



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نفت-اکتشاف

مدل سازی شکستگی در مخازن شکافدار توسط مدل گسسته شکستگی در

یکی از میادین نفتی خلیج فارس

نگارنده: سعید ملاسمعیل

اساتید راهنما

دکتر مهرداد سلیمانی منفرد

دکتر سیدرضا قوامی ریابی

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۴۶۹۶۲۰۹۱
تاریخ: ۹۶/۱۱/۱۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سعید ملاسمعیل با شماره دانشجویی ۹۴۱۶۸۷۴ رشته مهندسی نفت گرایش اکتشاف تحت عنوان: مدل سازی شکستگی در مخازن شکافدار توسط مدل گسسته شکستگی در یکی از میداین نفتی خلیج فارس که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: علمی) مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

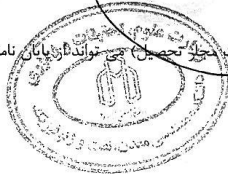
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مهرداد سلیمانی منفرد	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر سید رضا قوامی ریایی	دانشیار	
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد رداد	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر امین روشندل کاهو	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر بهزاد تخم چی	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۹۶/۱۱/۱۷

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم به آنان که:

با هستی خویش، راه را برایم گشودند

پدرم، به پاس دست‌هایش که فریادرس است و نومی‌دی در پناهِش به امید می‌گراید

مادرم، به پاس مهرش که عشق را در وجودم پروراند و دامانش سجده‌گاه مهربانی است

خواهرم که خورشید محبتش را غروبی نیست

و با سپاس خالصانه از همسرم که حضورش شمع فروزان راه من بود، قلبم را آرام، ذهنم را

پرجوش و انگیزه‌ام را متعالی کرد. . .

تقدیم سپاس

سپاس خدایی را که به قلم جان داد تا نوشتن بیاموزم، سپاس پدری را که سایه بلندش را استوار داشت، سپاس مادری را که آغوش پر مهرش را دریغ نداشت و سپاس استادی را که مرا بنده خویش ساخت.

امروز که بر شانه گذشتگانمان ایستاده‌ام و به افق‌های دانش مینگرم، بر خود واجب می‌دانم تا از زحمات تمامی عزیزانی که مرا در عرصه علم آموزی یاری نمودند تقدیر کنم. ارادت خالصانه من تقدیم به اساتید گران‌قدرم جناب آقایان دکتر مهرداد سلیمانی منفرد، دکتر سید رضا قوامی که برادرانه و دلسوزانه رهنمودهایشان چراغ روشنی در مسیر این پژوهش بود. همچنین با تشکر از سایر اساتید محترم گروه مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود از جمله جناب آقایان دکتر عرب احمدی و جناب آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی که علی‌رغم کمبودها و دشواری‌های موجود، طی دوران تحصیل این‌جانب زحمات زیادی جهت ارتقاء سطح علمی دانشجویان این دانشکده کشیدند و از اساتید فرزانه و دلسوز، آقایان دکتر بهزاد تخم‌چی و دکتر امین روشندل کاهو که زحمت داوری این پایان‌نامه را متقبل شدند، با تقدیر از نماینده محترم تحصیلات تکمیلی، جناب آقای دکتر رداد که با شکیبایی این مسئولیت را پذیرفتند، همچنین دوستان عزیزم که همواره محبتشان فروکش نمی‌کند، کمال تشکر و قدردانی

را دارم و در نهایت برای تمامی این عزیزان آرزوی تندرستی و توفیق الهی را از درگاه باری تعالی

مستدعی هستم.

سعید ملاسمعیل

۱۳۹۶/۱۱/۸

تعهدنامه

اینجانب سعید ملاسمعیل دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی اکتشاف نفت دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع مدل سازی شکستگی در مخازن شکافدار توسط مدل گسسته شکستگی در یکی از میادین نفتی خلیج فارس تحت راهنمایی دکتر مهرداد سلیمانی منفرد و دکتر سید رضا قوامی ریابی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

تهیه مدل دقیق شکستگی و توزیع آنها در مخازن با شکستگی طبیعی، از موارد پیچیده در مهندسی مخازن می‌باشد. مدل‌سازی شکستگی تنها بر اساس داده‌های چاه دارای محدوده اثر کم می‌باشد و از این رو منجر به عدم قطعیت بالایی می‌شود. روش‌های مرسوم مدل‌سازی شکستگی معمولاً از الگوریتم‌های درون‌یابی به منظور پیش‌بینی توزیع فضایی شکستگی‌ها استفاده می‌کنند. در این تحقیق با استفاده از عوامل کنترل‌کننده شکستگی، مدل توزیع شکستگی با استفاده از ترکیب داده‌های لرزه-نگاری سه بعدی و چاه بدست می‌آید. بدین منظور پس از تعیین زون‌های شکستگی و جهت‌یابی آن‌ها با استفاده از داده‌های چاه، نشانگرهای تعیین‌کننده شکستگی از داده‌های لرزه‌ای استخراج گردید. از این نشانگرها به عنوان عامل کنترل‌کننده شکستگی برای ساخت مدل توزیع شکستگی استفاده شده است. در ادامه الگوریتم‌های تعیین شکستگی بر روی داده‌های لرزه‌ای پیاده گردید و مدل‌های توزیع-های شدت شکستگی به روش کوکریجینگ هم‌مختصات بر روی نشانگرها تهیه شد. سپس با دسته‌بندی شکستگی‌های مخزن، مدل شبکه گسسته شکستگی برای مقیاس‌های متفاوت شکستگی‌ها، بدست آمد. مقایسه شبکه گسسته شکستگی بدست آمده توسط استراتژی پیشنهادی با روش معمول، نشان داد که می‌توان از عوامل کنترل‌کننده شکستگی به عنوان محرک‌های شکستگی جهت توزیع شکستگی‌ها در مخزن با استفاده از داده‌های لرزه‌ای سه بعدی در مواردی که تعداد چاه‌های کمتری در مخزن وجود دارد، استفاده کرد. استراتژی پیشنهادی بر روی مخزن شکافداری در یکی از میادین خلیج فارس پیاده شد و شبکه گسسته شکستگی با دقت قابل قبول‌تری در مقایسه با روش معمول، بدست آمد. اما با توجه به ماهیت پیچیده شکستگی‌ها و کمبود داده‌های مرتبط با آن‌ها، مدل‌های حاصل همواره با عدم قطعیت همراه هستند. در مرحله دوم این تحقیق، برای قطعیت بخشیدن به مدل ساخته شده در مرحله اول و اعتبار سنجی آن، از روشی نو برای ساخت مدل گسسته شکستگی استفاده می‌شود. این مدل‌سازی از طریق رابطه‌ای که بین شدت شکستگی و محرک‌های شکستگی وجود دارد صورت می‌گیرد. بدین منظور از ابزار هوش مصنوعی برای شناسایی چگونگی همبستگی

بین شدت شکستگی و گروهی از محرک‌های شکستگی استفاده می‌شود. از بین عوامل نشان‌دهنده، مرتبط و کنترل‌کننده شکستگی، تخلخل، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل انتخاب گردیدند و از بین نشانگرهای لرزه‌ای، امیدانس صوتی نسبی، الگوریتم ردیابی مورچه، برجستگی، آشفستگی، انحنا و واریانس به عنوان محرک‌های شکستگی در نظر گرفته شدند. در ادامه مجدداً به کمک ابزار شبکه عصبی، به منظور شناسایی رابطه بین شدت شکستگی و محرک‌های شکستگی استفاده گردید. همچنین به در مرحله مدل‌سازی، از روش نظارت شده استفاده شد. همه عوامل کنترل‌کننده شکستگی به صورت نظارت شده با داده‌های تراکم شکستگی موجود در چاه آموزش داده شدند. در مرحله آموزش مدل از ۱۰۰ و ۵۰۰ مرتبه تکرار استفاده گردید. رابطه‌های به‌دست آمده با دو تکرار متفاوت با هم مقایسه شدند و معین گردید که با ۵۰۰ مرتبه تکرار، رابطه خوبی بین شدت شکستگی و محرک‌های شکستگی برقرار می‌شود. در نهایت از رابطه به‌دست آمده برای ساخت مدل گسسته شکستگی استفاده شد. همچنین معین گردید با عدم وجود تعداد چاه‌های کافی در میدان، با استفاده از عوامل کنترل‌کننده شکستگی می‌توان توزیع بسیار مناسبی از شدت شکستگی در مخزن ارائه داد.

کلمات کلیدی: مخازن شکافدار، مدل‌سازی شکستگی‌ها، شبکه گسسته شکستگی‌ها، شدت

شکستگی، نشانگرهای لرزه‌ای

لیست مقالات:

ملاسمعیل س. و سلیمانی م. و قوامی ر، (۱۳۹۶) "تهیه مدل گسسته شکستگی چند مقیاسه با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و چاه در یکی از میادین خلیج فارس" نشریه علمی پژوهشی ژئومکانیک

نفت

فهرست مطالب

فصل اول) مقدمه و کلیات	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ تأثیر شکستگی‌ها بر رفتار مخازن شکافدار طبیعی	۳
۳-۱ اهمیت شناسایی و بررسی شبکه شکستگی‌ها	۳
۴-۱ اهمیت مدل‌های جامع شبکه گسسته شکستگی‌ها	۵
۵-۱ مطالعات پیشین	۵
۱-۵-۱ مدل‌سازی شبکه گسسته شکستگی	۶
۶-۱ اهداف مطالعه	۱۲
۷-۱ ساختار پایان‌نامه	۱۴
فصل دوم) خصوصیات شکستگی‌ها و ابزارهای شناسایی آن‌ها	۱۵
۱-۲ مقدمه	۱۶
۲-۲ تعریف شکستگی	۱۶
۳-۲ توصیف پارامترهای اصلی شکستگی منفرد	۱۷
۱-۳-۲ عرض شکاف	۱۸
۲-۳-۲ اندازه شکستگی	۲۰
۳-۳-۲ جهت‌گیری شکستگی‌ها	۲۱
۴-۲ توصیف پارامترهای سیستم شکستگی‌ها	۲۱
۱-۴-۲ توزیع شکستگی‌ها	۲۱

- ۲-۴-۲ واحد حجم بلوک ماتریکس ۲۲
- ۲-۴-۳ چگالی و شدت شکستگی ۲۳
- ۲-۵ منابع داده‌های توصیف مخازن شکافدار ۲۴
- ۲-۵-۱ بررسی و مطالعات رخنمون ۲۴
- ۲-۵-۲ آنالیز مغزه ۲۵
- ۲-۵-۳ داده‌های لرزه‌ای ۲۶
- ۲-۵-۴ استفاده از چاه‌نمودارها در مطالعه شکستگی ۲۷
- ۲-۴-۵-۱ چاه‌نمودارهای تصویری ۲۷
- ۲-۶ اطلاعات مورد استفاده در مطالعه مخازن شکافدار ۲۹

فصل سوم) مطالعات ساختمانی میدان و بررسی داده‌ها و نشانگرهای لرزه‌ای ۳۱

- ۳-۱ روش‌شناسی بررسی و مطالعه شکستگی‌های مخزن مورد مطالعه ۳۲
- ۳-۲ ساز و کار شکل‌گیری شکستگی‌های طبیعی در میدان مورد مطالعه ۳۳
- ۳-۳ موقعیت چاه‌های مورد مطالعه در میدان ۳۳
- ۳-۴ بررسی ساختمان و تفسیر گسل‌های میدان ۳۵
- ۳-۵ مدل‌سازی گسل‌ها و ساخت افق مخزنی ۳۷
- ۳-۶ انواع شکستگی از بررسی نمودارهای تصویری ۳۸
- ۳-۶-۱ شکستگی‌های باز ۳۸
- ۳-۶-۲ شکستگی‌های مسدود (بسته) ۴۱
- ۳-۶-۳ شکستگی‌های القا شده طی عملیات حفاری ۴۱
- ۳-۷ نشانگرهای لرزه‌ای ۴۱

فصل چهارم) مدل سازی شبکه گسسته شکستگی	۴۳
۱-۴ مقدمه	۴۴
۲-۴ مدل شبکه گسسته شکستگی	۴۴
۳-۴ اهمیت مدل های شبکه گسسته شکستگی	۴۵
۴-۴ ساخت مدل شبکه گسسته شکستگی	۴۶
۱-۴-۴ ساخت مدل زمین شناسی مخزن	۴۷
۲-۴-۴ بررسی اطلاعات شکستگی	۴۹
۱-۲-۴-۴ دسته بندی شکستگی ها	۴۹
۲-۲-۴-۴ ساخت نمودار شدت شکستگی	۵۰
۳-۲-۴-۴ بزرگ نمایی نمودار شدت شکستگی	۵۱
۳-۴-۴ استخراج نشانگرهای لرزه ای	۵۴
۴-۴-۴ روش شناسی تهیه نقشه چگالی شکستگی ها	۵۹
۵-۴-۴ توزیع شکستگی ها	۶۷
۶-۴-۴ هندسه شکستگی ها	۶۷
۷-۴-۴ ساخت مدل گسسته شکستگی با استراتژی پیشنهادی	۶۸
۸-۴-۴ استراتژی تهیه مدل گسسته شکستگی ها با استفاده از روش شبکه عصبی	۷۴
۱-۸-۴-۴ ساخت مدل سه بعدی تخلخل	۷۵
۲-۸-۴-۴ ساخت مدل سه بعدی سنگ شناسی مخزن	۷۸
۳-۸-۴-۴ مدل ساختمانی فاصله از گسل	۸۲
فصل پنجم) نتایج و پیشنهادات	۹۳
فهرست منابع	۹۷

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) نمایش یک شکستگی در دو بعد ۱۷
- شکل (۲-۲) نمایش یک شکستگی در سه بعد ۱۸
- شکل (۳-۲) نمودار آمار پراکندگی اندازه عرض شکافها با توزیع لاگ نرمال ۱۹
- شکل (۴-۲) کاهش عرض شکاف به علت آزاد شدن فشار وارد بر سنگ ۲۰
- شکل (۵-۲) نمایش سیستمهای شکستگی با درجه شکستگیهای متفاوت ۲۲
- شکل (۶-۲) مثالی از شکستگیها در بازه‌ای از چاه ۲۴
- شکل (۷-۲) تصویری از رخنمون شکستگیها ۲۵
- شکل (۸-۲) نمونه‌ای از مغزه چاه که بازشدگی خوبی را نشان می‌دهد ۲۶
- شکل (۱-۳) نقشه کانتوری زیرسطحی مخزن مورد مطالعه ۳۴
- شکل (۲-۳) مکعب سه بعدی داده‌های لرزه‌ای ۳۵
- شکل (۳-۳-الف) مقطع دو بعدی در ۲۳۲۰ Inline= ۳۶
- شکل (۳-۳-ب) مقطع دو بعدی در ۲۳۵۶ Inline= ۳۶
- شکل (۳-۳-ج) نمایی از گسل‌های تفسیر شده در مکعب داده‌های لرزه‌ای ۳۷
- شکل (۴-۳) تصویر سه بعدی مخزن و گسل‌های مدل‌سازی شده ۳۸
- شکل (۵-۳) نمودارهای ستونی مربوط به شیب و جهت شکستگیها ۴۰
- شکل (۱-۴) جهت‌گیری قطب‌های شکستگی و دسته‌بندی شکستگیها به کلاس یک و دو ۵۰
- شکل (۲-۴) نمایش نمودار شدت شکستگی در چاه مورد مطالعه ۵۱
- شکل (۳-۴-الف) ساخت نمودار شدت شکستگی و بزرگ‌نمایی این نمودار با روش سلول همسایه ۵۳
- شکل (۳-۴-ب) مقایسه نمودارهای ستونی شدت شکستگی قبل و بعد از بزرگ‌نمایی ۵۴
- شکل (۴-۴) استفاده از مقطع دو بعدی عرضی برای توصیف انحنا ۵۶
- شکل (۴-۵-الف) الگوریتم ردیابی مورچه در برش زمانی ۷۲۰ میلی ثانیه ۵۶

- شکل (۴-۵-ب) نشانگر آشفتگی در برش زمانی ۷۲۰ میلی ثانیه ۵۷
- شکل (۴-۵-ج) نشانگر واریانس در برش زمانی ۷۲۰ میلی ثانیه ۵۷
- شکل (۴-۵-د) نشانگر برجستگی در برش زمانی ۷۲۰ میلی ثانیه ۵۸
- شکل (۴-۵-ه) نشانگر انحنا در برش زمانی ۷۲۰ میلی ثانیه ۵۸
- شکل (۴-۶-الف) توزیع شدت شکستگی به دست آمده با استفاده از روش کریجینگ ۶۰
- شکل (۴-۶-ب) توزیع نامناسب شدت شکستگی با استفاده از روش شبیه‌سازی گاوسی متوالی ۶۱
- شکل (۴-۶-ج) توزیع مطلوب شدت شکستگی با استفاده از روش شبیه‌سازی گاوسی متوالی ۶۱
- شکل (۴-۷-الف) توزیع شدت شکستگی با اعمال الگوریتم لرزه‌ای ردیابی مورچه ۶۴
- شکل (۴-۷-ب) توزیع شدت شکستگی با اعمال نشانگر لرزه‌ای آشفتگی ۶۴
- شکل (۴-۷-ج) توزیع شدت شکستگی با اعمال نشانگر لرزه‌ای واریانس ۶۵
- شکل (۴-۷-د) توزیع شدت شکستگی با اعمال نشانگر لرزه‌ای برجستگی ۶۵
- شکل (۴-۷-ه) توزیع شدت شکستگی با اعمال نشانگر لرزه‌ای انحنا ۶۶
- شکل (۴-۸) نمایش توزیع جهت‌گیری شکستگی‌ها با اعمال روش فیشر در استریونت ۶۹
- شکل (۴-۹) مدل گسسته شکستگی به دست آمده با استفاده از نشانگر آشفتگی ۷۰
- شکل (۴-۱۰) نمایش ستونی توزیع طول شکستگی در محدوده بازه‌ای ۱۰۵۰-۰ فوت ۷۱
- شکل (۴-۱۱-الف) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۴۵۰-۶۰۰ فوت ۷۲
- شکل (۴-۱۱-ب) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۷۵۰-۶۰۰ فوت ۷۲
- شکل (۴-۱۱-ج) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۷۵۰-۹۰۰ فوت ۷۳
- شکل (۴-۱۱-د) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۹۰۰-۱۰۵۰ فوت ۷۳
- شکل (۴-۱۲) نشانگر امپدانس صوتی نسبی در برش زمانی ۷۲۰ میلی ثانیه همراه گسل‌های مدل شده مخزن ۷۶
- شکل (۴-۱۳-الف) مدل سه بعدی تخلخل با استفاده از نشانگر امپدانس صوتی نسبی همراه گسل‌های مدل شده ۷۷
- شکل (۴-۱۳-ب) نمودار ستونی تخلخل قبل و بعد از بزرگ‌نمایی ۷۸
- شکل (۴-۱۴) مدل سه بعدی تمرکز کلسیت در مخزن و نمودار ستونی آن قبل و بعد از بزرگ‌نمایی ۸۰

- شکل (۴-۱۵) مدل سه بعدی تمرکز دولومیت در مخزن و نمودار ستونی آن قبل و بعد از بزرگ‌نمایی ۸۱
- شکل (۴-۱۶-الف) مدل قطعی محرک شکستگی فاصله از گسل ۸۲
- شکل (۴-۱۶-ب) نمودار ستونی فاصله از گسل ۸۳
- شکل (۴-۱۷-الف) توزیع شدت شکستگی به‌دست آمده با ۱۰۰ مرتبه تکرار ۸۷
- شکل (۴-۱۷-ب) توزیع شدت شکستگی به‌دست آمده با ۵۰۰ مرتبه تکرار ۸۸
- شکل (۴-۱۸) مدل گسسته شکستگی با استفاده از مدل توزیع شدت شکستگی با ۵۰۰ مرتبه تکرار ۸۹
- شکل (۴-۱۹) نمودار توزیع طول شکستگی و دسته‌بندی این نمودار به ۵ کلاس ۹۰
- شکل (۴-۲۰-الف) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۴۵۰-۶۰۰ فوت ۹۱
- شکل (۴-۲۰-ب) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۶۰۰-۷۵۰ فوت ۹۱
- شکل (۴-۲۰-ج) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۷۵۰-۹۰۰ فوت ۹۲
- شکل (۴-۲۰-د) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۹۰۰-۱۰۵۰ فوت ۹۲

فهرست جداول

- جدول (۱-۳) اطلاعات شکستگی‌های مربوط به چاه مورد مطالعه ۳۹
- جدول (۱-۴) ضریب همبستگی شدت شکستگی با نشانگرهای لرزه‌ای ۶۶
- جدول (۲-۴) میانگین جهت شیب، شیب و مقدار تمرکز برای دسته شکستگی‌ها ۶۹
- جدول (۳-۴) رابطه همبستگی بین محرک‌های شکستگی و شدت شکستگی با ۱۰۰ مرتبه تکرار ۸۵
- جدول (۴-۴) رابطه همبستگی بین محرک‌های شکستگی و شدت شکستگی با ۵۰۰ مرتبه تکرار ۸۶

فصل اول

مقدمه و کلیات

شکستگی‌ها^۱ ساختارهای فراگیری هستند که در انواع متفاوت سنگ‌ها و ساختگاه‌های تکتونیکی و در بازه ابعادی وسیعی رخ می‌دهند. درصد قابل ملاحظه‌ای از ذخایر هیدروکربنی جهان در مخازن شکافدار طبیعی^۲ جای گرفته‌اند. از این رو مدل‌سازی مخازن شکافدار از اهمیت خاصی برخوردار است. حضور شکستگی‌های طبیعی در مخازن شکافدار مسیرهای پیچیده‌ای برای عبور جریان سیال ایجاد می‌کنند که باعث تحت تأثیر قرار دادن خصوصیات مخزن، عملیات حفاری، تولید و بازیابی می‌شوند. بنابراین شناخت صحیح از شبکه شکستگی‌ها و نحوه توزیع آن‌ها، در رویارویی با منابع زیرزمینی شکافدار کمک شایانی به بهینه‌سازی عملیات حفاری، تولید و بهره‌برداری می‌کند. برای مثال با شناسایی مناطقی که دارای چگالی شکستگی بالایی هستند، چاه‌ها در محلی حفر خواهند شد که باعث اتصال شکستگی‌های هدایت کننده‌ی جریان سیال شوند. همچنین آگاهی از جزئیات دیگر شکستگی‌ها از جمله اندازه، جهت‌یابی و چگونگی اتصال، در مدل‌سازی جریان سیال ضروری است.

بسیاری از میادین هیدروکربنی در ایران از نوع میادین شکافدار طبیعی هستند که دارای نرخ تولید بسیار بالا می‌باشند. مخزن شکافدار، مخزنی است که در آن شکستگی‌ها، تراوایی مخزن را تحت تأثیر قرار داده و در نتیجه نرخ تولید و بازیافت هیدروکربن افزایش یافته است (Narr et al., 2006). شناسایی، پردازش و ارزیابی شکستگی‌های طبیعی یکی از اهداف مهم در مطالعات مخزن برای زمین-شناسان، متخصصین ژئوفیزیک و مهندسان نفت برای اکتشاف و توسعه مناسب مخزن می‌باشد.

^۱ Fractures

^۲ Naturally Fracture Reservoir

۲-۱ تأثیر شکستگی‌ها بر رفتار مخازن شکافدار طبیعی

بر اساس طبقه‌بندی (Nelson, 2001) مخازن شکافدار طبیعی در چهار گروه دسته‌بندی می‌شوند. در مخازن نوع اول شکستگی‌ها تأمین‌کننده اصلی نفوذپذیری و تخلخل سنگ هستند. در مخازن نوع دوم، تخلخل ماتریکس بیش‌تر از شکستگی‌ها است اما شکستگی‌ها تراوایی اصلی مخزن را تأمین می‌کنند. در مخازن نوع سوم، تراوایی ماتریکس نسبتاً بالا بوده و شکستگی‌ها باعث افزایش بیش‌تر ذخیره سیال می‌شوند. گروه چهارم مخازنی هستند که شکستگی‌های موجود در آن‌ها توسط مواد معدنی پر شده‌اند. در این مخازن، وجود شکستگی‌ها در افزایش تخلخل و تراوایی تأثیری نداشته و تنها باعث ناهمگنی مخزن و تقسیم‌سازند به بلوک‌های کوچک می‌گردد. بنابراین شکستگی‌ها، هم می‌توانند باعث افزایش تراوایی مخزن شوند و تأثیر قابل توجهی بر بهره‌برداری از چاه و افزایش راندمان برداشت داشته باشند و هم باعث ایجاد موانعی برای جریان یافتن سیال و کاهش میزان بازیابی از چاه شوند (Gong, 2007).

۳-۱ اهمیت شناسایی و بررسی شبکه شکستگی‌ها

شکستگی‌های طبیعی نقش قابل توجهی در جریان سیال در مخازن شکافدار طبیعی ایفا می‌کنند. از دیدگاه زمین‌شناسی، اکثر مخازن دارای تراوایی ماتریکس پایین بوده لذا شکستگی‌ها اصلی‌ترین محیط انتقال سیال به حساب می‌آیند. به طور کلی، هیدروکربن‌ها عمدتاً در تخلخل ماتریکس تجمع یافته‌اند و از طریق گذرگاه‌های تراوا از شکستگی‌ها به سمت چاه‌های تولیدی انتقال می‌یابند. همچنین سیستم‌های شکستگی می‌توانند نقش مهمی در تخلخل سنگ و ذخیره هیدروکربن نیز داشته باشند (Hong Tran, 2004). در طی سال‌های اخیر با بهبود اطلاعات حاصل از چاه‌نمودارها مانند چاه-نمودارهای تصویری و نیز افزایش کیفیت و دقت اطلاعاتی مانند داده‌های لرزه‌نگاری، ارتقاء روش‌ها و ابداع تکنیک‌های جدید در مطالعات شکستگی و مدل‌سازی مخازن شکافدار میسر شده است. هر چند

که با وجود این پیشرفت‌ها هنوز مطالعه و مدل‌سازی شبکه شکاف‌ها و بررسی نقش آن‌ها در رفتار مخزن با پیچیدگی‌ها و دشواری‌های زیادی روبرو است. آنچه مسلم است، به دلیل ماهیت پیچیده شکاف‌ها و رفتار مخازن شکافدار، لازم است تا در مطالعه آن‌ها از همه اطلاعات استاتیکی و دینامیکی که می‌تواند ما را در شناخت بهتر رفتار شکاف‌ها و مخزن یاری رساند استفاده گردد. این امر مستلزم وجود یک تیم مطالعاتی با تخصص‌های مختلف از جمله ژئوفیزیک، پتروفیزیک، زمین‌شناسی و مهندسی نفت می‌باشد. تنها از این طریق و انجام یک مطالعه یکپارچه است که می‌توان از عدم قطعیت‌های بررسی و مطالعه شکاف‌ها تا حدودی کاسته و مدل مناسبی از رفتار مخزن شکافدار ارائه نمود. در این تحقیق نیز سعی شده است با استفاده از اطلاعات چاه‌نمودارهای پتروفیزیکی و داده‌های لرزه‌ای، عدم قطعیت‌های موجود در مطالعه و بررسی مخازن شکافدار را تا حدودی کاهش داد و مدل مناسبی را از توزیع شکستگی در مخزن ارائه نمود. مشکلات مهندسی زیادی در ارتباط با شکستگی‌ها وجود دارد. برای مثال، هرزروی گل یکی از مشکلات هزینه‌آور در حفاری مناطق شکسته با فشار کم می‌باشد. سیال حفاری از طریق شکستگی‌های متقاطع هرز می‌رود و موجب افزایش زمان حفاری و تحمیل هزینه‌های اضافی به عملیات حفاری می‌گردد (Glowka et al., 1992).

به طور کلی، داشتن دانشی از شبکه گسسته شکستگی‌ها برای توسعه میادین نفتی، تولید گرما از مخازن زمین گرمایی و بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی، ضروری می‌باشد و منجر به ارزیابی دقیق از ذخایر، فرایند تولید و افزایش بازیابی می‌شود. همچنین مشکلات بالقوه مخزن نیز کاهش می‌-

یابد (Hong Tran, 2004).

۴-۱ اهمیت مدل‌های جامع شبکه گسسته شکستگی‌ها

مدل‌های تصادفی شبکه گسسته شکستگی^۳ به عنوان جزئی از توصیف و شبیه‌سازی مخزن، برای انواع کاربردهای مخزنی حیاتی هستند. یکی از اهداف طرح‌ریزی مخزن، تعیین مناطق با شدت شکستگی کم و شدت شکستگی زیاد است. در نتیجه، چاه‌های حفاری می‌توانند شکستگی‌هایی که کنترل‌کننده جریان سیال هستند را هدف قرار دهند. بنابراین، مدل‌های توزیع چگالی شکستگی لازم و ضروری هستند. از آنجایی که شکستگی‌های با خصوصیات مختلف (اندازه، جهت‌گیری و درجه اتصال) تأثیر متفاوتی بر جریان سیال مخزن دارند، به طوری که شکستگی‌های با اندازه‌ی بزرگ‌تر و دهانه‌ی بازتر سیال را به طور موثرتری انتقال می‌دهند. جهت‌گیری شکستگی‌ها کنترل‌کننده آنیزوتروپی مخزن و تراوایی جهتی است (Hong Tran, 2004). به عنوان مثال، شکستگی‌های تقریباً موازی به یکدیگر متصل نبوده و لذا یک شبکه‌ی به هم پیوسته برای جریان سیال را تشکیل نمی‌دهند. در چنین مواردی، جهت افزایش بازده تولید گمانه‌های حفاری برای قطع کردن شکستگی‌ها، باید به صورت جهت‌دار حفر گردند.

۵-۱ مطالعات پیشین

مطالعات وسیعی در زمینه شناسایی شکستگی‌ها و مدل‌سازی آن‌ها انجام شده است. در این بخش تاریخچه‌ای از مدل‌سازی شکستگی‌ها به روش شبکه گسسته شکستگی و برخی از کارهای انجام شده در این زمینه آورده شده است.

^۳ Stochastic Discrete Fracture Network Model

۱-۵-۱ مدل سازی شبکه گسسته شکستگی

بر اساس Gilman (2003) معمولاً از سه روش برای توصیف جریان سیال در مخازن شکافدار طبیعی استفاده می‌شود. اولین روش توسط مدل تخلخل دوگانه-تراوایی یگانه ارائه شده است که در آن بلوک‌های ماتریکس تنها از طریق شبکه‌های شکستگی متصل می‌باشند. در این مدل بیشتر ذخایر سیال در ماتریکس قرار دارد که دارای تخلخل بسیار بیشتری نسبت به شکستگی است و جریان سیال تنها از طریق شکستگی‌های بسیار تراوا انجام می‌گیرد. روش دوم توسط مدل تخلخل دوگانه-تراوایی دوگانه ارائه شده است. در مقایسه با مدل قبلی بلوک‌های ماتریکس با یکدیگر در ارتباط بوده و منجر به جریان یافتن سیال از طریق آن‌ها علاوه بر جریان ماتریکس به شکستگی می‌شود. روش سوم، مدل سازی جریان شبکه گسسته شکستگی، جدیدترین روش می‌باشد. این روش متکی به طرح فضایی سه بعدی از صفحات شکستگی است که منجر به ساخت شبکه‌ی به هم پیوسته‌ایی از سطوح شکستگی است. هر حجم سنگ مخزن که در سه بعد توسط شکستگی‌ها محدود شده است، بلوک‌های ماتریکس می‌باشند. مزیت اصلی این نوع مدل نسبت به دو مدل قبلی این است که شکستگی‌ها به عنوان ویژگی‌های گسسته شناخته می‌شوند. در حالی که در دو مدل قبلی، شکستگی‌ها توسط یک دسته از شبکه شکستگی با فضای منظم در مکعب‌های ماتریکس شناخته می‌شدند. این روش در پایداری شیب توده سنگ‌ها^۴ (Einstein et al, 1980)، تغییر شکل توده سنگ^۵ (Dershowitz and Einstein, 1988)، جریان آب‌های زیرزمینی^۶ (Long and Billaux, 1987) استفاده گردید و سپس به طور پیوسته بعد از آن توسعه یافت و دارای کاربردهای فراوانی در مهندسی عمران، مهندسی محیط-زیست و مهندسی مخزن و دیگر علوم زمین شد و به صورت یک روش بی‌همتا در شبیه‌سازی الگوی سه بعدی شکستگی‌ها تبدیل گردید.

