

## مدلسازی گسسته و چند مقیاس شکستگی‌ها در مخازن شکافدار طبیعی، مطالعه موردی یکی از میادین خلیج فارس

سعید ملا اسمعیل<sup>۱\*</sup>؛ مهرداد سلیمانی منفرد<sup>۲</sup>؛ سیدرضا قوامی ریابی<sup>۳</sup>

۱. کارشناسی ارشد؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲. دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، پژوهشگر موسسه ژئوفیزیک، موسسه فناوری کارلسروهه،

آلمان

۳. دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۰۷ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۰۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2019.112170.1051

### چکیده

تهیه و به‌روزرسانی مدل‌های دقیق از توزیع شکستگی‌ها در مخازن هیدروکربنی، از موارد پیچیده در مسائل مربوط به ژئومکانیک مخازن است. داده‌های چاه همواره از ارزش بالایی در مدل‌سازی توزیع شکستگی‌ها در مخزن برخوردار هستند. با این حال تکیه بر داده‌های چاه به تنهایی باعث افزایش عدم قطعیت در چگونگی توزیع شکستگی در سرتاسر مخزن می‌شود. روش‌های معمول در توزیع شکستگی، معمولاً از الگوریتم‌های درون‌یابی به منظور پیش‌بینی توزیع فضایی شکستگی‌ها در مخزن استفاده می‌کنند. در این تحقیق با استفاده از مفهوم محرک‌های شکستگی، مدل توزیع شکستگی در مخازنی که اطلاعات چاه به صورت بسیار اندک در دسترس است و در واقع مخزن در مرحله شناسایی است؛ با ترکیب داده‌های لرزه‌نگاری سه بعدی به دست می‌آید. بدین منظور از اطلاعات ارزشمند ولی بسیار اندک چاه تنها برای تعیین زون‌های شکستگی و جهت‌یابی آن‌ها استفاده می‌شود. سپس نشانگرهای تعیین‌کننده شکستگی به عنوان بستر لازم برای توزیع محرک‌های شکستگی در مخزن، از داده‌های لرزه‌ای استخراج می‌گردد. سپس با تعیین محرک‌های شکستگی، مدل توزیع شکستگی با استفاده از روش‌های کریجینگ و شبیه‌سازی گاوسی متوالی به دست می‌آید. در ادامه با پیاده‌سازی الگوریتم‌های تعیین شکستگی بر روی داده‌های لرزه‌ای، مدل‌های توزیع‌های شدت شکستگی به روش کوکریجینگ هم‌مختصات بر روی نشانگرها تهیه می‌شوند. در این مرحله با دسته‌بندی شکستگی‌های مخزن از منظر اهمیت در انتقال سیال و با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی، مدل شبکه گسسته شکستگی برای مقیاس‌های متفاوت شکستگی‌ها، به دست می‌آید. این استراتژی بر روی مخزنی که اطلاعات بسیار اندکی از چاه در آن در دسترس است، پیاده گردید. تفسیر نتایج و مقایسه مدل‌های شبکه گسسته شکستگی به دست آمده با استراتژی پیشنهادی و روش معمول، نشان داد که می‌توان از مفهوم محرک‌های شکستگی جهت توزیع شکستگی‌ها در مخزن با استفاده از داده‌های لرزه‌ای سه بعدی، در مواردی که تعداد چاه‌های بسیار اندکی در مخزن وجود دارد، استفاده کرد.

### واژگان کلیدی

مدل‌سازی گسسته، توزیع شکستگی، مخازن شکافدار، نشانگرهای لرزه‌ای، شبیه‌سازی گاوسی

### ۱. پیشگفتار

سیال در مخزن ایجاد می‌کنند. مشخصاً شناسایی دقیق چگونگی توزیع شبکه‌ای مختلف شکستگی و تعیین انواع آن‌ها، لازمه تهیه هرگونه برنامه پیشنهادی در بهینه‌سازی عملیات حفاری، برنامه‌ریزی تولید، تعیین محل حفر چاه‌های برداشت و یا تزریق، و به صورت کلی، مدیریت مخزن است. در تهیه مدل شبکه شکستگی‌ها، با توجه به ماهیت پیچیده حرکت

مخازن با سیستم شکستگی‌های طبیعی، درصد قابل توجهی از مخازن هیدروکربنی در ساختارهای زمین‌شناسی مختلف دنیا را تشکیل می‌دهند (Nelson, 2001). از این‌رو مدل‌سازی توزیع شبکه شکستگی‌ها در این‌گونه مخازن، از اهمیت بالایی برخوردار است. معمولاً حضور شبکه‌های مختلف شکستگی‌های طبیعی در مخازن، مسیرهای پیچیده‌ای را برای عبور جریان

شکستگی و خصوصیات زمین‌شناسی مرتبط با شکستگی‌ها، فرآیند مدل‌سازی با ترکیب مدل‌های به دست آمده شکستگی تکمیل می‌گردد. همچنین می‌توان ابزارهای هوش مصنوعی در تعیین روابط بین خصوصیات زمین‌شناسی و پارامترهای مؤثر بر شدت شکستگی استفاده کرد (Ouenes et al., 2000). در انواع استراتژی‌های مورد استفاده در تلفیق اطلاعات لازم در تهیه مدل توزیع شکستگی‌ها در مخازن با شبکه شکستگی پیچیده، از ترکیب روش‌های آماری و هوش مصنوعی در یک فرآیند به‌روزرسانی تکراری استفاده می‌شود (Tran et al., 2002). همچنین می‌توان از تکنیک‌های مدل‌سازی شیء‌گرا و روش‌های بهینه‌سازی کلی نیز در کاهش عدم قطعیت مدل نهایی استفاده کرد (Tran et al., 2003). علاوه بر انتخاب استراتژی مناسب در تهیه مدل شبکه شکستگی‌ها، به منظور بهبود مدل در مخازن کربناته، شناسایی و دخالت دادن خصوصیات سنگ‌شناسی کربنات‌ها مانند ویژگی‌های کارستی، خصوصیات هندسی شکستگی، حضور و فراوانی احتمالی شکستگی‌های موجود در مرز رخساره‌ها و همچنین ارتباط بین شدت شکستگی و ضخامت لایه‌بندی نیز مدنظر قرار گیرند (Dershowitz, 2007).

در بیشتر مطالعات و البته در مواردی که میدان مورد مطالعه، مراحل تولید را پشت سر گذاشته و در مرحله توسعه است، می‌توان از داده‌های تولید، جریان سیال و چاه‌آزمایی نیز برای تعیین انواع شکستگی‌ها و مدل‌سازی توزیع آن‌ها در مخزن استفاده کرد (Guaiquirian et al., 2007). در تمامی این موارد، داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی، اطلاعاتی با گستردگی لازم در ابعاد مخزن را به منظور تهیه مدل توزیع شکستگی‌ها در اختیار قرار می‌دهد (Smith 2008; Wilson et al., 2013). با استفاده از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی، تهیه مدل پیوسته شکستگی (CFM<sup>1</sup>) با ترکیب ویژگی‌های لرزه‌ای و مفهوم محرک‌های شکستگی قابل انجام خواهد بود. بدین منظور لازم است که از مفهوم محرک‌های شکستگی<sup>۲</sup>، و تعیین ارتباط آن‌ها با شکستگی به کمک داده‌های لرزه‌ای استفاده کرد (Ouenes et al., 2010). این استراتژی می‌تواند در مخازنی که اطلاعات اندکی از چاه در اختیار است و در مواردی که مخزن همچنان در مرحله شناسایی است، مورد استفاده قرار گیرد. در

