

## ارائه استراتژی ترکیبی مدل‌سازی گسل‌ها به‌روش چند نشانگری در داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی در یکی از میادین خلیج فارس

ایمان صمدی<sup>۱</sup>، معصومه کردی<sup>۲\*</sup>، مهرداد سلیمانی منفرد<sup>۳</sup> و امیر احمدی<sup>۴</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نفت و ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی نفت و ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳. دانشیار، گروه مهندسی نفت و ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۴. کارشناس ارشد، شرکت نفت فلات قاره ایران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۸/۶/۲، پذیرش نهایی: ۹۸/۱/۱)

### چکیده

شناسایی و مطالعه گسل‌ها در مخازن هیدروکربنی، اهمیت ویژه‌ای در مراحل ازدیاد برداشت و توسعه میدان دارد. در بررسی ساختارهای با زمین‌شناسی پیچیده، تفسیر گسل‌ها با عدم قطعیت بالایی همراه خواهد بود. روش‌های متعارف تفسیر و مدل‌سازی گسل‌ها در داده‌های لرزه‌ای علاوه بر نیاز به دانش زمین‌شناسی مفسر که خود می‌تواند به‌عنوان منشأ عدم قطعیت باشد، فرآیندی بسیار دشوار و وقت‌گیر است. بدین‌منظور در این مطالعه یک استراتژی خودکار و ترکیبی به‌منظور افزایش دقت و سرعت مدل‌سازی گسل‌ها و شکستگی‌ها در داده لرزه‌ای معرفی می‌شود. گسل‌ها به‌طور معمول با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای تفسیر می‌شوند. به‌منظور تفسیر گسل‌های میدان مورد نظر در این تحقیق، ابتدا نشانگرهای آشفتگی، واریانس، انحنا و الگوریتم ردیابی مورچه از داده‌های لرزه‌ای استخراج شد. از بین نشانگرهای موجود، نشانگرهای آشفتگی، واریانس و انحنا به‌طور واضح گسل‌های بزرگ‌مقیاس را مشخص کردند. گسل‌های کوچک‌مقیاس که شناسایی آنها در داده‌های لرزه‌ای دشوار است، به‌کمک الگوریتم ردیابی مورچه مدل‌سازی شدند. به‌کارگیری روش‌های بیان‌شده در تفسیر ساختاری مخزن در کنار مدل‌سازی قطعی گسل‌ها به‌روش ترکیبی بر روی داده‌های لرزه‌ای، نشان‌دهنده شناسایی و تفسیر بهتر گسل‌ها با استفاده از استراتژی پیشنهادی و رویکرد ترکیب روش‌های موجود بود. نتایج حاصل از تفسیر چند نشانگری و همچنین مدل‌سازی گسل‌ها در میدان مورد مطالعه، انطباق خوبی با اطلاعات زمین‌شناسی نشان داد. لذا می‌توان پیشنهاد داد استراتژی به‌کار گرفته‌شده در مدل‌سازی و استفاده از یافته‌های مطالعات چند نشانگری می‌تواند به‌منظور افزایش دقت در مطالعات ساختاری مخزن، مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی چندمقیاسی، نشانگر لرزه‌ای، انحنا، آشفتگی، الگوریتم ردیابی مورچه.

### ۱. مقدمه

(وارسته و همکاران، ۱۳۹۱). با توجه به این‌که داده‌های لرزه‌نگاری سه‌بعدی دارای سطح پوشش وسیع در مخزن و به‌ویژه در مناطق بین‌چاهی است، بنابراین به کاهش عدم قطعیت مدل در مدل‌سازی توامان داده‌های لرزه و چاه منجر خواهد شد (لی و همکاران، ۲۰۲۰). با در نظر گرفتن قدرت تفکیک در داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی، گسل‌هایی که در محدوده این قدرت تفکیک قرار می‌گیرند، به‌صورت یک شبکه ناپیوسته مدل می‌شوند. بدین ترتیب استخراج خودکار گسل‌ها به‌عنوان فرآیندی در جهت تسریع مدل‌سازی شکستگی‌ها و افزایش دقت آن مورد توجه قرار گرفت (پدرسن و همکاران، ۲۰۰۲).

مدل‌سازی ناهمگنی‌های زمین‌شناسی، چه از انواع ساختاری و چه از انواع ویژگی‌های مخزن، از گام‌های اصلی در مسأله بهینه‌سازی محل حفر چاه‌های تولیدی و مدیریت میدان است. در این میان، شناسایی هندسه شکستگی‌ها و مدل‌سازی آنها از پارامترهای مهم در مدل‌سازی مخازن هیدروکربنی، به‌ویژه از انواع شکاف‌دار آنها می‌باشند (هو و همکاران، ۲۰۱۴). با مطالعه هندسه شکستگی‌ها به‌کمک داده‌های لرزه‌ای بازتابی شامل مطالعه گسل‌ها و شکستگی‌های کوچک‌مقیاس مؤثر در انتقال سیالات و بزرگ‌مقیاس مؤثر در هندسه مخزن، می‌توان به مدل‌سازی و تفسیر هندسی مخزن پرداخت

هاشمی شاهدانی و جواهریان (۲۰۰۹) نشان دادند که با استخراج خودکار گسل‌ها به کمک نشانگرهای لرزه‌ای، می‌توان این شبکه ناپیوسته از گسل‌ها را با دقت بالایی مدل کرد. علاوه بر استفاده از نشانگرهای معمول لرزه‌ای، سوشه و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای بر روی یکی از میادین امارات، نشان دادند که مجموعه کامل گسل‌ها را می‌توان به‌طور مستقیم از مکعب الگوریتم ردیابی مورچه، که پیش از این توسط دوریگو و اشتوتزل (۲۰۰۴) معرفی شده بود، استخراج کرد. با این روش هر گسل شناسایی شده بر روی مکعب لرزه‌ای دارای یک سطح است که این سطوح در مجموع می‌توانند به یک شبکه گسسته تبدیل شوند. مهدوی‌بصیر و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که پس از کاهش نوفه و بالا بردن کیفیت داده‌های لرزه‌ای، می‌توان عملکرد بهتری در شناسایی و استخراج خودکار گسل‌ها به کمک چند نشانگر حساس به شکستگی از جمله نشانگر شباهت و انحنا داشت. یان و همکاران (۲۰۱۳)، با توجه به دقت بالای بهینه‌سازی در الگوریتم مورچگان، نشان دادند که می‌توان از نتایج این الگوریتم در ارزیابی مدل‌های به‌دست آمده از نشانگرها، استفاده کرد. هیل (۲۰۱۳) با معرفی یک استراتژی دومرحله‌ای در قالب یک الگوریتم کارآمد، به شناسایی و مدل‌سازی گسل‌ها در مکعب لرزه‌ای پرداخت. بدین‌صورت که سطوح گسل را به‌طور خودکار به‌عنوان المان‌های چهار ضلعی مدل کرده و جهت‌یافتگی گسل‌ها تخمین زده می‌شود. محدودیت این روش تخمین و ارزیابی مشخصات گسل‌های متقاطع بود. اودو و همکاران (۲۰۱۴) به‌منظور بهبود تحلیل و مدل‌سازی گسل‌ها، علاوه بر استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای شباهت و انحنا، به کمک تحلیل چند نشانگری، موفق به شناسایی دقیق ترگسل‌های اصلی و چند گسل فرعی در داده مورد مطالعه شدند. یاو و همکاران (۲۰۱۴) برای بهبود کارایی تفسیر گسل از روش استخراج سطحی استفاده کردند. آنها روش جدیدی از استخراج سطح و بازسازی سطح گسل را ارائه کردند که از ایده ابر نقطه‌ای سه‌بعدی، برای ساختن گسل‌ها

استفاده می‌کند. آنها توانستند با کمک الگوریتم ردیابی مورچگان، گسل‌های موجود در یکی از میدان‌های نفتی دریای شمال را تفسیر و مدل‌سازی کنند. نگری و همکاران (۲۰۱۵) پس از حذف نوفه در داده‌های لرزه‌ای، پیوستگی مکانی در مشخصات لرزه‌ای را بهبود داده و نشانگرهای حساس به ناپیوستگی آشفتگی و واریانس را از داده‌های لرزه‌ای استخراج کردند. آنها همچنین نتایج حاصل از این دو نشانگر را در شناسایی خودکار جهت و شیب گسل‌ها توسط الگوریتم ردیابی مورچگان استفاده کردند. هاشمی شاهدانی و همکاران (۲۰۱۷) با معرفی نرم‌افزار SeisArt، ابزاری را به‌منظور استخراج خودکار مشخصات در داده‌های لرزه‌ای معرفی کردند. چن و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از الگوریتم ردیابی مورچگان، نشان دادند که می‌توان مدل شکستگی‌ها را با سرعت بیشتری در داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی با حجم بالا به‌دست آورد. رن و گویو (۲۰۱۹) نشان دادند که اهمیت گسل‌های کوچک در افزایش قابلیت بهره‌دهی مخزن دارای تأثیر قابل‌توجهی است و بایستی در کنار مدل شکستگی بزرگ مقیاس در فرآیند تهیه چهارچوب مدل زمین‌شناسی در نظر گرفته شود. این مسأله را مارتن و همکاران (۲۰۱۹) در تهیه مدل شکستگی مخزن با رویکرد ژئومکانیکی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که لازم است مدل شکستگی گسل‌ها با استفاده از اطلاعات متفاوت در حالت چند مقیاس تهیه شوند. نوری و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از رگرسیون گاوسی، به مدل‌سازی خودکار شکستگی‌ها پرداختند. اوزکایا (۲۰۱۹) نشان داد که با مدل کردن شکستگی‌های کوچک مقیاس به کمک نمودار تصویری چاه در کنار داده‌های لرزه‌نگاری می‌توان سایر مشخصات مخزن از جمله نفوذپذیری را با قطعیت بیشتری مدل کرد. کوریسون و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مدل‌سازی شکستگی‌ها به کمک داده‌های لرزه‌نگاری و چاه، ولی به‌صورت جداگانه، نشان داد که می‌توان میزان عدم قطعیت در مدل‌سازی شکستگی مخزن را