^۴ Rock slope stability

^۵ Rock mass deformation

^۶ Groundwater flow

این نوع از مدل‌های شبکه گسسته شکستگی به دلیل نیاز به تحقیقات در زمینه جریان سیال در مخازن زباله‌های هسته‌ای گسترش یافتند که منجر به ظهور مدل‌های شکستگی تصادفی گردید. این مدل‌ها همچنین کاربردهایی در مهندسی معدن یافتند. مدل‌های اولیه از شبکه شکستگی به صورت قطعی^۷ به عنوان گروهی از شکستگی‌های از پیش تعریف شده بودند. این مدل‌های شبکه شکستگی به دلیل ثابت بودن شکستگی‌ها که در بلوک‌های یکسان جدا شده بودند، مدل‌های ساده‌ای بودند. اما بعد از آزمایش و بررسی نمونه‌های رخنمون مشخص شد که شکستگی‌ها به این شیوه ظاهر نمی‌گردند، و لذا مدل‌های تصادفی خیلی زود پیشنهاد گردیدند. اولین مدل‌های تصادفی، مدل‌های ساده‌ای بودند که در آن‌ها شکستگی‌ها به صورت صفحه‌ای و محدود در نظر گرفته شده بود. روش‌شناسی مدل‌سازی شبکه شکستگی توسط مولفین بسیاری توسعه پیدا کرده است و مدل‌های مختلفی ارائه گردیده است.

الف) مدل دیسکی^۸

در این مدل، شکستگی‌ها به صورت دیسکی شکل بوده و جهت‌گیری آن‌ها توسط قطر دیسک مشخص شده و پراکندگی آن‌ها به صورت تصادفی و با توزیع پواسون^۹ در فضا می‌باشد.

ب) مدل چند ضلعی ونزیانو^{۱۰}

در این مدل، شکستگی‌های چند ضلعی به وسیله فرآیندی تصادفی (پواسون) از خطوط بر صفحات تعریف می‌شوند. توزیع جهت‌گیری این صفحات به صورت دلخواه انجام می‌گیرد. چند ضلعی‌های در هر صفحه مستقل از یکدیگر هستند بنابراین هیچ امکانی برای تعیین محل خاتمه شکستگی‌ها^{۱۱} در محل تقاطع وجود ندارد.

^۷ Deterministic Models

^۸ The disk model

^۹ Poisson Distribution

^{۱۰} The Veneziano polygon model

^{۱۱} Fracture Termination

در این مدل، شکستگی‌های چند وجهی بر روی صفحات شکستگی تعریف می‌شوند. این کار توسط فرآیندی از خطوط پواسون^{۱۳} که نتیجه تقاطع صفحات شکستگی است انجام می‌گیرد. این مدل قادر است محل خاتمه شکستگی در تقاطع شکستگی‌ها را مدل کند. اما لازمه آن تعریف اندازه و محل خاتمه آن به طور غیر مستقیم از شدت صفحات شکستگی است.

مدل‌سازی شکستگی فرآیندی پیچیده از توصیف ویژگی‌ها و پیش‌بینی فضایی شکستگی‌ها برای پیش‌بینی رفتار مخزن می‌باشد. در مقیاس مخزن داده‌های چاه اطلاعات ضروری در رابطه با شکستگی‌ها را تأمین می‌کنند اما این داده‌ها تنها در محدوده‌ی نزدیک چاه دارای اعتبار هستند. لذا توصیف شکستگی نیازمند تلاش‌های زیادی برای پیش‌بینی توزیع شکستگی در نقاط دور از چاه می‌باشد. ازین‌رو روش‌های متعارف زمین‌آماری برای تخمین چگالی شکستگی در سراسر مدل به کار گرفته شد. از تکنیک‌هایی از جمله کریجینگ و شبیه‌ساز گاوسی برای تخمین شدت شکستگی در سراسر مدل استفاده شد که این روش‌ها در برخی موارد نتایج ناموفقی را در پیش‌بینی توزیع شکستگی‌ها ارائه دادند (El-Ouahed et al., 2005). در نتیجه مدل‌سازی شکستگی نیازمند یک رابطه ثانویه مانند رابطه واقعی بین شدت شکستگی و رویدادهای تکتونیکی محلی یا ناحیه‌ای می‌باشد (Nelson, 2001; Stearns and Friedman, 1972; Zellou et al., 1995).

Ouenes et al., (2000) روش جدیدی که در آن از ترکیب مدل‌سازی شبکه گسسته و پیوسته شکستگی استفاده شده است را توسعه دادند. از مزیت‌های این روش، ساخت مدل شکستگی بر اساس تمامی داده‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و داده‌های مهندسی است و پس از آن مدل‌های گسسته شکستگی ضمنی ساخته می‌شوند. فرآیند مدل‌سازی با ساختن مدل‌های شکستگی پیوسته شروع شده که قادر به گرفتن رابطه بین شدت شکستگی و خصوصیات زمین‌شناسی مرتبط با شکستگی

^{۱۲} The Dershowitz Fracture Model-(Dershowitz, 1984)

^{۱۳} Poisson lines

می‌باشند. ابزارهای هوش مصنوعی برای انطباق بین خصوصیات زمین‌شناسی و شدت شکستگی استفاده شده است که در نهایت مدل‌های گسسته شکستگی بازتاب دهنده‌ی شرایط زمین‌شناسی منعکس شده در مدل‌های پیوسته و همچنین نشان‌دهنده مشخصات شکستگی مشاهده شده می‌باشند.

Tran et al., (2002) روش‌شناسی یکپارچه جدیدی برای مدل‌سازی شبکه شکستگی ارائه دادند. این روش‌شناسی ویژگی‌های زمین‌شناسی، روش‌های آماری و هوش مصنوعی در یک حلقه تو در تو را یکپارچه می‌کند و برای توصیف شبکه‌های شکستگی و شبیه‌سازی آن‌ها به کار می‌رود. از شبکه عصبی برای به دست آوردن رابطه پارامترهای اولیه و ثانویه شکستگی از داده‌های نمودار تصویری و مغزه استفاده شده است.

Tran et al., (2003) روش‌شناسی یکپارچه‌ی دیگری برای مدل‌سازی شبکه شکستگی با استفاده از مدل‌سازی شیء‌گرا^{۱۴} و بهینه‌سازی کلی^{۱۵} را ارائه دادند. در ابتدا، به عنوان مدل شیء‌گرا هر شکستگی مشخص شده و به عنوان یک شیء مجزا عمل می‌کند. در این روش شکستگی به عنوان یک شیء که به وسیله موقعیت، جهت و اندازه توصیف شده، در نظر گرفته می‌شود. هر شیء قوانین مختلفی مانند جابه‌جایی، چرخش، رشد، کوتاه شدگی، تکرار یا حذف به عنوان رفتار در فضا دارند. مدل شبکه گسسته شکستگی^{۱۶} (DFN)، به صورت مخلوطی از تعداد کل شکستگی‌ها، تک شکستگی و خواص آن‌ها تعریف می‌شود.

Dershowitz et al., (2004) روش شبکه گسسته شکستگی را برای مخازن کربناته توسعه دادند. در این کار روش‌های شناسایی خصوصیات زمین‌شناسی کربناته مثل ویژگی‌های کارستی، شکستگی‌های موجود در لایه و مرز لایه، تطابق بین شدت شکستگی و ضخامت لایه‌بندی توسعه داده شده است.

^{۱۴} Object Base Modeling

^{۱۵} Global Optimization

^{۱۶} Discrete Fracture Network Model

El-Ouahed et al., (2005) در روشی با استفاده از ابزار هوش مصنوعی به شناسایی و بررسی زون-های شکسته در یک میدان نفتی پرداختند. این عملکرد شامل رابطه پیچیده موجود بین شدت شکستگی و بعضی محرک‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیک از جمله رخساره‌ها، تخلخل، تراوایی، ضخامت لایه، نزدیکی به گسل، شیب و انحنا ساختمان استوار است. سپس به منظور تهیه نقشه شدت شکستگی، از شبکه عصبی و منطق فازی استفاده می‌کند. این ابزار عملکرد بسیار مناسبی را در توصیف مخازن شکافدار طبیعی نشان دادند.

Guaiquirian et al., (2007) از روش شبکه گسسته شکستگی برای مدل‌سازی شکستگی‌های در یک میدان نفتی استفاده کردند و از تمامی داده‌های موجود شامل داده‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و داده‌های مهندسی مخزن شامل داده‌های تولید، جریان‌سنج‌ها و چاه‌آزمایی برای تعیین انواع اصلی شکستگی‌ها، پیش‌بینی رخداد آن‌ها در مخزن و تعیین خواص هیدرولیکی دسته شکستگی‌های متفاوت، بهره بردند.

روش شبکه گسسته شکستگی برای توصیف شکستگی‌های طبیعی در مقیاس چاه و مدل‌سازی سه بعدی شبکه شکستگی در مقیاس میدان استفاده گردیده است. لازم به ذکر است که توصیف شکستگی‌های طبیعی فرآیندی پیچیده است و به شرایط زمین‌شناسی توسعه مخزن بستگی دارد. محیط رسوبی نقش مهمی در تولید شکستگی‌های مخزن بازی می‌کند. شکستگی‌های با رده یکسان که احتمالاً در زمان یکسانی ایجاد شده‌اند در یک دسته شکستگی گروه‌بندی می‌شوند. هر شبکه شکستگی حداقل شامل یک دسته شکستگی می‌باشد و الزاماً محدود به آن نمی‌باشد. موقعیت سنگ-های رسوبی بسیار متفاوت می‌باشد، بنابراین مدل‌های پیچیده‌تری برای ارتباط بین دسته شکستگی-های متفاوت توسعه یافتند.

Ouenes et al., (2010) با استفاده از داده‌های چاه، نشانگرهای لرزه‌ای و محرک‌های شکستگی از جمله تخلخل و ضخامت لایه‌ها به مدل‌سازی شکستگی‌ها تحت عنوان مدل‌سازی پیوسته شکستگی

پرداختند. این عملکرد بر اساس شناسایی محرک‌های شکستگی، طبقه‌بندی و کاربرد آن‌ها در ساخت مدل شکستگی انجام گرفت.

ملایوسفی و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از چاه‌نمودار تصویری به تعیین پارامترهای مدل‌سازی عددی شبکه گسسته شکستگی‌ها پرداختند. همچنین با استفاده از داده‌های ثبت شده برای شکستگی‌های باز در چاه مناسب‌ترین توابع توزیع احتمال برای پارامترهای هندسی شکستگی‌ها را در میدان مورد مطالعه‌شان ارائه دادند. همچنین با استفاده از توابع توزیع احتمال، پارامترهای هندسی شکستگی‌ها و روش شبیه‌سازی مونت کارلو مدل‌های شبکه گسسته شکستگی را تهیه کردند.

بیات و همکاران (۲۰۱۴) به مدل‌سازی پیوسته شکستگی در مخازن کربناته با تلفیق داده‌های لرزه‌ای، زمین‌شناسی و پتروفیزیکی پرداختند. بیات و همکاران (۲۰۱۴) از تراکم شکستگی حاصل از تحلیل شکستگی‌های مغزه‌های سه چاه از میدان مارون استفاده کردند. همچنین از نشانگرهای لرزه‌ای مرتبط با شکستگی از جمله فرکانس لحظه‌ای، انحنا و شیب نیز استفاده کردند.

Wilson et al., (2015) مدل بهبود یافته شبکه گسسته شکستگی را برای مخازن نفتی ماسه سنگی تن‌اسلیپ^{۱۷} در تی‌پت‌دام^{۱۸} ارائه دادند. همچنین به بررسی و توصیف مخزن به کمک داده‌های لرزه‌ای سه بعدی، چاه‌نمودارهای تصویری و اطلاعات رخنمون پرداختند. با توجه به مطالعات انجام شده بازشدگی شکستگی‌ها از نمودارهای تصویری با توزیع لاگ نرمال به دست آمد. همچنین با بررسی داده‌های رخنمون، مشخص شد که اطلاعات طول شکستگی از تابع توزیع توانی پیروی می‌کند. از نشانگرهای لرزه‌ای برای شناسایی مناطق دارای گسل خوردگی و چین‌خوردگی که در توزیع شدت شکستگی نقش مهمی را ایفا می‌کنند استفاده شد.

^{۱۷} Tensleep

^{۱۸} Teapot Dome

(Richard and Lamine, 2017) به توصیف و مدل‌سازی شکستگی‌های موجود در مخازن کربناته شمال کویت با استفاده از تصاویر چاه، داده‌های مغزه و اطلاعات دینامیکی پرداختند. از مدل‌های گسسته شکستگی به‌دست آمده در طرح‌ریزی برنامه حفاری و همچنین برآورد و پیش‌بینی تولید استفاده شد. همچنین از بررسی اطلاعات مغزه و فشار ناپایدار برای کالیبره کردن تراوایی و تخلخل مدل ساخته شده استفاده کردند.

(Liao et al., 2017) با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای سه بعدی و یک مدل میان‌لایه‌های رسی، به بررسی و ساختمان و گسل‌های موجود در منطقه وودفورد پرداختند. همچنین برای شناسایی روند گسل‌های این منطقه از نشانگرهای حجمی همدوسی، جهت شیب و انحنا استفاده شد.

با توجه به بررسی و مروری بر مطالعات پیشین، دریافتیم که با توجه به کمبود داده‌های شکستگی مورد نیاز برای توزیع هرچه بهتر شدت شکستگی در مخزن مورد مطالعه، استفاده از عوامل کنترل‌کننده شکستگی، نقش مهم و اساسی را در مدل‌سازی هرچه بهتر شکستگی‌ها دارند. با توجه به داده‌های در دسترس می‌توان از داده‌های لرزه‌ای برای شناخت هرچه بهتر توزیع شکستگی‌ها و همچنین بررسی ساختمانی مخزن بهره جست. همچنین می‌توان از نشانگرهای استخراجی مرتبط با شکستگی‌ها، به عنوان عامل کنترل‌کننده شکستگی‌ها استفاده نمود. علاوه بر نشانگرهای لرزه‌ای مرتبط با شکستگی‌ها، از عوامل کنترل‌کننده دیگر از جمله سنگ‌شناسی، فاصله از گسل و تخلخل می‌توان برای توزیع بهتر شکستگی‌ها در مخزن استفاده نمود. همچنین می‌توان رابطه موجود بین این عوامل کنترل‌کننده و شدت شکستگی را با استفاده از ابزار شبکه عصبی مورد بررسی قرار داد. استفاده از تمامی عوامل کنترل‌کننده موجود، می‌تواند مدل‌سازی مطلوبی از توزیع شکستگی‌ها در مخزن را ارائه کند.

۱-۶ اهداف مطالعه

به دلیل پیچیدگی رفتار مخازن شکافدار و نیز کمبود داده‌های مورد استفاده در آنالیز شبکه شکاف‌ها لازم است در مطالعه شکستگی‌ها از همه اطلاعات موجود که می‌تواند ما را در تحلیل بهتر شکستگی‌ها یاری رساند استفاده گردد (محبی و همکاران، ۱۳۹۰). در طی سال‌های اخیر با بهبود اطلاعات حاصل از چاه‌ها مانند نمودارهای تصویری و نیز افزایش کیفیت و دقت اطلاعاتی مانند داده‌های لرزه‌نگاری، ارتقا روش‌ها و ابداع تکنیک‌های جدید در مطالعات شکستگی و مدل‌سازی مخازن شکافدار میسر شده است. تا کنون تلاش‌های بسیاری برای شناسایی شکستگی‌ها صورت گرفته است که از آن میان می‌توان به استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری، داده‌های پتروفیزیکی، تست چاه، بررسی نحوه از دست رفتن گل حفاری و تفسیر مغزه اشاره نمود. هرچند با ظهور چاه نمودارهای تصویری، شناسایی ویژگی‌های شکستگی‌ها بسیار ساده‌تر شد. در میداین ایران تعداد بسیار زیادی چاه وجود دارد که متاسفانه دارای تعداد اندکی چاه‌نمودارهای تصویری هستند. در این تحقیق، ناحیه‌ی مورد مطالعه دارای نتایج تفسیر چاه‌نمودار تصویری و همچنین داده‌های سه بعدی لرزه‌ای است. هدف از انجام این تحقیق آن است که از توزیع شدت شکستگی مناسب برای ساخت مدل گسسته شکستگی استفاده کند. در این تحقیق، مدل‌های توزیع شدت شکستگی به‌دست آمده، علاوه بر روش ساخت متعارف و استفاده از اطلاعات شکستگی حاصل از چاه‌نمودار تصویری، با افزوده شدن اطلاعات حاصل از نشانگرهای لرزه‌ای نیز انجام خواهد گرفت و نتایج حاصل از این دو روش با هم مقایسه می‌شوند و بهترین مدل توزیع شدت شکستگی برای ساخت مدل گسسته شکستگی استفاده خواهد شد. برای اعتبارسنجی مدل به‌دست آمده، با استفاده از ابزار هوش مصنوعی به ارتباط موجود بین شدت شکستگی و عوامل کنترل‌کننده شکستگی از جمله تخلخل، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل و نشانگرهای لرزه‌ای پرداخته خواهد شد. از رابطه بدست آمده برای توزیع شدت شکستگی در مخزن استفاده خواهد شد و در آخر مدل گسسته شکستگی با استفاده از این روش به‌دست خواهد آمد. در نهایت مدل‌های گسسته شکستگی تولید شده با استفاده از دو روش با هم مقایسه خواهند شد.

۷-۱ ساختار پایان نامه

مطالب ارائه شده در این پایان نامه به شرح زیر است:

همانطور که مشاهده شد، فصل اول به تأثیر شکستگی‌ها بر رفتار مخازن شکافدار طبیعی، اهمیت مدل‌های گسسته شکستگی و مطالعات پیشین در این زمینه می‌پردازد. در فصل دوم به مطالعه شکستگی‌ها، ویژگی‌های آن‌ها و منابعی که قادر به سرشت‌نمایی شکستگی‌ها می‌باشند مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در فصل سوم به ساز و کار شکل‌گیری شکستگی‌های طبیعی در میدان مورد مطالعه، بررسی و تفسیر گسل‌های آن، ساخت زون مخزنی، انواع شکستگی از دید چاه‌نمودارهای تصویری و مبحث نشانگرهای لرزه‌ای پرداخته می‌شود. فصل چهارم به تفسیر ساخت مدل DFN، عوامل کنترل‌کننده شکستگی و توصیف منطق به کاربرده شده در هر مرحله با استفاده از داده‌های چاه‌نمودار تصویری و نشانگرهای لرزه‌ای می‌پردازد. در ادامه شدت شکستگی به دست آمده از روش‌های متعارف زمین آماری با شدت شکستگی حاصل از شبکه عصبی مقایسه می‌شوند. در انتها، فصل پنجم به ارائه پیشنهادات و نتیجه‌گیری‌های حاصل از این مطالعه خواهد پرداخت.

فصل دوم

خصوصیات شکستگی‌ها

و

ابزارهای شناسایی آن‌ها

شبهه‌سازی و توصیف مخازن شکسته طبیعی، نیاز به درک درستی از توزیع فضایی واحدهای مخزن و خواص پتروفیزیکی آن‌ها نظیر تخلخل، نفوذپذیری و مشخصات هندسی شکستگی مانند جهت، زاویه شیب و شدت دارد. تغییرات فضایی ویژگی‌های شکستگی مانند اندازه و چگالی بسیار نامنظم و پیچیده است (Van Golf., 1982).

منابع اطلاعاتی برای توصیف کامل مخازن شکسته طبیعی شامل آنالیز مغزه، داده‌های چاه نمودارها، داده‌های لرزه‌ای، رخنمون و داده‌های تست چاه هستند. هر یک از این منابع اطلاعاتی در مورد مخزن در مقیاس‌های مختلف فراهم می‌کنند. در این فصل، ابتدا به تعریف شکستگی و توصیف خصوصیات شکستگی منفرد و شبکه شکستگی‌ها پرداخته می‌شود و در ادامه منابع اطلاعات در دسترس میدان، جهت سرشت‌نمایی شکستگی‌ها با مقیاس و شعاع بررسی متفاوت شرح داده می‌شود.

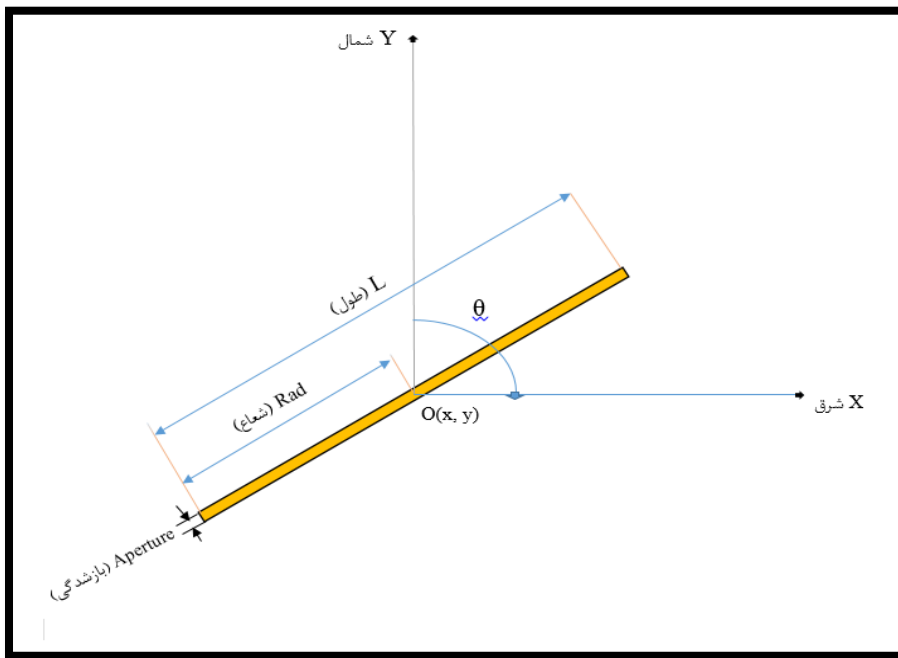
۲-۲ تعریف شکستگی

واژه شکستگی به هر گونه ترک یا ناپیوستگی فیزیکی در سنگ به واسطه تنش فراتر از مقاومت سنگ، اطلاق می‌گردد. شکستگی‌ها شامل درزه‌ها^{۱۹} و گسل‌ها نیز می‌باشند. درزه‌ها سطوح شکستگی بدون جابه‌جایی هستند در حالی که گسل‌ها، شکستگی یا ناحیه‌ای از شکستگی‌ها هستند که در طول سطوح آن‌ها جابه‌جایی وجود دارد (Van Golf, 1982). شکستگی‌ها می‌توانند به شدت جهت مهاجرت سیال را در زیر سطح تحت تأثیر قرار دهند. اکتشافات اخیر حاکی از آن است که شکستگی‌ها نقش بسیار مهمی در تولید از سنگ‌های کربناته با تراوایی کم ایفا می‌کنند. به این دلیل که شکستگی‌ها سطح مشترکی با ماتریکس تشکیل می‌دهند که بسیار بزرگ‌تر از سطحی است که توسط گمانه ایجاد می‌شود.

^{۱۹} joints

۳-۲ توصیف پارامترهای اصلی شکستگی منفرد

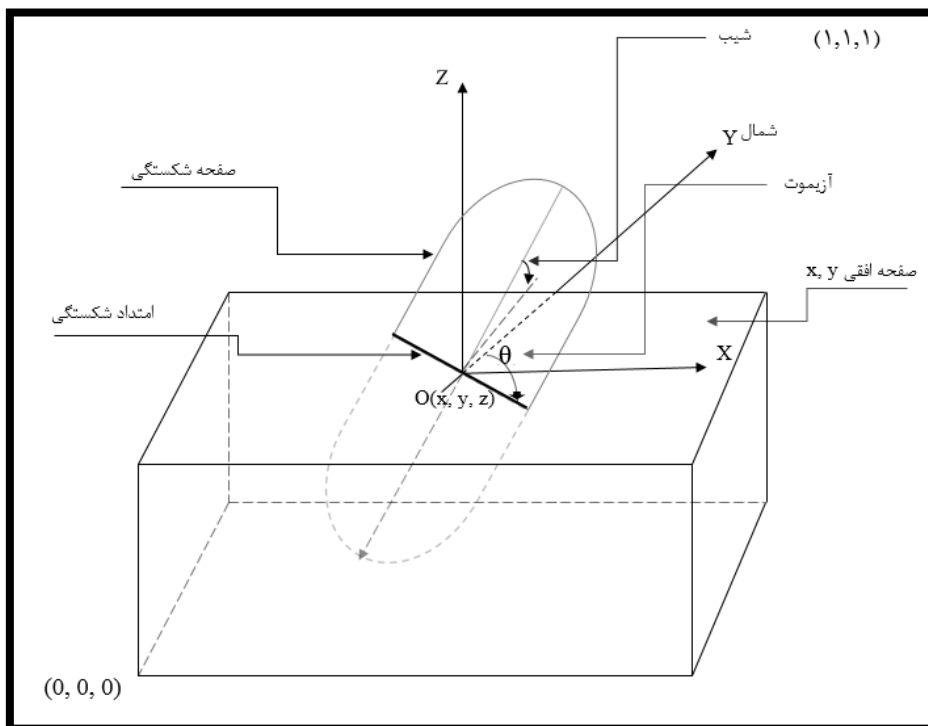
همانطور که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است، وضعیت یک شکستگی منفرد در دو بعد، توسط مختصات مرکز آن (x, y) ، جهت (θ) ، طول (L) یا شعاع (Rad) و ضخامت یا بازشدگی $(Aperture)$ مشخص می‌شود. جهت شکستگی، از محور Y ها (جهت شمال) و در جهت عقربه‌های ساعت اندازه‌گیری می‌شود. جهت شکستگی در سه بعد طبق شکل (۲-۲)، با زاویه آزیموت مشخص می‌شود و ضخامت معادل میزان بازشدگی موثر شکستگی است. اگر یک شکستگی با رسوبات پر شده باشد، به طوری که جریان سیال محدود شود، مقدار بازشدگی موثر به صفر میل می‌کند.



شکل (۱-۲) نمایش یک شکستگی در دو بعد (Hong Tran., 2004)

در این حالت، شکستگی از یک سطح دایره‌ای کم ضخامت تشکیل شده است. سطح دایره‌ای به وسیله مختصات مرکز (x, y, z) ، دو مقدار جهت‌یابی (شیب و آزیموت) و شعاع (Rad) معرفی می‌شود.

شیب، میزان انحراف صفحه شکستگی از افق است و در جهت عمود بر امتداد شکستگی، اندازه‌گیری می‌شود. آزیموت، زاویه بین خط تقاطع صفحه شکستگی و افق با جهت شمال است. اندازه شعاع شکستگی از صفر تا اندازه مقیاس مخزن متغیر است (Hong Tran., 2004).

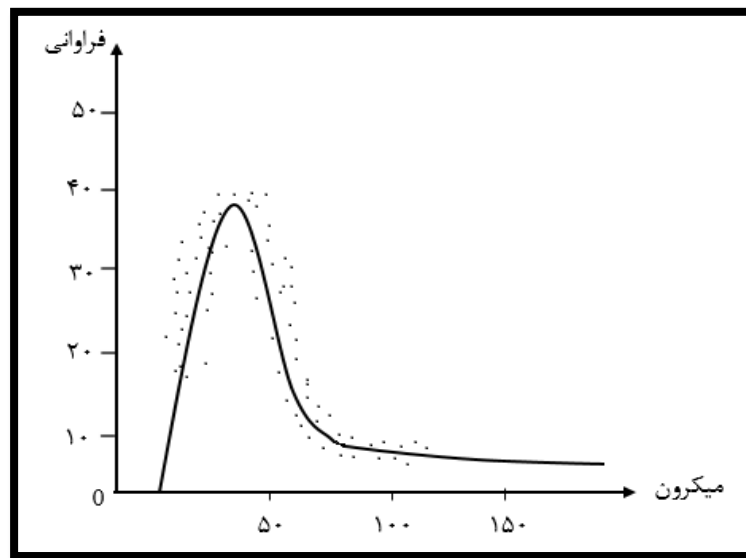


شکل (۲-۲) نمایش یک شکستگی در سه بعد (Hong Tran., 2004)

۲-۳-۱ عرض شکاف

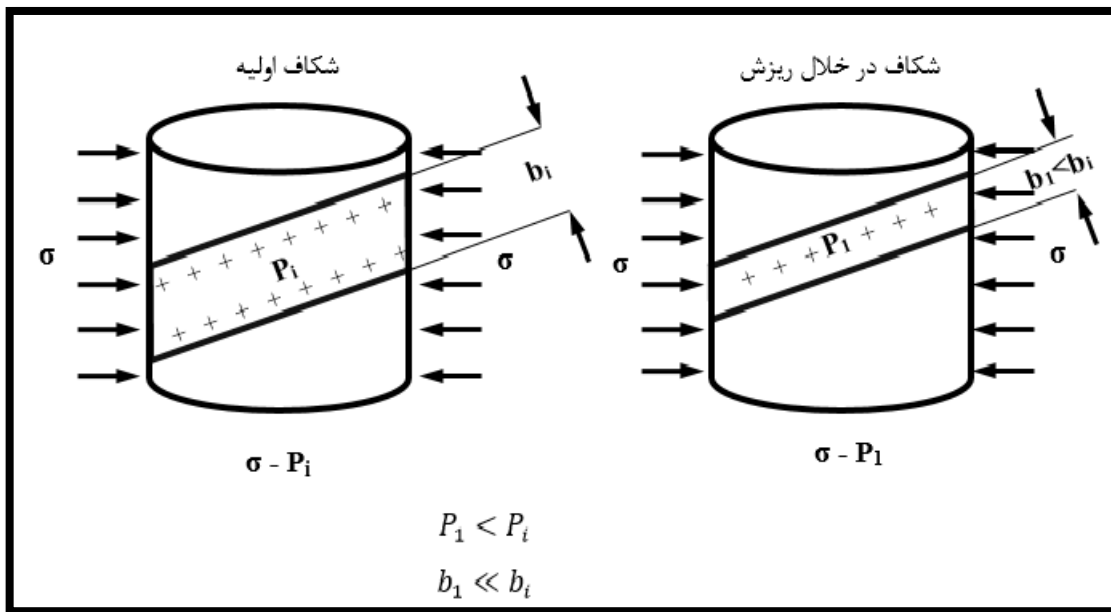
عرض شکستگی یا میزان بازشدگی، به فاصله بین دو دیواره شکستگی اطلاق می‌شود. عرض شکستگی بین ۱۰ تا ۲۰۰ میکرون متغیر است. اما آمار نشان می‌دهد متداول‌ترین محدوده بازشدگی بین ۱۰ تا ۴۰ میکرون است. شکل (۲-۳)، نمودار پراکندگی اندازه عرض شکافها را نشان می‌دهد. عرض شکستگی به ویژگی‌های لیتولوژی و پتروفیزیکی از جمله نوع سنگ، نوع تنش و محیط مخزن بستگی

دارد. این پارامتر مهم‌ترین نقش را در عبور جریان دارد. شکستگی‌های باز به صورت منفرد و یا در ارتباط با شبکه شکستگی‌ها و با ایجاد کانال‌های جریان هدایت سیالات را بر عهده دارند. وجود شکستگی‌های بسته خود می‌تواند در هدایت سیال به نقاط دیگر موثر واقع شود و به صورت غیر مستقیم در هدایت جهت جریان شرکت نمایند. بازشدگی شکستگی‌ها معمولاً به صورت توابع توزیع احتمال نرمال، لاگ نرمال یا توانی بیان می‌شود (ملایوسفی و همکاران ۲۰۱۱).