سیال و نیز کمبود داده‌های مورد نیاز در آنالیز شبکه شکستگی‌ها در مخازنی که در مرحله شناسایی هستند؛ لازم است که از استراتژی‌هایی مبنی بر به‌کارگیری داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی استفاده گردد (Stearn and Friedman, 1972). در بیشتر مطالعات انجام شده، اطلاعات حاصل از چاه‌ها مانند انواع نمودارهای چاه‌پیمایی، چاه نمودارهای تصویری و مقاطع نازک، به عنوان اطلاعات پایه و مورد نیاز در مطالعات شکستگی و مدل‌سازی مخازن شناخته می‌شوند (Fossen, 2010). با این وجود این داده‌ها تنها در محدوده‌ی نزدیک چاه دارای اعتبار هستند و از این‌رو توصیف شکستگی نیازمند مطالعات بیش‌تری برای نقاط دور از چاه است (Guaiquirian et al., 2007). در این‌گونه موارد، داده‌های سه‌بعدی لرزه‌نگاری به عنوان داده‌هایی با توزیع مناسب در مخزن ولی با قدرت تفکیک پایین، مورد استفاده واقع می‌گردند (Wilson et al., 2013). در مدل‌سازی شبکه شکستگی‌ها در مخزن، مشخصات هندسی شکستگی‌های قطع‌کننده‌ی چاه‌ها در چاه نمودارهای تصویری به منظور مدل‌سازی توزیع شبکه شکستگی استفاده می‌شود (Lorenz and Hill, 1992). در مرحله توزیع مدل شکستگی در مخزن، انواع روش‌های آماری برای تخمین چگالی شکستگی در سراسر مدل به کار گرفته می‌شود (Anees, 2013). مطالعات مختلف و آنالیز داده‌های تولید در مخازنی که شکستگی‌های آن‌ها به روش‌های درون‌یابی مانند کریجینگ و شبیه‌ساز گاوسی تهیه شده بود، نشان داده که مدل‌سازی با عدم قطعیت بالایی همراه است (El Ouahed et al., 2005). در نتیجه کاهش عدم قطعیت در مدل‌سازی و توزیع شبکه شکستگی در مخزن، نیازمند درک و استفاده از روابط دیگری در تدقیق مدل مانند شناسایی رابطه بین شدت شکستگی و رویدادهای تکتونیکی محلی یا ناحیه‌ای با استفاده از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی است (Nelson, 2001). بدین منظور می‌توان از دو نوع مدل‌سازی شکستگی به صورت ترکیب مدل‌سازی شبکه گسسته و پیوسته استفاده کرد (Ouenes et al., 2000). بدین ترتیب که در ابتدا، مدل شکستگی‌ها بر اساس تمامی داده‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و داده‌های مهندسی مخزن تهیه شده و در ادامه، مدل‌های گسسته شکستگی ضمنی ساخته می‌شوند. سپس با تعیین روابط بین انواع پارامترهای تأثیرگذار در شدت

<sup>1</sup> Continues fracture model

<sup>۲</sup> Fracture driver

شکستگی‌ها در مخزن استفاده می‌شوند. بدین ترتیب می‌توان با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای، مدل‌های اولیه‌ی توزیع شدت شکستگی که با دو روش ذکر شده به دست آمده‌اند را به‌روزرسانی کرده و همچنین توزیع قابل قبولی در نواحی گسل خورده و بالای محدوده تاقدیسی مخزن به دست آورد. البته لازم به ذکر است که افزایش دقت در مدل نهایی، وابسته به استفاده از بهترین نقشه شدت شکستگی به عنوان ورودی در مرحله مدل‌سازی گسسته شکستگی است.

## ۲.۱. آنالیز و ساخت مدل مخزن

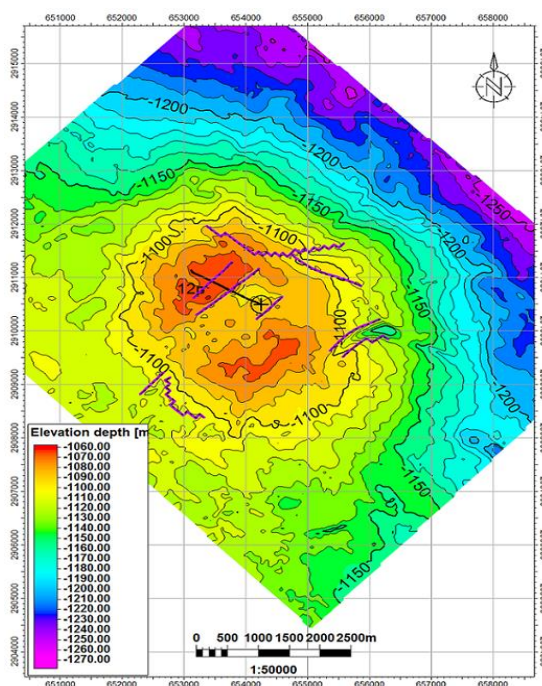
به منظور بررسی استراتژی پیشنهادی در مدل‌سازی شبکه گسسته شکستگی‌ها و مقایسه آن با روش‌های معمول، اطلاعات مربوط به میدانی در خلیج فارس مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور در ابتدا با استفاده از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی، مدل دقیق ساختاری مخزن مورد مطالعه تهیه گردید. شکل ۱، نقشه توپوگرافی زیرسطحی تهیه شده از افق مخزنی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود مخزن مورد مطالعه، به شکل یک برآمدگی متقارن با گسل‌خوردگی‌هایی در مرکز است. در ادامه مدل ساختمانی تهیه شده از مخزن، به صورت شبکه‌ای از سلول‌های با ابعاد  $50 \times 1$  متر شبکه‌بندی گردید. لازم به ذکر است که این ابعاد، با توجه به وسعت مخزن مورد مطالعه و آنالیز ابعادی شبکه تقسیم‌بندی انتخاب گردید. مطالعات زمین‌شناسی صورت گرفته در محدوده میدان مورد مطالعه، نشان داده‌اند که گسل‌ها در این مخزن به عنوان یکی از دلایل عمده و مهم ایجاد شکستگی در مخزن عمل کرده‌اند. بنابراین دخالت دادن پارامترهای مربوط به گسل خوردگی و نقش آن در توزیع شکستگی‌ها در مخزن، در مدل‌سازی توزیع شکستگی‌ها دارای اهمیت بالایی خواهد بود (Ferrill et al., 2011). همچنین تأثیر هر یک از عوامل مختلف دیگر زمین‌شناسی ساختمانی مانند چین‌خوردگی، شیب یال‌ها و انحناى ساختمان در چگونگی توزیع شکستگی‌ها در مخزن، در این مرحله تحلیل می‌شود. با توجه به آنالیز مدل ساختمانی تهیه شده در مخزن مورد مطالعه، ناحیه‌ی مورد مطالعه دارای گسل خوردگی و همچنین بالآمدگی در بخش مرکزی ساختمان مخزن است. بنابراین می‌توان بیان کرد که شکستگی‌های مخزن احتمالاً متأثر از انحناى مخزن و همچنین گسل خوردگی در بخش مرکزی می‌باشند. بدین ترتیب با توجه

این تحقیق، با توجه به وسعت بالای میدان مورد مطالعه و تعداد اندک چاه‌های موجود، استفاده از روش‌های تک متغیره با خطای بالایی در مدل‌سازی شبکه شکستگی‌ها همراه خواهد بود. از این‌رو، استراتژی پیشنهادی در استخراج نشانگرهای لرزه‌ای و تهیه مدل توزیع شکستگی با شناسایی ارتباط آن‌ها با محرک‌های شکستگی به عنوان متغیر ثانویه، می‌تواند باعث مدل‌سازی دقیق‌تر و در مدل‌سازی توزیع شبکه شکستگی در مخزن گردد. استراتژی‌های متفاوتی به منظور استفاده از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی در توزیع شکستگی‌ها و تهیه شبکه گسسته شکستگی وجود دارد (Dershowitz, 2007). استراتژی پیشنهادی در این مطالعه، به منظور کاربرد در مخزنی است که اطلاعات اندکی از داده‌های چاه وجود دارد و کیفیت بالای داده‌ی لرزه‌ای، امکان استفاده دقیق‌تر از مفهوم محرک‌های شکستگی را فراهم می‌آورد.

## ۲. استراتژی تهیه‌ی مدل شکستگی

در استراتژی پیشنهادی در مدل‌سازی توزیع شبکه شکستگی در مخزن، لازم است که در گام اول، مدل ساختمانی مخزن بر اساس داده لرزه‌نگاری سه‌بعدی تهیه گردد. همچنین وجود حداقل داده‌های یک چاه در منطقه الزامی است. نمودارهای چاه‌پیمایی، چاه نمودارهای تصویری و اطلاعات مقاطع نازک نیز تجزیه و تحلیل خواهند شد. سپس با درشت‌نمایی اطلاعات شکستگی حاصل از چاه نمودار تصویری و استفاده از روش‌های کریجینگ و شبیه‌سازی گاوسی متوالی، مدل اولیه‌ای از توزیع شدت شکستگی در مخزن به دست می‌آید. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره گردید، استفاده از این روش‌ها با عدم قطعیت بالایی همراه خواهند بود. با این حال به عنوان مدل‌های اولیه می‌توانند مورد استفاده قرار گرفته و در مراحل بعدی، به‌روزرسانی شوند. از طرف دیگر، نشانگرهای لرزه‌ای مرتبط با شکستگی و گسل‌ها، شناسایی گردیده و از داده‌های لرزه‌ای استخراج خواهد شد. همچنین محرک‌های شکستگی با استفاده از داده‌های چاه، شناسایی شده و ارتباط آن‌ها با شکستگی در داده‌های لرزه‌ای شناخته می‌شود. سپس با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای که می‌توانند ارتباط بین محرک‌های انتخابی و داده‌های لرزه‌ای را بهتر نشان دهند، مدلی از چگونگی توزیع شکستگی‌ها در مخزن به دست می‌آید. بدین ترتیب نشانگرها به عنوان اطلاعات ورودی ثانویه به منظور مدل‌سازی توزیع

به اهمیت نقش گسل‌ها در توزیع شکستگی، اطلاعات مربوط به گسل‌های مخزن به صورت سه‌بعدی در مدل نهایی ساختمانی مخزن، وارد گردید (شکل ۱).