## ۲. استراتژی پیشنهادی در تهیه مدل شکستگی

به منظور تهیه مدل شکستگی در هر روشی، در ابتدا لازم است که مدل استاتیکی مخزن تهیه شود. در این مرحله مدل استاتیک مخزن با انجام فرآیند شبکه‌بندی به سلول‌هایی با ابعاد مشخص تقسیم می‌شود. سپس به کمک تفسیر و مدل‌سازی دستی گسل‌ها، ابعاد سلول‌ها تغییر کرده و ساختارهای زمین‌شناسی واقعی شبیه‌سازی می‌شوند. تفسیرهای ساختاری و شناسایی گسل‌ها در این مرحله به کمک نشانگرهای لرزه‌ای انجام می‌شود. بدین منظور لازم است که مطالعه وسیعی در رابطه با انتخاب نشانگرهای مناسب صورت گرفته و با استفاده از آنالیز چند نشانگری، آن نشانگرهایی که می‌توانند بیشترین اطلاعات را در اختیار قرار دهند، انتخاب گردند. در مرحله بعد به صورت موازی، شناسایی گسل‌ها به صورت خودکار انجام خواهد گرفت. این مرحله بدین دلیل انجام می‌شود که هم با توجه به زمان‌بر بودن شناسایی دستی گسل‌ها در داده‌های سه‌بعدی و همچنین شناسایی آنها در اینتروال‌های مختلفی از خطوط لرزه‌ای، احتمال از دست دادن گسل‌های با ابعاد کوچک‌تر در تهیه مدل نهایی شکستگی، دور از انتظار نخواهد بود. بدین منظور در این تحقیق، استفاده از الگوریتم ردیابی مورچه پیشنهاد می‌شود. پدرسن و همکاران (۲۰۰۲) بیان کردند که پیش از استفاده از الگوریتم ردیابی مورچه، لازم است که پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی شوند. بدین منظور یک مرحله آنالیز حساسیت‌سنجی جهت انتخاب پارامترهای مهم و مقادیر بهینه آنها در شناسایی کامل گسل‌ها با حداقل نوفه صورت می‌گیرد (هو و همکاران، ۲۰۱۴). پس از شناسایی خودکار گسل‌ها به کمک پارامترهای بهینه الگوریتم ردیابی مورچگان، پردازش و تصحیح مجموعه گسل‌ها انجام شده و عارضه‌های شناسایی شده غیرگسلی حذف خواهند شد. بدین منظور عارضه‌های غیر گسلی بر اساس ویژگی‌های مختلف فیلتر می‌شوند. سپس با استفاده از جهت‌یافتگی و انشعابات سطوح گسلی، آنها را در

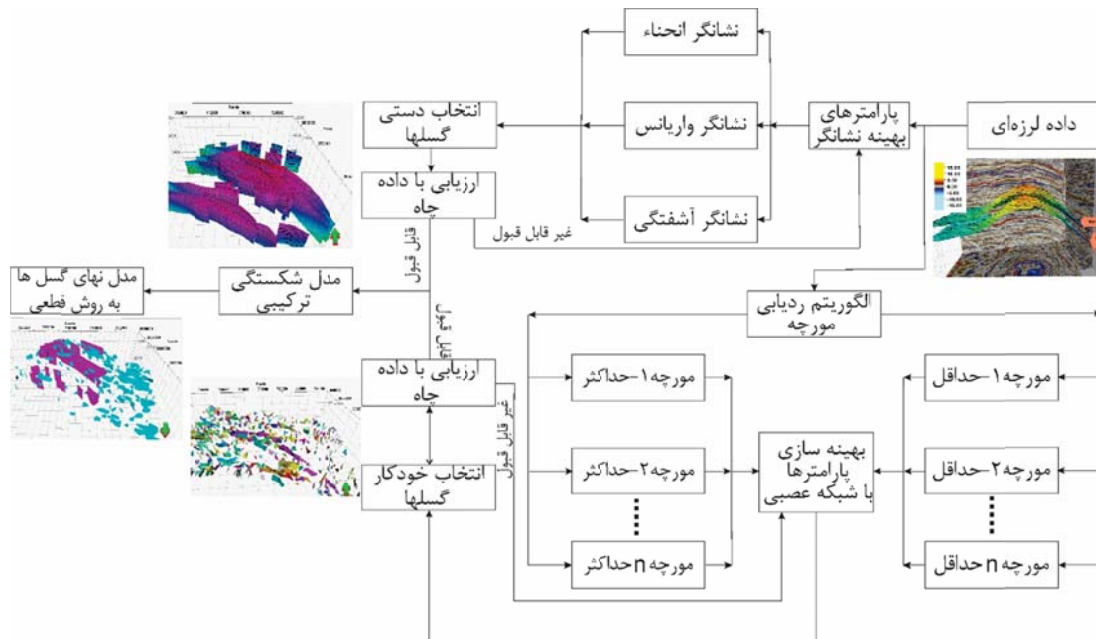
به مقدار چشم‌گیری کاهش داد. کائو و همکاران (۲۰۱۹) این مسأله را در مدل‌سازی دوبعدی شکستگی به روش المان محدود در یک مخزن پیاده کردند و نشان دادند که در حالت دوبعدی، مدل‌سازی چندمقیاسه و خودکار شکستگی‌ها می‌تواند در تعیین استراتژی تولید از میدان، مؤثر واقع شود. بر همین اساس، ژو و همکاران (۲۰۱۹) یک استراتژی تهیه مدل چندمقیاسه از شکستگی‌ها در مخزن به کمک داده‌های لرزه و چاه پیشنهاد کردند که البته در استراتژی پیشنهادی آنها، مدل شکستگی تهیه شده از داده لرزه‌ای کاملاً به صورت تفسیرهای دستی تهیه می‌شود. هدف اصلی در این تحقیق، ارائه استراتژی تهیه مدل شکستگی چند مقیاسه در داده‌های لرزه‌ای به کمک مدل‌سازی مفسر مینا برای گسل‌ها و شکستگی‌های بزرگ مقیاس و مدل‌سازی شکستگی‌های کوچک مقیاس به صورت خودکار و ارزیابی آنها به کمک داده‌های چاه است. در داده‌های لرزه‌ای، گسل‌های با جابه‌جایی بزرگ و اختلاف زیاد امپدانس صوتی بین دو طرف صفحه گسل، به سادگی قابل تشخیص می‌باشد. اما با توجه به این که بسیاری از گسل‌های کوچک‌تر در مرزهای گستره قدرت تفکیک افقی داده‌های لرزه‌ای است، بنابراین تشخیص گسل‌های کوچک مقیاس با جابه‌جایی و اختلاف امپدانس کم، با دشواری روبه‌رو است. یکی از راه‌های شناخت گسل‌ها، استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای است که تعیین گسل‌ها در مقیاس کوچک‌تر را امکان‌پذیر می‌سازد. در استراتژی ترکیبی ارائه شده در این تحقیق، مدل‌سازی گسل‌ها به دو روش خودکار و دستی انجام می‌شود. در نهایت با ترکیب کردن این دو مدل به عنوان دو دسته گسل در فرآیند مدل‌سازی گسسته، می‌توان به یک مدل واحد که شامل گسل‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس است دست یافت. به کمک استراتژی بیان شده می‌توان درک بهتری از خصوصیات گسل‌های کوچک مقیاس در کنار گسل‌های بزرگ مقیاس داشت.

می‌باشد (شکل ۲- الف) (کانیخوف و ملکی، ۲۰۰۶). فعالیت کوه‌زایی هرسنین علاوه بر حرکات ناحیه‌ای، حرکات بالارو محلی در هر دو قسمت شرقی و غربی حوضه نمکی (سری هرمز) داشته که باعث تولید ساختمان‌هایی مانند ساختمان میدان مورد مطالعه شده‌اند (مهدوی‌بصیر و همکاران، ۲۰۱۳). از مهم‌ترین ساختارهای مرتبط با گنبدها، گسل‌های تشکیل شده در محدوده بالای کلاهک گنبدها می‌باشند. الگوی این گسل‌ها توسط عوامل مختلفی هم‌چون اندازه و شکل گنبد نمکی، ضخامت رسوبات رویی و وجود تنش ناحیه‌ای کششی یا فشارشی در حین بالا آمدگی کنترل می‌شود. این میدان در سازندهای شعیا (داریان)، گدوان، عرب (سورمه) و خوف دارای پتانسیل می‌باشد. با توجه به شکل ۲-ب، در این پژوهش سازند عرب به‌عنوان افق مخزنی هدف، انتخاب شد. سازند مورد مطالعه بیشتر از دولومیت همراه با لایه‌های نازک انیدریت تشکیل شده و بر طبق مشخصات و خصوصیات مخزنی، به هشت لایه بهره‌ده تقسیم شده. شکل ۲-ج، مدل زمین‌شناسی ساختمانی مخزن را که در گام اول استراتژی پیشنهادی تهیه شده است، نشان می‌دهد.