شکل (۲-۳) نمودار آمار پراکندگی اندازه عرض شکاف‌ها با توزیع لاگ نرمال (Van Golf., 1982)

عرض شکستگی در شرایط مخزن و آزمایشگاه به علت آزاد شدن فشار وارد بر سنگ در سطح متفاوت است. شکل (۲-۴)، کاهش عرض شکاف را به علت آزاد شدن فشار وارد بر سنگ در شرایط آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در شرایط مخزن، فشار محصورکننده (σ) ثابت بوده ولی فشار منفذی اولیه P_i در خلال برداشت از مخزن کاهش یافته و به P_1 تنزل می‌یابد. به دلیل انبساط سنگ مخزن، از عرض دهانه b کاسته خواهد شد.



شکل (۲-۴) کاهش عرض شکاف به علت آزاد شدن فشار وارد بر سنگ (Van Golf., 1982)

۲-۳-۲ اندازه شکستگی

اندازه شکستگی به رابطه بین طول شکستگی و طول لایه بستگی دارد. بر این اساس، شکستگی‌ها را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی کرد:

الف) شکستگی‌های کوچک با طول کم‌تر از لایه

ب) شکستگی‌های متوسط که از چندین لایه می‌گذرند

ج) شکستگی‌های بزرگ که وسعت زیادی دارند و اغلب به ده‌ها یا صدها متر نیز می‌رسند

شکستگی‌های کوچک را می‌توان معادل شکستگی‌های جدا افتاده دانست و شکستگی‌های متوسط و بزرگ را جز شبکه‌های شکستگی در نظر گرفت. طبق مشاهده‌ها، شکستگی‌های کوچک باریک و اغلب مسدود هستند. در حالی که شکستگی‌های بزرگ، عرض بیش‌تری دارند و به ندرت با مواد مختلف پر شده‌اند (Van Golf., 1982). طول شکستگی‌ها معمولاً از تابع توزیع نمایی یا توانی تبعیت می‌کند.

طول شکستگی‌ها با محل قرارگیری شکستگی در ارتباط است و در مناطقی که امکان انتشار ترک و شکاف نیست (مانند لایه‌های نمکی که دارای رفتار خمیری هستند) طول شکستگی‌ها شدیداً کاهش می‌یابد. همچنین طول اولیه شکستگی‌ها می‌تواند در برخورد با شکستگی‌های جدید دچار تغییر شوند. طول و امتداد شکستگی‌ها به طور تصادفی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو مطالعه می‌شوند (ملایوسفی و همکاران ۲۰۱۱).

۲-۳-۳ جهت‌گیری شکستگی‌ها

جهت‌گیری شکستگی‌ها (شامل شیب و جهت شیب) با استفاده از داده‌های تحلیلی زمین‌شناسی شبیه‌سازی می‌شوند. جهت فضایی شکستگی‌ها عمدتاً به نوع شکستگی یعنی برشی، کششی و فشاری بستگی دارد. جهات محلی تنش‌های اصلی که بردارهای ویژه تانسور تنش می‌باشند، کنترل‌کننده روند غالب شکستگی‌های به وجود آمده است (ملایوسفی و همکاران ۲۰۱۱). از مقایسه آرایش شکستگی‌های متعدد چنین نتیجه‌گیری می‌شود که همه شکاف‌های موازی تولید یک سیستم شکستگی می‌کنند. چنانچه ارتباط داخلی بیش‌تری بین سیستم‌های شکستگی در یک مخزن مشاهده شود، تولید شبکه شکستگی می‌نماید.

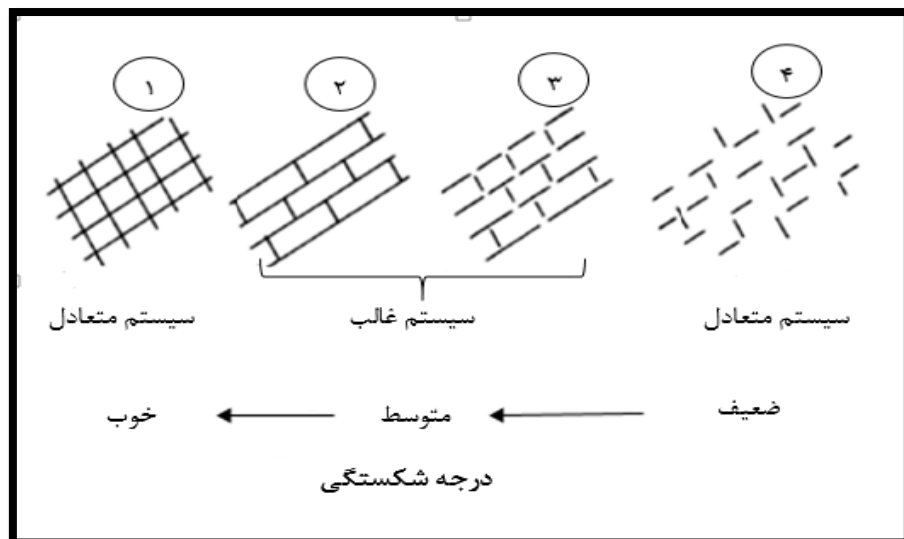
۲-۴-۴ توصیف پارامترهای سیستم شکستگی‌ها

برای مطالعه مخازن شکافدار، ابتدا باید ویژگی‌های اساسی و محل شکستگی‌های منفرد را شناخت و سپس سیستم شبکه شکستگی را بررسی نمود.

۲-۴-۱ توزیع شکستگی‌ها

در یک شبکه شکستگی که از دو یا تعداد بیش‌تری سیستم شکستگی تشکیل شده است، هر سیستم شکستگی تحت یک نوع تنش خاص به وجود آمده است. اما در این میان جفت شکاف‌های مزدوجی

که تحت تنش یکسان به وجود می‌آیند، استثناء می‌باشند. توزیع شکاف با درجه شکستگی بیان می‌شود. در صورتی که سیستم شکستگی ها معادل هم باشند، هرچه ارتباط بین سیستم کمتر باشد و سیستم های شکاف بر هم چیره شوند درجه شکستگی ضعیف تر است (Van Golf., 1982). برای مثال دو سیستم ارتوگونال در شکل (۲-۵) نشان داده شده است. در مورد ۱، دو سیستم به صورت پیوسته در ارتباط هستند. این پدیده معادل درجه بالایی از شکستگی است. در مورد ۴ درجه شکستگی ضعیف و در موارد ۲ و ۳ یکی از دو سیستم غالب است.



شکل (۲-۵) نمایش سیستم‌های شکستگی با درجه شکستگی‌های متفاوت (Van Golf., 1982)

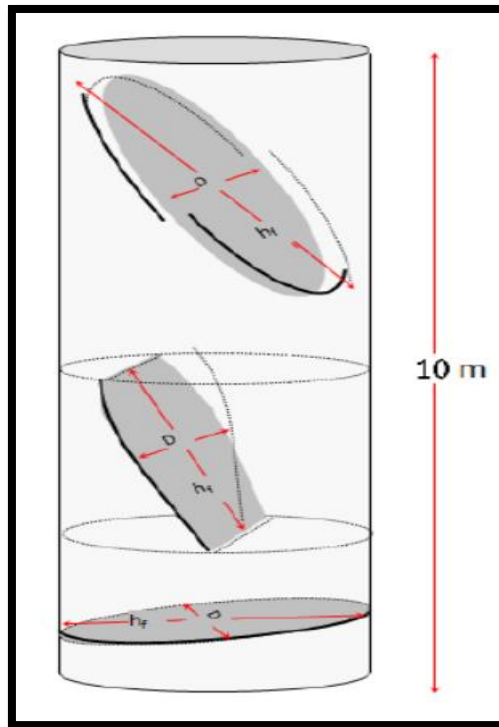
۲-۴-۲ واحد حجم بلوک ماتریکس

وقتی شبکه شکستگی، مخزن را در جهت‌های مختلف جدا می‌سازد، در واقع سنگ مخزن آن را به بلوک‌های ماتریکس تقسیم می‌کند. از آنجا که هر بلوک ماتریکس با شبکه پیوسته‌ای از شکستگی احاطه شده است، هر بلوک از نظر هیدرودینامیکی از بلوک‌های مجاور جدا است. در واقعیت بین بلوک‌های ماتریکس نقاط تماس وجود دارد اما عملاً ارتباط هیدرودینامیکی بین آن‌ها وجود ندارد. بلوک‌های ماتریکس با توجه به شیب، امتداد و توزیع سیستم شکستگی، با شکل، اندازه و حجم تعریف

می‌شوند. شکل هندسی ماتریکس نامنظم است اما برای بررسی عملی آن را به شکل‌های هندسی منظم ساده سازی می‌کنند (Vang Golf., 1982).

۲-۴-۳ چگالی و شدت شکستگی

چگالی شکستگی و شدت شکستگی از مهم‌ترین ویژگی‌های شبکه شکستگی هستند. چگالی شکستگی (p) به عنوان تعداد شکستگی‌ها در سطح نمونه‌برداری (p_{20}) یا تعداد شکستگی‌ها در حجم نمونه‌برداری (p_{30}) تعریف می‌شود. بنابراین شدت شکستگی می‌تواند به صورت تعداد شکستگی‌ها در امتداد خط نمونه‌برداری (p_{10})، طول کل شکستگی‌ها در سطح نمونه‌برداری (p_{21}) و یا سطح کل صفحات شکستگی در حجم سنگ (p_{32}) اندازه‌گیری شود (Dershowitz., 1984). برای مثال در شکل (۲-۶)، سه شکستگی در طول ده متر وجود دارد، طبق تعریف، مقدار شدت شکستگی برابر 0.3 خواهد بود. واحد هر سه مورد شدت شکستگی یکسان (l/m) است اما p_{10} و p_{21} وابسته به جهت نمونه‌برداری هستند و به جهت شکستگی‌ها نسبت به خط برداشت بستگی دارند. در صورتی که شدت شکستگی سه بعدی، یک پارامتر استاتیک مثل تخلخل بوده و مستقل از جهت است و می‌تواند با استفاده از گمانه، با کمک وزن دهی مناسب از شکستگی‌های مشاهده شده، تخمین زده شود. شکل (۲-۶)، مثالی از شکستگی‌ها در بازه‌ای از چاه را نشان می‌دهد.



شکل (۶-۲) مثالی از شکستگی‌ها در بازه‌ای از چاه (Jamvayev., 2004)

۵-۲ منابع داده‌های توصیف مخازن شکافدار

منابع مختلف داده برای سرشت نمایی شکستگی‌ها در مخازن شکافدار وجود دارند و هر یک از این منابع، قادر به توصیف خصوصیتی از شکستگی‌ها هستند. به طور کلی منابع داده‌ها در مقیاس مخزن، شامل داده‌های به دست آمده از رخنمون، آنالیز مغزه، لرزه‌نگاری و داده‌های حاصل از چاه هستند که در ادامه به توضیح مختصری از هر کدام پرداخته شده است.

۱-۵-۲ بررسی و مطالعات رخنمون

تصاویر رخنمون، داده‌هایی در مقیاس ناحیه‌ای و یکی از مهم‌ترین منابع اطلاعات هستند. مطالعه رخنمون‌ها امکان شناسایی دقیق دو بعدی مشخصه‌های اصلی مخازن و ساختارهای زمین‌شناسی را فراهم می‌کنند و نقش مهمی در درک سه بعدی شکستگی‌ها دارند (Martinez., 2002). در واقع با

اندازه‌گیری‌های سطحی و تعمیم آن‌ها به زیر سطح زمین، می‌توان شکستگی‌های زیر سطحی را مورد بررسی قرار داد. هرچند تبدیل تصاویر دو بعدی رخنمون سطحی به شبکه سه بعدی شکستگی‌ها به علت تفاوت بین هوازدگی و فشار روباره در سطح و عمق، کار ساده‌ای نیست (Song et al., 2000). با مطالعات رخنمون می‌توان بین شکستگی‌های منطقه‌ای و ساختاری نیز تمایز قائل شد. شکستگی‌های منطقه‌ای، معمولاً در مناطق وسیعی گسترش یافته‌اند و منشاء تشکیل آن‌ها هیچ ارتباطی با گسل-خوردگی یا چین‌خوردگی‌های محلی ندارد. درحالی‌که شکستگی‌های ساختاری مستقیماً به گسل-خوردگی و چین‌خوردگی‌های محلی مرتبط هستند. (Martinez., 2002). با مطالعه رخنمون، بسیاری از خصوصیات شکستگی‌ها مثل جهت یافتگی، بازشدگی، چگالی و توزیع آن‌ها، به‌دست می‌آید. شکل (۷-۲)، تصویری از یک رخنمون شکستگی‌ها را نشان می‌دهد.

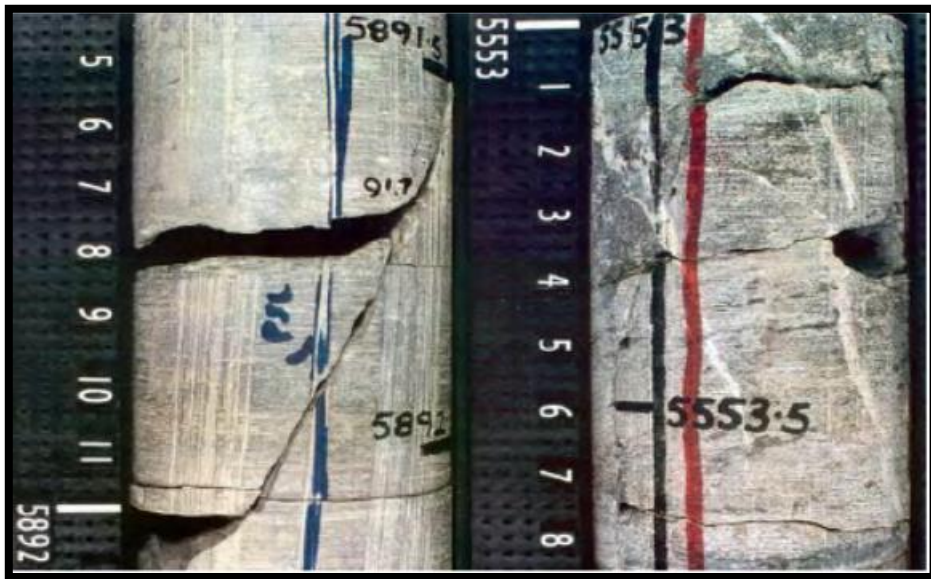


شکل (۷-۲) تصویری از رخنمون شکستگی‌ها (Hong Tran., 2004)

۲-۵-۲ آنالیز مغزه

داده‌های حاصل از مغزه، مستقیم‌ترین راه برای به‌دست آوردن اطلاعات از مخازن هستند. از این‌رو آنالیز مغزه، تنها منبع تایید خواص مخازن به‌دست آمده از بررسی چاه‌نمودارها و دیگر روش‌های غیر-

مستقیم است (Martinez., 2002). اندازه‌گیری‌هایی که بر روی مغزه‌ها صورت می‌گیرد، معمولاً شامل تخلخل، چگالی دانه‌ها، نفوذپذیری، اشباع سیال و توصیف لیتولوژی هستند. همچنین اطلاعاتی مثل بازشدگی، جهت، فاصله‌داری، عرض و چگالی شکستگی‌های زیرزمینی نیز تفسیر می‌شوند (کشاورز و همکاران ۲۰۱۳). شکل (۲-۸)، تصویر نمونه‌ای از مغزه یک چاه با بازشدگی خوبی را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۸) نمونه‌ای از مغزه چاه که بازشدگی خوبی را نشان می‌دهد (Hong Tran., 2004)

۲-۵-۳ داده‌های لرزه‌ای

لرزه‌نگاری یکی از مهم‌ترین منابع داده‌هایی است که می‌تواند اطلاعات قابل اعتمادی را از شکستگی-های مخازن شکافدار در اختیار قرار دهد.

در عملیات لرزه‌نگاری، فرستنده و گیرنده‌های امواج بر روی زمین تعبیه می‌شوند. سرعت انتشار امواج به چگالی و خواص الاستیک سنگ بستگی دارد. زمانی که موج به سطحی می‌رسد که سرعت آن به طور چشم‌گیری تغییر می‌کند، بخشی از انرژی به لایه‌های پایین منتقل می‌شود و بقیه آن به

گیرنده‌ها می‌رسد. نقشه‌های دو یا سه بعدی، مجموعه‌ای از سیگنال‌های سینوسی حاصل از پردازش سیگنال‌های انرژی ثبت شده در گیرنده‌ها هستند.

به طور کلی برداشت‌های دو بعدی و سه بعدی لرزه‌ای، داده‌هایی با مقیاس ناحیه‌ای هستند و بسته به دامنه و طول موج سیگنال‌ها، شعاع بررسی متفاوتی از چند ده تا چند صد فوت را در بر می‌گیرند. داده‌های لرزه‌ای، لیتولوژی، ساختار مخزن، ضخامت و انحنای سازندهای مختلف را توصیف می‌کنند. این ابزار همچنین قادر به مشخص کردن استحکام و خواص هیدرولیکی توده سنگ شکافدار هستند. چرا که پاسخ‌های لرزه‌ای مربوط به زون‌های نفوذپذیر و کم استحکام هستند. سیگنال‌های لرزه‌ای دارای ویژگی‌های مجزایی هستند که اکثر آن‌ها توسط ناهمگنی‌های مخزن مثل شکستگی‌ها تحت تاثیر قرار می‌گیرند. این ویژگی‌ها بر اساس دامنه، فاز و سرعت سیگنال‌های لرزه ای می‌باشند. هر ویژگی قادر خواهد بود یکی از جنبه‌های شبکه شکستگی را مشخص کند (Gong, 2007).

۲-۵-۴ استفاده از چاه نمودارها در مطالعه شکستگی

چاه نمودارها ابزارهایی برای ارزیابی ویژگی‌های سازند و پتانسیل تولید هیدروکربن از یک مخزن هستند و به دو دسته کلی چاه نمودارهای متعارف و غیرمتعارف تقسیم می‌شوند. چاه نمودارهای متعارف از جمله چاه نمودار چگالی، قطر سنجی، گاما و نوترون هستند که معمولاً در همه چاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند اما چاه نمودارهای غیرمتعارف، مانند چاه نمودارهای تصویری به سبب تخصصی و هزینه‌بر بودنشان در موارد خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Martinez., 2002).

۲-۵-۴-۱ چاه نمودارهای تصویری

چاه نمودارهای تصویری در مقایسه با چاه نمودارهای مرسوم، منابع داده بهتری برای سرشت‌نمایی و توصیف شکستگی‌ها به شمار می‌روند. این چاه نمودارها از معدود ابزارهای هستند که می‌توانند خصوصیات شکستگی را مستقیماً اندازه‌گیری کنند.

دو نوع چاه نمودار به صورت عمومی وجود دارد که برای تهیه تصویر از دیواره چاه استفاده می‌شود که شامل میکرواسکنر سازندی^{۲۰} (FMS) و تصویرگر صوتی^{۲۱} (ATV) می‌باشد. این دو چاه نمودار با گل حفاری به داخل چاه رانده می‌شوند و جزئیات تصویری دیواره چاه را بر اساس تغییرات مقاومت و انعکاس صوت تهیه می‌کنند. ابزار میکرواسکنر سازندی از تکنولوژی شیب‌سنج استفاده کرده و دارای چهار بازوی اندازه‌گیری ریزمقاومت است. تصاویر حاصل از این نمودار، ویژگی‌هایی نظیر لایه‌بندی، ساخت‌های رسوبی، شکستگی، استیلولیت و تغییر شکل‌های بعد از رسوب‌گذاری مثل گسل، چین-خوردگی و فروریزش را نشان می‌دهد. ابزار تصویرگر صوتی همانند FMS یک چاه‌نمودار تفسیری است که می‌تواند اطلاعاتی در زمینه موقعیت و ویژگی تخلخل‌های ثانویه از قبیل شکستگی‌ها، شیب و امتداد آن‌ها فراهم کند. این ابزار بر اساس تباین صوتی دیواره چاه، تصویر فراهم می‌کند (Rezaie and Nogole-Sadat., 2004).

ابزارهای FMI نسل جدیدی از ابزارهای تصویربرداری هستند که نسبت به FMS دارای پوشش دیواره‌ای بیشتری هستند و اندازه‌گیری‌های خود را توسط استفاده از جریان‌های رایج موجود در سازند انجام می‌دهند. ابزار FMI برای مطالعات پدیده‌های موجود در سازندهای زمین‌شناسی بسیار جدید هستند و فناوری بالایی دارند. این ابزار بر اساس اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سازند و سیال درون چاه کار می‌کنند. چاه نمودار FMI با داشتن زیادی حسگر قادر است در اعماق زیاد شکستگی‌های باز را از پدیده‌های زمین‌شناسی دیگر متمایز نماید. این چاه نمودار، تصاویری دو بعدی از نمای ۳۶۰ درجه دیواره چاه ارائه می‌کند و تکنیک بهبود یافته‌ای برای توصیف ویژگی‌های زمین‌شناسی در امتداد چاه است. با استفاده از داده‌های شکستگی شناسایی شده با این چاه نمودار، می‌توان پارامترهای هندسی شکستگی‌ها را در ساخت شبکه DFN تعیین نمود.

^{۲۰} Formation Micro Scanner

^{۲۱} Acoustic televiewer

۶-۲ اطلاعات مورد استفاده در مطالعه مخازن شکافدار

به دلیل پیچیدگی رفتار مخازن شکافدار و نیز کمبود داده‌های مورد استفاده در آنالیز شبکه شکستگی‌ها لازم است در مطالعه شکستگی‌ها از همه اطلاعات موجود که می‌تواند ما را در تحلیل بهتر شکستگی‌ها یاری رساند، استفاده گردد. این اطلاعات گستره وسیعی از اطلاعات حاصل از مراحل اولیه اکتشاف و تولید مخزن مانند اطلاعات زمین‌شناسی و تکتونیک ناحیه‌ای، ژئوفیزیک، مدل‌ها و اطلاعات ژئومکانیک، حفاری، نمودارهای مختلف چاه‌پیمایی و چاه‌آزمایی تا اطلاعات حاصل در حین بهره‌برداری و تولید از مخزن مانند تاریخچه تولید چاه‌ها و مخزن را شامل می‌شود (محبی و همکاران، ۱۳۹۰). استفاده مناسب و به جا از هر یک از داده‌های فوق می‌تواند ما را در شناخت بهتر رفتار شکستگی‌ها، مکانیزم‌های ایجاد و گسترش آن‌ها و نیز نقش آن‌ها در تولید و نهایتاً ساخت یک مدل مفهومی از شکستگی‌ها یاری رساند. مدل‌سازی شبکه گسسته شکستگی یک معرفی تصادفی از شبکه‌های شکستگی طبیعی هستند که به طور گسترده و رو به رشد برای توصیف مخازن شکافدار طبیعی استفاده می‌شوند. در این مطالعه از نرم‌افزار پترل استفاده شده است. در این نرم‌افزار امکان انجام آنالیز بر روی داده‌های استاتیک مانند خواص ماتریکس، نمودارهای پتروفیزیکی، مغزه و نشانگرهای لرزه‌ای و همچنین آنالیز داده‌های دینامیک مانند تاریخچه تولید، آزمایش‌های شاخص بهره‌دهی، چاه‌آزمایی، نمودارهای تولید چاه و اطلاعات هرزروی گل فراهم شده است. با انجام آنالیزهای مربوطه و استفاده از انواع مختلف داده‌های قابل استفاده در این نرم‌افزار می‌توان به درک بهتری از چگونگی توزیع شکستگی‌ها در مخزن رسید و برآورد بهتری از نقش آن‌ها در تولید از مخزن به دست آورد. در این نرم‌افزار امکان انجام تحلیل‌های آماری و زمین‌آماري بر روی اطلاعات چاه و استفاده از داده‌های مختلف فراهم آمده است. در نتیجه می‌توان تأثیر عوامل مختلف را بررسی نموده و در ساخت مدل شکستگی مورد بهره‌برداری قرار داد.

فصل سوم

مطالعات ساختمانی میدان مورد مطالعه

و

بررسی داده‌ها و نشانگرهای لرزه‌ای

۳-۱ روش‌شناسی بررسی و مطالعه شکستگی‌های مخزن مورد مطالعه

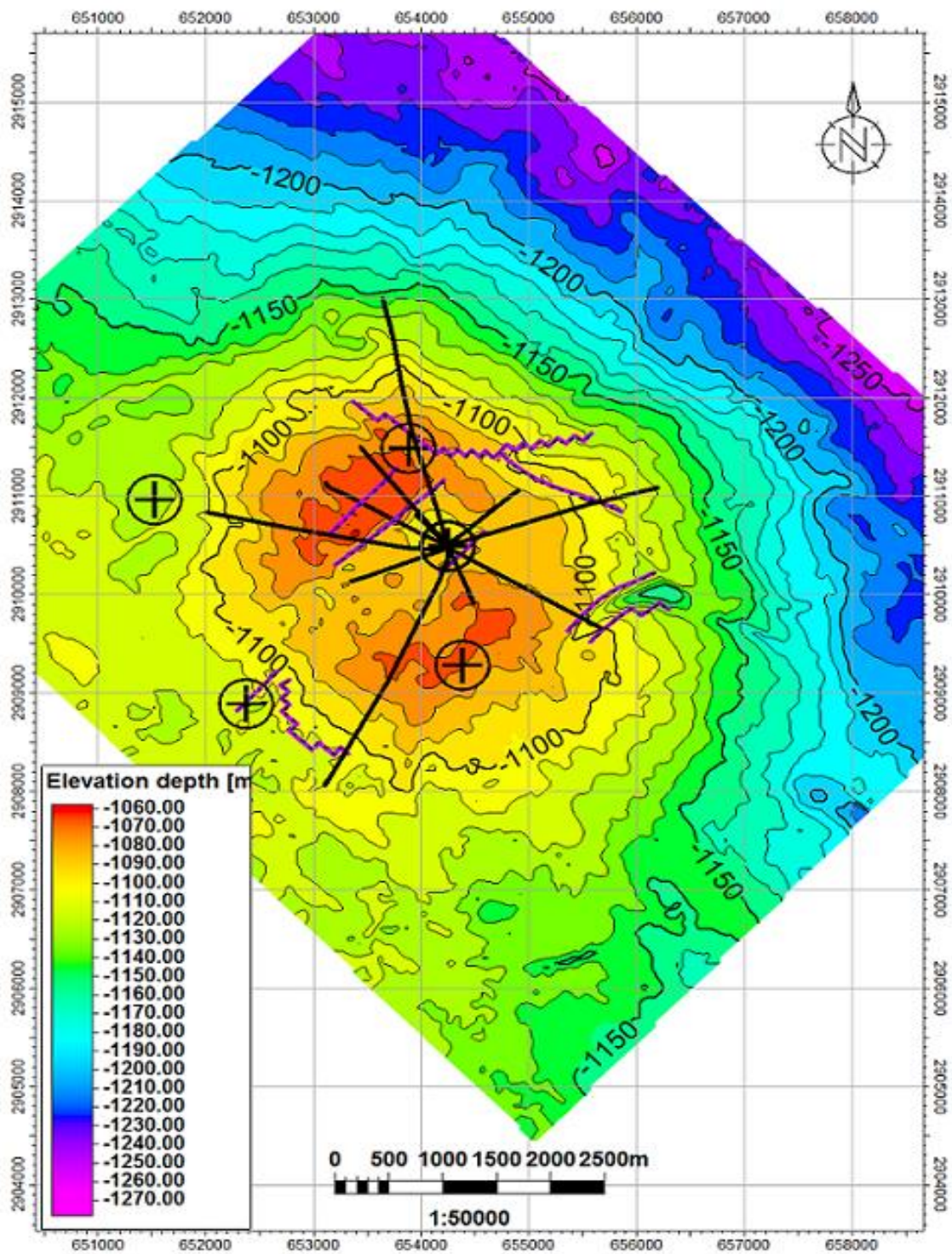
در این مطالعه برای انجام مدل‌سازی، ابتدا گسل‌های موجود در مخزن شناسایی و مدل‌سازی گسل‌ها صورت خواهد گرفت. در ادامه با توجه به داده‌های سر سازندها و همچنین داده‌های سه بعدی لرزه‌ای به تفسیر افق‌ها و ساخت زون دارای شکستگی پرداخته خواهد شد. در ادامه مخزن به یک شبکه سلول‌بندی شده تقسیم می‌شود. در گام بعدی به آنالیز اطلاعات شکستگی حاصل از چاه‌نمودار تصویری می‌پردازیم. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته بر شکستگی‌های مخزن، این شکستگی‌ها از نوع شکستگی‌های باز می‌باشند. در ادامه با توجه به اطلاعات شکستگی و بررسی آن‌ها به دسته‌بندی این اطلاعات بر اساس شیب و آزمون‌شان می‌پردازیم. در نتیجه شکستگی‌ها در قالب دسته شکستگی -ها کلاس‌بندی می‌شوند. در ادامه با توجه به داده‌های شکستگی، نمودار شدت شکستگی در چاه مورد مطالعه محاسبه خواهد شد. با استفاده از داده‌های لرزه‌ای، نشانگرهای مرتبط با شکستگی استخراج می‌شود. با استفاده از روش‌های زمین‌آماري و نشانگرهای لرزه‌ای به‌دست آمده، مدل شدت شکستگی در مخزن به‌دست می‌آید و در نهایت مدل گسسته شکستگی در مقیاس‌های مختلف ساخته خواهد شد. در این مطالعه به منظور اعتبارسنجی مدل به‌دست آمده از روش شبکه عصبی استفاده می‌شود. با بررسی عوامل کنترل‌کننده شکستگی که به عنوان محرک‌های شکستگی شناخته می‌شوند به بررسی رابطه موجود بین این محرک‌های شکستگی و شدت شکستگی پرداخته خواهد شد. با توجه به رابطه به‌دست آمده با استفاده از شبکه عصبی، مدل شدت شکستگی در مخزن با این روش به‌دست می‌آید و در نهایت مدل گسسته شکستگی از این طریق ساخته می‌شود. در آخر مدل‌های شدت شکستگی با هم مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.

