangqing, Vali Mehdipour, Wang Xiao., 2016, The Effect of Diagenesis and Sedimentary Facies Type on Reservoir Properties in Fahliyan Formation in One Iranian Oil Field, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, pp 4907-4920.

[۸] مطیعی، همایون، ۱۳۷۲، "زمین‌شناسی ایران، چین‌شناسی زاگرس"، سازمان زمین‌شناسی کشور، طرح تدوین کتاب، تهران، ۵۳۶ ص.

[۹] جواهری نیستانک، ع.، ۴۹۸۱، کاربرد نشان‌گر لرزه‌ای همدوسی در به تصویر کشیدن گسل‌ها در داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی، پایان‌نامه، دانشگاه تهران موسسه ژئوفیزیک.

[10] Russell, B., Hampson, D. P., Schuelke, J. S and Quirein, J. A., (1997), Multi-Attribute Seismic Analysis, The leading Edge. 16, P-1439-1443.

[11] M. Batzle, Ronny Hofmann, Manika Prasad, Gautam Kumar, L. Duranti, and De-hua Han (2005) Seismic attenuation: observations and mechanisms. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2005: pp. 1565-1568.

[12] Raji, W. and Rietbrock, A., 2013. Attenuation (1/Q) estimation in reflection seismic records. Journal of Geophysics and Engineering, 10(4), p.045012.

[۱۳] ارزانی، علی، علوی، سید احمد. پولادزاده، محمود. کلال‌زاده، علی‌رضا. مهدی‌پور، ضرغام. "کاربرد نشان‌گرهای ساختمانی در اکتشاف و توسعه هیدروکربنی یک پهنه تداخلی" علوم زمین، ۱۳۸۷. ص ۵۶-۵۱.

[14] Pigott, J.D., Kang, M.H., and Han, H.C., 2013. First order seismic attributes for clastic seismic facies interpretation: Examples from the East China Sea. Journal of Asian Earth Sciences, v.66, 34-54.

[15] Randen, T., Pedersen, S.I., and Sønneland, L., 2001, Automatic extraction of fault surfaces from three-dimensional seismic data: expanded abstracts, Int. Mtg., Soc. exploration geophysics, 551–554.

[16] Koson, S., Chenrai, P. and Choowong, M., 2014. Seismic attributes and their applications in seismic geomorphology. Bulletin of Earth Sciences of Thailand, 6(1), pp.1-9.

[17] Zhang, X., LI, T., Shi, Y. and Zhao, Y., 2015. The application of fracture interpretation technology based on ant tracking in Sudeerte Oilfield. Acta Geologica Sinica-English Edition, 1(89), pp.437-438.

[18] Dorigo, M., Gambardella, L.M, 1997, Ant colony