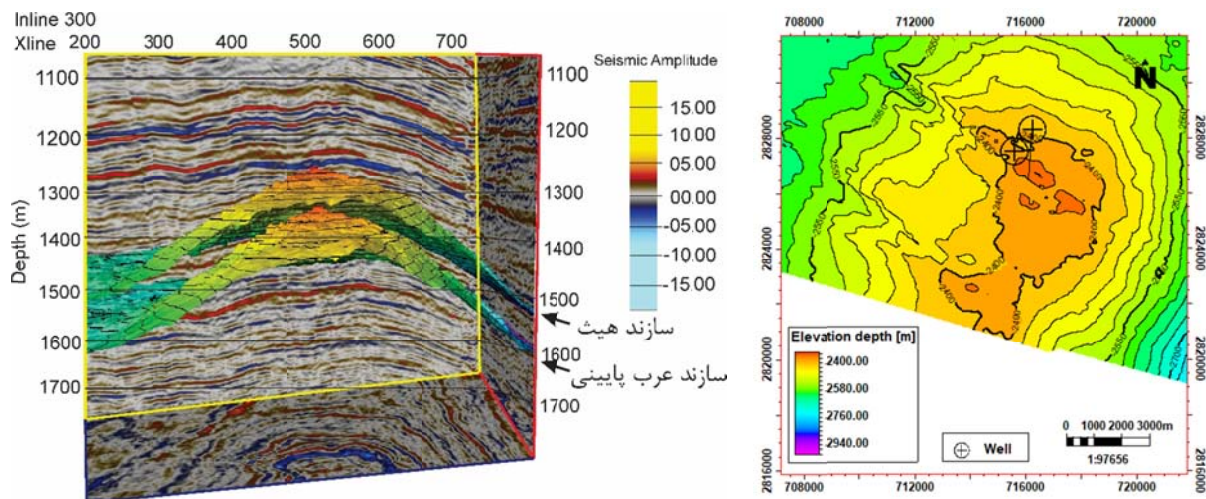
نمودارهای هیستوگرام مربوطه مورد مطالعه و ارزیابی قرار داده و مدل با استفاده از داده‌های چاه، ارزیابی و به‌روزرسانی می‌شود. در گام بعدی، مدل‌های شکستگی تهیه شده به‌روش خودکار و به‌روش دستی با یکدیگر تلفیق شده و مدل شکستگی چندمقیاسی تهیه می‌شود. در این مدل، گسل‌های با ابعاد بزرگ‌تر توسط مدل شکستگی با انتخاب دستی وارد شده و گسل‌های با ابعاد کوچک‌تر از مدل شکستگی خودکار در فرآیند تلفیق وارد خواهند شد. شکل ۱ روندی از استراتژی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

### ۳. زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه

میدان مورد از میدان‌های هیدروکربنی با شکستگی طبیعی در منطقه خلیج فارس است. مکعب داده لرزه‌ای مورد استفاده دارای ۶۵۸ خط گیرنده و ۱۰۹۲ خط چشمه با فاصله ۲۵ متر بین هر خط است. ساختمان میدان مورد مطالعه، ساختمان گنبدی شکل متمایل به بیضوی با محور تقریباً شمال‌شرقی - جنوب‌غربی و حاصل از دی‌پیرسم می‌باشد که احتمالاً مربوط به حرکت گسل‌های عمیق و فشار نفوذ نمک به‌بالا

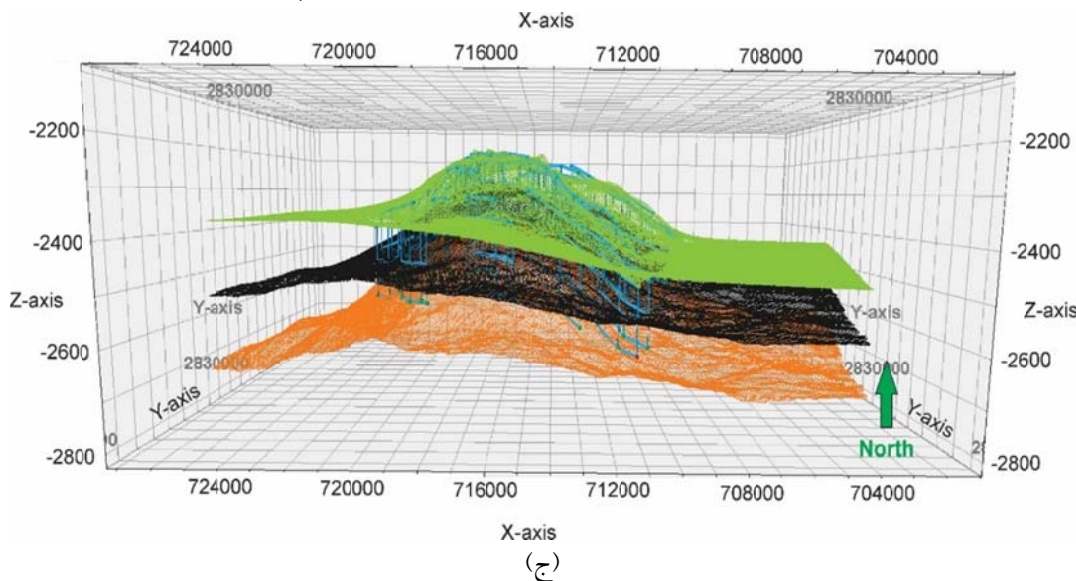


شکل ۱. نمودار مراحل انجام تهیه مدل شکستگی به‌روش استراتژی پیشنهادی.



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۲. الف) نمایی از داده‌های لرزه‌ای و افق‌های مخزنی مورد مطالعه، ب) نقشه کنٹوری زیر سطحی از افق مورد مطالعه و ج) مدل استاتیکی تهیه‌شده از مخزن.

#### ۴. نشانگرهای لرزه‌ای و تفسیر گسل‌ها

نشانگرهای لرزه‌ای توابع ریاضی مشتق‌شده از داده‌های لرزه‌ای هستند که در حوزه‌های زمان، فرکانس و یا زمان - فرکانس و از داده‌های لرزه‌ای پیش و پس از برانبارش استخراج می‌شوند (برون، ۲۰۰۱). نشانگرهای مشتق‌شده از زمان شامل داده‌های ساختمانی و نشانگرهای مشتق‌شده از دامنه شامل داده‌های چینه‌شناسی و مخزنی هستند (چوپرا و مارفورت، ۲۰۰۵؛ آوست و همکاران، ۲۰۱۰). به‌منظور تفسیر شکستگی‌ها و گسل‌ها در میان ده‌ها نشانگر لرزه‌ای

که در مطالعات لرزه‌ای استفاده می‌شوند؛ نشانگرهای انحنای آشفتگی، واریانس و الگوریتم ردیابی مورچه بیشترین کاربرد را دارند (هانت و همکاران، ۲۰۱۰). در رابطه با نشانگر انحنای می‌توان بیان کرد که پارامتر مورد استفاده در این نشانگر به‌میزان تغییر شیب لایه مورد نظر در ساختار چین‌خورده مربوط است. میزان انحنای ساختارها و لایه‌های زمین‌شناسی را می‌توان بر روی برش‌های افقی داده‌های لرزه‌ای تعیین کرد (ابوالخیر و همکاران، ۲۰۱۲). مقادیر بالای نشانگر انحنای تغییرات ناگهانی در شیب

ساختاری را برجسته می‌کند که شاخصه رایج شکستگی‌ها و گسل‌ها هستند (چوپرا و مارفورت، ۲۰۰۷). هرچقدر میزان انحنا بیشتر باشد، گسل‌ها به صورت برجسته تری نشان داده می‌شوند (روبرت، ۲۰۰۱). در محلی که انحنا وجود داشته باشد، می‌توان میزان تنش موجود در لایه را با استفاده از رابطه (۱) محاسبه کرد (مارفورت، ۲۰۰۷):

$$\sigma = \frac{hE}{2R} = \frac{hKE}{2} \quad (1)$$

که در آن  $h$  ضخامت لایه،  $E$  مدول یانگ،  $R$  شعاع انحنا و  $K$  مقدار انحنا را نشان می‌دهد.

نشانگر بعدی که نشانگر واریانس می‌باشد، به عنوان یک ویژگی لرزه‌ای شناخته می‌شود که عدم پیوستگی در سیگنال را نشان می‌دهد. این عدم پیوستگی در سیگنال می‌تواند به منظور شناسایی گسل‌ها استفاده شود. محاسبه واریانس در سه بعد نشان‌دهنده تغییرپذیری از یک ردلرزه به ردلرزه دیگر در یک فاصله زمانی خاص است و بنابراین باعث ایجاد تغییرات جانبی قابل تفسیر در مکعب لرزه‌ای می‌شود (پریا، ۲۰۰۹). مقدار واریانس بر روی یک ردلرزه به کمک رابطه (۲) محاسبه می‌شود (مارفورت، ۲۰۰۷):

$$\text{Var}(t, p, q, x, y) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J [u_j(t, p_{xj}, q_{yj}) - u(t, p, q)]^2 \quad (2)$$