۲-۳ ساز و کار شکل‌گیری شکستگی‌های طبیعی در میدان مورد مطالعه

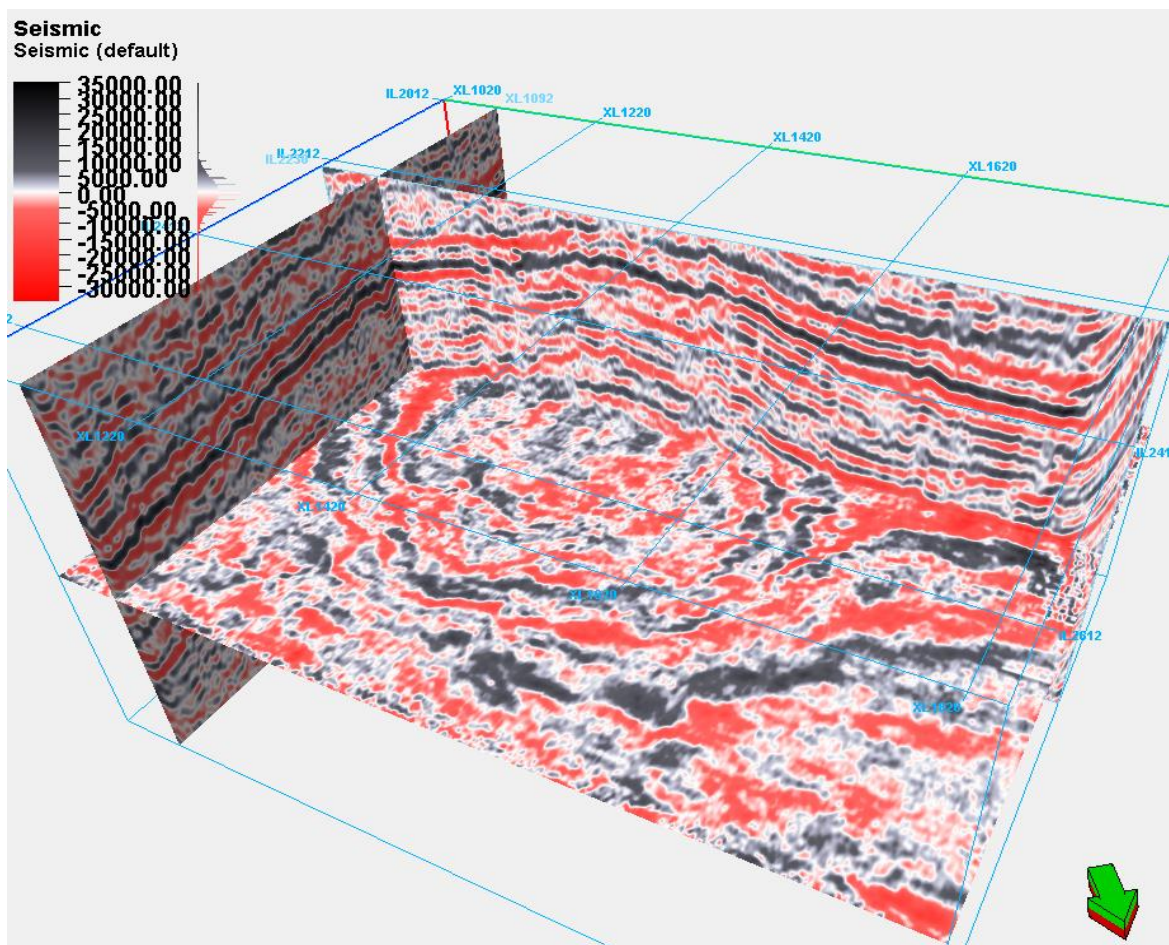
یکی از روندهای موجود در طبیعت، حضور سیستم‌های شکستگی در آن دسته از طبقات رسوبی است که تغییر شکل تکتونیکی مشخصی را نشان می‌دهند. صرف نظر از عملکرد عوامل دیاژنزی در پیدایش پاره‌ای از شکستگی‌های طبیعی با جهت‌یابی‌های پراکنده و تصادفی، حضور سطوح گسلی و چین-خوردگی، تفسیر شکستگی‌های طبیعی را در طبقات رسوبی آسان می‌نماید. این میدان نیز نمونه‌ای از این موارد است که تغییرات زیاد در شیب لایه‌بندی و انحنای ساختمانی از یک طرف و وجود سطوح گسلی و گنبد‌های نمکی از طرف دیگر، تحلیل و بررسی شکستگی‌های مشاهده شده را آسان کرده است. بنابراین با توجه به آنچه ذکر شد، می‌توان از عوامل تکتونیکی محلی به عنوان فاکتورهای شکل-دهنده شکستگی در این میدان پرداخت.

۳-۳ موقعیت چاه‌های مورد مطالعه در میدان

میدان مورد مطالعه، میدان نفتی در حوزه‌ی خلیج فارس می‌باشد. برای مدل‌سازی مخزن مورد مطالعه، از اطلاعات پانزده چاه حفر شده در میدان استفاده شده است. یکی از چاه‌ها دارای اطلاعات شکستگی حاصل از چاه‌نمودار تصویری FMI می‌باشد. همچنین این میدان دارای داده‌های لرزه‌ای سه بعدی با کیفیت بالا بوده که در مدل‌سازی مخزن مورد مطالعه و همچنین مطالعه ساختمانی از آن بهره برده‌ایم. شکل (۱-۳)، موقعیت چاه‌های مذکور را بر روی نقشه کانتوری زیر سطحی مخزن مورد مطالعه همراه با گسل‌های تفسیر شده نشان می‌دهد. همانطور که شکل نشان می‌دهد گسل‌ها در بخش مرکزی و انحنای مخزن قرار گرفته‌اند. شکل (۲-۳) نیز مکعب سه بعدی داده‌های لرزه‌ای میدان را نشان می‌دهد.



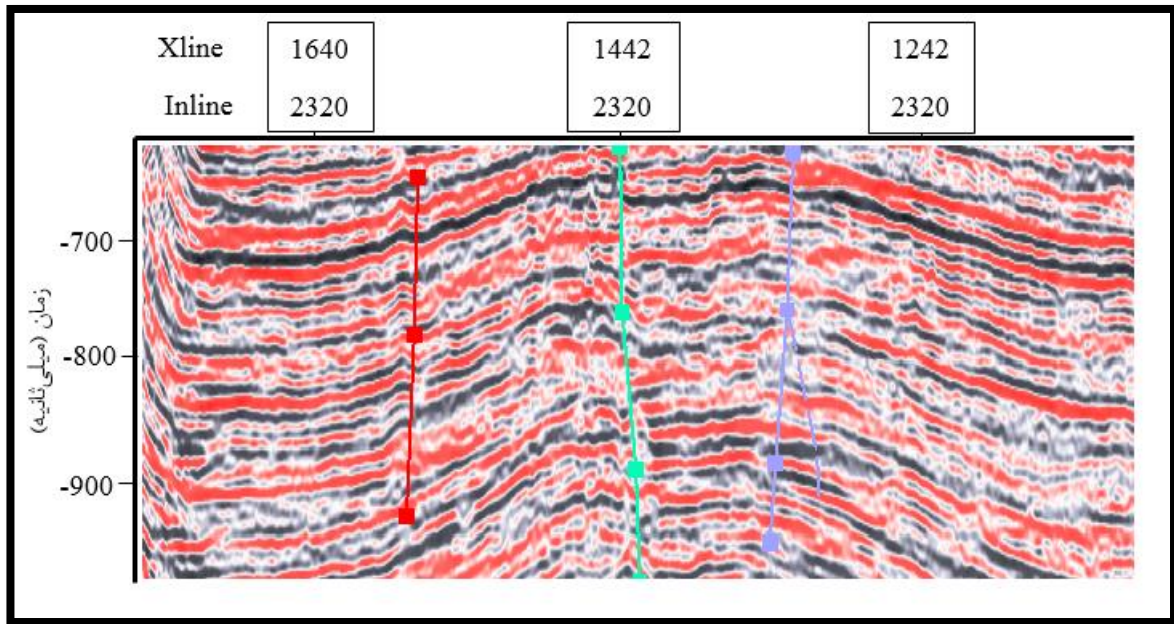
شکل (۳-۱) نقشه کانتوری زیرسطحی مخزن مورد مطالعه



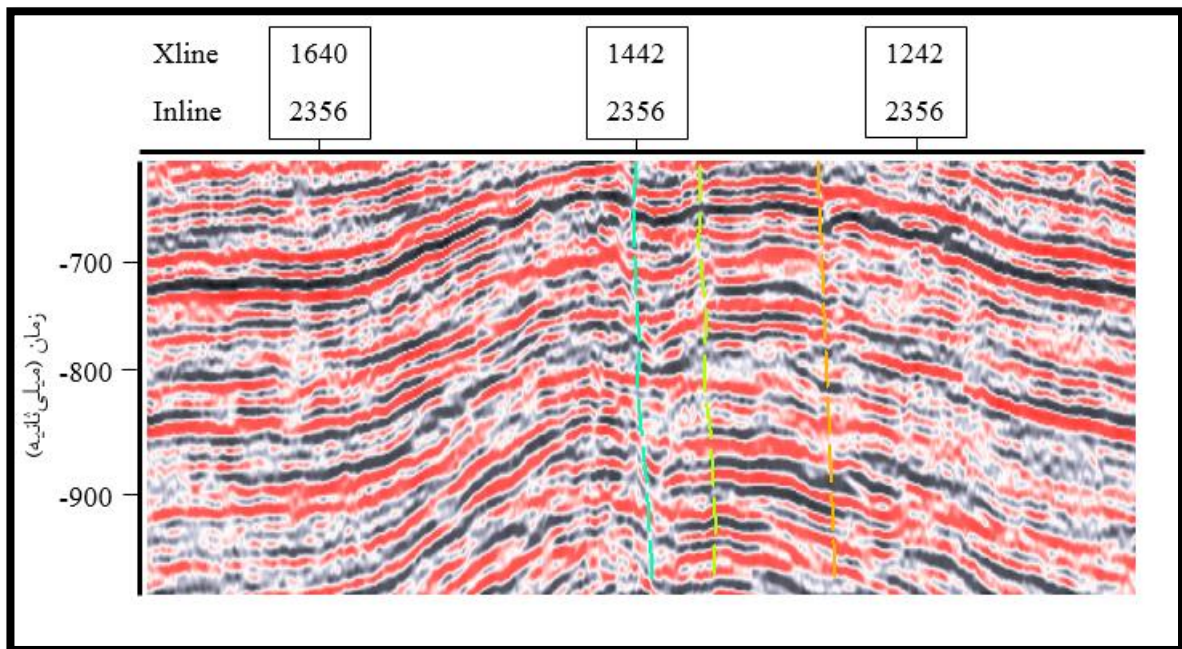
شکل (۲-۳) مکعب سه بعدی داده‌های لرزه‌ای

۴-۳ بررسی ساختمان و تفسیر گسل‌های میدان

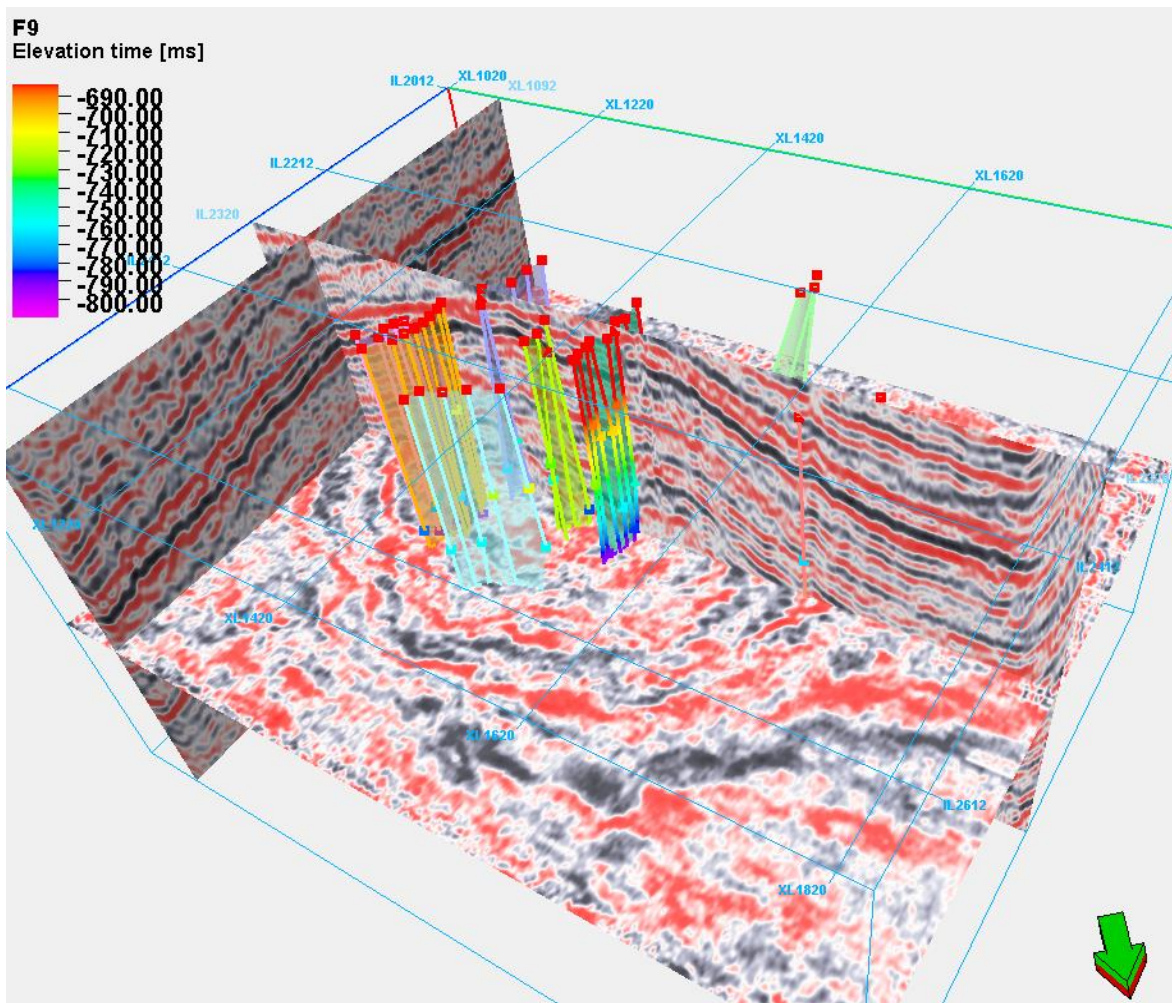
با توجه به مطالعاتی که بر روی مقاطع لرزه‌ای این میدان انجام شد، گسل‌های این میدان مورد تفسیر قرار گرفت. گسل‌های تفسیر شده در بخش مرکزی میدان تمرکز دارند، به طوری که در بخش مرکزی میدان بالآمدگی مشاهده شده است و گسل‌های میدان در اثر این بالآمدگی شکل گرفته‌اند. با بررسی‌ها و تفسیرهای صورت گرفته بر مقاطع لرزه‌ای، نه عدد گسل مورد تفسیر قرار گرفت. شکل (۳-۳-الف) مقطعی دو بعدی از تفسیر گسل‌ها را در بخش انحنای مخزن در $\text{Inline} = 2320$ و شکل (۳-۳-ب) مقطع دو بعدی دیگری را در $\text{inline} = 2356$ نشان می‌دهد. همچنین شکل (۳-۳-ج) تصویر سه بعدی از تفسیر گسل‌ها را در مکعب داده‌های لرزه‌ای نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳-الف) مقطع دو بعدی در $\text{Inline}=2320$



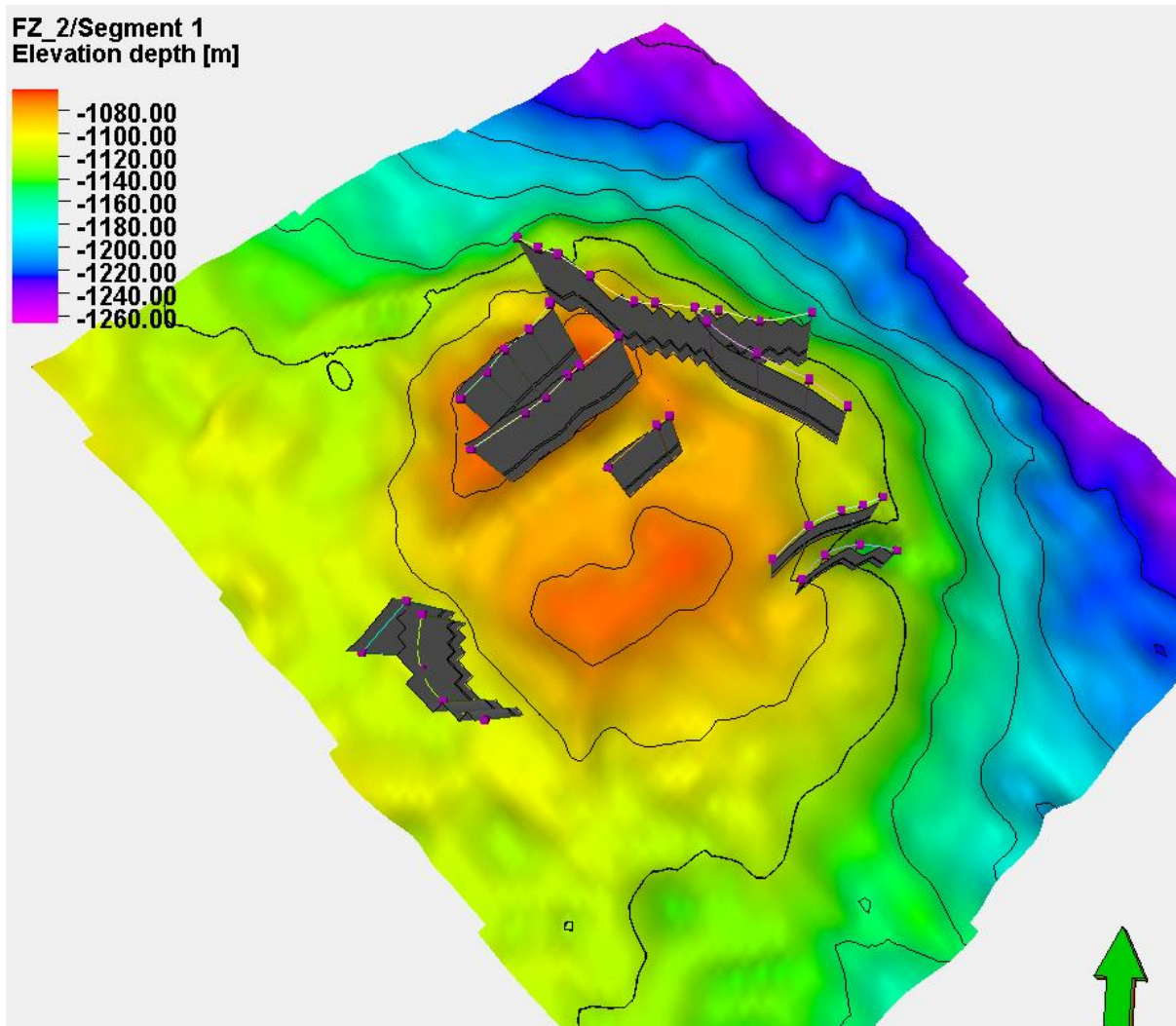
ادامه شکل (۳-۳-ب) مقطع دو بعدی در $\text{Inline}=2356$



ادامه شکل (۳-۳-ج) نمایی از گسل‌های تفسیر شده در مکعب داده‌های لرزه‌ای

۳-۵ مدل‌سازی گسل‌ها و ساخت افق مخزنی

در ادامه پس از تفسیر گسل‌های میدان، به تفسیر افق‌های مورد مطالعه با استفاده از اطلاعات سر سازندها و همچنین داده‌های لرزه‌ای پرداخته شد و زون دارای شکستگی مشخص گردید. در ادامه، بعد از تفسیر گسل‌ها و ساخت زون دارای شکستگی به مدل‌سازی آن‌ها پرداخته شد. شکل (۳-۴)، تصویر سه بعدی از گسل‌های مدل شده را که در ساختمان مخزن قرار گرفت نشان می‌دهد.



شکل (۳-۴) تصویر سه بعدی از مخزن و گسل‌های مدل‌سازی شده

۳-۶ انواع شکستگی از بررسی نمودارهای تصویری

اطلاعاتی که از تفسیر نمودارهای FMI حاصل می‌شوند شامل تفسیر ساختمان‌هایی از جمله لایه-بندی، شکستگی‌های باز و بسته، باندهای مقاوم، باندهای ریزشی و استیلولیت هستند.

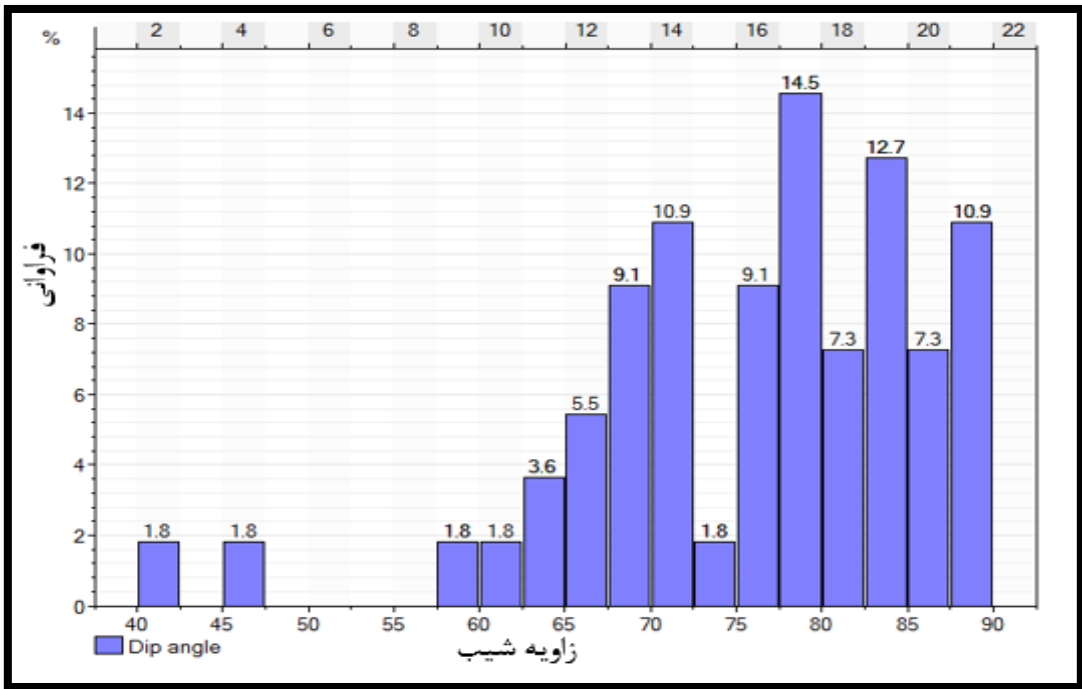
۳-۶-۱ شکستگی‌های باز

این نوع شکستگی در نمودارهای تصویری به صورت منحنی با مقاومت کم (تیره رنگ) مشخص می‌شود. شکستگی‌های باز حاوی گل حفاری نفوذ یافته، آب سازندی و یا رس هستند. هر چند به طور

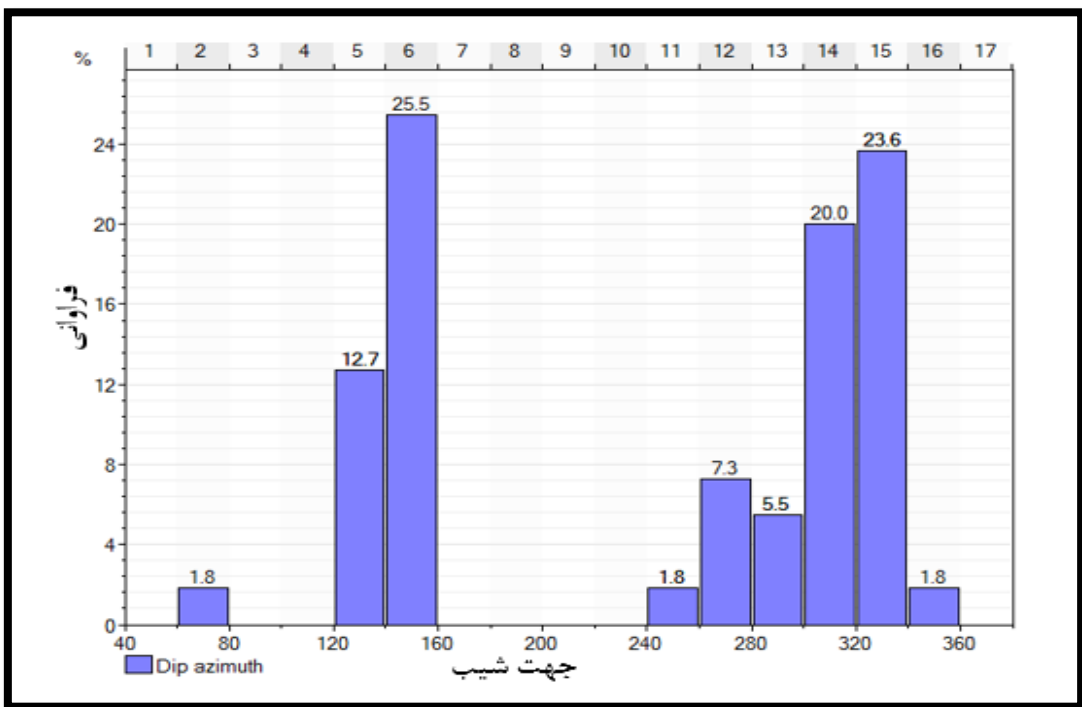
دقیق مشخص نمی‌شود که شکستگی با رس پر شده یا برای عبور سیال باز است، ولی فرض بر این است که تمامی این نوع شکستگی‌ها باز هستند (شرایط ایده‌آل). در صورتی که بخشی از شکستگی با سیمان پر شده باشد، به آن شکستگی نیمه‌مسدود می‌گویند. این شکستگی‌ها ممکن است در اثر عملیات حفاری باز شوند (شفیع‌زاده و تخم‌چی، ۱۳۹۰). با توجه به این‌که تنها یکی از چاه‌های میدان دارای اطلاعات شکستگی مربوط به چاه‌نمودار نمودار تصویری می‌باشد، با مطالعاتی که روی شکستگی‌های این چاه صورت گرفته است، شکستگی‌های آن از نوع باز می‌باشد. جدول (۳-۱)، اطلاعات شکستگی‌های مربوط به چاه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۳-۵-الف)، نمودار ستونی مربوط به شیب شکستگی‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، شکستگی‌های مربوط به این چاه دارای شیب نزدیک به قائم می‌باشد. شکل (۳-۵-ب)، نمودار ستونی مربوط به جهت شیب شکستگی‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۳-۱) اطلاعات شکستگی‌های مربوط به چاه مورد مطالعه

تعداد شکستگی	طول عمق نمودارگیری واحد	شدت شکستگی واحد
۵۵	۳۳	۰/۶۲



(الف)



(ب)

شکل (۳-۵) الف) نمودار ستونی مربوط به شیب شکستگی‌ها (ب) نمودار ستونی مربوط به جهت شکستگی‌ها

۳-۶-۲ شکستگی‌های مسدود (بسته)

شکستگی‌های مقاوم در نمودارهای تصویری به شکل موج سینوسی و به رنگ سفید یا روشن ظاهر می‌شوند. این شکستگی‌ها در ابتدا باز بوده‌اند اما توسط سیمان‌های مقاوم مانند کوارتز و کلسیم کربنات پر شده‌اند و از موانع تراوایی سازند به شمار می‌آیند. به دلیل قطع شدن جریان پیوسته دستگاه FMI، در اطراف این شکستگی‌ها هاله‌ای دیده می‌شود.

۳-۶-۳ شکستگی‌های القایی طی عملیات حفاری

در طول عملیات حفاری به دلیل تنش وارد بر دیواره چاه ممکن است شکستگی‌هایی ایجاد شود که عمدتاً عمودی هستند. بنابراین در تصویرهای FMI به شکل موج سینوسی نبوده و خطوطی عمودی را ایجاد می‌کنند (شفیع‌زاده و تخم‌چی، ۱۳۹۰)

۳-۷ نشانگرهای لرزه‌ای

نشانگرهای لرزه‌ای توابع ریاضی مشتق شده از داده‌های لرزه‌ای هستند که در حوزه‌های زمان، فرکانس و زمان-فرکانس از داده‌های لرزه‌ای استخراج می‌شوند. یکی از روش‌های مطالعه گسل‌ها و شکستگی‌های مخازن، استفاده از روش‌های لرزه‌نگاری می‌باشد. داده‌های لرزه‌نگاری تنها منبع حاوی اطلاعات زمین‌شناسی برای مناطق بین چاهی در مخزن به حساب می‌آیند لذا نتایج این تحقیق می‌تواند به کاهش عدم قطعیت در شناخت چارچوب ساختمانی مخزن و نیز برآورد بهتر مشخصات شارش مخزن کمک شایانی کند. همچنین در طراحی چاه‌ها، با داشتن اطلاعات مربوط به گسل‌ها و شکستگی‌های مخزن می‌توان مسیر بهینه حفاری را به طریقی تعیین کرد. یکی از روش‌های شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌ها در مکعب حاصل از برانبارش داده‌های لرزه‌ای، استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای است (Brown, 2001). با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای استخراج شده از داده‌های لرزه‌ای، ویژگی‌های بسیاری از ردلرزه‌ها از دید کیفی (پیش‌بینی سنگ‌شناسی) و کمی (پیش‌بینی پتروفیزیکی) تجزیه و

تحلیل می‌شوند (Meldahl et al., 2001). دامنه داده‌های لرزه‌ای عامل اصلی برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی همچون مقاومت صوتی، ضرایب بازتاب، سرعت و جذب است، درحالی که مولفه فاز داده‌های لرزه‌ای نقش مهمی در تعیین شکل و موقعیت هندسی ساختمان‌های زمین‌شناسی ایفا می‌کند (Taner et al., 1994). تغییرات فضایی خواص چینه‌شناسی سنگ و سیال، تغییر متغیرهای هندسی و فیزیکی نشانگرها را باعث می‌شوند (Taner et al., 1994; Chopra and Marfurt, 2007; Chao et al., 2009). از آنجا که نشانگرهای هندسی به تغییرات جانبی در شیب لایه‌ها، پیوستگی بازتابنده‌ها، تشابه الگوهای لرزه‌ای، انحنای سطوح و انرژی لرزه‌ای حساس هستند، بنابراین استخراج ویژگی‌های محیط زیرسطحی مانند توزیع شکستگی‌ها و گسل‌ها با استفاده از آن‌ها امکان‌پذیر می‌باشد. با این حال، ویژگی تفکیک‌پذیری پایین داده‌های لرزه‌ای در برخی موارد، استخراج اطلاعات بیان شده از آن‌ها را با دشواری روبرو می‌کند. با این حال، با توجه به افزایش قدرت تفکیک و کیفیت داده‌های لرزه‌ای سه بعدی، استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای به منظور بررسی ساختمانی مخزن و تشخیص نواحی شکستگی و گسل‌ها توسعه پیدا کرده است (Anees, 2013; Lefranc et al., 2012). نشانگرهای لرزه‌ای انتخاب شده، با توجه به پیش‌بینی نحوه توزیع شکستگی‌ها در مخزن، می‌توانند برای افق‌های لرزه‌ای تفسیر شده یا حجم‌های داده‌های لرزه‌ای به کار گرفته شوند (Hart et al., 2002; Robert, 2001). کاربرد صحیح نشانگرها به شدت به تفسیر صحیح افق‌های لرزه‌ای بستگی دارد (Marfurt and Chopra, 2006). با توجه به مطالعات صورت گرفته، نشانگرهای مناسب در توصیف ساختمانی و گسل‌ها شامل نشانگر آشفتگی^{۲۲}، برجستگی^{۲۳}، انحنای^{۲۴}، واریانس^{۲۵} و همچنین الگوریتم ردیابی مورچه^{۲۶} می‌باشد (Ouenes A., 2000; Zellou A. M. and Ouenes A., 2001).