شکل ۱. نقشه کانتوری زیرسطحی مخزن مورد مطالعه که شامل گسل‌ها و محل یک چاه در مرکز مخزن با اطلاعات چاه نمودار تصویری است.

## ۲.۲ آنالیز اطلاعات شکستگی

پس از ساخت مدل سه‌بعدی زمین‌شناسی، آنالیز ساختمانی، مدل‌سازی و مطالعه گسل‌های مخزن، داده‌های شکستگی به دست آمده از چاه نمودار تصویری موجود در مخزن، مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه شکستگی‌ها در چاه نمودار تصویری نشان داد که شکستگی‌های مخزن همگی از نوع شکستگی‌های باز می‌باشند. همچنین استریوپلات نشان داده شده در شکل ۲-الف، جهت یافتگی فضایی شکستگی‌ها در مخزن را نشان می‌دهد. با استفاده از آنالیزهای ساده آماری و بررسی شیب، آزیموت، هندسه و خصوصیات مشترک شکستگی‌ها، تمامی شکستگی‌های موجود در مخزن به دو دسته شکستگی تقسیم شدند. میانگین آزیموت و شیب شکستگی‌ها به ترتیب برای دسته شکستگی کلاس یک برابر ۳۱۵ و ۷۸ درجه و برای دسته شکستگی کلاس دو برابر ۱۴۸ و ۷۲ درجه به دست آمد (شکل ۲-الف). بدین ترتیب مدل اولیه شدت شکستگی برای هر دسته

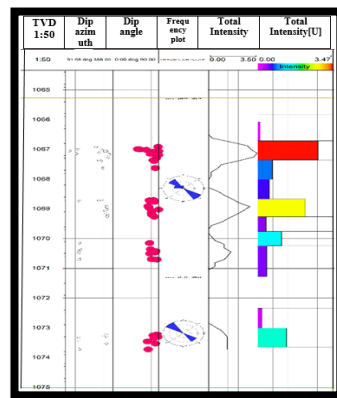
در مخزن به دست آمد. با استفاده از مدل اولیه شدت شکستگی، می‌توان چگالی شکستگی را به کمک محاسبه مساحت تجمعی شکستگی در واحد حجم به دست آورد (Dershowitz and Herda., 1992). نمودار نشان‌دهنده چگالی شکستگی، مشتمل بر داده‌های پیوسته‌ای است که بیانگر تغییرات شدت شکستگی در اعماق مختلف مخزن است (شکل ۲-ب). در مرحله بعد لازم است که داده‌های شدت شکستگی به دست آمده از اطلاعات چاه را جهت همخوانی با داده‌های لرزه‌ای، درشت‌نمایی کرد. در این مرحله بزرگ‌نمایی نمودار شدت شکستگی با استفاده از روش سلول همسایه به دست آمد (شکل ۲-ب). به منظور بررسی دقت فرایند درشت‌نمایی، شکل ۲-ج نمودار ستونی شدت شکستگی قبل و بعد از بزرگ مقیاس شدن را نشان می‌دهد. نمودار نشان داده شده در شکل ۲-ج، بیانگر اختلاف اندک در شدت شکستگی‌ها قبل و پس از درشت‌نمایی است. در ادامه با توجه به نمودار

مدلسازی گسسته و چند مقیاسه شکستگی‌ها در مخازن شکافدار طبیعی، مطالعه موردی یکی از میداین خلیج فارس

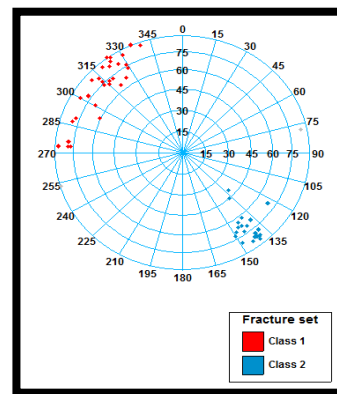
### ۲.۳ استخراج نشانگرهای لرزه‌ای

نشانگرهای لرزه‌ای همواره به عنوان داده‌های ارزشمندی در توصیف زمین‌شناسی مخازن، شناسایی و توصیف گسل‌ها و همچنین شکستگی‌ها در مخزن شناخته می‌شوند (Brown, 2001). همچنین با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای، مشخصات کیفی مخزن مانند سنگ‌شناسی و پارامترهای کمی مانند پارامترهای پتروفیزیکی تجزیه و تحلیل می‌شوند (Meldahl et al., 2001).

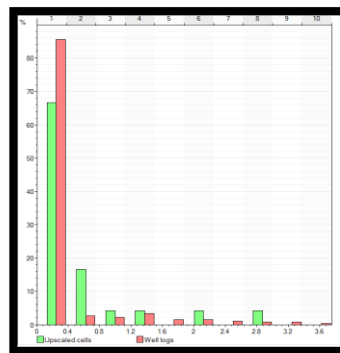
شدت شکستگی و توزیع دسته‌های مختلف آن در ستون مخزن، تنها یک زون به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر توزیع شکستگی انتخاب گردید. با توجه به میزان و شدت شکستگی-ها، زون شکستگی بین ۱۰۶۵ تا ۱۰۷۵ متری به منظور مدل‌سازی توزیع شکستگی در مخزن انتخاب گردید.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۲.۳ (الف) جهت‌گیری قطب‌های شکستگی و دسته‌بندی شکستگی‌ها به کلاس یک با میانگین آزیموت ۳۱۵ و شیب ۷۸ درجه و کلاس دو با میانگین آزیموت ۱۴۸ درجه و شیب ۷۲ درجه (ب) ساخت نمودار شدت شکستگی و بزرگ‌نمایی این نمودار با روش سلول همسایه (ج) مقایسه نمودارهای ستونی شدت شکستگی قبل (قرمز) و بعد از بزرگ‌نمایی (سبز)

همچنین نشانگرهایی که بر پایه اطلاعات مؤلفه فاز داده‌های لرزه‌ای به دست می‌آیند، نقش مهمی در مطالعه شکل و موقعیت هندسی ساختمان‌های زمین‌شناسی ایفا می‌کند (Taner et al., 1994). تغییرات خواص چینه‌شناسی در ستون مخزن، مطالعات سنگ‌شناسی در سکانس‌های چینه‌ای

بدین ترتیب با استفاده از نشانگرهایی که بر پایه اطلاعات دامنه موج لرزه‌ای از داده‌های لرزه‌ای استخراج می‌شوند، اطلاعاتی مانند مقاومت صوتی، ضرایب بازتاب، سرعت انتشار موج و میزان جذب انرژی موج لرزه‌ای حاصل می‌شوند که همگی در ارتباط با سنگ‌شناسی مخزن و شدت شکستگی در آن است.