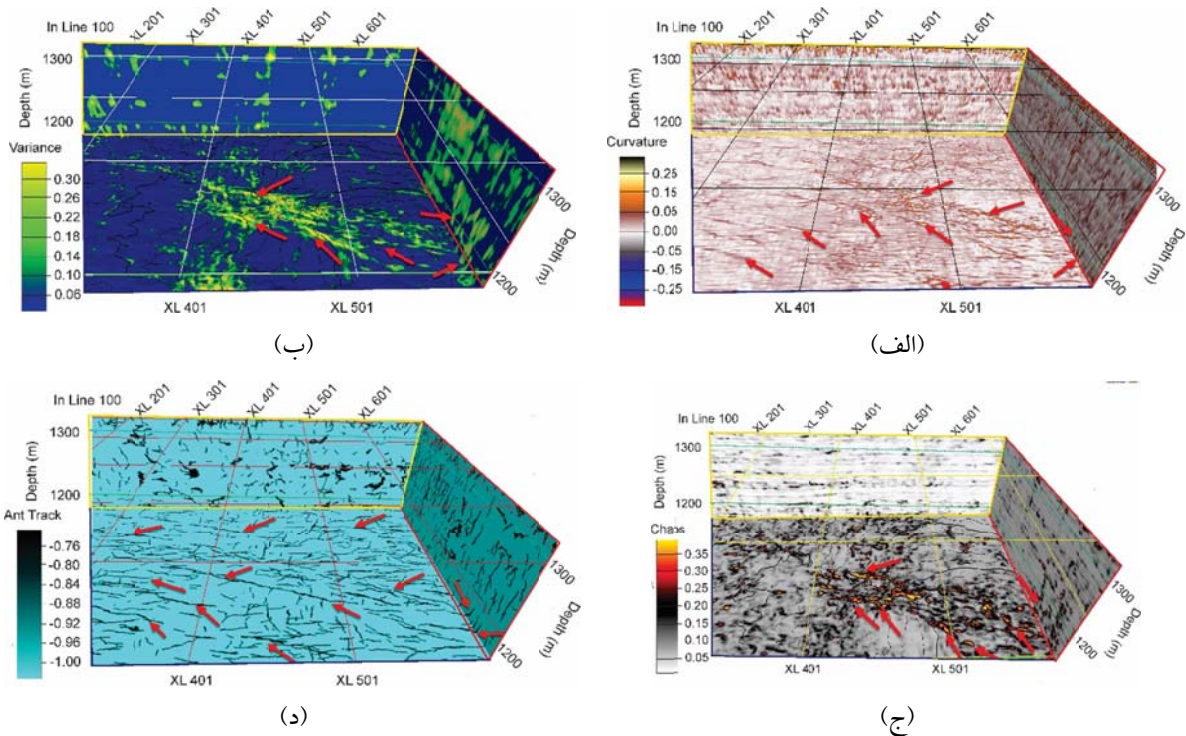
که در آن  $(x, y)$  مختصات نقطه و  $J$  تعداد ردلرزه‌ها است. نشانگر بعدی مورد استفاده در این مطالعه، نشانگر الگوریتم ردیابی مورچه است که بر اساس الگوی رفتاری مورچگان در پیدا کردن مسیر بهینه دستیابی به هدف به کمک کلونی مورچگان تهیه شده است. الگوریتم ردیابی مورچه بر اساس پارامترهای مختلف به ترسیم وقایع و عدم قطعیت در داده‌های لرزه‌ای می‌پردازد (یان و همکاران، ۲۰۱۳). پارامترهای اصلی در الگوریتم ردیابی مورچه شامل مرز اولیه مورچه، انحراف مورچه‌ای و اندازه گام مورچه‌ای است (هو و همکاران، ۲۰۱۴). پارامتر مرز اولیه مورچه کنترل‌کننده تعداد و حجم مکعبی است که مورچه درون آن به جستجو می‌پردازد. پارامتر انحراف

مورچه، حداکثر انحراف مجاز هر عامل را از مسیر اصلی کنترل می‌کند و به مورچه اجازه می‌دهد تا عدد بزرگ تری را جستجو کند. پارامتر اندازه گام مورچه تعیین می‌کند که تا چه حد مورچه برای افزایش جستجوی خود پیشرفت کرده و افزایش این مقدار به مورچه اجازه می‌دهد تا بیشتر جستجو کند و ارتباطات بیشتری را پیدا کند. هنگامی که ردیابی مورچه نتواند لبه‌ها را در یک شعاع تعریف شده دنبال کند، می‌تواند از طریق سه پارامتر دیگر پیشرفت بیشتری داشته باشد. این پارامترها عبارتند از گام غیرمجاز، گام‌های لازم مجاز و معیارهای توقف (چن و همکاران، ۲۰۱۸). در پارامتر گام‌های غیرمجاز، مورچه اجازه دارد هنگامی که یک لبه شناسایی نشده باشد، فراتر از مکان قبلی خود به جستجو بپردازد. در پارامتر گام‌های مجاز مورد نیاز، با استفاده از پارامتر گام غیرمجاز با تعدیل تعدادی از گام‌های معتبر، بعد از یک گام غیرمجاز، جستجو ادامه پیدا می‌کند. پارامتر معیار توقف در ترکیب با مراحل غیرمجاز عمل می‌کند و برای پایان دادن به ردیابی مورچه پس از انجام اقدامات غیرمجاز است. در نهایت پارامترهای بهینه‌شده در الگوریتم ردیابی مورچه، توصیف بهتری از ویژگی‌های ظریف و پیچیده شکستگی‌ها از جمله گسل‌های کوچک مقیاس در داده‌های لرزه‌ای ارائه می‌دهد. ویژگی‌های غیرساختاری مانند کانال‌های مدفون کمتر احتمال دارد که توسط الگوریتم ردیابی مورچه تشخیص داده شوند، زیرا این ویژگی‌ها معمولاً دارای بافت‌های آشفته در داخل کانال هستند (جانسن، ۲۰۰۵). استفاده از چندین نشانگر این امکان را فراهم می‌کند تا به طور همزمان بر روی چند نشانگر مطالعه کرده و با ترکیب چندین نوع اطلاعات متفاوت با یکدیگر، دقت و صحت مدل نهایی را افزایش داد. تفسیر گسل‌ها در اغلب موارد به علت کیفیت پایین داده‌های لرزه‌ای تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این امر باعث افزایش استفاده از روش‌های ردیابی‌های خودکار گسل‌ها می‌شود (اودو و همکاران، ۲۰۱۴). تفسیر نشانگرهای لرزه‌ای می‌تواند گسترش مکانی هر گسل را به خوبی نشان



همکاران، ۲۰۱۳؛ نگری و همکاران، ۲۰۱۵)، نشانگرهای آشفتگی، واریانس، انحنا و الگوریتم ردیابی مورچگان از داده‌های لرزه‌ای استخراج شده است. مکعب نشانگر انحنا که از داده لرزه‌ای در میدان مورد مطالعه به دست آمده و گسل‌های مدل‌شده که با پیکان نشان داده شده‌اند، در شکل ۳-الف آورده شده است. این نشانگر توانسته گسل‌های بزرگ مقیاس که دارای جهت یافتگی شمال‌غربی-جنوب‌شرقی هستند را آشکارسازی کند. در شکل ۳-ب خطوط مشخص شده، نشان‌دهنده ویژگی‌های ظاهری گسل بر روی نشانگر واریانس می‌باشد. با پیاده‌سازی این نشانگر بر روی سطح سازند عرب پایینی، اثر گسل‌ها به خوبی نمایان شده و مکان‌هایی که دارای بیشترین گسل خوردگی بوده با پیکان بر روی مدل مشخص شده‌اند.

دهد. این مسأله اجازه می‌دهد تا بتوان با روش دستی انتخاب صحیحی از مناطق گسلی را بر روی مقاطع لرزه‌ای داشت. سپس با ارتباط خطوط تفسیری صرفاً بر روی این مقاطع زمانی می‌توان سطوح گسلی را ایجاد کرد. در این بررسی، سطوح گسلی با استفاده از تکنیک‌های تفسیری شناسایی امتداد و پیوستگی رخداده‌ها، شیب رخداده‌های بازتابی و سایر الگوهای لرزه‌ای در مقطع مورد تفسیر قرار گرفته‌اند. این عملیات، به صورت تکراری و بر روی مقاطع لرزه‌ای، نقشه‌های کنتوری زیرسطحی زمانی و مقاطع نشانگر لرزه‌ای انجام گرفت. انتخاب ویژگی‌های گسلی بر روی یک شبکه منظم صورت گرفته و سطوح گسلی برای تمام افق‌های مورد نظر ارزیابی شد. به منظور تفسیر گسل‌های میدان مورد مطالعه ابتدا بر اساس مطالعات پیشین (مهدوی‌بصیر و



شکل ۳. الف) شناسایی گسل‌ها بر روی مقطع نشانگر انحنا، در این شکل گسل‌های بزرگ مقیاس و اصلی میدان با پیکان نشان داده شده‌اند. اکثر گسل‌ها دارای جهت یافتگی شمال‌غربی-جنوب‌شرقی هستند. ب) نمایش گسل‌ها توسط نشانگر سطحی واریانس. بیشترین تمرکز گسل‌ها در مرکز و جنوب میدان مورد مطالعه است. ج) شناسایی گسل‌ها توسط نشانگر سطحی آشفتگی و د) نتیجه اعمال الگوریتم ردیابی مورچگان بر روی مکعب لرزه‌ای.

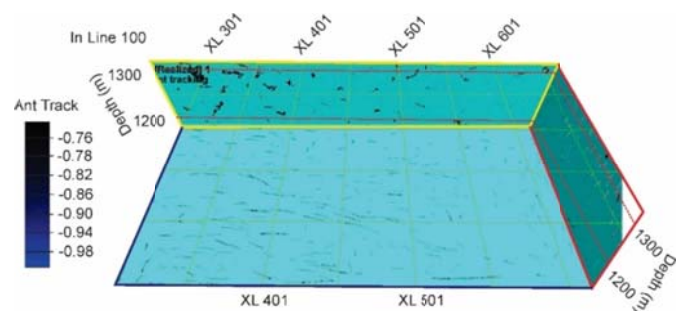
در شکل ۳-ج، پیکان‌ها نشان‌دهنده محل گسل‌ها بر روی سطح سازند عرب پایینی می‌باشند که توسط نشانگر آشفستگی نمایان شده‌اند. با توجه به شکل ۳، بر روی مکعب‌های نشانگرهای واریانس و آشفستگی نسبت به مکعب نشانگر انحنای گسل‌های کمتر ولی با وضوح بالاتری مشاهده می‌شوند. شکل ۳-د نتیجه پیاده‌سازی الگوریتم ردیابی مورچه را نشان می‌دهد که به‌خوبی توانسته لبه‌های گسل‌ها را به‌صورت چشم‌گیری برجسته کند. با توجه به شکل ۳-د، گسل‌های کوچک‌مقیاس که توسط دیگر نشانگرها قابل تشخیص نبوده‌اند با کمک الگوریتم ردیابی مورچگان شناسایی شدند. با بهینه‌سازی پارامترهای مختلف در الگوریتم ردیابی مورچگان، می‌توان به شناسایی گسل‌های کوچک‌مقیاس با دقت بالاتری پرداخت. در این مطالعه پارامترهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و به کمک آنالیز حساسیت‌سنجی، بهترین پارامترها انتخاب شدند. پارامترهای مورد آزمایش و مقادیر بهینه در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در این مرحله فرآیند حساسیت‌سنجی به‌منظور تشخیص میزان تأثیرگذاری پارامترهای الگوریتم ردیابی مورچه در صحت مدل نهایی صورت گرفت. بدین‌منظور با استفاده از کمترین و بیشترین مقادیر پارامترهای مختلف الگوریتم ردیابی مورچه با گام‌های کوچک، شناسایی گسل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۲ و شکل ۴، اثر کمترین و بیشترین مقادیر پارامتر مرز اولیه مورچه در مقایسه با مقدار بهینه آن در حالت مورچه‌های