^{۲۲} Chaos

^{۲۳} Edge-Enhancement

^{۲۴} Curvature

^{۲۵} Variance

^{۲۶} Ant-tracking algorithm

فصل چهارم

مدل سازی شبکه گسترده شکستگی ها

ساخت مدل مناسب از چگونگی توزیع شکستگی‌ها در مخزن، یکی از مهم‌ترین مراحل مدل‌سازی شکستگی‌ها است. هدف از این بخش تهیه یک نقشه سه بعدی از چگونگی توزیع شکستگی‌ها و بررسی شدت شکستگی در فضای مخزن و استفاده از این مدل برای مدل‌سازی گسسته شکستگی است.

۴-۲ مدل شبکه گسسته شکستگی

مدل‌سازی شبکه گسسته شکستگی به روش DFN، نمایشی تصادفی از شبکه شکستگی‌های طبیعی است. تولید شبکه شکستگی توسط اطلاعات آماری حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده میدان، صورت می‌گیرد. در مدل DFN، مجموعه‌ای از شکستگی‌های منحصر به فرد بر اساس توصیفات تصادفی از خواص شکستگی‌ها مثل شدت شکستگی، جهت‌گیری و اندازه آن‌ها ساخته می‌شوند.

رویکرد DFN برای مطالعه جریان در محیط‌های گسسته، به دلیل حفظ هندسه شکستگی به واقعیت بسیار نزدیک است. به‌طور کلی این مدل یک اسکلت سه بعدی از سدهای جریانی مانند گسل‌ها و لایه‌های آرژیلیتی و همین‌طور خصوصیات گسسته‌ای که متمرکزکننده جریان سیال هستند را می‌سازد (Botros et al., 2008). مدل DFN، شبیه‌سازی عددی جریان سیال را نیز انجام می‌دهد. برای مثال چون هندسه شکستگی از جمله محل، جهت‌یابی و اندازه آن‌ها در دسترس است، به صورت تحلیلی با استفاده از روش‌های اجزاء مرزی یا اجزاء محدود تانسور، تراوایی مشابه برای DFN را تخمین می‌زند. به علاوه، در مخازن شکسته طبیعی در موقعیت‌هایی که شکستگی‌ها اتصال خوبی ندارند و یا دارای تراوایی پایینی هستند، بعضی از روش‌های بالا بردن تراوایی مانند تحریک هیدرولیکی شکستگی کارایی دارد.

۳-۴ اهمیت مدل‌های شبکه گسسته شکستگی

یکی از اهداف مهم در مطالعات مخازن، شناسایی مناطق با تراکم شکستگی مختلف است که از این طریق می‌توان به ارزیابی محل چاه‌های جدید برای بهینه‌سازی حفاری پرداخت. بنابراین مدل‌های نشان‌دهنده پراکندگی شدت شکستگی‌ها ضروری هستند. همچنین آگاهی از جزئیات خواص دیگر شکستگی‌ها نیز مورد نیاز است، زیرا شکستگی‌ها با خصوصیات مختلف از جمله اندازه، جهت‌یابی و چگونگی اتصال، تأثیر متفاوتی در جریان سیال مخزن دارند. جهت‌یابی شکستگی‌ها، ناهمگنی مخزن و تراوایی مستقیم را کنترل می‌کند. برای مثال شکستگی‌های موازی، شبکه متقاطع برای جریان سیال را ایجاد نمی‌کنند. بنابراین در این‌گونه موارد چاه‌های حفاری باید به‌صورت متقاطع با شکستگی‌ها حفر شوند تا تولید موثر افزایش یابد.

برای ساخت مدل‌های عددی نحوه حرکت سیال از درون شکستگی‌ها، ابتدا به ساخت مدل شبکه گسسته شکستگی‌ها نیاز است. مدل‌های شبکه گسسته شکستگی با کاربرد شبیه‌سازی مونت کارلو و طبق توابع توزیع آماری طول، جهت و موقعیت فضایی سیستم‌های شکستگی ساخته می‌شوند. هر کدام از پارامترهای شکستگی‌ها مانند فاصله‌داری، مکان فضایی، جهت‌داری و اندازه می‌تواند با توابع توزیع آماری مانند توزیع‌های نرمال، لاگ نرمال، یکنواخت، گاوسی و یا توابع توزیع دیگر بیان شوند. در محیط‌های همگن فرض می‌شود که شکستگی‌ها به طور کاملاً تصادفی پخش شده‌اند. موقعیت مکانی شکستگی‌ها با فرایند آماری پواسون که کاربرد گسترده‌ای در مدل‌سازی شبکه گسسته شکستگی‌ها دارد، تعیین می‌شوند. فرآیند پواسون به طور خاص بیانگر تابع توزیع آماری محل قرارگیری شکستگی‌ها است و دانسیته متوسط شکستگی‌ها به عنوان کنترل‌کننده این فرآیند تصادفی است. با وجود این‌که تراکم شکستگی‌ها می‌تواند متغیر باشد، استفاده از نقاط ناهمگن در فرآیند پواسون بر صحت بیش‌تر شبیه‌سازی موقعیت شکستگی‌ها می‌افزاید (ملایوسفی و همکاران ۲۰۱۱).

رایج‌ترین توزیع‌های طول شکستگی روش‌های نرمال، لاگ نرمال، قانون توانی و توزیع نمایی می‌باشند که برای هر یک از آن‌ها مباحث بسیار قوی تجربی و تئوری به‌عنوان معرف مناسب اندازه شکستگی‌ها وجود دارد. با توجه به این‌که داده‌های مربوط به اندازه شکستگی در دسترس نیست، از روش قانون توانی استفاده خواهد شد. طول شکستگی‌ها با محل قرارگیری شکستگی‌ها در ارتباط است و در مناطقی که امکان انتشار ترک و شکاف نیست (مانند لایه‌های نمکی) طول شکستگی‌ها شدیداً کاهش می‌یابد. همچنین طول اولیه شکستگی‌ها می‌تواند در برخورد با شکستگی‌های جدید دچار تغییر شود (ملایوسفی و همکاران ۲۰۱۱). طبق مطالعات صورت گرفته توزیع بازشدگی از توزیع لاگ نرمال پیروی می‌کند. با توجه به این‌که طول شکستگی‌ها و میزان دهانه بازشدگی آن‌ها از پارامترهای اساسی و تأثیرگذار در مدل‌سازی شبکه گسسته شکستگی‌ها هستند، می‌توان همبستگی این دو پارامتر را در مدل‌سازی لحاظ کرد. به‌طوریکه بر اساس تحقیقات انجام شده روی وابستگی طول شکستگی و میزان بازشدگی دهانه آن‌ها، مدل‌سازی شبکه گسسته شکستگی‌ها این انعطاف‌پذیری را دارد که به شکستگی‌های با طول بیشتر، دهانه بازشدگی بیشتر و به شکستگی‌های با طول کم‌تر، دهانه بازشدگی کم‌تری را نسبت دهد.

۴-۴ ساخت مدل شبکه گسسته شکستگی

برای ساخت مدل شبکه گسسته شکستگی‌ها، در ابتدا باید مدل استاتیک مخزن ساخته شود. در استراتژی پیشنهادی، ابتدا مدل ساختمانی مخزن بر اساس داده لرزه‌نگاری سه بعدی، تهیه شده و سپس به آنالیز و بررسی اطلاعات نمودار تصویری پرداخته می‌شود. با درشت‌نمایی اطلاعات شکستگی حاصل از چاه‌نمودار تصویری و استفاده از روش‌های متعارف زمین‌آماري مانند کریجینگ و شبیه‌سازی گاوسی متوالی، مدل اولیه‌ای از توزیع شدت شکستگی در مخزن بدست می‌آید که هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارد. مهم‌ترین مسأله در مدل‌سازی، امکان تلفیق

داده‌ها از منابع مختلف و استفاده از نتایج هر یک از آن‌ها برای یک مدل‌سازی مطلوب است. با یک مدل دقیق و واقع‌گرایانه می‌توان تخمین نسبتاً کاملی از کل مخزن، حتی در میادینی که دارای تعداد چاه محدود می‌باشد، به دست آورد. در ادامه نشانگرهای لرزه‌ای مرتبط با شکستگی و گسل‌ها از داده‌های لرزه‌ای استخراج خواهد شد. این ویژگی‌های لرزه‌ای با استفاده از روش کوکریجینگ هم مختصات به عنوان ورودی ثانویه برای درون‌یابی شکستگی استفاده می‌شوند. با استفاده از این روش، شعاع تأثیر داده‌های چاه در سرتاسر مخزن به طور کامل کنترل می‌شود. مدل‌های اولیه‌ی توزیع شدت شکستگی با دو روش ذکر شده به دست خواهند آمد. همچنین نشان داده خواهد شد که مدل اولیه‌ی بدست آمده با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای، توزیع بسیار خوبی را در نواحی گسل-خوردگی و انحنای مخزن از خود نشان می‌دهند. در ادامه بهترین نقشه شدت شکستگی به عنوان ورودی برای مدل‌سازی گسسته شکستگی استفاده خواهد شد.

نکته‌ای که وجود دارد این است که پیچیدگی‌های زمین‌شناسی، ناهمگنی و اطلاعات غیر مستقیم و غیر کامل به دست آمده از ابزارهای اندازه‌گیری به ندرت می‌تواند یک درک و فهم کامل و واقع‌گرایانه از ناهمگنی زیرسطحی را ارائه دهند. بنابراین در مدل‌سازی، دستیابی به یک مدل کامل و بدون نقص، امکان‌پذیر نیست. مدل‌های سه بعدی، بهترین امکان را برای لحاظ کردن تمامی داده‌های در دسترس فراهم می‌کنند. مدل‌سازی ساختمانی یک مخزن، مدل متداولی برای افق‌های زمین‌شناسی و گسل‌ها می‌باشد که چارچوب هندسی شبکه سه بعدی را شکل می‌دهد و مرز مدل‌های رخساره‌ای و پتروفیزیکی که معرف خواص سنگ هستند را، ایجاد می‌کند. همچنین مبنای محاسبات حجم‌سنجی، طراحی چاه و شبکه شبیه‌سازی سیال مخزن را شکل می‌دهد.

۴-۴-۱ ساخت مدل زمین‌شناسی مخزن

در این مرحله از مدل‌سازی، داده‌های مربوط به پانزده چاه در دسترس میدان در فرمت مناسب بارگذاری شد. در ادامه گسل‌های مخزن مورد تفسیر و در مدل ساختمانی مخزن قرار گرفت و

همچنین زون دارای شکستگی ساخته شد. در ادامه مخزن به یک شبکه سلول بندی شده تقسیم شد که تمامی خواص هر سلول مانند خواص پتروفیزیکی و لیتولوژیکی در تمام حجم آن یکسان است. با توجه به فاصله شبکه‌ها از یکدیگر و میزان داده‌ها، می‌توان خواص مشابه موجود در سلول‌های فاقد اطلاعات را تخمین زد. بدیهی است هر چه میزان این اطلاعات بیشتر باشد، تخمین‌ها به واقعیت نزدیک‌تر خواهند بود. همچنین انتخاب تعداد سلول‌های شبکه هم باید به گونه‌ای باشد که تخمین‌ها تا حد ممکن دقیق‌تر محاسبه شوند. بدیهی است اگر تعداد سلول‌ها کم باشد، باعث هموارشدگی در نتایج می‌شود. بنابراین با افزایش تعداد سلول‌ها می‌توان از هموارشدگی نتایج مدل‌سازی جلوگیری نمود. هرچند از یک مرحله به بعد، افزایش تعداد سلول‌ها فقط زمان انجام محاسبات را افزایش می‌دهد در حالی که در نتایج تغییری حاصل نخواهد شد. با توجه به ابعاد محدوده مخزنی و آنالیز ابعادی شبکه تقسیم بندی، ابعاد عرض و طول سلول‌های شبکه برابر $1 \times 50 \times 50$ متر در نظر گرفته شد. با توجه به مطالعات زمین‌شناسی صورت گرفته در محدوده میدان مورد مطالعه، مشخص گردید که گسل‌ها به عنوان یکی از دلایل عمده و مهم ایجاد شکستگی در مخزن عمل کرده‌اند که آنالیز اطلاعات آن‌ها می‌تواند در شناخت و پیش‌بینی تأثیر گسل‌ها در ایجاد و توزیع شکستگی‌ها استفاده گردد. آنالیز گسل‌ها همچنین در پیش‌بینی محل وقوع شکستگی‌های بزرگ مقیاس و شکستگی‌های وابسته به گسل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Ferrill et al., 2011).

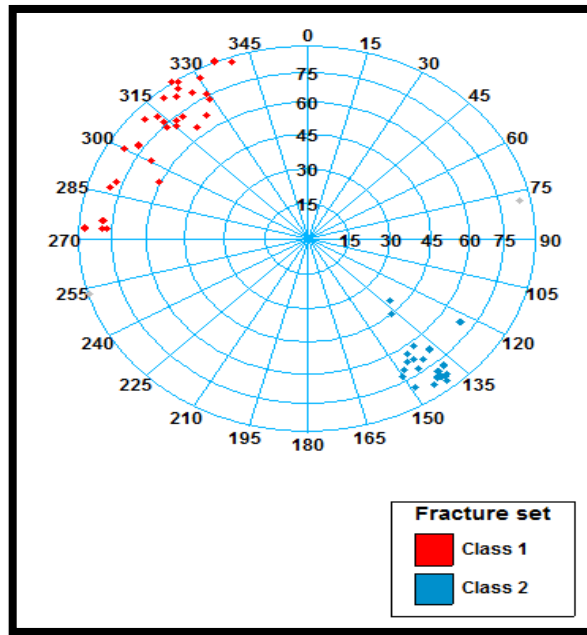
وجود عوامل مختلف ساختمانی مانند چین‌خوردگی، گسل، انحنای ساختمان و تأثیر هر یک از آن‌ها در گسترش شکستگی‌ها در این بخش تحلیل می‌شود. با توجه به آنالیز مدل ساختمانی تهیه شده در مخزن، ناحیه‌ی مورد مطالعه دارای گسل خوردگی و همچنین بالآمدگی در بخش مرکزی ساختمان مخزن می‌باشد. بنابراین پیش‌بینی می‌شود که شکستگی‌های مخزن مورد مطالعه، متأثر از انحنای مخزن و همچنین گسل خوردگی در بخش مرکزی باشد.

۲-۴-۴ بررسی اطلاعات شکستگی

پس از ساخت مدل سه بعدی زمین‌شناسی مخزن، داده‌های شکستگی در دسترس میدان مورد مطالعه قرار می‌گیرند و پس از دسته‌بندی، ساخت نمودار شدت شکستگی و نقشه چگالی، شکستگی‌ها به فضای بین چاهی و محل‌هایی که فاقد اطلاعات شکستگی هستند، تعمیم داده می‌شوند. در ادامه مراحل مدل‌سازی شکستگی‌ها شرح داده شده است.

۱-۲-۴-۴ دسته‌بندی شکستگی‌ها

پس از ساخت مدل سه بعدی زمین‌شناسی و آنالیز ساختمانی و بررسی گسل‌های مخزن، داده‌های شکستگی بدست آمده از چاه‌نمودار تصویری موجود در مخزن، مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به آنالیزهای صورت گرفته، داده‌های شکستگی مخزن همگی از نوع شکستگی‌های باز می‌باشند. اولین مرحله در ساخت مدل DFN، دسته‌بندی داده‌های شکستگی با استفاده از خصوصیات مشترکشان است. دسته شکستگی به مجموعه‌ای از شکستگی‌ها اطلاق می‌شود که دارای توزیع و خواص مشترک هستند. با توجه به این‌که داده‌های موجود در این مطالعه حاصل از تفسیر چاه‌نمودار تصویری هستند، دسته‌بندی آن‌ها بر اساس شیب و آزیموتشان خواهد بود. داده‌های شکستگی با استفاده از خصوصیات مشترکشان، شیب و آزیموت، 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. استریوپلات نشان داده شده در شکل (۴-۱)، جهت-گیری سه بعدی قطب‌های شکستگی در فضای دو بعدی را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۴) جهت گیری 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

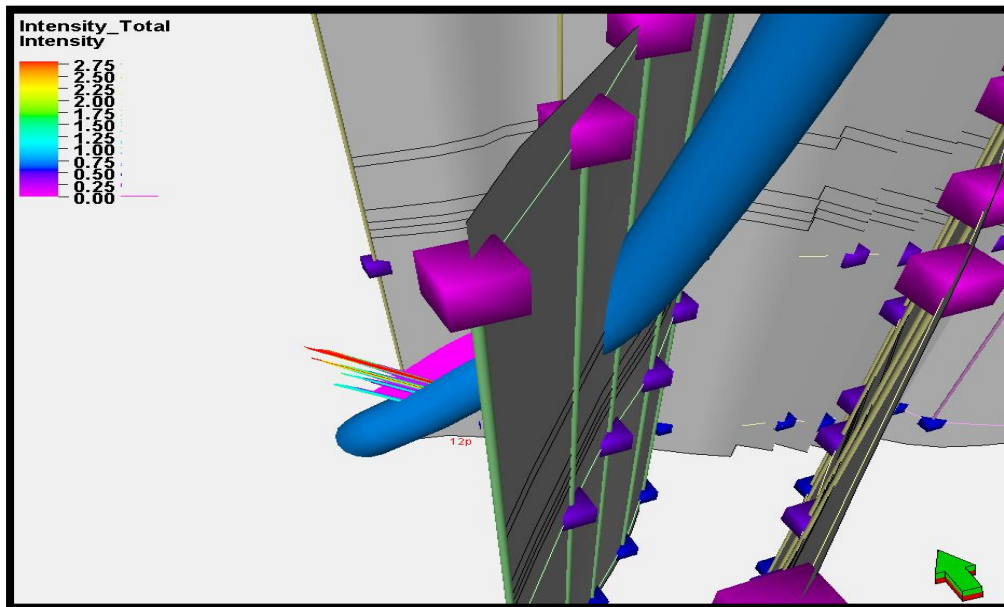
۲-۲-۴-۴ ساخت نمودار شدت شکستگی

گام بعدی در بررسی داده‌های شکستگی تبدیل داده‌های گسسته شکستگی به نمودار شدت شکستگی می‌باشد. این نمودار مشتمل بر داده‌های پیوسته‌ای است که نمایش‌دهنده تغییرات شدت شکستگی در اعماق مختلف می‌باشد. بنابراین برای تفسیر و درک صحیح‌تری از شکستگی‌ها در اعماق مورد بررسی، آن‌ها را توسط این نمودار به صورت پیوسته مطالعه می‌کنیم. فرمول (۱-۴) برای ساخت نمودار شدت شکستگی به کار می‌رود.

$$\text{Intensity(MD)} = (\text{Cum}(\text{MD} + W/2) - (\text{Cum}(\text{MD} - W/2)))/W \quad (1-4)$$

در این فرمول شدت شکستگی، W طول پنجره MD عمق مورد بررسی و Cumulative نمودار تجمعی داده‌های شکستگی است. شکل (۲-۴)، نمودار شدت شکستگی را در چاه مورد مطالعه نشان می‌دهد. انتخاب اندازه پنجره به طول چاه، شرایط محلی زمین‌شناسی و هدف

تحلیل بستگی دارد. با توجه به این که هدف مدل DFN انعکاس آمار شکستگی‌ها در فواصل بین چاهی است، بنابراین اندازه پنجره باید به گونه‌ای انتخاب شود که حضور مناطق دارای شکستگی به هنگام محاسبه چگالی شکستگی به درستی به حساب آید. طول پنجره با توجه به پراکندگی داده‌های این میدان ۵ متر در نظر گرفته شد. بنابراین نمودار شدت شکستگی توسط مساحت تجمعی شکستگی در واحد حجم (در سه بعد، P_{32}) بدست آمد (Dershowitz and Herda., 1992).



شکل (۲-۴) نمایش نمودار شدت شکستگی در چاه مورد مطالعه

۳-۲-۴-۴ بزرگ‌نمایی نمودار شدت شکستگی

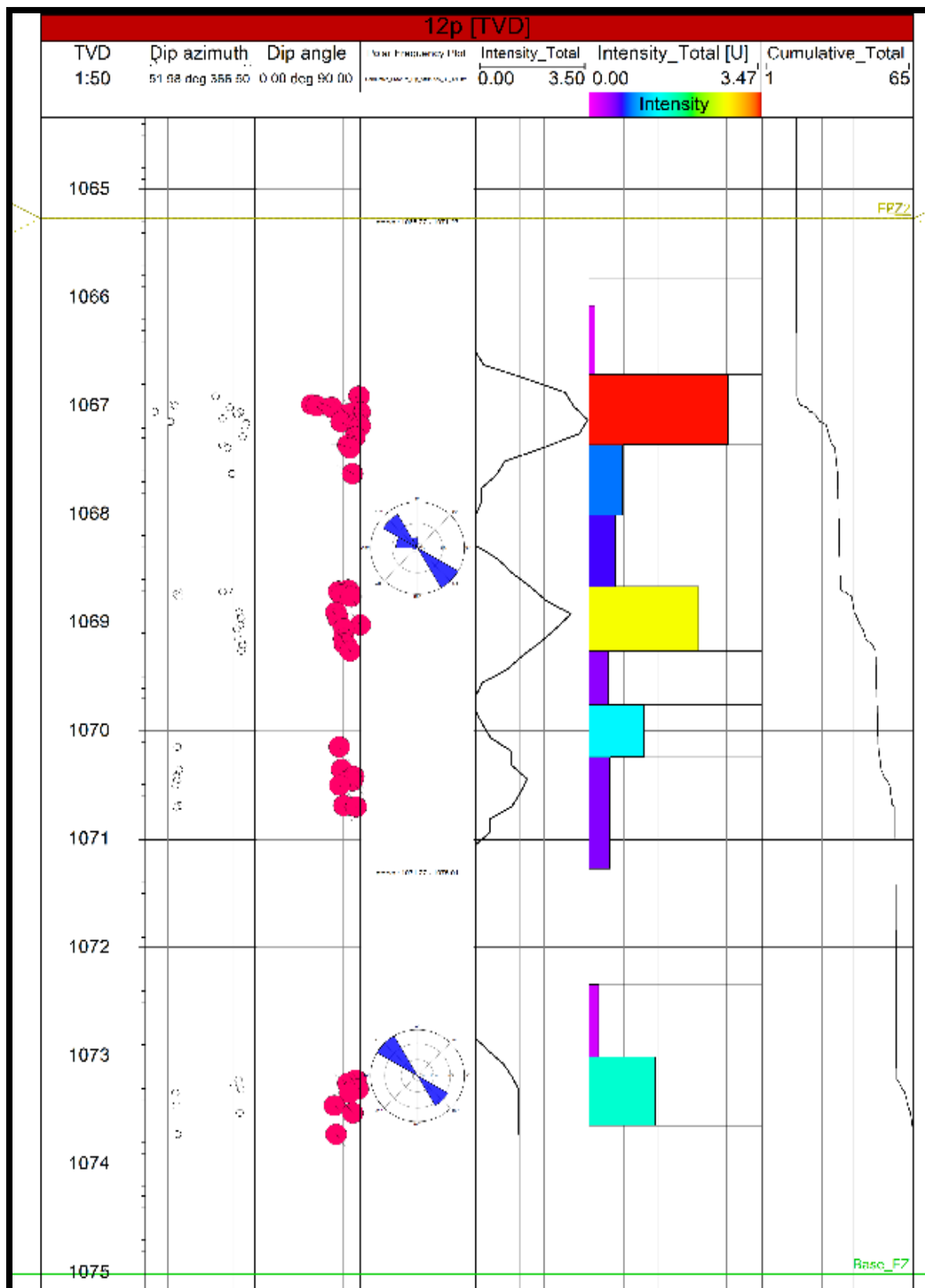
گام بعدی، بزرگ‌نمایی نمودار شدت شکستگی ساخته شده در مرحله قبل است. در واقع هدف از این کار نسبت دادن مقادیر مشخص شدت شکستگی به سلول‌هایی از شبکه است که در مسیر چاه قرار دارند. برای این کار، سه روش درون سلولی، سلول همسایه و روش ساده برای انتخاب سلول‌های شبکه مورد نظر وجود دارد.

درون سلولی: در این روش برای بزرگ‌نمایی یک سلول از شبکه، چاه باید از دو ضلع مخالف سلول به عنوان مثال بالا و پایین آن عبور کرده باشد.

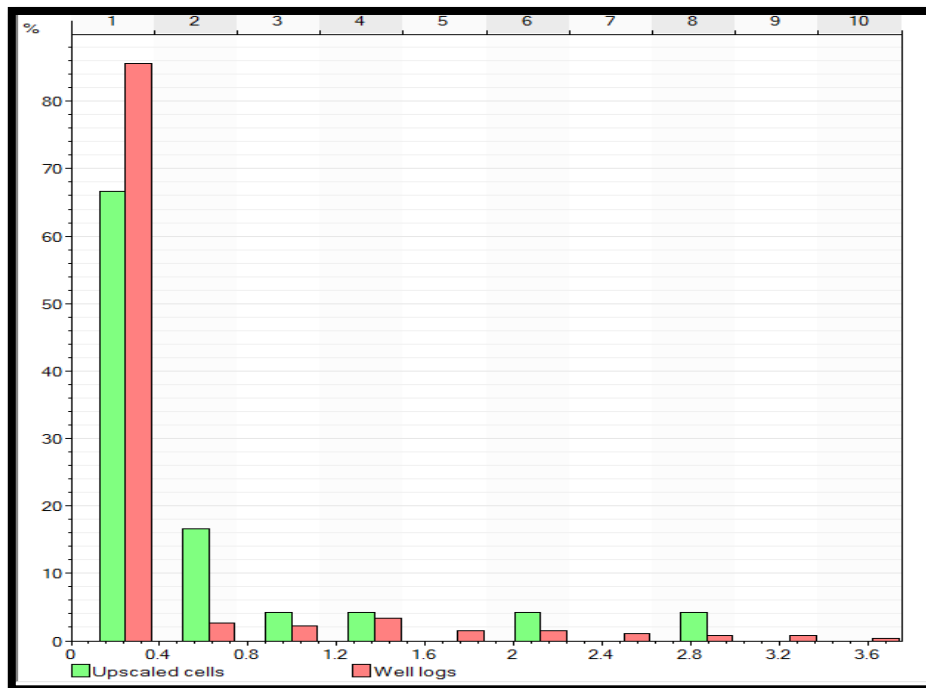
سلول همسایه: در این روش از مقادیر نمودار شدت شکستگی در تمام سلول‌های شبکه که مسیر چاه از آن‌ها عبور کرده و متعلق به یک لایه هستند، میانگین‌گیری می‌کند و مقدار میانگین را به تمام سلول‌های آن لایه نسبت می‌دهد.

روش ساده: این روش، به همه سلول‌های شبکه که مسیر چاه آن‌ها را قطع کرده است، مقادیر شدت شکستگی نسبت داده می‌شود.

در این مطالعه، از روش سلول همسایه برای بزرگ‌نمایی استفاده شده است. برتری این روش، نسبت دادن مقادیر دقیق‌تر به سلول‌های شبکه و لحاظ کردن تعداد سلول‌های بیش‌تر است. شکل (۴-۳-الف)، نمودار شدت شکستگی، نمودار تجمعی شکستگی، نمودار بزرگ‌نمایی شده شدت شکستگی، شیب و جهت شیب داده‌های شکستگی را در چاه مورد مطالعه نشان می‌دهد. همچنین شکل (۴-۳-ب) نمودار ستونی شدت شکستگی را قبل و بعد از بزرگ‌نمایی نشان می‌دهد.