نشانگر همدوسی اجرا گردید (شکل ۳-الف). همان گونه که در نتیجه حاصل از اعمال الگوریتم ردیابی مورچه دیده می شود (شکل ۳-الف)، محدوده تجمع شکستگی ها و توزیع آن ها در محدوده مخزن، تابع توزیع گسل ها و منطبق بر جهت شکستگی هایی است که در آنالیز چاه نمودارها به دست آمده بود. چگونگی توزیع شکستگی ها در محدوده مخزن توسط نشانگر آشفتگی در شکل ۳-ب نشان داده شده است. وجود بافت آشفته در داده های لرزه ای، به عوامل مختلفی از قبیل حضور مسیرهای مهاجرت گاز، نفوذ نمک به لایه ها، وجود گسل ها و همچنین تجمع شکستگی ها در یک محدوده بستگی دارد. در مخزن مورد مطالعه، حضور گسل ها و شکستگی ها می تواند توسط نشانگر آشفتگی تشخیص داده شود. با اعمال نشانگر آشفتگی در افق زمانی ۷۲۰ میلی ثانیه از داده های لرزه ای (که منطبق بر محدوده مخزنی است) حداکثر آشفتگی در قسمت انحنای مخزن به دست آمد (شکل ۳-ب). این مسئله نشان دهنده حضور بیشتر شکستگی ها در این محدوده است. نشانگر دیگری که می تواند در رابطه با حضور گسل ها و شکستگی ها در کنار تفسیر تغییر شکل ساختمان و چینه-نگاری سکانسی استفاده گردد، نشانگر واریانس است. این نشانگر، از میزان واریانس اختلاف بین ردلرزه ها استفاده می کند. به گونه ای که اگر مقدار شباهت دو ردلرزه کنار هم حداکثر باشد (برابر یک) در آن صورت اختلاف یا واریانس بین آن ها صفر خواهد شد.

بنابراین هیچ گونه رخدادی در فاصله بین این دو ردلرزه وجود نخواهد داشت. شکل ۳-ج، نشانگر واریانس استخراج شده از داده های لرزه ای در مخزن مورد مطالعه را نشان می دهد. همان گونه که در مدل نشانگر واریانس دیده می شود، توزیع شکستگی ها به مانند نقشه های توزیع شکستگی حاصل از الگوریتم ردیابی مورچه و آشفتگی، از هندسه مشخصی پیروی می کنند. در واقع تجمع شکستگی ها بیشتر در محدوده مرکزی مخزن دیده می شود. در ادامه با استفاده از نشانگر برجسته سازی لبه ها، مرزهایی که محدوده های با الگوهای مختلف لرزه ای را از یکدیگر جدا کرده است، شناسایی می شوند. شکل ۳-د، نشانگر آشکار سازی لبه به دست آمده از

و مطالعات سنگ و سیال، همچنین با استفاده از دیگر نشانگرهای لرزه ای قابل انجام هستند (Taner et al., 1994; Chopra and Marfurt, 2007; Chao et al., 2009). مطالعات نشان داده اند از آنجا که نشانگرهای هندسی لرزه ای به تغییرات جانبی در شیب لایه ها، پیوستگی بازتابنده ها در داده های لرزه ای، الگوهای لرزه ای متفاوت، انحنای بازتابنده ها و تغییرات انرژی لرزه ای در داده ها حساس هستند؛ بنابراین استخراج ویژگی های محدوده مخزن مانند توزیع شکستگی ها با استفاده از آن ها، امکان پذیر است. با این حال، قدرت تفکیک پذیری پایین داده های لرزه ای در برخی موارد، استخراج اطلاعات بیان شده از آن ها را با دشواری روبرو می کند. با این وجود، با توجه به افزایش قدرت تفکیک و کیفیت داده های لرزه ای سه بعدی، به ویژه در داده های لرزه ای دریایی و برداشت داده های لرزه ای با قدرت تفکیک بسیار بالا منحصراً جهت مطالعات مخزنی، استفاده از نشانگرهای لرزه ای به منظور آنالیز ساختمانی مخزن و مدل سازی توزیع شکستگی ها و گسل ها توسعه پیدا کرده است (Anees, 2013; Lefranc et al., 2012). با توجه به هدف مورد مطالعه در چگونگی مدل سازی شکستگی ها، نشانگرهای لرزه ای را می توان یا تنها در افق های لرزه ای مربوط به مخزن استخراج کرد و یا آن ها را در حجم های داده های لرزه ای به کار برد (Hart et al., 2001; Robert, 2002). با توجه به اینکه در این مطالعه نشانگرها تنها برای افق مخزنی استفاده می شوند، بنابراین کاربرد صحیح نشانگرها به شدت به تفسیر صحیح افق های لرزه ای در مرحله مطالعه ساختمانی و زمین شناسی مخزن بستگی دارد (Marfurt and chopra, 2006).

نشانگرهای انتخاب شده در این تحقیق به منظور توصیف ساختمانی، شناسایی توزیع شکستگی ها و گسل ها، شامل نشانگر آشفتگی<sup>۳</sup>، الگوریتم ردیابی مورچه<sup>۴</sup>، لبه یابی<sup>۵</sup> و واریانس است (Randen et al., 2001; Pedersen et al., 2002; Ouenes A., 2000; Zellou A. M. and Ouenes A., 2001). لازم به ذکر است که الگوریتم ردیابی مورچه، به عنوان یکی از شناخته شده ترین الگوریتم ها در شناسایی شکستگی ها است که در این مطالعه این الگوریتم خود بر روی

۳ Chaos

۴ Ant tracking

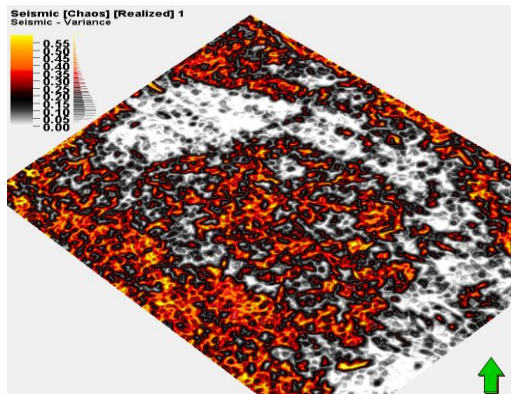
۵ Edge enhancement



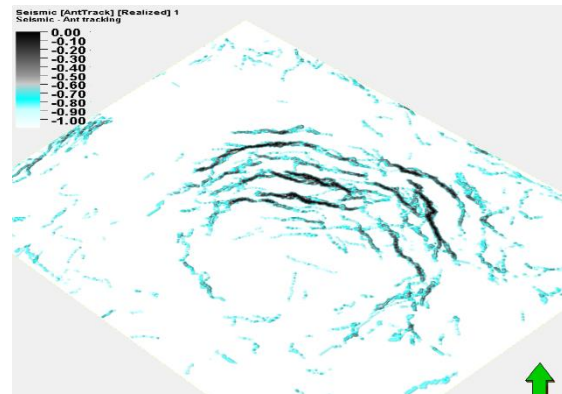
مدلسازی گسسته و چند مقیاس شکستگی‌ها در مخازن شکافدار طبیعی، مطالعه موردی یکی از میادین خلیج فارس

در استراتژی پیشنهادی، نشانگرهای به دست آمده به منظور تعیین توزیع شدت شکستگی در مخزن، به عنوان ورودی ثانویه در مدل ساختمانی مخزن استفاده خواهند شد.

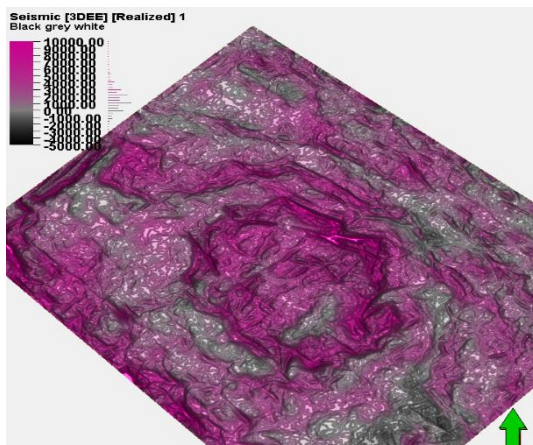
داده‌های لرزه‌ای در محدوده مخزن را نشان می‌دهد. به مانند سایر نشانگرهای به دست آمده، شکستگی‌ها در محدوده‌های مختلف مخزن منطبق بر ساختار تکتونیکی و گسل خوردگی مخزن توزیع شده‌اند. نقشه‌های به دست آمده تا این مرحله، تنها ایده‌ای از توزیع شکستگی‌ها در مخزن ارائه داده‌اند.