فعال به‌صورت مستقل از یکدیگر بر روی نشانگر الگوریتم ردیابی مورچه مورد بررسی قرار گرفتند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شکل ۴-الف، مقدار ۱ به‌عنوان حداقل مرز اولیه مورچه در حالت مورچه‌های فعال در نظر گرفته شد. با توجه به شکل ۴-الف، همان‌گونه که پیش‌بینی شده بود، الگوریتم ردیابی مورچگان با مقدار حداقلی مرز اولیه مورچه قادر به شناسایی همه گسل‌ها نمی‌باشد. در شکل ۴-ب، مقدار ۳۰ به‌عنوان حداکثر مرز اولیه مورچه در حالت مورچه‌های فعال در نظر گرفته شد. در شکل ۴-ب نیز همان‌گونه که قابل‌پیش‌بینی بود، الگوریتم ردیابی مورچگان با مقدار حداکثر مرز اولیه مورچه همه گسل‌ها و یا خط‌وارگی‌ها را شناسایی کرده. با این حال در بهینه‌ی گسلی، نوفه‌های زیادی مشاهده می‌شود که این نوفه‌ها در بیشتر نقاط می‌تواند تفسیر گسل‌ها را دچار خطا کند. شکل ۴-ج نشان‌دهنده نتیجه الگوریتم ردیابی مورچه توسط پارامتر بهینه جهت بهبود در نمایش گسل‌ها است. همان‌طور که مشاهده می‌شود گسل‌ها به‌خوبی شناسایی شده و میزان نوفه به حداقل مقدار خود رسیده است. لازم به‌ذکر است که آنالیز حساسیت‌سنجی برای همه پارامترها و همه مقادیر در کل بازه حداقل و حداکثر با گام ۱ صورت گرفت که به‌دلیل حجم بسیار بالای اطلاعات، جداول و شکل‌های لازم، تنها مقادیر حداقل، حداکثر و مقدار بهینه آورده شده است. اعتبارسنجی مقدار بهینه نیز با توجه به نقاط کنترلی از داده‌های چاه صورت گرفت.

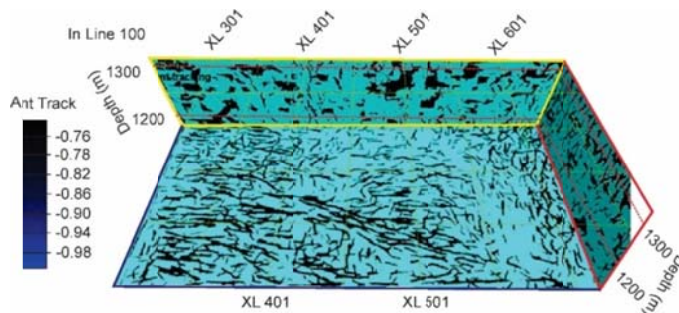
جدول ۱. پارامترهای مختلف الگوریتم ردیابی مورچه، استفاده‌شده در این مطالعه.

پارامتر	شرط توقف	گام مجاز	گام غیر مجاز	ابعاد هر گام	انحراف مسیر	شرایط مرزی
حداقل	۰	۰	۰	۲	۰	۱
حداکثر	۵۰	۳	۳	۱۰	۳	۳۰
مورچه منفعل	۵	۳	۱	۳	۲	۷
مورچه فعال	۱۰	۲	۲	۳	۲	۵

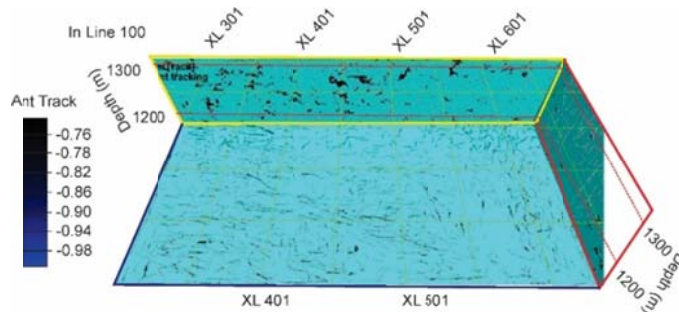




(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴. بررسی میزان حساسیت پارامترهای الگوریتم ردیابی مورچه نسبت به تشخیص گسل‌ها. الف) انتخاب عدد ۱ به‌عنوان مقدار حداقلی مرز اولیه مورچه در حالت مورچه‌های فعال و عدم توانایی در شناسایی همه گسل‌ها. ب) انتخاب عدد ۳۰ به‌عنوان مقدار مرز اولیه مورچه در حالت مورچه‌های فعال و شناسایی همه گسل‌ها همراه با نوفه فراوان و ج) انتخاب عدد بهینه ۵ و شناسایی همه گسل‌ها بدون نوفه.

جدول ۲. پارامترهای مختلف الگوریتم ردیابی مورچه استفاده‌شده در حساسیت‌سنجی.

پارامتر	شرط توقف	گام مجاز	گام غیر مجاز	ابعاد هر گام	انحراف مسیر	شرایط مرزی
حداکثر	۱۰	۲	۲	۳	۲	۳۰
یک مورچه	۱۰	۲	۲	۳	۲	۱
مسیر مورچه	۱۰	۲	۲	۳	۲	۵

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تعداد ۳۸ گسل با این روش شناسایی و مدل شد. در روش دوم، گسل‌ها با کمک الگوریتم ردیابی مورچگان شناسایی شد که در شکل ۵-ب نشان داده شده‌اند. در شکل ۶ اطلاعات

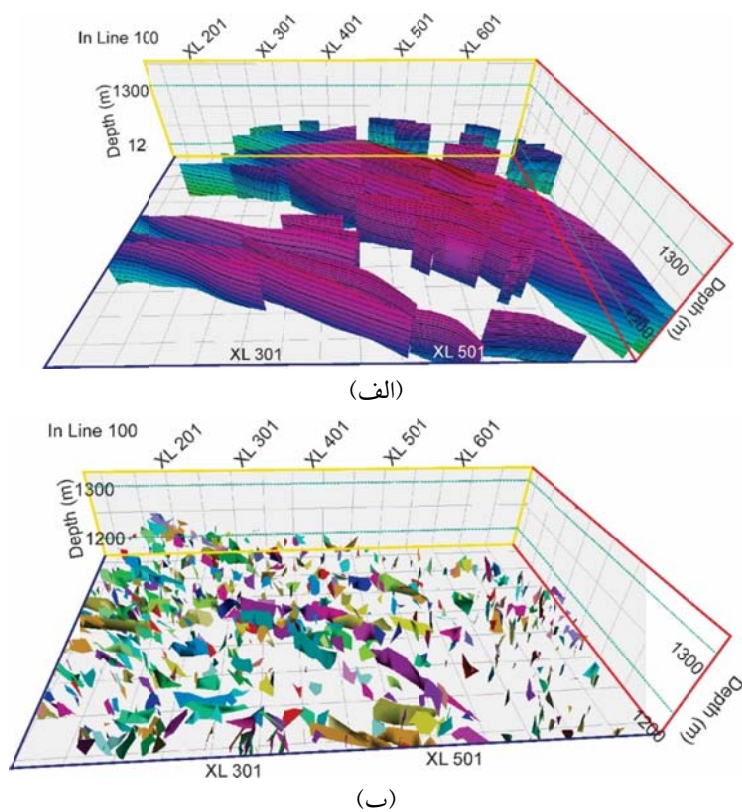
در ادامه با توجه به استراتژی پیشنهادی، شناسایی و مدل‌سازی گسل‌ها به دو روش دستی و خودکار انجام گرفت. گسل‌هایی که با روش دستی از مکعب لرزه‌ای استخراج شده است در شکل ۵-الف نشان داده شده‌اند.

### ۵. اعتبارسنجی و تلفیق مدل‌های شکستگی

به منظور اعتبارسنجی مدل‌های شکستگی تهیه شده، از اطلاعات مغزه و چاه نمودارهای تصویری استفاده می‌شود. در این مطالعه با توجه به داده‌های موجود، برای اعتبارسنجی گسل‌ها از نمودار تصویری چاه موجود در میدان مورد مطالعه استفاده شد. همان‌گونه که در شکل‌های ۷-الف و ۷-ب مشاهده می‌شود، گسلی با شیب ۴۶ درجه و آزمون شیب ۲۲۵ درجه در عمق ۲۸۴۲ متری در چاه شناسایی شده است. در شکل ۷-ب، گسل مورد نظر بر روی چاه نمودارهای شناسایی و تفسیر شده و با استفاده از نمودارهای تهیه شده شدت شکستگی و توزیع تجمعی آنها (شکل ۷-ج)، مدل شکستگی‌های کوچک مقیاس در داده‌های چاه تهیه شد. این تطابق بیان کننده اعتبار بالای تفسیر گسل‌ها می‌باشد.