شکل (۴-۳-الف) ساخت نمودار شدت شکستگی و بزرگ‌نمایی این نمودار با روش سلول همسایه



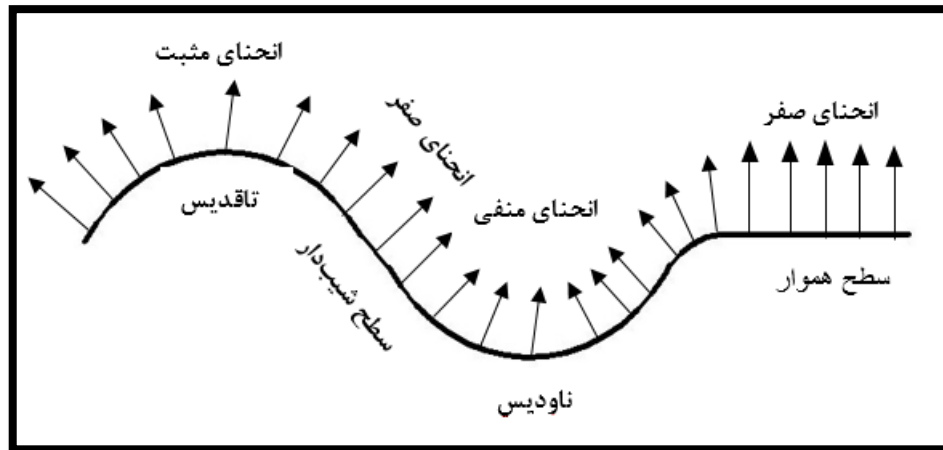
ادامه شکل (۳-۴-ب) مقایسه نمودارهای ستونی شدت شکستگی قبل (قرمز) و بعد از بزرگ‌نمایی (سبز)

۳-۴-۴ استخراج نشانگرهای لرزه‌ای

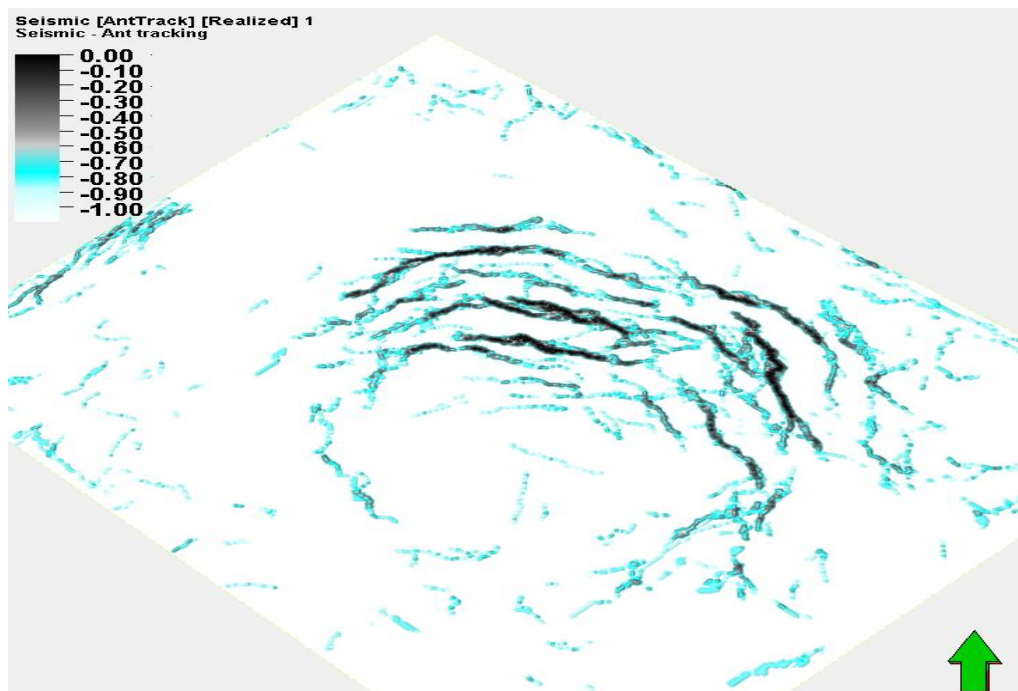
با توجه به مطالعات صورت گرفته، نشانگرهای مناسب در توصیف ساختمانی و گسل‌ها شامل نشانگر آشفستگی، برجستگی، انحنا، واریانس و الگوریتم ردیابی مورچه می‌باشد (Ouenes A., 2000; Zellou). (A. M. and Ouenes A., 2001). استفاده از الگوریتم ردیابی مورچه، از شناخته شده‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها در شناسایی ناپیوستگی‌ها و گسل‌ها در داده‌های لرزه‌ای است (Randen et al., 2001; Pedersen et al., 2002). با اعمال این الگوریتم مقدار تمرکز شدت شکستگی‌ها و گسل‌ها در ناحیه‌ی انحنا، مخزن به‌دست آمد (شکل ۴-۵-الف). همانگونه که در شکل (۴-۵-الف) دیده می‌شود، محدوده تجمع شکستگی‌ها و توزیع آنها در محدوده مخزن، تابع توزیع گسل‌ها و منطبق بر جهت شکستگی‌هایی است که در آنالیز چاه نمودارها به‌دست آمده بود. شکل (۴-۵-ب)، نشانگر آشفستگی در داده‌های لرزه‌ای مخزن را نشان می‌دهد. آشفستگی در داده‌های لرزه‌ای می‌تواند به دلیل وجود مسیر-

های مهاجرت گاز، رسوخ توده نمکی، گسل‌ها، شکستگی‌ها و ناپیوستگی‌ها باشد. با اعمال نشانگر آشفستگی در برش زمانی ۷۲۰ میلی‌ثانیه از داده‌ی لرزه‌ای (که منطبق بر محدوده مخزنی می‌باشد) حداکثر آشفستگی در قسمت انحنای مخزن به‌دست آمد (شکل ۴-۵-ج). نشانگر واریانس در تفسیر تغییر شکل ساختمان، گسل‌ها، محیط رسوبی و چینه‌نگاری استفاده می‌شود. این نشانگر، شباهت بین شکل موج‌ها را اندازه‌گیری می‌کند به طوری که اگر مقدار شباهت یک باشد، واریانس صفر خواهد شد. شکل (۴-۵-ج)، نشانگر واریانس استخراج شده از داده‌های لرزه‌ای در مخزن را نشان می‌دهد. همانگونه که دیده می‌شود، توزیع شکستگی‌ها به مانند نقشه‌های توزیع شکستگی بدست آمده از الگوریتم ردیابی مورچه و آشفستگی، از هندسه مشخص بیان شده، پیروی می‌کنند. با استفاده از نشانگر برجستگی، به عنوان یکی از نشانگرهای تشخیص لبه و الگو در داده‌های لرزه‌ای، می‌توان برجستگی نقاط ناهموار که در اثر شکستگی‌ها در داده ایجاد شده باشند را، شناسایی کرد. شکل (۴-۵-د)، نشانگر برجستگی تهیه شده در داده‌های لرزه‌ای مخزن را نشان می‌دهد. به مانند سایر نشانگرهای بدست آمده، شکستگی‌ها در محدوده‌های مختلف مخزن منطبق بر ساختار تکتونیکی و گسل خوردگی مخزن است. انحنای یک خاصیت دو بعدی از یک منحنی است که میزان خمیدگی منحنی را در یک نقطه نشان می‌دهد. محاسبه میزان تراکم شکستگی‌ها بر اساس تغییرات میزان انحنای تاقدیس یکی از بهترین روش‌ها در مطالعه و محاسبه‌ی میزان تراکم شکستگی‌ها در قسمت‌های مختلف تاقدیس و تغییرات شیب سطح لایه‌بندی می‌باشد (Ouenes, 2010). روش بهتر در توصیف انحنای تصور یک مقطع دو بعدی عرضی برای یک سطح می‌باشد (شکل ۴-۴). بردارهای عمود بر سطح در طول افق و به فواصل منظم رسم می‌شوند. در مکان‌هایی که افق صاف و دارای شیب مسطح می‌باشد، بردارهای مشابه همگی موازی بوده و بنابراین انحنای افق در این مکان‌ها صفر می‌باشد. در مکان‌هایی که افق، یک تاقدیس یا ویژگی تپه‌ای شکل را تشکیل می‌دهد، بردارها واگرا و انحنای مثبت و وقتی منحنی یک ناودیس را تشکیل می‌دهد، بردارها همگرا و انحنای منفی می‌شود که البته این یک قرارداد همیشگی نمی‌باشد. شکل (۴-۵-ه)، اعمال نشانگر انحنای را در داده‌های لرزه‌ای نشان می‌دهد.

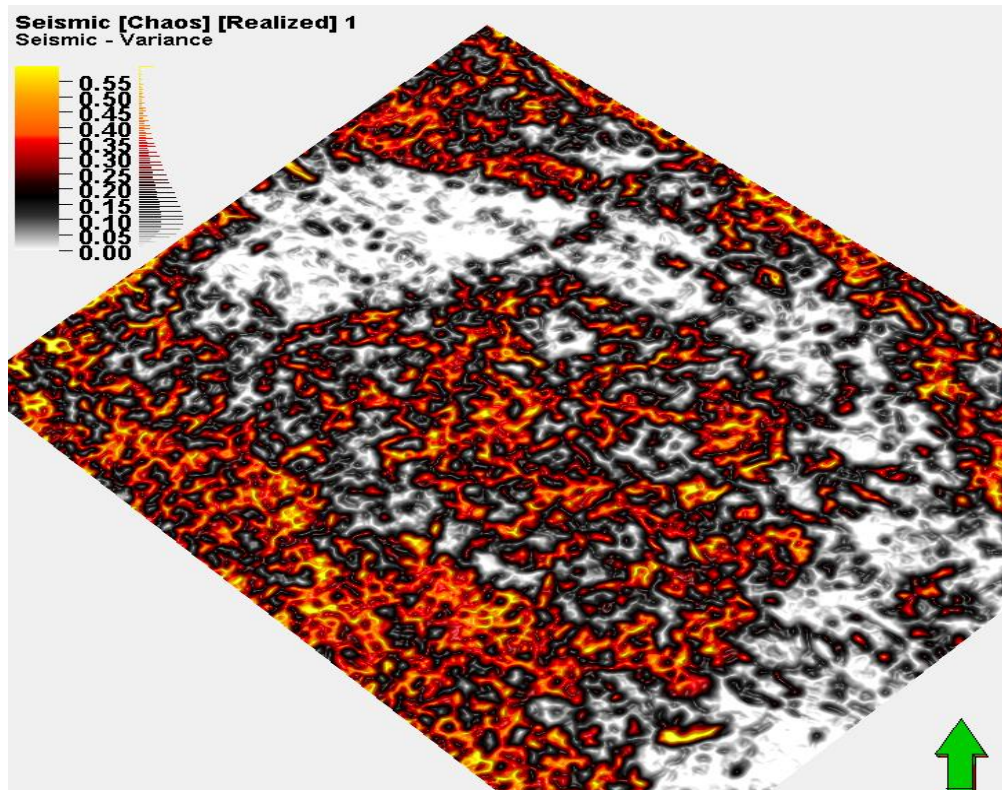
با استفاده از این نشانگر، حداکثر انحنای در بخش مرکزی مخزن به دست آمد. در ادامه، نشانگرهای استخراج شده از داده‌های لرزه‌ای، به منظور تعیین توزیع شدت شکستگی در مخزن، به عنوان ورودی ثانویه در مدل ساختمانی مخزن استفاده خواهند شد.



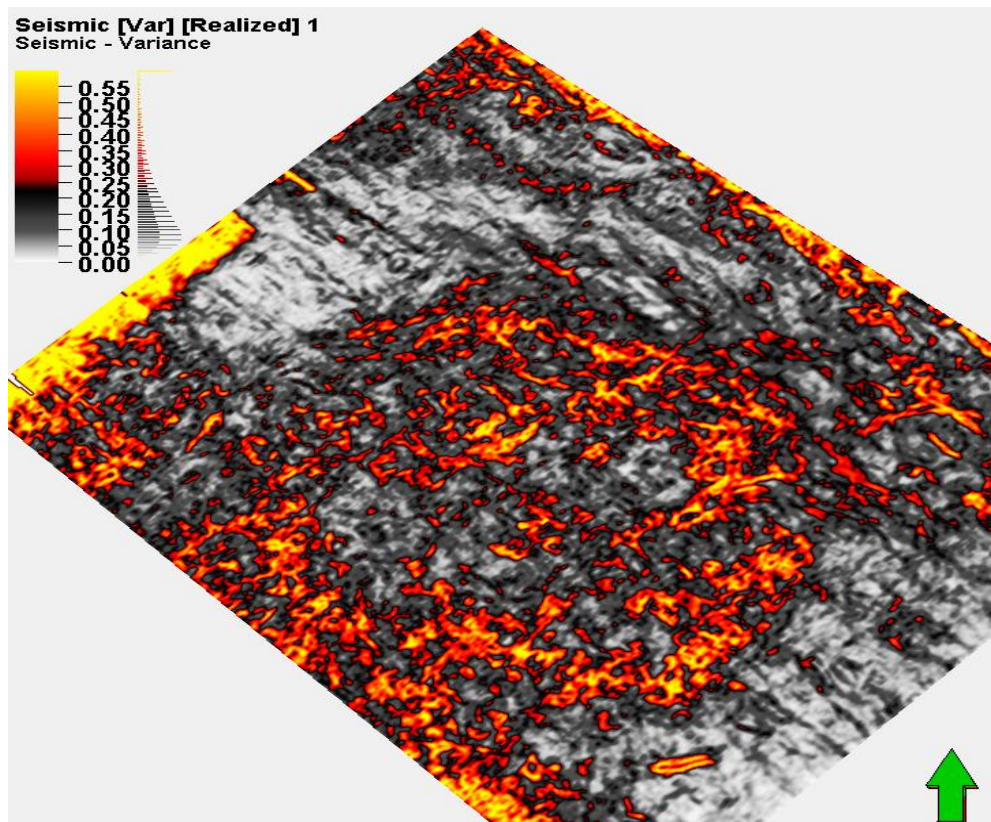
شکل (۴-۴) استفاده از مقطع دو بعدی عرضی برای توصیف انحنای پیکان‌ها نشان‌دهنده بردارهای عمود بر سطح هستند. برای بردارهای موازی، انحنای صفر، بردارهای واگرا انحنای مثبت و بردارهای همگرا انحنای منفی تعریف می‌شود (Robert, 2001)



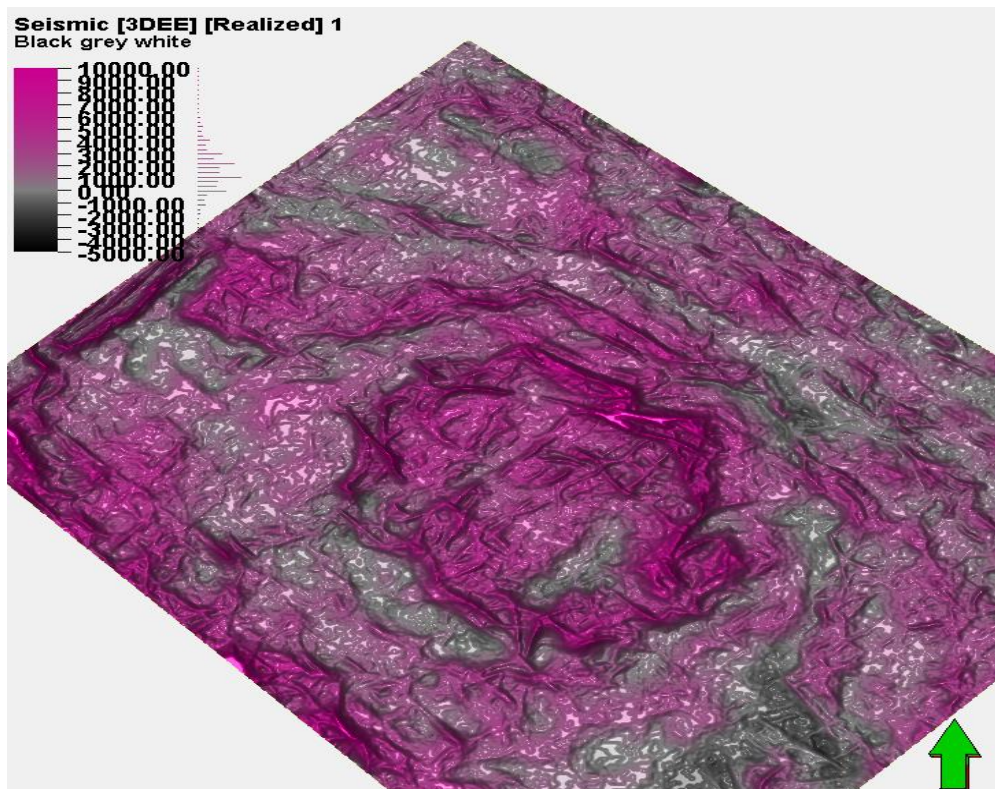
شکل (۴-۵-الف) الگوریتم ردیابی مورچه در برش زمانی ۷۲۰ میلی ثانیه



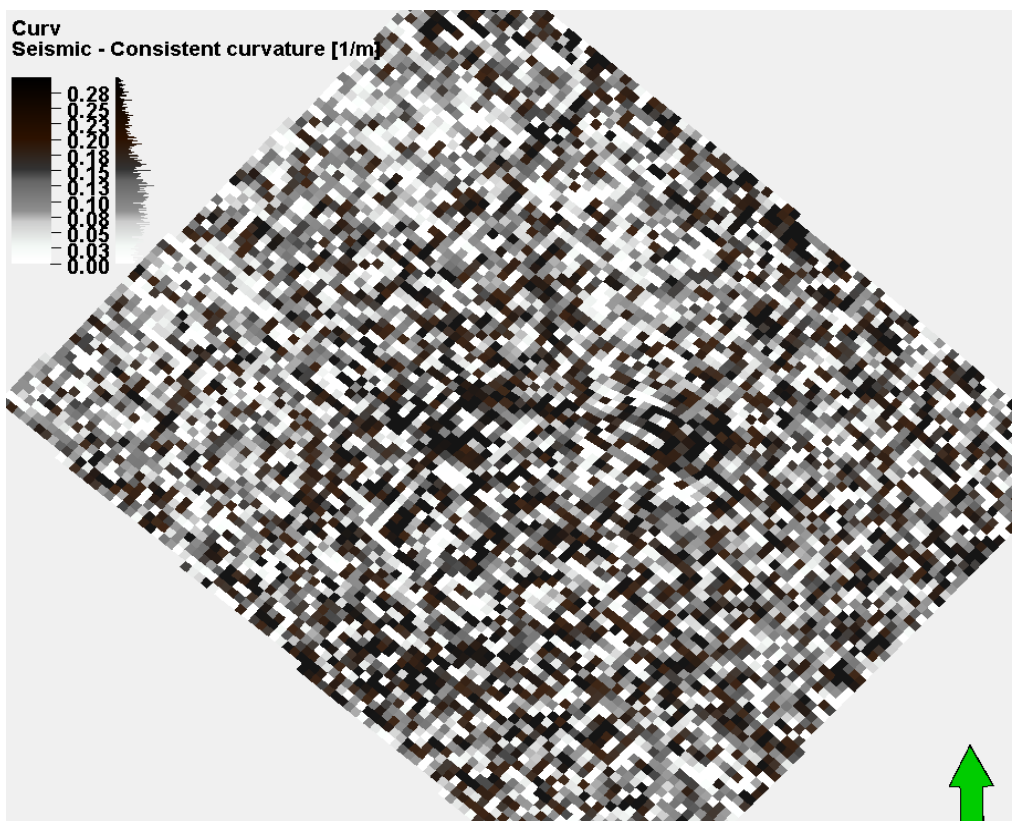
ادامه شکل (۴-۵-ب) نشانگر آشفتگی در برش زمانی ۷۲۰ میلی ثانیه



ادامه شکل (۴-۵-ج) نشانگر واریانس در برش زمانی ۷۲۰ میلی ثانیه



ادامه شکل (۴-۵-د) نشانگر برجستگی در برش زمانی ۷۲۰ میلی ثانیه



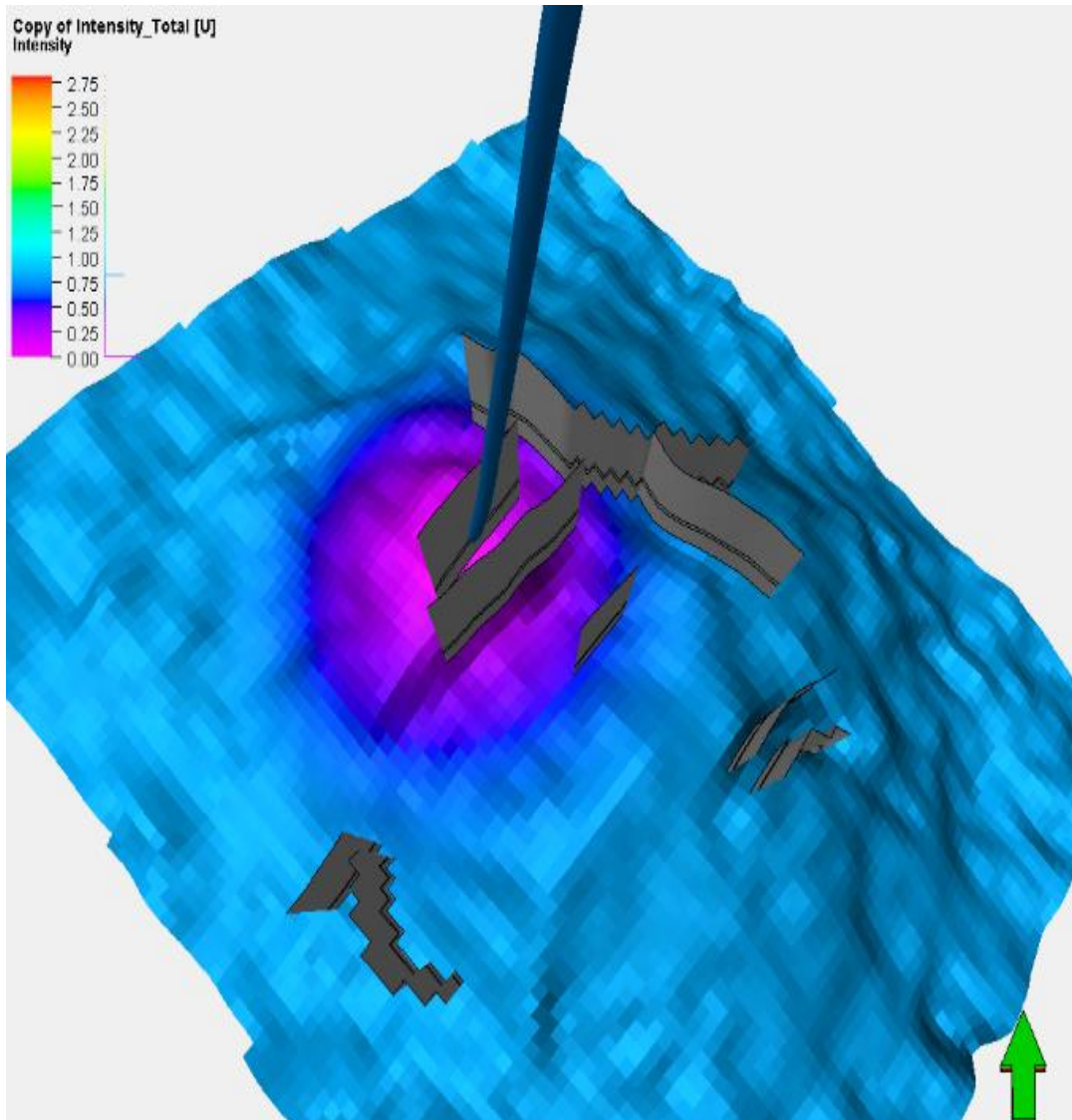
ادامه شکل (۴-۵-ه) نشانگر انحنا در برش زمانی ۷۲۰ میلی ثانیه

۴-۴-۴ روش‌شناسی تهیه نقشه چگالی شکستگی‌ها

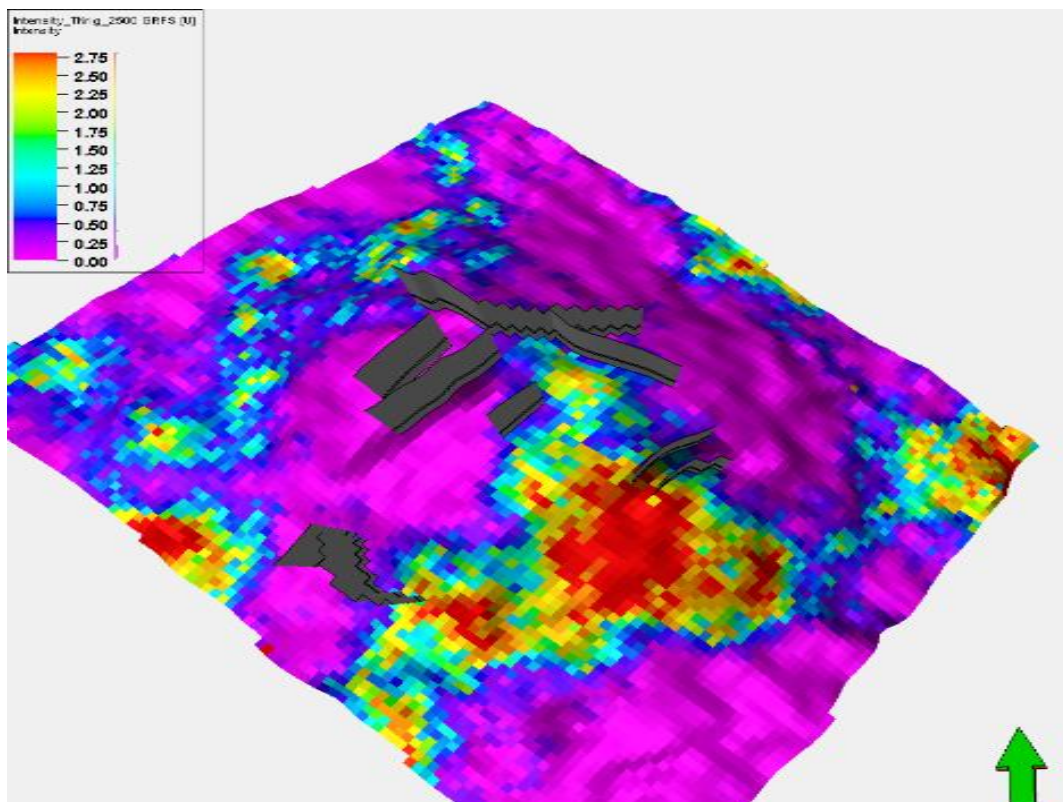
پس از ساخت نمودار شدت شکستگی و بزرگ‌نمایی این نمودار، گام بعدی تهیه نقشه چگالی شکستگی به واسطه این نمودار می‌باشد. نقشه چگالی شکستگی، یک نقشه پیکسلی است که نماینده کل ناحیه شکستگی در حجم مخزن می‌باشد. این نقشه یکی از بهترین اندازه‌گیری‌های شاخص برای توزیع فضایی شکستگی‌ها است. در ساخت نقشه چگالی شکستگی‌ها می‌توان از پارامترهای ثانویه که در تعیین میزان و چگونگی پراکندگی شکستگی‌ها نقش دارند نیز استفاده نمود. استراتژی معمول در تخمین شدت شکستگی در محدوده مخزن، استفاده از روش‌های زمین‌آماری می‌باشد. الگوریتم کریجینگ یک روش تخمین می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان مقدار یک کمیت در نقاط با مختصات معلوم را، در نقاط دیگری با مختصات معلوم، به‌دست آورد. این روش بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار استوار بوده و بهترین تخمین گر خطی نا اریب محسوب می‌شود (Bohling, 2005).

کریجینگ به صورت محلی، دقیق عمل می‌کند، ولی توزیع فضایی نتایج حاصل از این تخمین تمایل به هموار شدن دارند و این هموار شدن باعث می‌شود تا برای مقادیر کم، تخمینی بیش‌تر و برای مقادیر زیاد، تخمینی کم‌تر از مقدار واقعی حاصل شود. این خاصیت در شبیه‌سازی جریان، مشکل بزرگی را ایجاد می‌کند که برای رفع این مشکل شبیه‌ساز گاوسی متوالی معرفی شده است (Arpat; 2005). شکل (۴-۶-الف)، مدل توزیع شکستگی بدست آمده از روش کریجینگ در مخزن را نشان می‌دهد. روش شبیه‌سازی گاوسی متوالی یک روش شبیه‌سازی تصادفی می‌باشد که برای داده‌های پیوسته به کار می‌رود. اجرای شبیه‌سازی گاوسی متوالی، حاصل بازسازی خواص فضایی مورد نظر به صورت متوالی، با استفاده از توزیع شرطی است. مهم‌ترین محدودیت مدل گاوسی، خاصیت حداکثر بی‌نظمی آن است که باعث پراکندگی مقادیر حداکثر در شبیه‌سازی می‌شود. شکل (۴-۶-ب)، توزیع نامناسب شدت شکستگی در مخزن را نشان می‌دهد به‌طوری‌که در قسمت انحنای مخزن و نواحی گسل‌خورده دارای کم‌ترین شدت شکستگی می‌باشد. شکل (۴-۶-ج)، توزیع متفاوتی از شدت

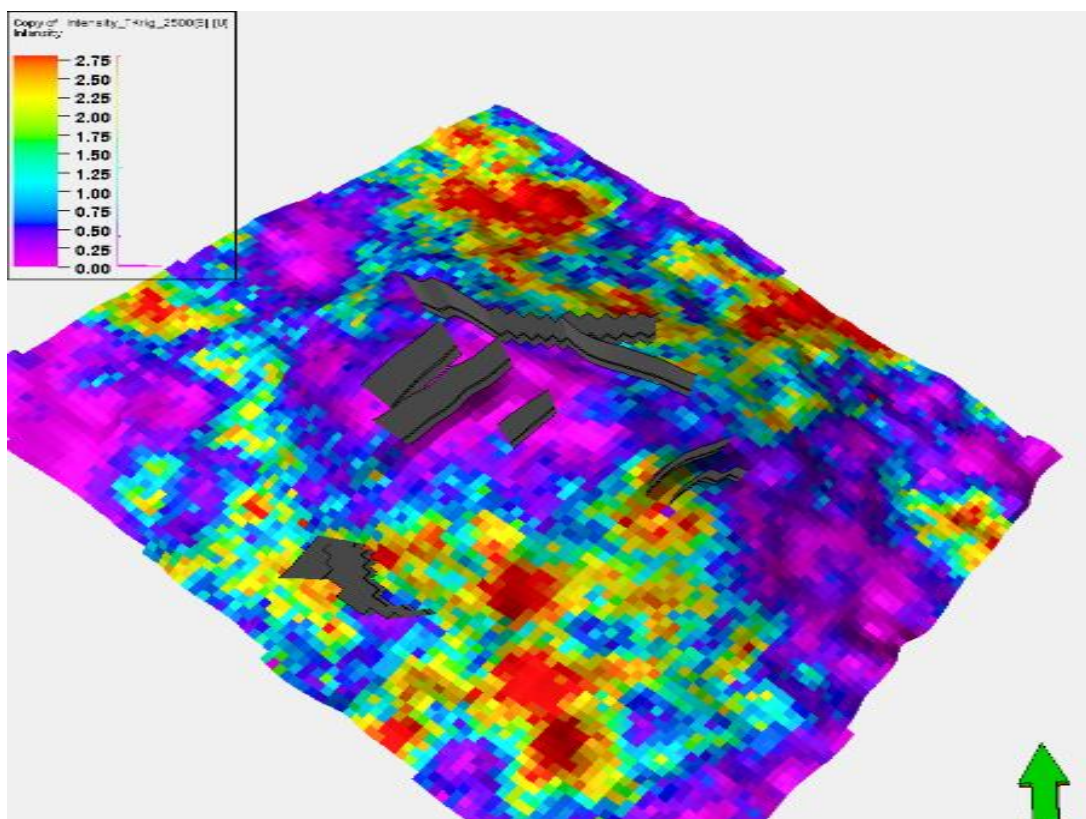
شکستگی را نشان می‌دهد. به‌طوریکه مشاهده گردید که در هر بار مدل‌سازی، توزیع شدت شکستگی متفاوتی از داده‌های شکستگی به‌دست می‌آید.