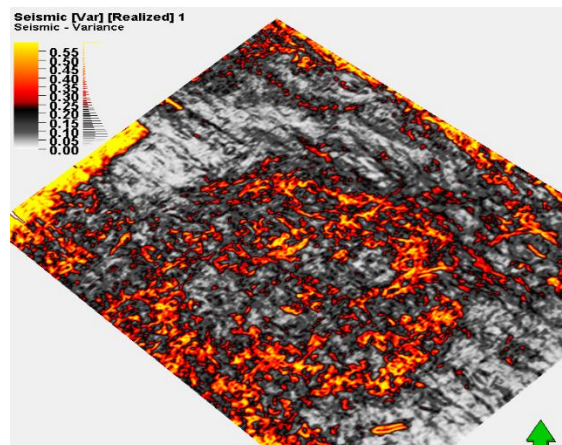
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳. نشانگرهای استخراج شده در برش زمانی ۷۲۰ میلی ثانیه (الف) ردیابی مورچه (ب) آشفتگی (ج) واریانس و (د) برجستگی

تخمین گر خطی ناریب شناخته می‌شود (Bohling, 2005). روش کریجینگ معمولاً به صورت محلی دارای دقت قابل قبولی در تخمین است، ولی توزیع فضایی نتایج حاصل از این تخمین تمایل به هموار شدن دارد. بدین دلیل معمولاً تخمینی بیش‌تر از مقدار واقعی برای مقادیر کم به دست می‌آید و برای مقادیر بالا، این تخمین ممکن است مقدار کم‌تری از مقدار واقعی تخمین بزند. به منظور برطرف کردن مشکل تخمین توسط روش

### ۳. تهیه نقشه‌ی چگالی شکستگی‌ها

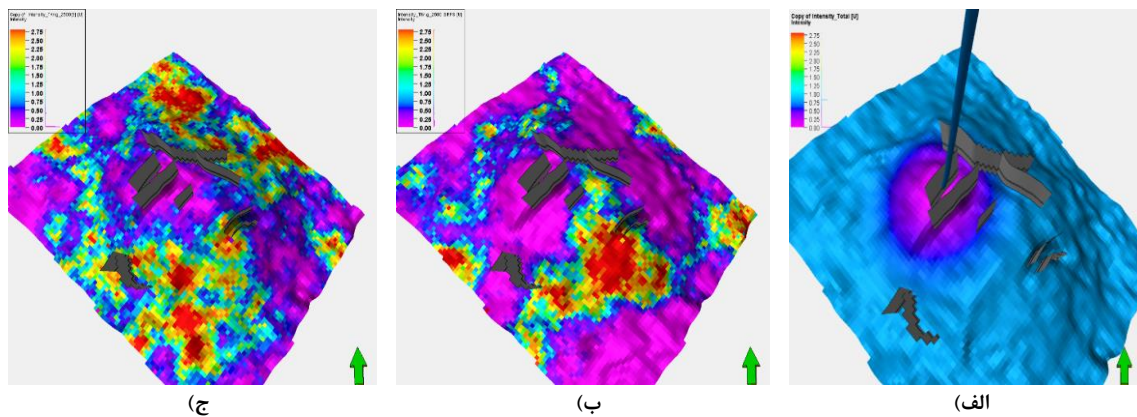
در روش‌های معمول تخمین شدت شکستگی در مخزن، از روش‌های زمین‌آماری استفاده خواهد شد. در این بین، از الگوریتم کریجینگ که یک روش تخمین برای نقاط با مختصات معلوم به کمک اطلاعات موجود در سایر نقاط دیگر با مختصات معلوم است، استفاده می‌شود. روش دورنیایی کریجینگ بر اساس روش میانگین متحرک وزن‌دار استوار بوده و به عنوان بهترین

کلی دقیق‌تر از نتایج به دست آمده از روش کریجینگ عمل است، با این حال نیاز به وجود مدل اولیه با خطای اندک را برطرف می‌کند. همچنین روش زمین آمار دو نقطه‌ای که بر اساس واریوگرام عمل می‌کند، در ساختارهای بسیار پیچیده زمین‌شناسی، با خطا همراه خواهد بود. به همین دلیل از روش کوکریجینگ به منظور غلبه بر این محدودیت‌ها استفاده گردید. در این روش معمولاً از متغیر ثانویه‌ای که دارای شبکه نمونه- برداری منظمی از پارامتر مورد تخمین است و در عین حال همبستگی بالایی با متغیر اولیه نیز دارد، استفاده می‌شود. این روش در مواردی که داده‌های مربوط به تخمین پارامتر ثانویه در تمام نقاط شبکه وجود داشته باشد، مانند داده‌های لرزه‌ای سه بعدی، عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد.

بدین ترتیب در واقع داده‌های اولیه، در همان نقاطی که داده‌های ثانویه حضور دارند، تخمین زده می‌شوند. همچنین با توجه به اینکه حضور محدوده اطلاعات چاه در محدوده مخزن، امکان تخمین درست از نرخ تغییرات افقی واریوگرام را نمی‌دهد، لذا تهیه مدل توزیع شدت شکستگی با استفاده از روش واریوگرام در محدوده مخزن، از قطعیت مناسبی برخوردار نخواهد بود. در نتیجه استفاده از یک راهبرد ثانویه به منظور توزیع دقیق شکستگی در مخزن نیاز است (Nelson, 2001). یکی از این راهبردهای ثانویه، تعیین ارتباط منطقی بین شدت شکستگی و رویدادهای تکتونیکی و استفاده از نشانگرهای لرزه- ای می‌باشد (Zellou et al., 1995; Ouenes., 2009).

کریجینگ، می‌توان از روش شبیه‌ساز گاوسی متوالی استفاده کرد (Arpat; 2005). الگوریتم شبیه‌ساز گاوسی متوالی، یک الگوریتم شبیه‌ساز تصادفی است که به منظور شبیه‌سازی پارامتر موردنظر به کمک دسته‌ای از داده‌های پیوسته به کار می‌رود. نتایج حاصل از روش تخمین کریجینگ معمولاً در نقاطی قابل اعتماد است که تخمین با کم‌ترین واریانس خطا حاصل شود. همچنین در روش تخمین کریجینگ (بر خلاف الگوریتم شبیه‌سازی متوالی)، از برآوردهای انجام شده در نقاط دیگر، برای تخمین یک پارامتر استفاده نمی‌شود. روش شبیه‌سازی گاوسی متوالی به صورت به‌روزرسانی متوالی پارامتر مورد نظر با استفاده از توزیع شرطی است. لازم به ذکر است که مهم‌ترین محدودیت در روش شبیه‌سازی گاوسی متوالی، خاصیت حداکثر بی‌نظمی آن است که باعث پراکندگی مقادیر حداکثر از پارامتر مورد نظر، در انجام فرایند شبیه‌سازی می‌شود. شکل ۴-الف، مدل توزیع شکستگی به دست آمده از روش کریجینگ در مخزن را نشان می‌دهد.

شکل ۴-ب نقشه‌ای از توزیع نادرست شدت شکستگی در مخزن که به روش شبیه‌سازی گاوسی متوالی به دست آمده است را نشان می‌دهد. همانگونه که دیده می‌شود، قسمت انحنای مخزن و نواحی گسل‌خورده دارای کم‌ترین شدت شکستگی است. شکل ۴-ج نقشه مطلوب توزیع شدت شکستگی به دست آمده به روش شبیه‌سازی گاوسی متوالی را نشان می‌دهد. اگرچه نتایج به دست آمده از روش شبیه‌سازی گاوسی متوالی به صورت



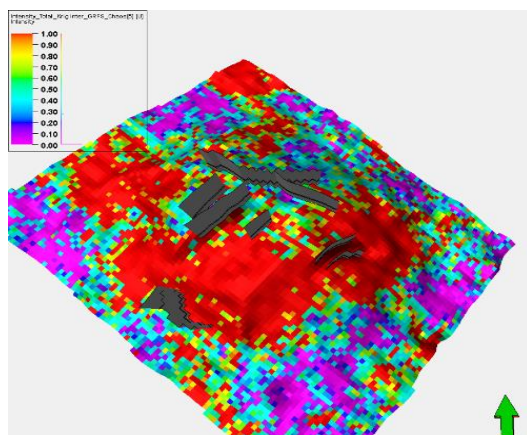
شکل ۴. الف) توزیع شدت شکستگی با استفاده از روش کریجینگ ب) توزیع نامناسب شدت شکستگی با استفاده از روش شبیه‌سازی گاوسی متوالی ج) توزیع مطلوب شدت شکستگی با روش شبیه‌ساز گاوسی