گسل‌های تفسیر شده‌ای که با روش دستی به دست آمده‌اند، در کنار اطلاعات گسل‌هایی که با روش خودکار مدل شده، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. با توجه به شکل‌های ۶-الف و ۶-ب، در هر دو روش بیشترین شیب گسل‌ها بین ۸۰ تا ۹۰ درجه مشاهده شده است.

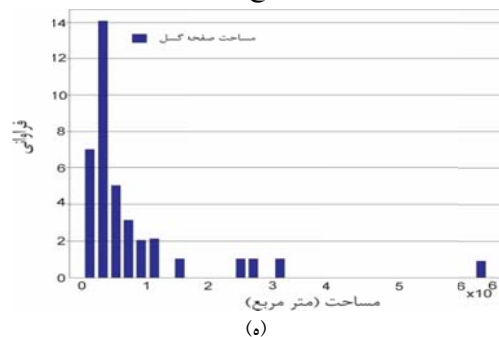
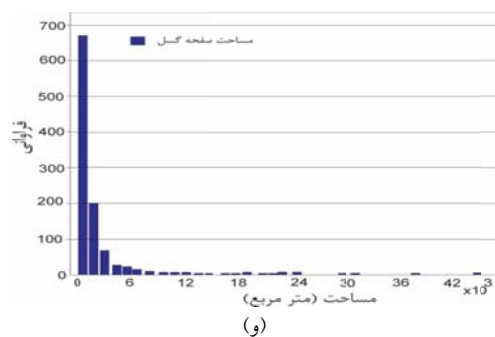
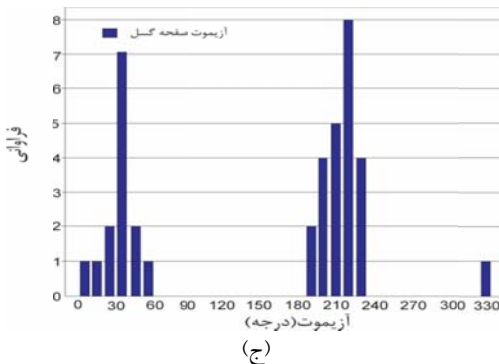
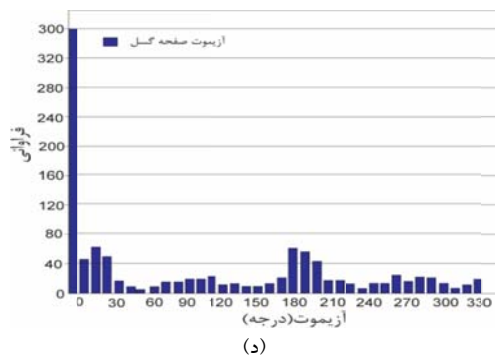
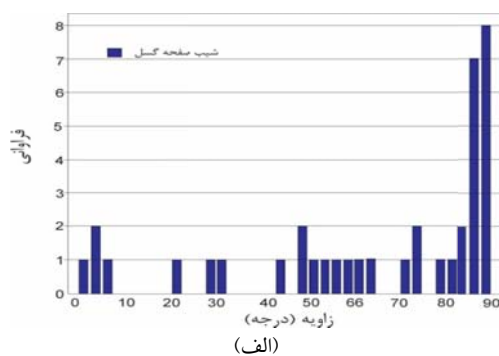
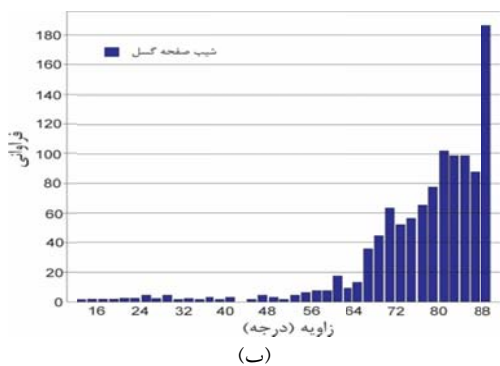
در شکل‌های ۶-ج و ۶-د، مشاهده می‌شود که آزمون شیب گسل‌ها در هر دو روش از روند شمالی-جنوبی و شمال شرقی-جنوب غربی پیروی می‌کند. شکل‌های ۶-ه و ۶-و، مساحت گسل‌های مدل شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، گسل‌هایی که با روش دستی استخراج شده‌اند دارای مساحت بیشتری در مقایسه با گسل‌هایی هستند که با روش خودکار مدل شده‌اند. این تفاوت در مساحت، میزان توانایی در استخراج گسل‌های کوچک مقیاس با روش دستی و خودکار را نشان می‌دهد.



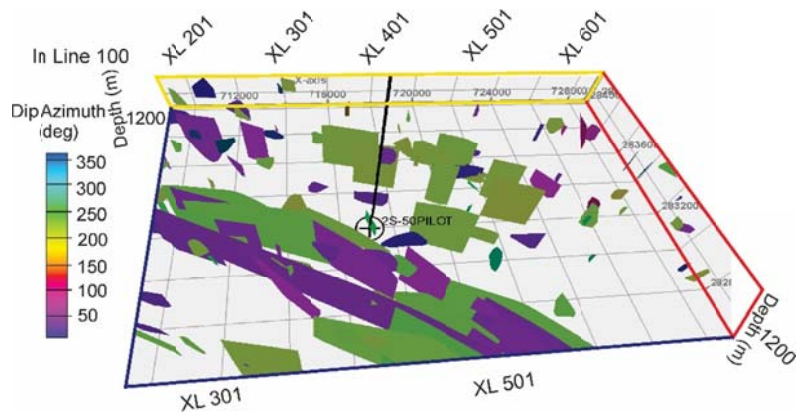
شکل ۵. الف) گسل‌های استخراج شده از مکعب داده‌های لرزه‌ای، با روش دستی و ب) مجموعه گسلی استخراج شده از مکعب الگوریتم ردیابی مورچه به روش خودکار.

احتمالی با هر مرتبه فرآیند تهیه مدل بر روی یک سری داده ثابت، جواب‌های مختلفی به دست می‌آید که احتمال وقوع آنها باهم برابر است. در روش قطعی، نتایج به دست آمده وابسته به توزیع پارامترهای داده‌های ورودی هستند و همچنین این فرآیند دارای زمان پردازش کمتری است. در ساخت مدل گسسته شکستگی در فرآیند مدل‌سازی شکستگی قطعی، به طور معمول می‌توان تنها گسل‌هایی که مانند گذرگاهی برای عبور سیال عمل می‌کنند را در فرآیند تلفیق مد نظر قرار داد.

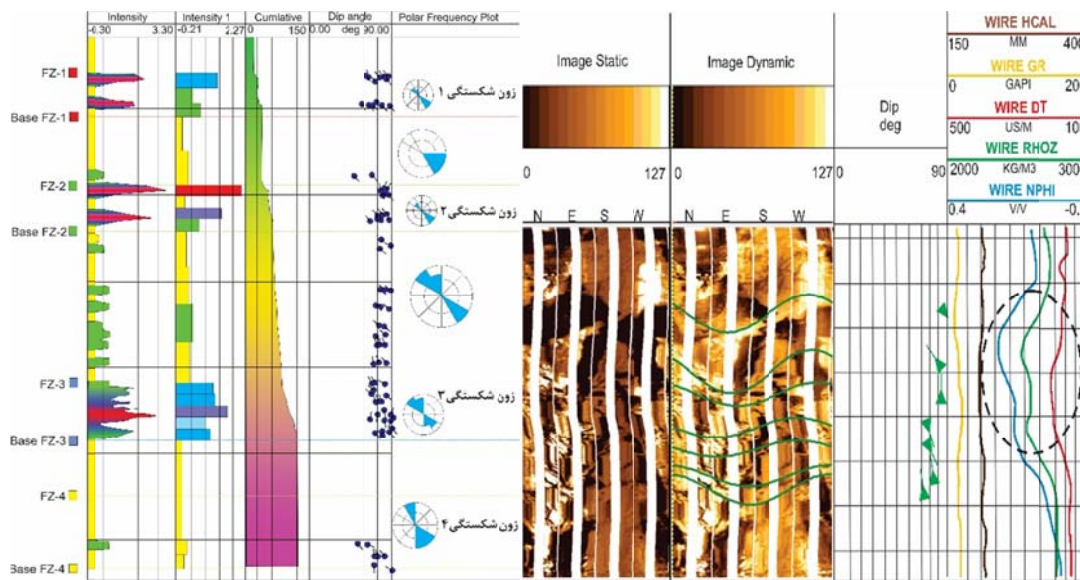
از طرفی بر روی مقاطع لرزه‌ای در محل برخورد گسل‌ها با خط لرزه‌ای نیز می‌توان صحت تفسیر گسل‌های شناسایی شده را مورد ارزیابی قرار داد. پس از ارزیابی مدل‌های شکستگی تهیه شده، در این مرحله مدل‌های شکستگی به دست آمده وارد فرآیند تلفیق می‌شوند. در فرآیند تلفیق و ساخت شبکه‌ی گسسته شکستگی چندمقیاسی، از همه‌ی شکستگی‌ها و گسل‌های موجود که در هر دو روش پیشین مدل شده‌اند، استفاده می‌شود. در فرآیند تلفیق می‌توان از دو روش مدل‌سازی قطعی و مدل‌سازی احتمالی استفاده کرد. در روش‌های



**شکل ۶.** الف) شیب گسل‌های استخراج شده با روش دستی، ب) شیب مجموعه گسلی استخراج شده با روش خودکار، ج) آزیموت شیب گسل‌های استخراج شده با روش دستی، د) آزیموت شیب مجموعه گسلی استخراج شده با روش خودکار، ه) مساحت گسل‌های استخراج شده با روش دستی و و) مساحت گسل‌های استخراج شده با روش خودکار.