شکل (۴-۶-الف) توزیع شدت شکستگی به‌دست آمده با استفاده از روش کریجینگ



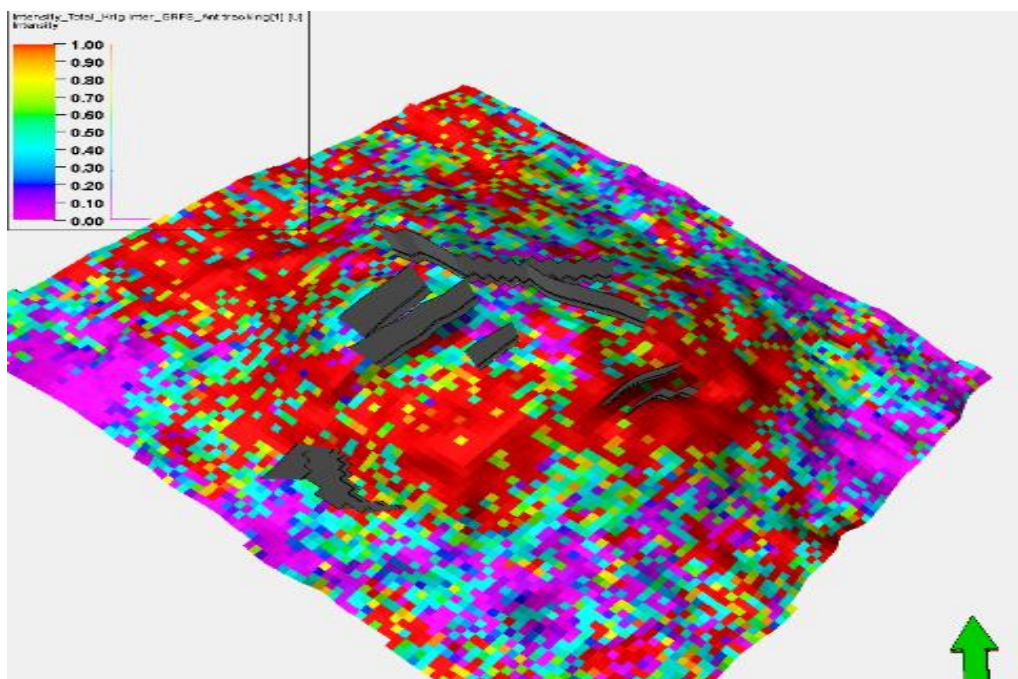
ادامه شکل (۴-۶-ب) توزیع نامناسب شدت شکستگی با استفاده از روش شبیه‌ساز گاوسی متوالی



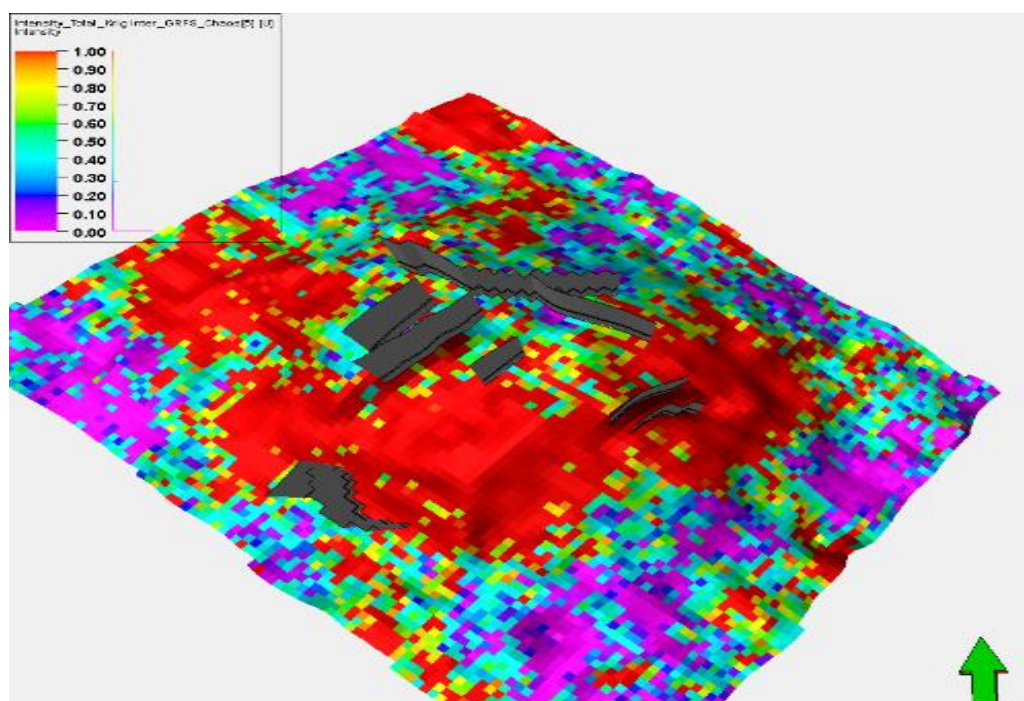
ادامه شکل (۴-۶-ج) توزیع مطلوب شدت شکستگی با استفاده از روش شبیه‌ساز گاوسی متوالی

روش شبیه‌سازی متوالی گاوسی هرچند به صورت کلی دقیق‌تر از کریجینگ عمل می‌کند و توزیع شدت شکستگی بهتری نسبت به کریجینگ ارائه می‌کند، اما هنوز قابلیت برطرف کردن نیاز به مدل-سازی الگوهایی با پیوستگی زمین‌شناسی را ندارد. زمین‌آمار دو نقطه‌ای بر اساس واریوگرام، قادر به نمایش ساختارها و اشکال زمین‌شناسی پیچیده نیست. محدودیت‌هایی که در زمین‌آمار دو نقطه‌ای و مدل وابسته به واریوگرام مشاهده شده است باعث شد تا از روش جدیدی برای غلبه بر این محدودیت‌ها استفاده شود. این روش جدید، روش کوکریجینگ هم مختصات می‌باشد. در این روش معمولاً از متغیر ثانویه‌ای که دارای شبکه برداشت (نمونه‌برداری) منظم بوده و در عین حال همبستگی بالایی با متغیر اولیه دارد، استفاده می‌شود. این روش زمانی به کار می‌رود که داده‌های ثانویه (در این تحقیق، داده‌های لرزه‌ای) در تمام نقاط شبکه وجود داشته باشد، مانند زمانی که از داده‌های لرزه‌ای سه بعدی استفاده می‌شود. بدین ترتیب در واقع داده‌های اولیه، در همان نقاطی که داده‌های ثانویه حضور دارند، تخمین زده می‌شوند. علاوه بر این موارد ذکر شده، داده چاه اجازه یک تخمین درست از نرخ تغییرات افقی واریوگرام را نمی‌دهد. به طوری که تنها با داده‌های چاه می‌توان نرخ تغییرات عمودی واریوگرام را در نظر گرفت. ازین‌رو با محدودیت داده‌های چاه، توزیع شدت شکستگی و مدل شکستگی تولید شده از قطعیت خوبی برخوردار نیستند. در نتیجه استفاده از یک راهبرد ثانویه برای مدل‌سازی شکستگی نیاز است (Nelson, 2001). یکی از این راهبردهای ثانویه، تعیین ارتباط منطقی بین شدت شکستگی و رویدادهای تکتونیکی و استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای می‌باشد (Zellou et al., 1995; Ouenes A., 2009). در ادامه نشانگرهای استخراج شده از داده‌های لرزه‌ای توسط روش کوکریجینگ هم‌مختصات، به عنوان ورودی ثانویه انتخاب شده و در تهیه‌ی مدل توزیع‌های شدت شکستگی در مخزن، دخالت داده شدند که نتایج آن در شکل (۴-۷)، نشان داده شده است. مدل‌های توزیع شدت شکستگی به‌دست آمده با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای بیانگر توزیع مناسب شدت شکستگی در بخش انحنای مخزن و ناحیه‌ی گسل‌خورده می‌باشد. شکل (۴-۷-الف)، توزیع شدت شکستگی در مخزن با استفاده از نشانگر ردیابی مورچه را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی این نشانگر

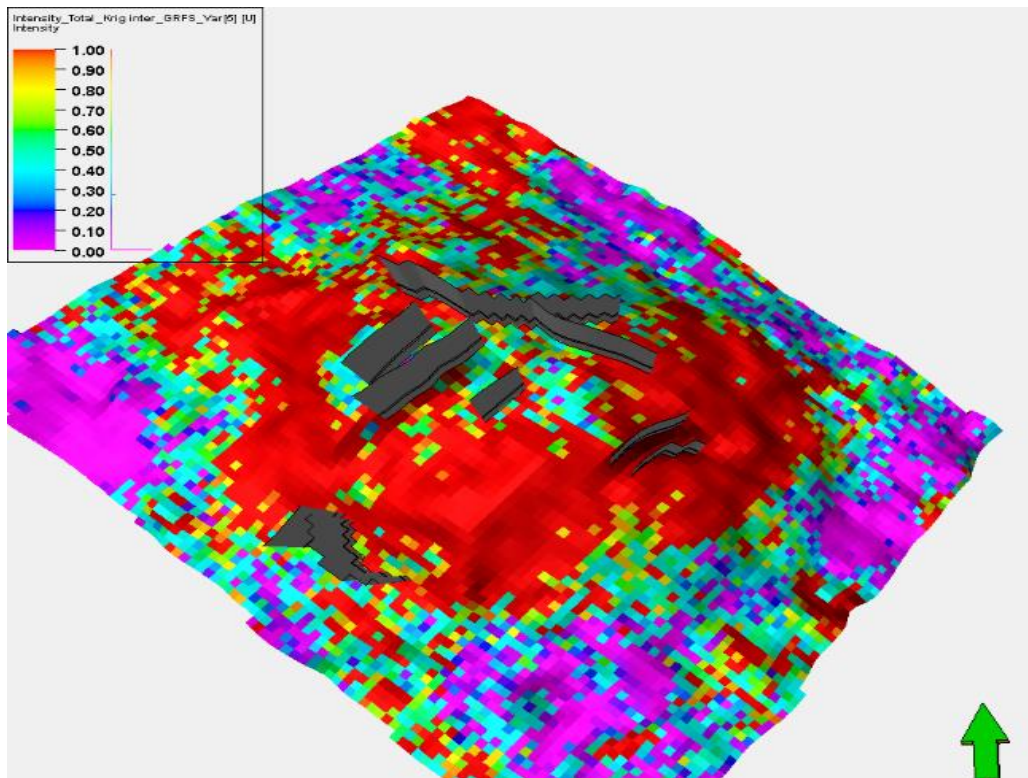
با شدت شکستگی ۰/۵۶ حاصل شد. شکل (۴-۷-ب)، توزیع شدت شکستگی در محدوده‌ی مخزن با اعمال نشانگر آشفستگی را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن این نشانگر به عنوان ورودی ثانویه، ضریب همبستگی با شدت شکستگی ۰/۶۸ به دست آمد. با استفاده از این نشانگر توزیع مطلوبی از شدت شکستگی در بخش انحنای مخزن و ناحیه‌ی گسل خورده مشاهده شد. شکل (۴-۷-ج)، توزیع شدت شکستگی با استفاده از نشانگر واریانس را نشان می‌دهد که ضریب همبستگی این نشانگر با شدت شکستگی ۰/۶۱ به دست آمد. به طوریکه توزیع شدت شکستگی حاصل از نشانگر آشفستگی را تأیید می‌کند. شکل (۴-۷-د)، توزیع نامناسبی از شدت شکستگی در نواحی گسل خورده با استفاده از نشانگر لرزه‌ای برجستگی را نشان می‌دهد. با استفاده از این نشانگر، ضریب همبستگی با شدت شکستگی ۰/۳۲ به دست آمد. شکل (۴-۷-د)، توزیع شدت شکستگی با اعمال نشانگر لرزه‌ای انحنای مخزن را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن این نشانگر به عنوان ورودی ثانویه، ضریب همبستگی با شدت شکستگی ۰/۴۵ به دست آمد. با توجه به آنالیز ضرایب همبستگی به دست آمده در این مرحله، نشانگر آشفستگی بیش‌ترین همبستگی را با شدت شکستگی ارائه داد (جدول ۴-۱). همچنین با توجه به توزیع‌های شدت شکستگی که توسط روش کوکریجینگ هم‌مختصات به دست آمد، در نواحی انحنای مخزن و گسل-خورده بیش‌ترین شدت شکستگی مشاهده شد.



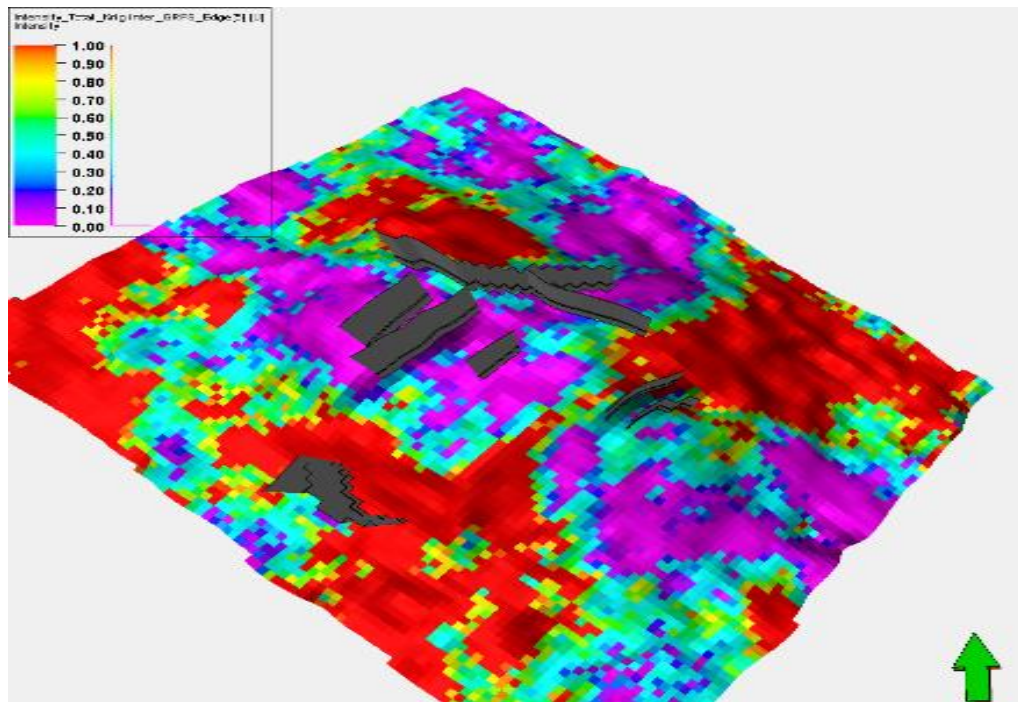
شکل (۴-۷-الف) توزیع شدت شکستگی به دست آمده توسط روش کوکریجینگ هم‌مختصات، با اعمال نشانگر لرزه‌ای ردیابی مورچه



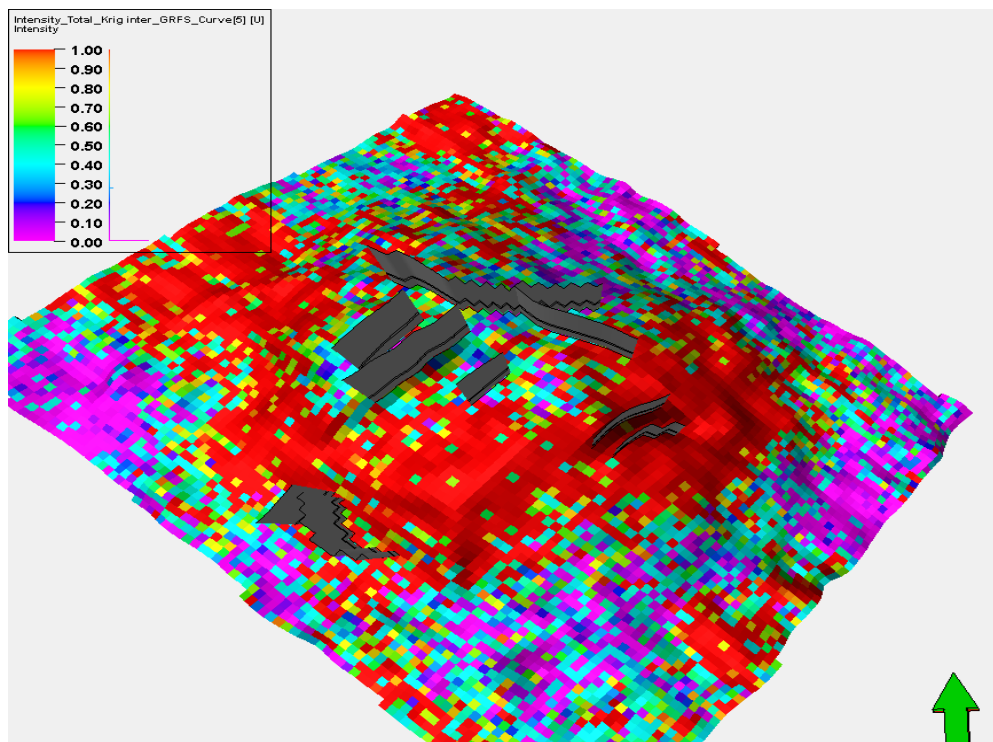
ادامه شکل (۴-۷-ب) توزیع شدت شکستگی به دست آمده توسط روش کوکریجینگ هم‌مختصات، با اعمال نشانگر لرزه‌ای آشفتنگی



ادامه شکل (۴-۷-ج) توزیع شدت شکستگی به دست آمده توسط روش کوکریجینگ هم‌مختصات، با اعمال نشانگر لرزه‌ای واریانس



ادامه شکل (۴-۷-د) توزیع شدت شکستگی به دست آمده توسط روش کوکریجینگ هم‌مختصات، با اعمال نشانگر لرزه‌ای برجستگی



ادامه شکل (۴-۷-۵) توزیع شدت شکستگی به دست آمده توسط روش کوکریجینگ هم‌مختصات، با اعمال نشانگر لرزه‌ای انحنا

جدول (۴-۱) ضریب همبستگی شدت شکستگی با نشانگرهای لرزه‌ای

نشانگرهای لرزه‌ای	ضریب همبستگی
آشفستگی	۰/۶۸
ردیابی مورچه	۰/۵۶
واریانس	۰/۶۱
انحنا	۰/۴۵
برجستگی	۰/۳۲

۴-۴-۵ توزیع شکستگی‌ها

در این مرحله چگالی داده‌های شکستگی برای ساخت مدل تعریف می‌شود. چگالی شکستگی می‌تواند به صورت یکی از موارد تعداد شکستگی‌ها، طول شکستگی‌ها یا مساحت شکستگی‌ها به حجم سنگ تعریف شود. در این بخش نقشه سه بعدی حاصل از شکستگی‌ها که در حقیقت مساحت شکستگی‌ها در واحد حجم است، به عنوان ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در محیط‌های همگن فرض می‌شود که شکستگی‌ها به طور کاملاً تصادفی پخش شده‌اند. موقعیت مکانی شکستگی‌ها با فرایند آماری پواسون که کاربرد گسترده‌ای در مدل‌سازی شبکه گسسته شکستگی‌ها دارد، تعیین می‌شوند. فرآیند پواسون به طور خاص بیانگر تابع توزیع آماری محل قرارگیری شکستگی‌ها است و دانسیته متوسط شکستگی‌ها به عنوان کنترل‌کننده این فرآیند تصادفی است. با وجود این که تراکم شکستگی‌ها می‌تواند متغیر باشد، استفاده از نقاط ناهمگن در فرآیند پواسون بر صحت بیش‌تر شبیه‌سازی موقعیت شکستگی‌ها می‌افزاید (ملايوسفی و همکاران ۲۰۱۱).

۴-۴-۶ هندسه شکستگی‌ها

اندازه شکستگی پارامتری است که نمی‌توان آن را مستقیماً با ابزار درون‌چاهی اندازه گرفت. برآورد اندازه شکستگی از چاه‌نمودارهای تصویری نیز مشکل است. چرا که تقاطع چاه تنها بخشی از شکستگی را نشان می‌دهد. منبع دیگر کسب اطلاعات از اندازه شکستگی، بررسی آنالوگ‌های رخنمون است. داده‌های دینامیک هم می‌توانند یک ایده کلی از طول شکستگی‌ها حاصل کنند. رایج‌ترین توزیع‌های طول شکستگی توزیع‌های نرمال، لاگ نرمال، قانون توانی، توزیع نمایی می‌باشند که برای هر یک از آن‌ها مباحث بسیار قوی تجربی و تئوری به عنوان معرف مناسب اندازه شکستگی‌ها وجود دارد. با توجه به این‌که داده‌های مربوط به اندازه شکستگی در دسترس نیست، از روش قانون توانی برای توزیع طول شکستگی‌ها استفاده شده است. طول اثر شکستگی‌ها با محل قرارگیری شکستگی‌ها در ارتباط است و در مناطقی که امکان انتشار ترک و شکاف نیست (مانند لایه‌های نمکی) طول

شکستگی‌ها شدیداً کاهش می‌یابد. همچنین طول اولیه شکستگی‌ها می‌تواند در برخورد با شکستگی‌های جدید دچار تغییر شوند.

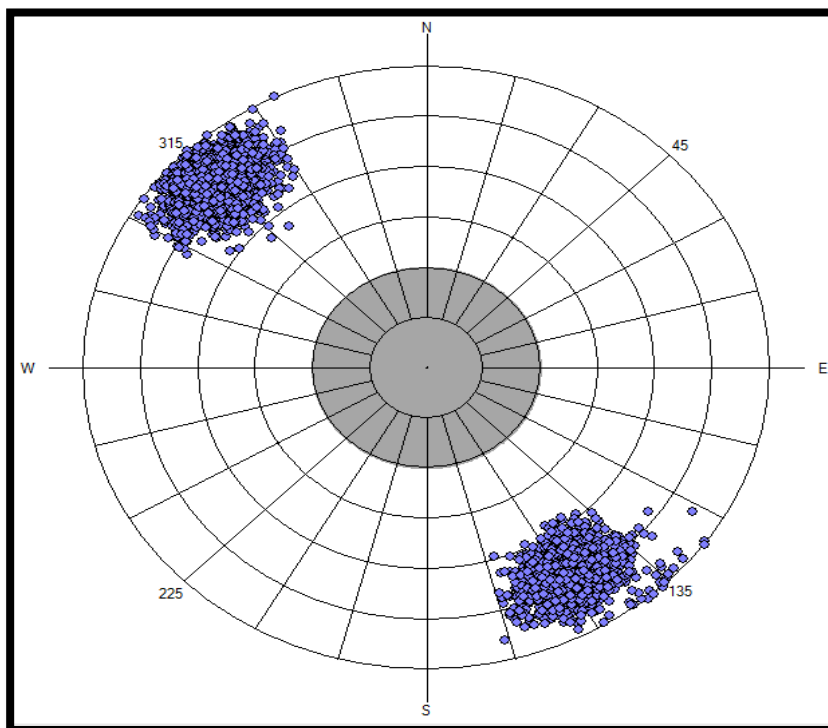
۷-۴-۴ ساخت مدل گسسته شکستگی با استراتژی پیشنهادی

هدف از مدل‌سازی شکستگی‌ها، یکپارچه‌سازی اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و داده‌های مهندسی مخزن، در صورت در دسترس بودن، جهت ساخت مدل‌های سه بعدی قابل قبول از شبکه شکستگی است. این کار با هدف پیش‌بینی توزیع خصوصیات دسته شکستگی‌ها در واحدهای مخزنی و ساختن مدل سه بعدی شبکه شکستگی جهت استفاده در محاسبات جریان سیال، انجام می‌گیرد. به منظور تهیه مدل گسسته شکستگی، بهترین مدل توزیع شدت شکستگی بدست آمده در مراحل قبل، به عنوان مدل اولیه در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه نشانگر آشفتگی استخراج شده از داده‌ها، ضریب همبستگی خوبی با مدل‌های اولیه شدت شکستگی از خود نشان داد، بنابراین از نقشه‌ی توزیع شدت شکستگی مربوطه به عنوان مدل اولیه در تهیه مدل‌سازی شکستگی انتخاب گردید. به منظور تهیه مدل گسسته شکستگی چند مقیاسه، لازم است که شکستگی‌های مدل شده با استفاده از تعیین محدوده‌ی آستانه‌ای، در کلاس مقیاس‌های مختلف، دسته بندی گردد. با توجه به اینکه اندازه شکستگی، پارامتری است که نمی‌توان آن را مستقیماً با ابزار درون چاهی اندازه گرفت و همچنین برآورد اندازه شکستگی از چاه‌نمودارهای تصویری مشکل می‌باشد، از این رو، از روش قانون توانی برای توزیع طول شکستگی استفاده شد. به منظور اعمال جهت‌گیری شکستگی‌ها با توجه به داده‌های شیب و جهت شیب می‌توان از سه روش فیشر، کنت و بینگهام بهره برد که روش فیشر برای توزیع جهت-گیری شکستگی‌ها انتخاب شد. پارامترهای مورد استفاده در روش فیشر شامل مقدار میانگین شیب، میانگین جهت شیب و مقدار تمرکز می‌باشد. مقدار تمرکز بیانگر پراکندگی داده‌ها در اطراف میانگین شیب می‌باشد. به‌طوری‌که هر اندازه مقدار تمرکز بیشتر باشد، قطب‌های شکستگی تمرکز بیشتری را در اطراف میانگین شیب نشان می‌دهد. با آنالیز مقدار داده‌های شیب و جهت شیب، مقدار تمرکز ۶۰،

پراکندگی مناسبی در اطراف مقدار میانگین شیب را ارائه داد. شکل (۴-۸)، جهت‌گیری قطب‌های شکستگی با مقدار تمرکز ۶۰ را در محدوده‌ی میانگین شیب نشان می‌دهد. برای دسته شکستگی کلاس یک مقدار میانگین جهت شیب و شیب به ترتیب برابر ۳۱۵ و ۷۸ درجه و برای کلاس دو به ترتیب برابر ۱۴۸ و ۷۲ درجه می‌باشد و برای هر دو کلاس مقدار تمرکز ۶۰ در نظر گرفته شد (جدول ۴-۲).

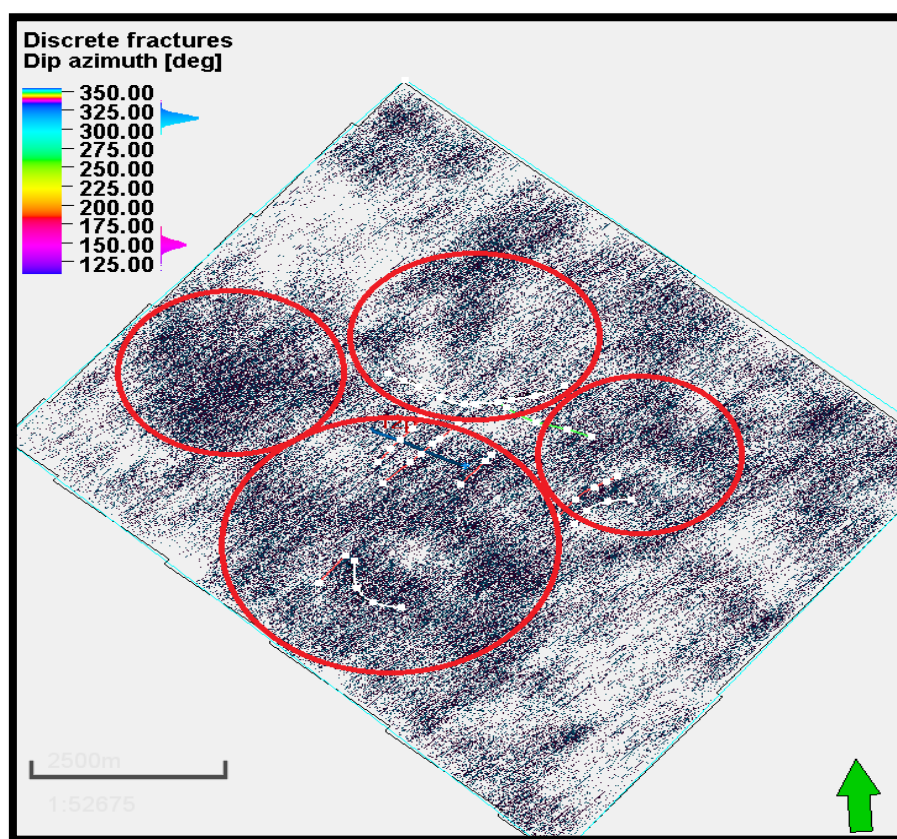
جدول (۴-۲) میانگین جهت شیب، شیب و مقدار تمرکز برای دسته شکستگی‌ها

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



شکل (۴-۸) نمایش توزیع جهت‌گیری شکستگی‌ها با اعمال پارامترهای میانگین شیب، میانگین جهت شیب و مقدار تمرکز توسط روش فیشر در استریونت

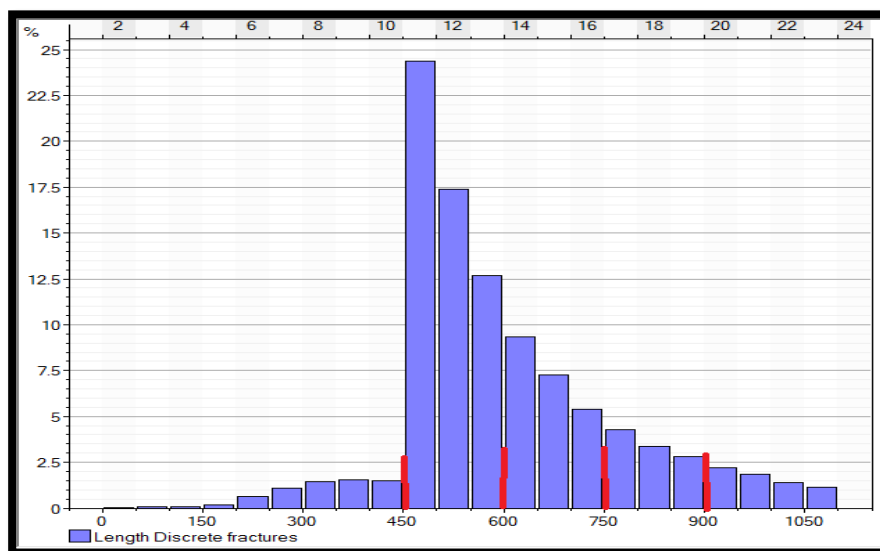
در ادامه از مدل توزیع شدت شکستگی به دست آمده با استفاده از نشانگر آشفتگی در مرحله قبل، به عنوان ورودی برای ساخت مدل گسسته شکستگی استفاده شد. شکل (۴-۹)، مدل گسسته شکستگی را با استفاده از نشانگر آشفتگی نشان می‌دهد. در مدل گسسته شکستگی به دست آمده شدت تمرکز شکستگی‌ها در نواحی انحنای مخزن و بخش‌های دارای گسل خوردگی مشاهده شد.