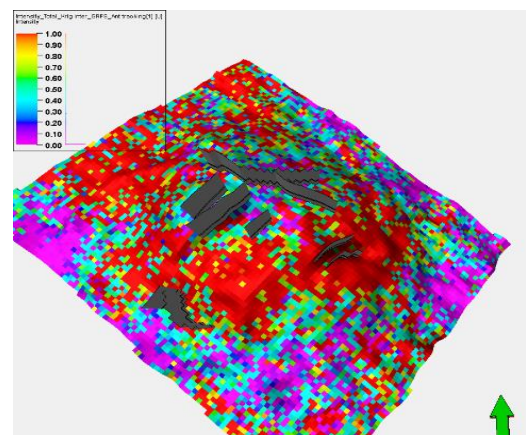
مدلسازی گسسته و چند مقیاس شکستگی‌ها در مخازن شکافدار طبیعی، مطالعه موردی یکی از میادین خلیج فارس

نشان می‌دهد. ضریب همبستگی به دست آمده در توزیع شکستگی به کمک نشانگر آشفتگی برابر  $0/68$  است. در این نقشه نیز نشانگر آشفتگی، حداکثر شدت شکستگی را در بخش انحنای مخزن و ناحیه‌ی غسل خورده نشان می‌دهد. همچنین چگونگی توزیع شدت شکستگی در مخزن به کمک نشانگر واریانس، در شکل ۵-ج نشان داده می‌شود. در این مرحله ضریب همبستگی نشانگر واریانس با شدت شکستگی  $0/61$  به دست آمد. در انتهای این مرحله از استراتژی پیشنهادی، مدل توزیع شدت شکستگی با استفاده از نشانگر لرزه‌ای آشکارسازی لبه در شکل ۵-د آورده شده است. ضریب همبستگی به دست آمده برای نشانگر آشکارسازی لبه به کمک شدت شکستگی، برابر  $0/32$  به دست آمد.

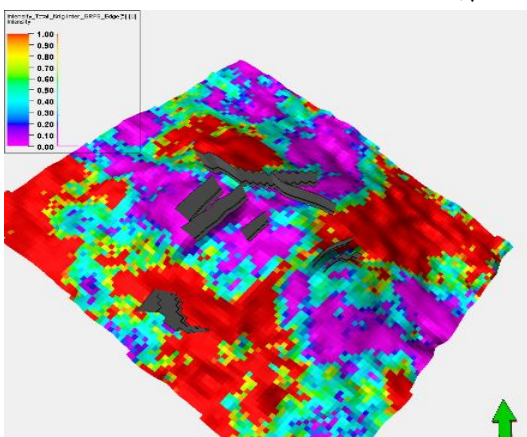
در ادامه نشانگرهای استخراج شده از داده‌های لرزه‌ای در مرحله قبل، توسط روش کوکریجینگ هم‌مختصات به عنوان ورودی ثانویه انتخاب شده و در تهیه‌ی مدل توزیع‌های شدت شکستگی در مخزن، دخالت داده می‌شوند. نتایج به دست آمده از این استراتژی در شکل ۵، نشان داده شده است. به مانند نشانگرهای لرزه‌ای که به صورت معمول بر روی داده‌های لرزه‌ای در مرحله قبل به دست آمدند، مدل‌های توزیع شدت شکستگی به دست آمده در این مرحله نیز بیانگر توزیع بیشتر شکستگی در بخش انحنای مخزن و ناحیه‌ی غسل خورده است. شکل ۵-الف توزیع شدت شکستگی در مخزن با استفاده از الگوریتم ردیابی مورچه را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی در این نشانگر با شدت شکستگی  $0/56$  به دست آمد. شکل ۵-ب نقشه توزیع شدت شکستگی در محدوده‌ی مخزن با استفاده از نشانگر آشفتگی را



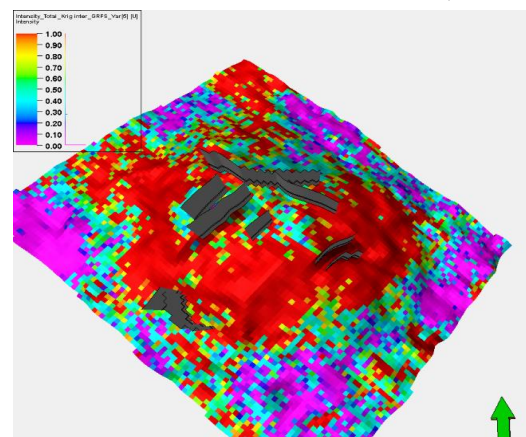
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵. توزیع‌های شدت شکستگی به دست آمده توسط روش کوکریجینگ هم‌مختصات، با اعمال نشانگرهای لرزه‌ای به عنوان ورودی ثانویه، (الف) ردیابی مورچه (ب) آشفتگی (ج) واریانس (د) آشکارسازی لبه.

جدول ۱. ضریب همبستگی شدت شکستگی با نشانگرهای لرزه‌ای

نشانگرهای لرزه‌ای	ضریب همبستگی
آشفتگی	۰/۶۸
ردیابی مورچه	۰/۵۶
واریانس	۰/۶۱
برجستگی	۰/۳۲

تصویری نیز مشکل است؛ از این رو از روش قانون توانی در تعیین توزیع طول شکستگی‌ها استفاده گردید. به منظور استفاده از اطلاعات جهت یافتگی شکستگی‌ها در ساخت مدل، با توجه به داده‌های شیب و جهت شیب، می‌توان از سه روش فیشر، کنت و بینگهام استفاده کرد. مطالعات انجام شده نشان داده‌اند که روش فیشر به منظور توزیع جهت‌گیری شکستگی‌ها عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد. پارامترهای مورد استفاده در روش فیشر شامل میانگین شیب، میانگین جهت شیب و مقدار تمرکز است. پارامتر مقدار تمرکز، بیانگر میزان پراکندگی داده‌ها در اطراف میانگین شیب است به گونه‌ای که هر اندازه مقدار تمرکز بیشتر باشد، قطب‌های شکستگی تمرکز بیشتری را در اطراف میانگین شیب نشان می‌دهند (Fisher, 1953). با انجام چندین مرحله آنالیز حساسیت بر روی مقادیر شیب و جهت شیب، پراکندگی قابل قبولی در اطراف میانگین شیب برای مقدار تمرکز ۶۰ به دست آمد. شکل ۶، جهت‌گیری قطب‌های شکستگی با مقدار تمرکز ۶۰ در محدوده‌ی میانگین شیب را نشان می‌دهد. برای دسته شکستگی کلاس یک مقدار میانگین جهت شیب و شیب در شکستگی‌های کلاس یک به ترتیب برابر ۳۱۵ و ۷۸ درجه و برای شکستگی‌های کلاس دو به ترتیب برابر ۱۴۸ و ۷۲ درجه است.

جدول ۲، مقادیر بیان شده در آنالیز شکستگی هر دو کلاس را نشان می‌دهد. در ادامه مدل توزیع شدت شکستگی به دست آمده به کمک نشانگر آشفتگی، به عنوان ورودی در ساخت مدل گسسته شکستگی استفاده می‌شود. شکل ۷، مدل گسسته شکستگی به دست آمده بدین روش را نشان می‌دهد. در مدل گسسته شکستگی نشان داده شده، بیشترین شدت تمرکز شکستگی‌ها، در نواحی انحنای مخزن و بخش‌های دارای گسل-خوردگی مشاهده می‌شود.

با توجه به آنالیز ضرایب همبستگی به دست آمده در این مرحله، نشانگر آشفتگی بیش‌ترین همبستگی را با شدت شکستگی نشان می‌دهد که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. همچنین با توجه به توزیع‌های شدت شکستگی که توسط روش کوکریچینگ هم‌مختصات به دست آمد، در نواحی انحنای مخزن و گسل‌خورده بیش‌ترین شدت شکستگی مشاهده می‌شود.