(الف)



(ج)

(ب)

شکل ۷. الف) مدل شکستگی تهیه شده که در آن گسل های مدل شده در محل چاه گرفته شده و به خوبی قابل شناسایی است. ب) نمودار تصویری چاه مربوطه که منحنی آبی سبز نشان دهنده گسل موجود در دیواره چاه است. همچنین سایر نمودارهای پتروفیزیکی نیز نشان دهنده محل گسل خوردگی هستند. ج) مدل شکستگی تهیه شده توسط چاه نمودار تصویری که نشان دهنده مدل شکستگی در محدوده مخزن است.

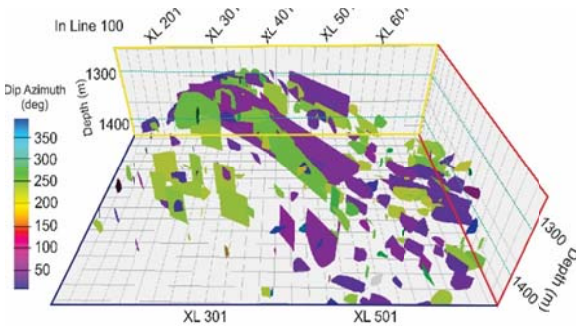
تلفیقی نهایی را نشان می دهد. در این مدل نیز آزمون شیب گسل های کوچک و بزرگ در دو کلاس متفاوت را نشان می دهد. همچنین مشخصات زاویه شیب و طول گسل ها در مدل تلفیقی دو مقیاسی در شکل های ۸-ج و ۸-د نشان داده شده اند. ویژگی های مختلف شکستگی های مدل سازی شده در مدل تلفیقی نهایی را همچنین می توان به صورت آماری مورد بررسی قرار داد. جدول ۳ نشان دهنده شیب، آزمون شیب، طول و مساحت هر یک از گسل های موجود در مدل تلفیقی گسل ها می باشد. با

بدین منظور گسل هایی که از هر روش به دست آمده، کلاس بندی شده و سپس بر اساس خصوصیات هر کلاس، وارد فرآیند تلفیق به روش مدل سازی قطعی می شوند. مدل قطعی گسل ها، نشان داده شده در شکل ۸-الف دارای دو کلاس می باشد. کلاس اول شامل گسل هایی است که با روش دستی مدل شده و کلاس دوم شامل گسل هایی است که با روش خودکار استخراج شده اند. این مدل را می توان برای سایر خصوصیات گسل ها نیز به دست آورد. شکل ۸-ب آزمون شیب گسل های مدل شده در مدل

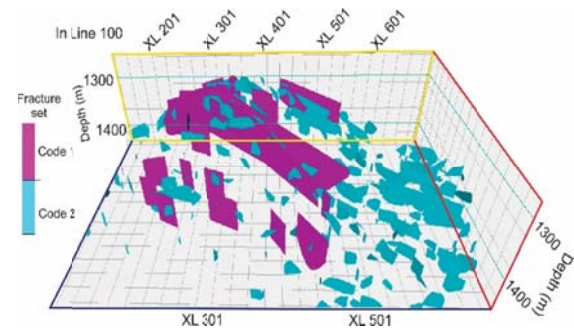


استراتژی پیشنهادی، تعیین پارامتر طول گسل‌ها است که در سازند مخزنی مورد مطالعه وبا توجه به جدول ۳، میانگین طول به‌دست آمده برای گسل‌ها ۸۸۵ متر می‌باشد.

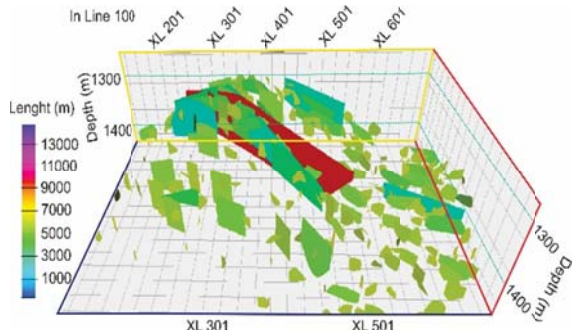
توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که میانگین آزمون شیب گسل‌های موجود در این مدل ۱۳۴ درجه و شیب میانگین گسل‌ها ۸۱ درجه می‌باشد. از مزایای مهم



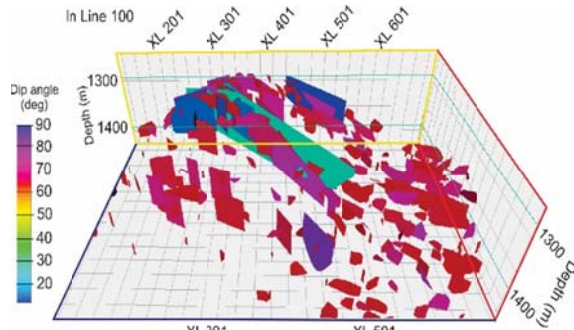
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸. مدل‌سازی ویژگی‌های شکستگی در مدل چندمقیاسی نهایی. (الف) کلاس‌بندی شکستگی‌ها در دو دسته بزرگ‌مقیاس و کوچک‌مقیاس، (ب) مشخصه آزمون شیب شکستگی‌ها، (ج) مشخصه زاویه شیب شکستگی‌ها و (د) مشخصه طول شکستگی‌ها.

جدول ۳. ویژگی‌های مختلف گسل‌های مدل‌سازی شده به روش پیشنهادی.

پارامتر	حداقل	حداکثر	میانگین
شیب (درجه)	۴	۹۰	۸۱
آزمون شیب (درجه)	۵	۳۵۸	۱۳۴
طول (متر)	۱۲۵	۱۳۶۵۴	۸۸۵
مساحت (متر مربع)	۱۲۳۰	۶۳۶۱۸۶۱	۱۰۱۵۱۳

## ۶. نتیجه گیری

گسل‌های بزرگ مقیاس استخراج شده به روش دستی و گسل‌های کوچک مقیاس استخراج شده به روش خودکار هستند، به عنوان یک مدل چندمقیاسی از شکستگی‌ها شناخته می‌شود تهیه می‌شود. بر اساس اعتبارسنجی انجام شده به کمک داده‌های چاه، تفسیر و مدل‌سازی گسل‌ها از دقت بالایی برخوردار هستند. مطالعه حاضر نشان داده که با استفاده از مدل‌سازی گسل‌ها به روش تلفیقی، می‌توان همه ویژگی‌های گسل‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس از جمله شیب، آزمون شیب و طول گسل را مدل کرد و از مدل چندمقیاسی تهیه شده در ادامه مطالعات مدل‌سازی سایر خواص مخزن استفاده کرد.

## مراجع

وارسته، ع، سیاه کوهی، ح، خامه‌چی، ا. و نوروزی، س.، ۱۳۹۱، کاربرد نشانگرهای لرزه‌ای همدوسی در توصیف گسل‌ها و شکستگی‌های مخزن، مجله پژوهش نفت، ۶۹، ۶۴-۷۲.

ارزیابی نشانگرهای لرزه‌ای در این تحقیق نشان داد که نشانگرهای انحناء، آشفستگی و واریانس در تشخیص گسل‌های بزرگ مقیاس کارآمد هستند. از طرفی تغییر در پارامترهای مختلف الگوریتم ردیابی مورچگان و انتخاب بهترین مقدار، باعث برجسته شدن گسل‌های مخزن می‌شود، با کمک الگوریتم ردیابی مورچگان علاوه بر گسل‌های بزرگ مقیاس، گسل‌های کوچک مقیاس نیز قابل مشاهده هستند. در این تحقیق برای تفسیر گسل‌ها از دو روش دستی و خودکار استفاده شد که در روش دستی، گسل‌های بزرگ مقیاس استخراج شدند و در روش خودکار با استفاده از داده‌های الگوریتم ردیابی مورچگان، گسل‌های کوچک مقیاس استخراج شدند. روش استخراج خودکار گسل‌ها یک روش بسیار سریع نسبت به روش استخراج دستی می‌باشد که با استفاده از فیلترهای مختلف موجود در این روش می‌توان خطای آن را به طور چشم‌گیری کاهش داد. مدل تلفیقی به دست آمده که شامل مدل

- Abul Khair, H., Cooke, D., Backé, G., King, R., Hand, M., Tingay, M. and Holford, S., 2012, Subsurface mapping of natural fracture networks; A major challenge to be solved. Case study from the shale intervals in the copper basin, south Australia, SGP, TR 194.
- Avseth, P., Mukerji, T. and Mavko, G., 2010, Quantitative seismic interpretation: applying rock physics tools to reduce interpretation risk, Cambridge University Press, ISBN 0-521-15135-X.
- Brown, A., 2001, Understanding seismic attributes, *Geophysics*, 66, 47-49. <https://doi.org/10.1190/1.1444919>
- Cao, R., Fang, S., Jia, P., Cheng, L., and Rao, X., 2019, An efficient embedded discrete-fracture model for 2D anisotropic reservoir simulation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 174, 115-130. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.11.004>.
- Chen, L., Xiao, C., Li, X., Wang, Z., and Huo, S., 2018, A seismic fault recognition method based on ant colony optimization. *Journal of Applied Geophysics*, 152, Pages 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.02.009>
- Chopra, S. and Marfurt, K.J., 2005, Seismic attributes A historical perspective, *Geophysics*, 70 (5), 3-28. <https://doi.org/10.1190/1.2098670>.
- Chopra, S. and Marfurt, K.J., 2007, Volumetric curvature attributes add value to 3D seismic data interpretation, *Proceedings, The Leading Edge*, 26(7), 856-867. <https://doi.org/10.1190/1.2756864>.
- Dorigo, M., and Stützle, T., 2004, *Ant colony optimization*, MIT Press, ISBN: 9780262042192
- Hale, D., 2013, Methods to compute fault images, extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images, *Geophysics*, 78 (2), 33-43. <https://doi.org/10.1190/geo2012-0331.1>.
- Hashemi Shahdani, H., and Javaherian, A., 2009, Seismic attribute redundancy reduction using statistical feature extraction technique, 1<sup>st</sup> EAGE International Petroleum Conference and Exhibition, Session: Seismic Interpretation-Attribute Analysis, Shiraz, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20145883>
- Hashemi Shahdani, H., Hadiloo, S., Mirzaee, S., and Beiranvand, B., 2017, SeisART software: seismic facies analysis by contributing interpreter and computer. *Arabian Journal of Geosciences*, 10 (23), 519.



- <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3274-8>
- Hu, J.L., Kang, Z.H., and Yuan, L.L., 2014, Automatic fracture identification using ant tracking in Tahe oilfield, *Advanced Materials Research*, 962, 556-559, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.962-965.556>
- Hunt, L., Reynolds, S., Broen, T., And Hadley, S., 2010, Quantitative estimate of fracture density variations in the Nordegge with azimuthal AVO and curvature: A case study, *The Leading Edge*, 1122-1137. <https://doi.org/10.1190/1.3485773>
- Jansen, K., 2005, Seismic investigation of wrench faulting and fracturing at Rulison field Master's Thesis, Colorado School of Mines.
- Konyuhov, A. I., Maleki, B., 2006, The Persian Gulf Basin: Geological history, sedimentary formations, and petroleum potential. *Lithology and Mineral Resources*. 41(4), 344-361 <https://doi.org/10.1134/S0024490206040055>
- Kurison, C., Kuleli, H. S., Mubarak, A., Al-Sultan, A., and Shehri, S. J., 2019. Reducing uncertainty in unconventional reservoir hydraulic fracture modeling: A case study in Saudi Arabia. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 71, 102948, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102948>
- Li, J., Mitra, S., and Qi, J., 2020, Seismic analysis of polygonal fault systems in the Great South Basin, New Zealand. *Marine and Petroleum Geology*, 111, 638-649, <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.052>
- Mahdavi Basir, H., Javaherian, A. and Tavakoli, M., 2013, Multi-attribute ant-tracking and neural network for fault detection: a case study of an Iranian oilfield, *Journal of Geophysics and Engineering*. 10, <https://doi.org/10.1088/1742-2132/10/1/015009>
- Marfurt, k., 2007, Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization, vol.1 EAGE, 45-71
- Maerten., Legrand, X., Castagnac, C., Lefranc, M., Joonnekindt, J. P., and Maerten, F., 2019. Fault-related fracture modeling in the complex tectonic environment of the Malay Basin, offshore Malaysia: An integrated 4D geomechanical approach. *Marine and Petroleum Geology*, 105, 222-237, <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.04.025>
- Negri, A. P., Tamunobereton-ari, I., and Amakiri, A. R. C., 2015, Ant-tracker attributes: an effective approach to enhancing fault identification and interpretation, *IOSR Journal*, 5, 67-73. <https://doi.org/10.9790/4200-05626773>
- Noori, M., Hassani, H., Javaherian, A., Amindavar, H., and Torabie, S., 2019, Automatic fault detection in seismic data using Gaussian process regression, *Journal of Applied Geophysics*, 163, 117-131, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.02.018>
- Odoh, B.I., Ilechukwa, J.N. and Okoli, N.I., 2014, The use of seismic attributes to enhance fault interpretation of OT field, Niger delta, *International Journal of Geosciences*, 5, 826-834. <https://doi.org/10.4236/ijg.2014.58073>
- Özkaya, S. I., 2019, Fracture modeling from borehole image logs and water invasion in carbonate reservoirs with layer-bound fractures and fracture corridors. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 179, 199-209. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.04.052>
- Pedersen, S. I., Randen, T., Sonnelan, L., and Steen, O., 2002, Automatic fault extraction using artificial ants, SEG Int'l Exposition and 72<sup>nd</sup> Annual Meeting, Salt Lake City, <https://doi.org/10.1190/1.1817297>
- Pereira, L.A.G.R., 2009, Seismic attributes in hydrocarbon reservoirs characterization: Master Thesis, The Department of Geosciences of the University of Aveiro, Portugal
- Ren, J., and Guo, P., 2019. A novel semi-analytical model for finite-conductivity multiple fractured horizontal wells in shale gas reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 24, 35-51. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.03.015>
- Roberts, A., 2001, Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons, *First Break*, 19, 85-100. <https://doi.org/10.1046/j.0263-5046.2001.00142.x>
- Souche, L., Astratti, D., Aarre, V., Clerc, N., Clark, A., Al Dayyani, T. N. A. and Mahmoud, S. L., 2012, A dual representation of multiscale fracture network modelling: application to a giant UAE carbonate field, *First Break* 30, 43-52. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2012004>
- Xu, S., Feng, O., Li, Y., and Wang, S., 2019, An integrated workflow for fracture propagation and reservoir simulation in tight oil. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 179, 1159-1172, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.05.007>
- Yan, Z., Gu, H., and Cai, C., 2013, Automatic fault tracking based on ant colony algorithms, *Computers and Geosciences*, 51, 269-281, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.08.003>
- Yao, X., Chen, W. Hu, G., Zou, W., and Li, Z., 2014, A fault surface extraction and

reconstruction method based on 3D seismic image, SEG Denver Annual Meeting, 1543–1547. <https://doi.org/10.1190/segam2014-1006.1>.

## Introducing an integrated strategy in fault modelling with multi-attributes in 3D seismic data in a field from Persian Gulf

Samadi, I.<sup>1</sup>, Kordi, M.<sup>2\*</sup>, Soleimani Monfared, M.<sup>3</sup> and Ahmadi, A.<sup>4</sup>

1. M.Sc. Graduated, Department of Petroleum Engineering and Geophysics, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
2. Assistant Professor, Department of Petroleum Engineering and Geophysics, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
3. Associate Professor, Department of Petroleum Engineering and Geophysics, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
4. M.Sc., Iranian Offshore Oil Company, Tehran, Iran

(Received: 24 Aug 2019, Accepted: 21 Jan 2020)

### Summary

Fault and fracture modelling is an important step in reservoir engineering which is required for any reservoir characterization and production management. There are various types of methods and strategies for building such models, however, each has its own advantages and drawbacks. The most important issue that should be considered is the ability to model both large- and small-scale faults, simultaneously. It is important, as large faults define geological frameworks of the reservoir, while small faults influence fluid movement in the reservoir. In this study, we introduce an integrated strategy for modelling small- and large-scale faults by seismic data, using multi-attributes. Large faults are defined by hand picking from seismic data using attributes, and small faults are modelled by an automatic ant tracking algorithm. Then, two separated models are integrated to build a unique, but multi-scale fault model. Result of each step of modelling is evaluated by well data. The methodology is applied on a hydrocarbon reservoir from the Persian Gulf. Results show that the multi scale fault model is accurate when evaluated by well data.

Integrated modelling of faults of fractures to obtain a unique multi-scale model is an interesting topic in reservoir engineering. Normally fractured reservoirs are divided into several production zones based on division made by large faults, while fluid movement in each zone is controlled by small fractures and faults. Thus, obtaining a unique model which contain information of faults in several scale is under investigation. However, conventional methods use separate sources of information for modelling faults in various scales. Large scale faults are normally modelled by seismic data while well data are used for modelling small faults. Ozkaya (2019) stated that modelling of faults both with seismic and well data would reduce uncertainty in reservoir fracture modelling. Cao et al. (2019) introduced an integrated strategy for modeling faults with two scales in 2D seismic data, but using seismic and well data. Kurison et al. (2019) have modelled faults and fractures in reservoir with 3D seismic data and well data, but in separate manners. But their final interpretation has shown that using both types of model would result in better reservoir modelling. Xu et al. (2019) introduced an integrated strategy for modelling faults and fractures in two scales simultaneously using seismic and well data. In this study, we introduce an integrated strategy for multi-scale fault modelling using only seismic data, which could be used in reservoirs which lack of well data.

The proposed strategy introduced here, initiates with a geological model building. Subsequently, large faults can be defined on seismic data and related attributes. Simultaneously, small scale faults can be modelled by an ant tracking algorithm in an automatic manner, then it would be refined by interpreter to remove other lineaments than fault that was modelled by the algorithm. Each model then would be evaluated by well data and in case of any error in the model, they would be removed by more ant tracking parameter optimizations and also deeper investigation by the interpreter. In the final step, both fault model would be integrated to build a unique informative multi-scale fault model which contains information of all faults in various sizes. Other characteristics of faults in the integrated model would be investigated for further analysis.

Large scale fault model showed major faults with northwest-southeast trending acting in the center of the reservoir, which has a dome shaped structure, and some minor faults with various trending around the major one. Through this modeling curvature, chaos and variance attributes were used for better fault detection. Small faults obtained by ant tracking distributed around the center of the field. Ant tracking algorithm parameter were optimized through sensitivity analysis prior to application. Afterwards, fault model was refined to remove non-fault lineament. Both models were evaluated by a fullbore formation microimager (FMI) log which proved fractures and faults that were obtained by seismic data. One fault that was detected by the proposed strategy were also captured by well. Then both fault models were integrated to a unique model and faults were modeled by deterministic method.

The integrated fault model obtained by the proposed strategy revealed the importance of a multi-scale fault model in reservoir engineering. Large faults of the study reservoir showed different zones of fractures in the formation reservoir, while small faults in the same model built a discrete network of fractures which provides canals for fluid movement. The integrated model shows that large faults in the study field are mostly in the center of the reservoir, while small faults are distributed through the edges of the formation reservoir, which could be used for further investigation of locating for production and/or injection wells.

**Keywords:** Multiscale modelling, Seismic attributes, Curvatures, Chaos, Ant tracking algorithm.

\* Corresponding author:

masoumeh.kordi@shahroodut.ac.ir