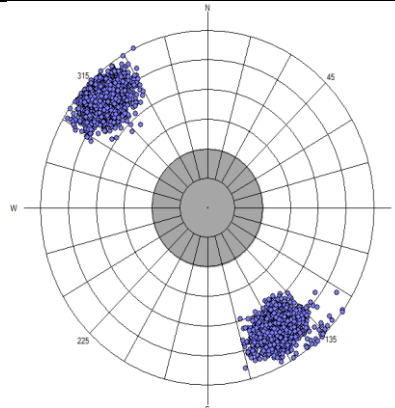
#### ۴. تهیه مدل گسسته شکستگی با استراتژی پیشنهادی

استراتژی اصلی در ساخت مدل‌های سه‌بعدی قابل قبول از توزیع شبکه شکستگی در مخزن، یکپارچه‌سازی و استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، بهره‌برداری و مهندسی مخزن است. این استراتژی با هدف تفسیر دقیق‌تر مدل‌های توصیف‌کننده توزیع دسته شکستگی‌ها در واحدهای مخزنی جهت انجام محاسبات جریان سیال است. در ابتدای روش پیشنهادی در تهیه مدل گسسته شکستگی، بهترین مدل توزیع شدت شکستگی به دست آمده در مراحل قبل، به عنوان مدل اولیه در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه نشانگر آشفتگی استخراج شده از داده‌های لرزه‌ای سه بعدی، بالاترین ضریب همبستگی با مدل‌های اولیه شدت شکستگی مربوطه به عنوان مدل اولیه در استراتژی پیشنهادی استفاده می‌شود. به منظور تهیه مدل گسسته شکستگی چند مقیاسه، لازم است که در ابتدا با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی و مهندسی مخزن در رابطه با نوع شکستگی‌های مسئول انتقال سیال، شکستگی‌ها را با تعیین حد آستانه، به کلاس‌های مختلفی دسته‌بندی کرد. با توجه به اینکه اندازه شکستگی را نمی‌توان مستقیماً با ابزار درون چاهی اندازه گرفت و همچنین برآورد اندازه شکستگی از چاه نمودارهای

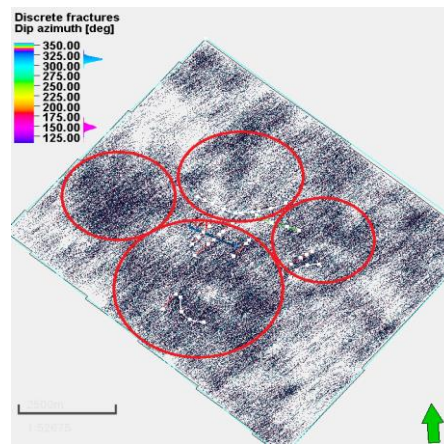
مدلسازی گسسته و چند مقیاسه شکستگی‌ها در مخزن شکافدار طبیعی، مطالعه موردی یکی از میداین خلیج فارس

جدول ۲. میانگین جهت شیب، شیب و مقدار تمرکز برای دسته شکستگی‌ها

دسته شکستگی	شیب	جهت شیب	تمرکز
کلاس یک	۷۸	۳۱۵	۶۰
کلاس دو	۷۲	۱۴۸	۶۰



شکل ۶. نمایش توزیع جهت‌گیری شکستگی‌ها با اعمال پارامترهای میانگین شیب، میانگین جهت شیب و مقدار تمرکز توسط روش فیشر در استریونت



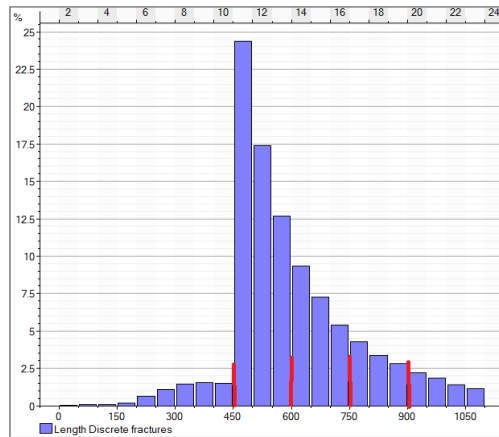
شکل ۷. تمرکز شدت شکستگی در مخزن با استفاده از نشانگر آشفتگی به عنوان ورودی

انتقال و افزایش جریان سیال ندارند؛ بنابراین در مدل‌سازی شکستگی‌ها دخالت داده نمی‌شوند. شکل ۹-الف، مدل گسسته شکستگی در بازه ۴۵۰-۶۰۰ فوت را نشان می‌دهد. بیشترین فراوانی شکستگی‌ها، در این بازه دیده می‌شود که این تمرکز شکستگی در این بازه، از نظر مکانی نیز در محدوده انحنای مخزن و بخش‌های دارای گسل خوردگی است. همچنین شکل ۹-ب، مدل گسسته‌ی شکستگی برای

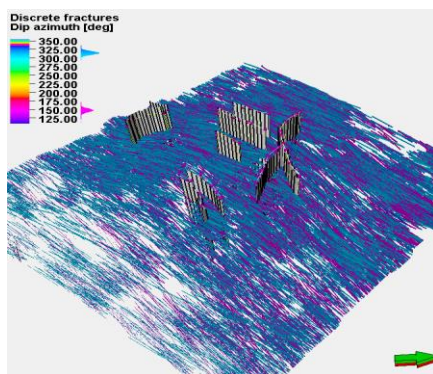
نمودار توزیع شکستگی‌ها در محدوده‌ی بازه‌های مختلف از طول شکستگی در مخزن، در شکل ۸ نشان داده شده است. این نمودار به کمک رابطه توزیع توانی به دست آمده است. با توجه به نمودار به دست آمده، محدوده‌ی اندازه‌ای شکستگی به پنج کلاس دسته‌بندی گردید. بر اساس نمودار شکل ۸، شکستگی‌هایی با طول ۰-۴۵۰ فوت، فراوانی اندکی در مخزن دارند و از آنجا که شکستگی‌های کوچک مقیاس تأثیری در

فراوانی آن‌ها نسبت به دو بازه قبلی، کمتر است. شکل ۹-د، مدل گسسته‌ی شکستگی برای بزرگ‌ترین شکستگی‌ها در بازه ۹۰۰-۱۰۵۰ فوت را نشان می‌دهد. در این مقیاس حداکثر طول شکستگی با کم‌ترین فراوانی به دست آمد.

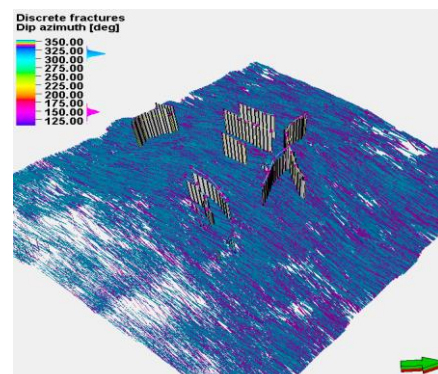
شکستگی‌های با طول بین ۶۰۰-۷۵۰ فوت را نشان می‌دهد. این بازه دارای فراوانی کم‌تری نسبت به بازه قبلی است و بیشترین تمرکز شدت شکستگی‌های با این طول، در قسمت انحنای مخزن مشاهده می‌شود. شکل ۹-ج، مدل گسسته‌ی شکستگی در بازه طولی ۷۵۰-۹۰۰ فوت را نشان می‌دهد. در این بازه، شکستگی‌ها دارای طول بیش‌تری هستند، ولی



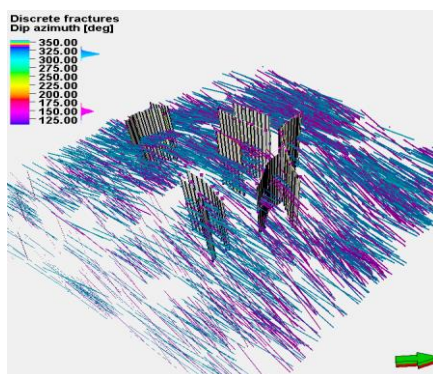
شکل ۸. نمایش ستونی توزیع طول شکستگی در محدوده‌ی بازه‌ای ۱۰۵۰-۰ فوت.



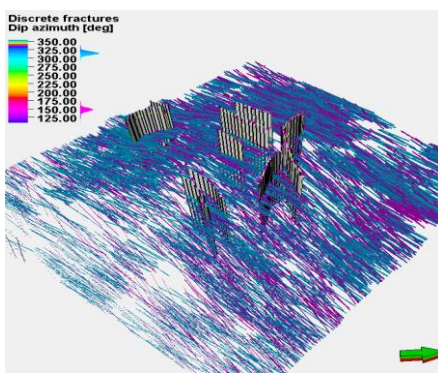
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۹. مدل‌های گسسته شکستگی در محدوده‌ی اندازه‌های (الف) ۴۵۰-۶۰۰ (ب) ۶۰۰-۷۵۰ (ج) ۷۵۰-۹۰۰ (د) ۹۰۰-۱۰۵۰ فوت

## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

مخزن را بیشتر در محدوده‌ی انحنای مخزن و بخش‌های دارای گسل خوردگی نشان دادند. در بین نشانگرهای لرزه‌ای به دست آمده، نشانگر آشفتگی، همبستگی بسیار مناسبی با شدت شکستگی ارائه کرد و برای مدل‌سازی گسسته شکستگی مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت با اعمال پارامترهای شکستگی از جمله شیب و جهت شیب شکستگی، مدل گسسته شکستگی در مقیاس‌های مختلف به دست آمد. در تمامی مدل‌های گسسته شکستگی به دست آمده، شدت شکستگی در بخش انحنای مخزن و در نزدیکی گسل‌های موجود در مخزن دیده شد. مقایسه شبکه گسسته شکستگی به دست آمده با استراتژی پیشنهادی با روش معمول، نشان داد که می‌توان با استفاده از مفهوم محرک‌های شکستگی و به کمک داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی، نقشه توزیع شکستگی‌ها در مخزن، در میدان‌هایی که تعداد چاه‌های کمتری در دسترس است، استفاده کرد. با توجه به نیاز اساسی به مدل‌های گسسته شکستگی برای تخمین تراوایی، می‌توان از این مدل‌ها به منظور مدل‌سازی جریان استفاده کرد. همچنین می‌توان طرح‌ریزی مناسبی را در تعیین محل جدید حفر چاه به‌منظور بهره‌برداری بیش‌تر مورد توجه قرار داد.

منابع داده‌های مورد استفاده در سرشت‌نمایی شکستگی‌های مخزن، هرکدام دارای مقیاس‌های جداگانه و قدرت تفکیک‌های متفاوت می‌باشند. بنابراین یافتن روشی که بتواند از همه‌ی ابزارهای موجود استفاده کند، به مدل‌سازی واقعی و دقیق‌تر شکستگی‌ها کمک شایانی خواهد کرد. با توجه به کمبود داده‌های میدان موردنظر، از گزارشات اطلاعات شکستگی مربوط به شیب و جهت شیب شکستگی‌های یک چاه مخزن مورد مطالعه استفاده شد. با بررسی‌های صورت گرفته بر شکستگی‌های مخزن مورد مطالعه، مشاهده گردید که روش‌های متعارف کریجینگ و شبیه‌ساز گاوسی متوالی، نقشه مناسبی از توزیع مناسبی از شدت شکستگی در مخزن را ارائه نکردند. از این‌رو با در دسترس بودن داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی میدان از نشانگرهای لرزه‌ای از جمله ردیابی مورچه، آشفتگی، وارپانس و آشکارسازی لبه برای تشخیص نواحی دارای شکستگی و گسل خورده در مخزن مورد مطالعه استفاده گردید و از این نشانگرها به عنوان ورودی ثانویه برای تعیین توزیع شدت شکستگی در مخزن استفاده گردید. مدل‌های شدت شکستگی که با به‌کارگیری نشانگرهای لرزه‌ای از داده‌های لرزه‌نگاری سه بعدی به دست آمد؛ توزیع شکستگی در

## منابع

- Arpat, G.P., (2005). Sequential simulation with patterns. PhD Thesis, Stanford University, Stanford, CA, USA.
- Anees, M. (2013). Seismic Attribute Analysis for Reservoir Characterization, 10th Biennial International Conference and Exposition.
- Bohling, G. (2005). Introduction to geostatistics and variogram analysis. Kansas geological survey, 2.
- Brown, A. (2001)- Understanding seismic attributes: Geophysics, 66, pp 47-49.
- Chopra, S., Marfurt, K. J. (2007). Seismic attributes, A new historical-perspective, Geophysics, 70(4): 3SO-28SO.
- Chao, W., Mian, C., Yan, J. (2009). A prediction method of borehole stability based on seismic attribute technology, Journal of Petroleum Science and Engineering, 65, pp 208-216.
- Dershowitz, W.S., Herda, H.H. (1992). Interpretation of fracture spacing and intensity, The 33th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association.



- EI Ouahed, A.K., Tiab, D., Mazouzi, A. (2005). Application of artificial intelligence to characterize naturally fractured zones in Hassi Messaoud Oil Field, Algeria. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 49(3), pp 122-141.
- Ferrill, D. A., A. P. Morris, R. N., McGinnis, K. J., Smart, C. W., William (2011). Fault zone deformation and displacement partitioning in mechanically layered carbonates, The Hidden Valley fault, central Texas, *AAPG Bulletin*, 95, pp 1383-1397, Doi: 10.1306/12031010065.
- Fossen, H. (2010). *Structural geology*. Cambridge University Press, ISBN: 978-0-521-51664-8.
- Guaquirian, L., Gonzalez, P., Gonzalez, A., Manuela Hernandez, M., Le Maux T., Mattioni, L., Rouvroy P. (2007). Use of Discrete Fracture Network 'DFN' to characterize and model a Naturally Fractured Sandstone Reservoir, Orocual Field, San Juan Formation, Venezuela – A Case study, SPE Paper 108052 presented at the SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, 15-18 April.
- Guven Burc Arpat (2005). Sequential simulation with patterns. PhD Thesis, Stanford University, Stanford, CA, USA.
- Hart, B.S., Pearson, R., Rawling, G.C. (2002). 3D seismic horizon-based approaches to fracture-swarm sweet spot definition in tight-gas reservoirs. *The Leading Edge*, 21(1), pp 28-35.
- Nelson, R. A. (2001). *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs*, Second edition, Gulf Professional Publishing, Boston, USA, ISBN: 0-88415-317-7.
- Lorenz, J., Hill, R. (1992). Measurement and Analysis of Fracture in Core, in *Geological Studies Relevant to Horizontal Drilling*, Society of Petroleum Engineers (U.S). Eastern Regional Conference and Exhibition.
- Lefranc, M., Farag, S., Souche, L., Dubois, A. (2012). Fractured Basement Reservoir Characterization for Fracture Distribution, Porosity and Permeability Prediction, AAPG International Conference and Exhibition, Singapore, pp 16-19.
- Meldahl, P., Heggland, R., Bril, B., de Groot, P. (2001). Identifying faults and gas chimneys using multi-attributes and neural networks: *The Leading Edge*, 20, pp 474-482.
- Murray, G. (1968). Quantitative fracture study-Sanish Pool, McKenzie County, North Dakota, *AAPG Bulletin*, Vol. 52, no. 1, pp 57-65.
- Marfurt, K.J., Chopra, S. (2006). Seismic attribute mapping of structure and stratigraphy, ISBN 1560801352 9781560801351.
- Ouenes, A., Hartley, L.J. (2000). Integrated fractured reservoir modeling using both discrete and continuum approaches, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.
- Ouenes, A., Anderson, T.C., Klepacki, D., Bachir, A., Boukhelf, D., Robinson, G.C., Holmes, M., Black, B.J., Stamp, V.W. (2010). Integrated characterization and simulation of the fractured Tensleep Reservoir at Teapot Dome for CO<sub>2</sub> injection design, SPE Western Regional Meeting. Society of Petroleum Engineers.
- Ouenes, A. (2000). Practical application of fuzzy logic and neural networks to fractured reservoir characterization, *Computers & Geosciences*, 26(8), pp 953-962. Ouenes, A. (2010). Mapping natural fractures using 3D seismic and well data: Application to a shale play, *Prism Seismic*.



- Pedersen, S.I., Randen, T., Sonneland, L., steen, O. (2002). Automatic 3D fault interpretation by artificial ants, 64th EAGE conference & exhibition.
- Roberts, A. (2001). Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons. *First break*, 19(2), pp 85-100.
- Randen, T., Pedersen, S.I., Sonneland, L. (2001). Automatic extraction of fault surface from three-dimensional seismic data, Annual International Meeting, Society Exploration Geophysicist, Expanded abstract.
- Stearns, D.W., Friedman, M. (1972). Reservoirs in fractured rock, *Geologic exploration methods*, AAPG International Conference and Exhibition, pp 82-106.
- Smith, V.L. (2008). Modeling natural fracture networks, Establishing the groundwork for flow simulation at Teapot Dome, Wyoming. WEST VIRGINIA UNIVERSITY.
- Taner, M. T., Schuelke, J. S., ODoherty, R., Baysal, E. (1994). Seismic attributes revisited, 64<sup>th</sup> Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, pp 1104-1106.
- Wilson, T.H., Smith, V., Brown, A. (2013). Developing a strategy for CO<sub>2</sub> EOR in an unconventional reservoir using 3D seismic attribute workflows and fracture image logs, 2013 SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists.
- Zellou, A.M., Ouenes, A., Banik, A. (1995). Improved fractured reservoir characterization using neural networks, geomechanics and 3D seismic, SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Zellou A. M., Ouenes A. (2001). Integrated fractured reservoir characterization using neural networks and fuzzy logic: three case studies, *Journal of Petroleum Geology*, pp 459-476.