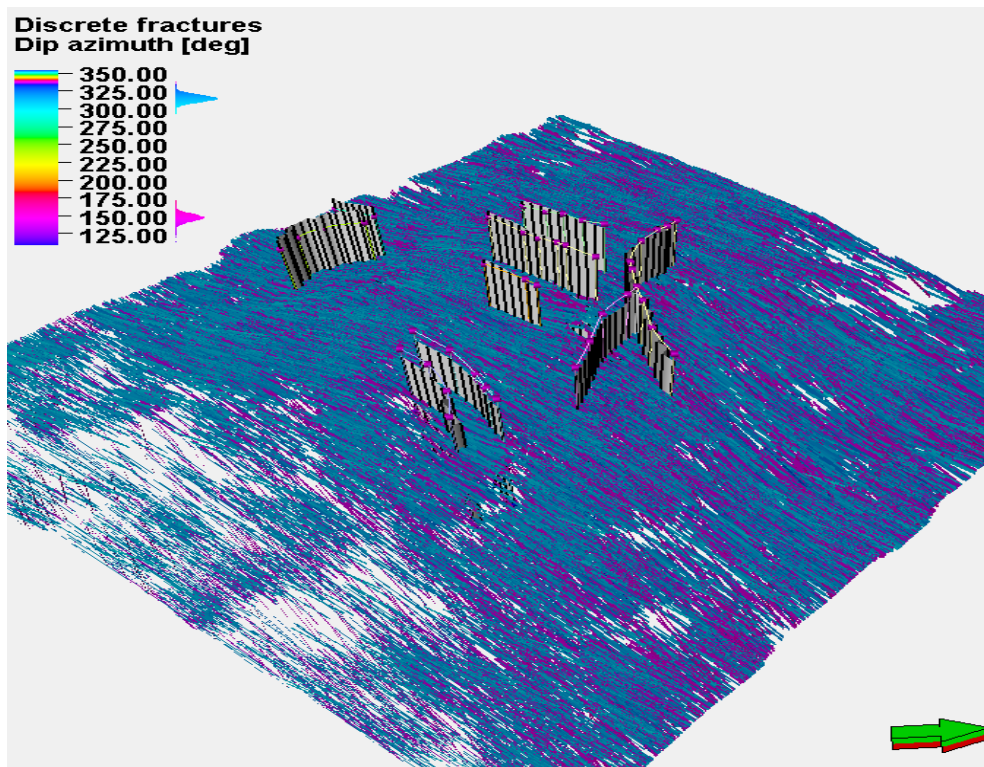
شکل (۴-۹) مدل گسسته شکستگی به دست آمده با استفاده از نشانگر آشفتگی و همچنین تمرکز شدت شکستگی در مخزن در فضای دو بعدی

با استفاده از رابطه توزیع توانی برای توزیع طول شکستگی در مخزن، شکل (۴-۱۰)، نمودار توزیع در محدوده‌ی اندازه‌ای مختلف طول شکستگی را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار به دست آمده، محدوده-

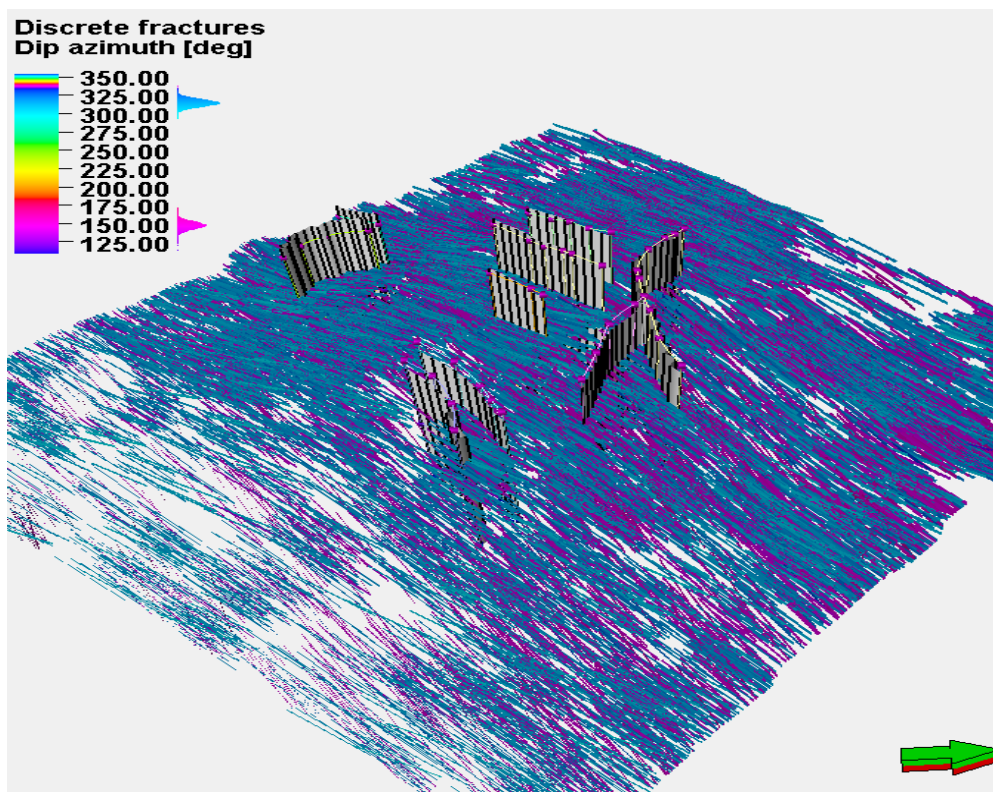
ی اندازه‌های شکستگی به پنج کلاس دسته‌بندی شد. طبق نمودار شکل (۴-۱۰)، شکستگی‌های مربوط به محدوده‌ی اندازه‌های ۰-۴۵۰ فوت، فراوانی مناسبی در مخزن از خود نشان ندادند و از آنجا که شکستگی‌های کوچک مقیاس تأثیری در جریان سیال نشان نمی‌دهند در مدل‌سازی شکستگی‌ها دخالت داده نشدند. شکل (۴-۱۱-الف)، مدل گسسته شکستگی در مقیاس ۴۵۰-۶۰۰ فوت را نشان می‌دهد. در این مقیاس طول شکستگی، مقدار فراوانی شکستگی، حداکثر به دست آمد که این تمرکز شکستگی در قسمت انحنای مخزن و بخش‌های دارای گسل خوردگی دیده شد. شکل (۴-۱۱-ب)، مدل گسسته‌ی شکستگی در محدوده‌ی اندازه‌های ۶۰۰-۷۵۰ فوت را نشان می‌دهد. این محدوده دارای فراوانی کم‌تری نسبت به مقیاس قبلی می‌باشد و بیشترین تمرکز شدت شکستگی را در قسمت انحنای مخزن نشان داد. شکل (۴-۱۱-ج)، مدل گسسته‌ی شکستگی در محدوده‌ی اندازه‌های ۷۵۰-۹۰۰ فوت را نشان می‌دهد. در این محدوده‌ی اندازه‌ای، شکستگی با طول بیشتر و فراوانی کم‌تری نسبت به دو مقیاس ذکر شده نشان داده شد. شکل (۴-۱۱-د)، مدل گسسته‌ی شکستگی در محدوده‌ی اندازه‌های ۹۰۰-۱۰۵۰ فوت را نشان می‌دهد. در این مقیاس حداکثر طول شکستگی با کم‌ترین فراوانی به دست آمد.



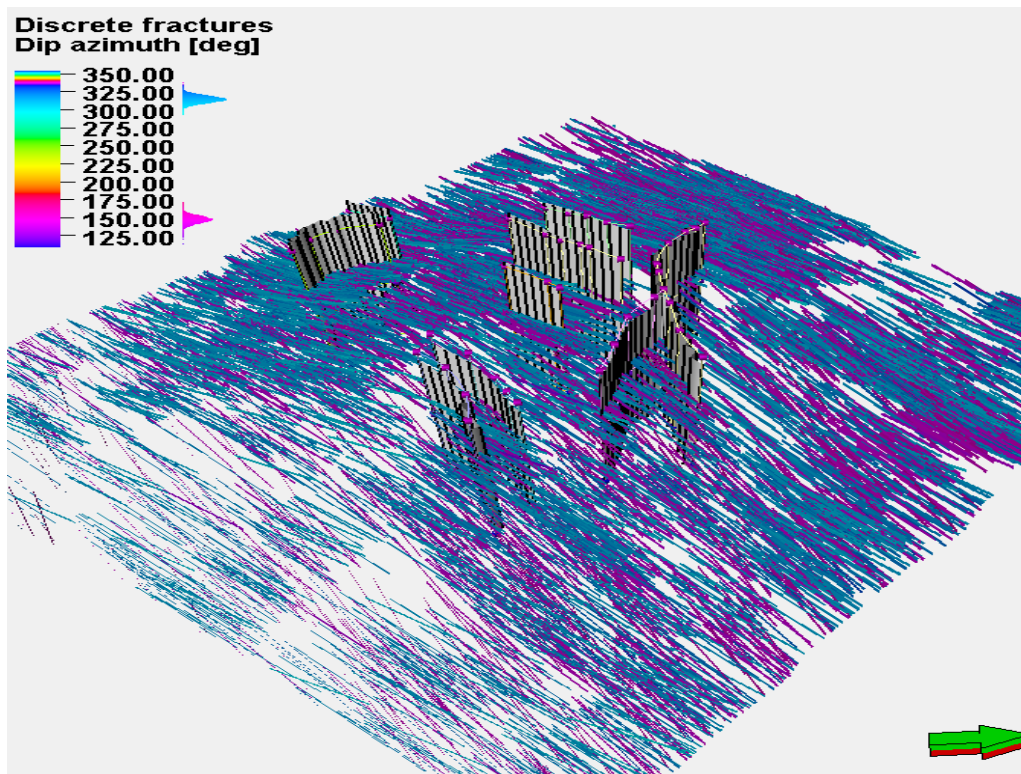
شکل (۴-۱۰) نمایش ستونی توزیع طول شکستگی در محدوده بازه‌های ۰-۱۰۵۰ فوت



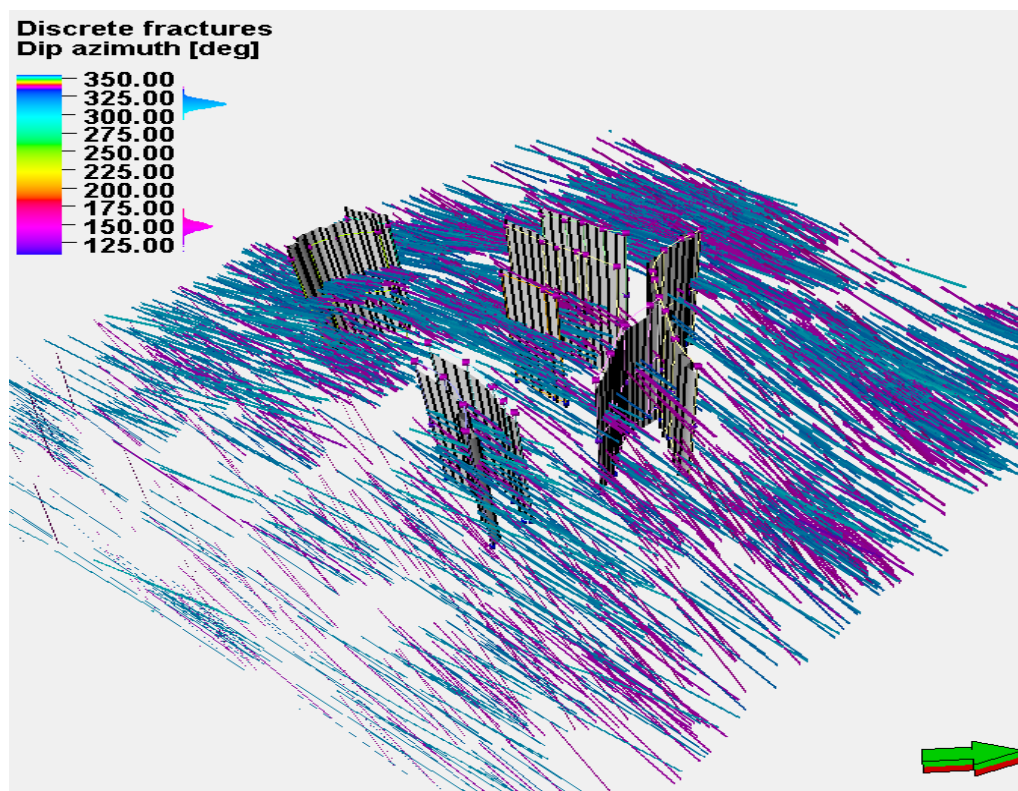
شکل (۴-۱۱-الف) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۴۵۰-۶۰۰ فوت



شکل (۴-۱۱-ب) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۶۰۰-۷۵۰ فوت



ادامه شکل (۴-۱۱-ج) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۷۵۰-۹۰۰ فوت



ادامه شکل (۴-۱۱-د) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۹۰۰-۱۰۵۰ فوت

فرآیند مدل‌سازی شبکه شکاف‌ها به دلیل ماهیت پیچیده آن همواره با خطا و عدم قطعیت بالایی همراه است. به همین دلیل لازم است تا سازگاری مدل شکستگی‌ها با اطلاعات دیگری بررسی شود. از آنجا که در این مطالعه، داده‌های تولید در اختیار نیستند، برای سنجش میزان صحت مدل گسسته شکستگی، از شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است.

۴-۴-۸ استراتژی تهیه مدل گسسته شکستگی‌ها با استفاده از روش شبکه عصبی

شبکه عصبی یک معادله‌ساز و یا یک ابزار پیچیده آنالیز رگرسیون می‌باشد که چندین خواص مخزن را به عنوان ورودی دریافت می‌کند و تلاش می‌کند که آن‌ها را با شاخص‌های شدت شکستگی به عنوان خروجی مرتبط کند (Ouenes, 2000). به همین منظور مجموعه‌ای از ابزار هوش مصنوعی برای مدل‌سازی مخازن شکافدار معرفی شد (Ouenes et al., 1995). این روش برای حوزه‌ها و میادین مختلف با موفقیت استفاده شد. زمانی که یک مجموعه رابطه پیچیده اما نامعین بین تعدادی محرک‌های شکستگی و شدت شکستگی موجود باشد استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی مانند شبکه عصبی مزیت بزرگی دارد. استفاده از داده‌های موجود در موقعیت چاه‌ها می‌تواند به شبکه عصبی اجازه پیدا کردن رابطه زیر لایه‌ها را بدهد. زمانی که این رابطه پیدا شود، شبکه عصبی تنها از ورودی‌های در دسترس در سراسر حجم مخزن برای پیش‌بینی شدت شکستگی در نواحی بین چاهی استفاده می‌کند (Ouenes, 2000). با توجه به اهمیت شکستگی در تولید از مخازن شکافدار، مدل‌سازی دقیق آن یکی از چالش‌های بزرگ صنعت می‌باشد. به همین منظور برای بررسی و مدل‌سازی دقیق شکستگی‌ها باید عوامل کنترل‌کننده شکستگی (محرک‌های شکستگی) مانند عوامل ساختاری، سنگ‌شناسی، ضخامت مخزن و فاصله از گسل‌ها را با داده‌های چاه تلفیق نمود (Jenkins et al., 2009).

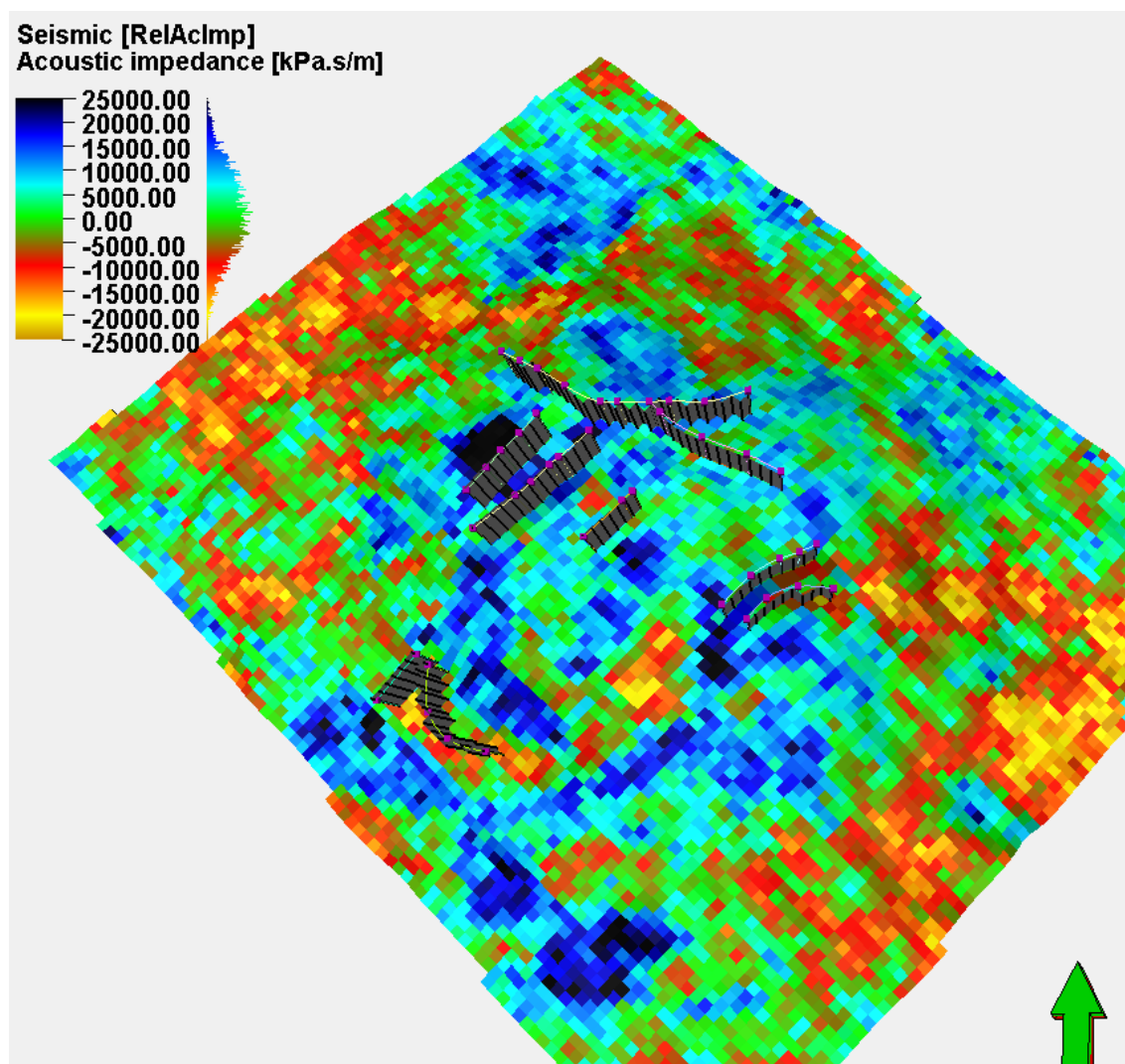
در این مطالعه برای بررسی و مطالعه دقیق‌تر شکستگی‌ها، از نمودارهای پتروفیزیکی از جمله تخلخل موثر، حجم دولومیت و کلسیت، نشانگر لرزه‌ای امپدانس صوتی نسبی و نشانگرهای استخراج شده در مراحل قبل از جمله آسفستگی، واریانس، الگوریتم ردیابی مورچه، انحنا و برجستگی استفاده شد.

امپدانس صوتی شاخص بسیار خوبی از سنگ‌شناسی می‌باشد که از حاصل ضرب سرعت و چگالی حاصل می‌شود. نشانگر امپدانس صوتی مقاومت سنگ را نشان می‌دهد به طوریکه هر چه امپدانس صوتی سنگ زیاد باشد نشان‌دهنده مقاومت بالای سنگ بوده و در نتیجه شکنندگی و احتمال افزایش تراکم شکستگی بالا می‌رود (بیات و همکاران، ۲۰۱۴). در بین تمامی محرک‌های شکستگی، سنگ‌شناسی و تخلخل نقش بزرگ و مهمی را در مدل‌سازی مخازن شکافدار ایفا می‌کند. این دو محرک-های اصلی خواص مکانیک سنگ را کنترل می‌کنند که به واسطه آن‌ها شکست سنگ و شدت شکستگی کنترل می‌شود. برای مثال در محرک شکستگی سنگ‌شناسی، افزایش تخلخل باعث شکل‌پذیری هرچه بیشتر سنگ می‌شود به طوریکه یک سنگ با داشتن مقدار زیادی شیل می‌تواند رفتاری شکل‌پذیر و بدون شکستگی را ارائه دهد. همچنین وجود مقدار زیادی دولومیت و کلسیت می‌تواند سنگ را به سمت شکستگی کامل هدایت کند (Ouenes, 2000). این مثال‌های ساده، اهمیت تخلخل و سنگ‌شناسی را در مدل‌سازی مخازن شکافدار بیان می‌کنند. علاوه بر این عوامل ذکر شده، محرک‌های شکستگی از جمله ضخامت لایه و نزدیکی به گسل نقش مهمی را در تعیین شدت شکستگی دارند به طوریکه انتظار می‌رود در نواحی دارای گسل خوردگی شدت شکستگی بالاتری را شاهد باشیم (Ouenes, 2000).

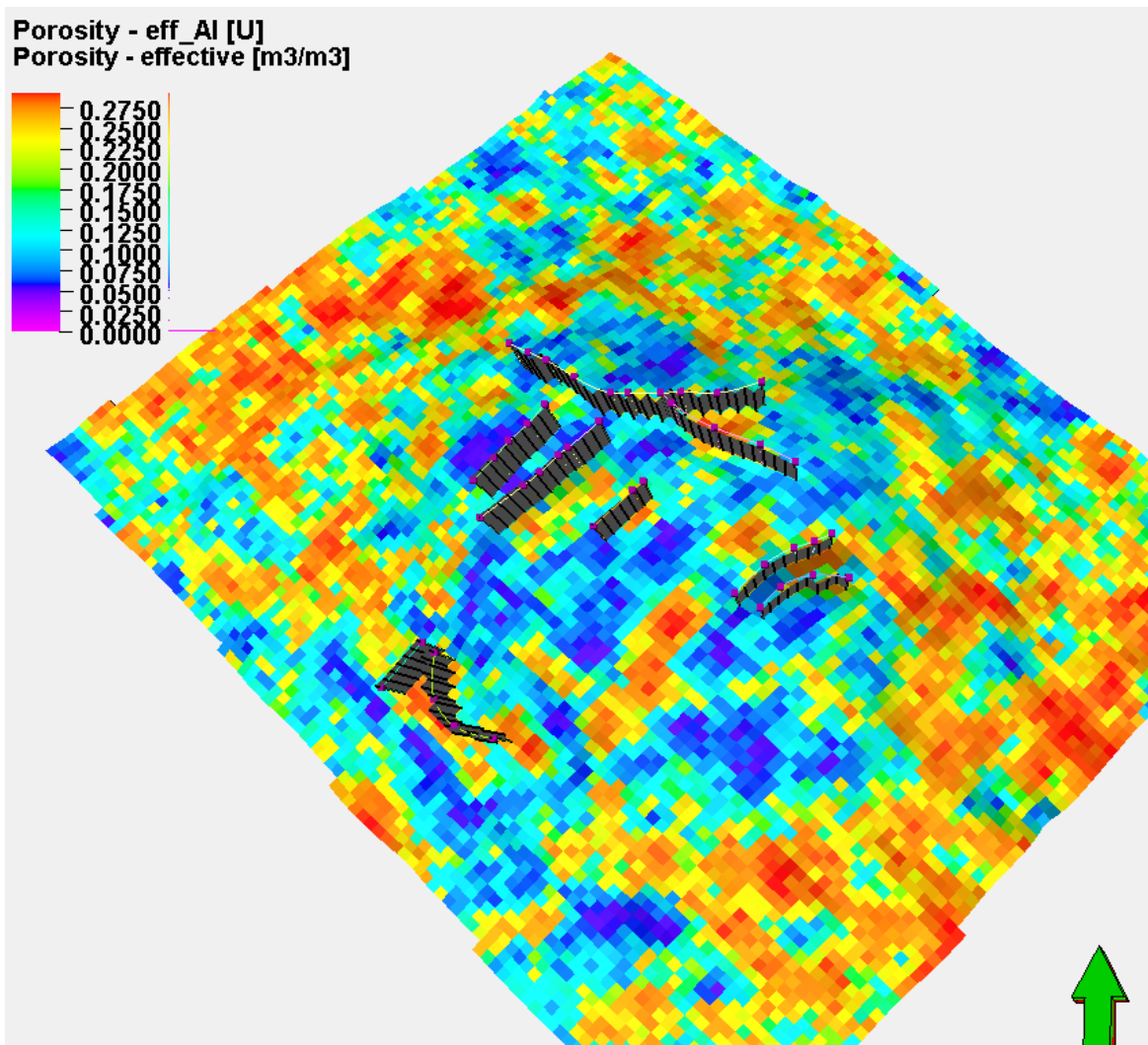
۴-۸-۱ ساخت مدل سه بعدی تخلخل

با توجه به اطلاعات مربوط به تخلخل موثر ده عدد چاه‌نمودارهای پتروفیزیکی، و همچنین استخراج نشانگر لرزه‌ای امپدانس صوتی نسبی، تخلخل در فضای سه بعدی با استفاده از روش زمین‌آماری شبیه‌ساز گاوسی متوالی مدل شد. شکل (۴-۱۲)، نشانگر لرزه‌ای امپدانس صوتی نسبی را در برش ۷۲۰ میلی‌ثانیه نشان می‌دهد. با توجه به شکل، قسمت انحنای مخزن و نواحی گسل‌خورده، مقدار امپدانس صوتی نسبی زیادی را نشان می‌دهد. این نواحی بیانگر افزایش مقدار مقاومت و کاهش تخلخل می‌باشد. در این مرحله، نشانگر لرزه‌ای امپدانس صوتی نسبی به عنوان ورودی ثانویه برای

قطعیت بخشیدن به مدل با استفاده از روش کوکریجینگ هم مختصات اضافه گردید. شکل (۴-۱۳)، مدل سه بعدی تخلخل را با استفاده از روش کوکریجینگ هم مختصات و نشانگر لرزه‌ای امپدانس صوتی نسبی نشان می‌دهد. ضریب همبستگی این نشانگر و تخلخل $0.75-$ به دست آمد. این ضریب همبستگی به دست آمده نشان‌دهنده رابطه معکوس تخلخل و امپدانس صوتی نسبی می‌باشد. با توجه به شکل (۴-۱۳)، مقدار تخلخل در بخش انحنای مخزن بسیار کم بوده، در نتیجه مقدار مقاومت زیادی را در این ناحیه نشان داد.



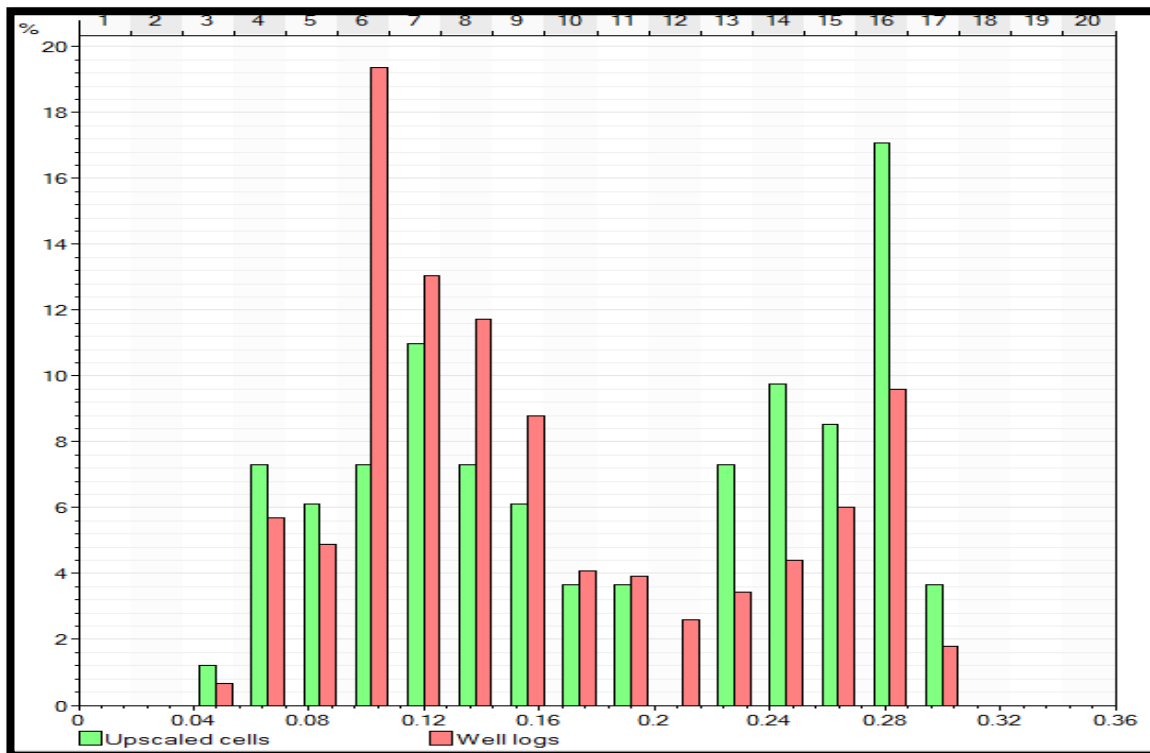
شکل (۴-۱۲) نشانگر امپدانس صوتی نسبی در برش ۷۲۰ میلی ثانیه همراه گسل‌های مدل شده مخزن



شکل (۴-۱۳-الف) مدل توزیع سه بعدی تخلخل با استفاده از نشانگر امپدانس صوتی به عنوان ورودی ثانویه همراه گسل‌های مدل شده مخزن

با توجه به مدل سه بعدی تخلخل به دست آمده، با افزایش تخلخل، مقاومت سنگ کاهش می‌یابد (Price, 1966). به طور کلی سنگ‌های با تخلخل پایین (با ترکیب و فابریک سنگ یکسان) تراکم شکستگی بالایی نسبت به سنگ‌های با تخلخل بالا دارند. با افزایش تخلخل، پیوند بین صفحات در سنگ دست نخورده کاهش یافته و در نتیجه مقاومت برشی و کششی سنگ کاهش می‌یابد. همچنین

با کاهش مقاومت سنگ، تراکم شکستگی نیز کاهش می‌یابد. شکل (۴-۱۳-ب)، نمودار ستونی تخلخل قبل و بعد از بزرگ‌نمایی را نشان می‌دهد.



ادامه شکل (۴-۱۳-ب) نمودار ستونی تخلخل قبل و بعد از بزرگ‌نمایی

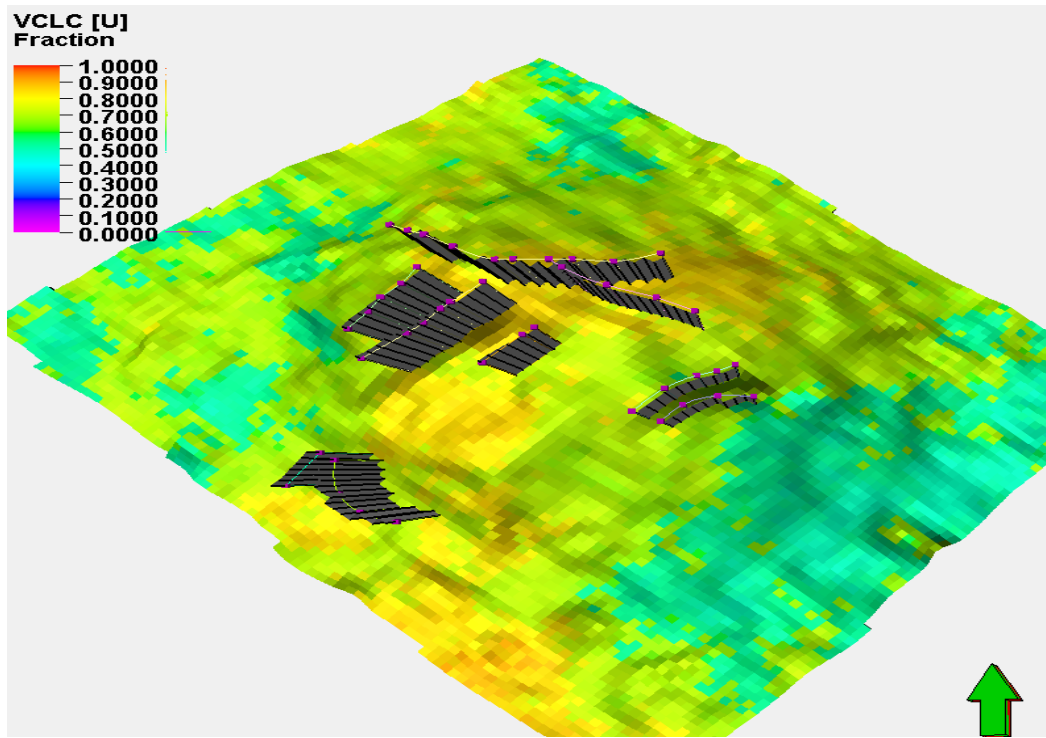
۴-۴-۸-۲ ساخت مدل سه بعدی سنگ‌شناسی مخزن

با توجه به داده‌های مربوط به چاه‌نمودارهای پتروفیزیکی، بررسی حجم انواع سنگ صورت گرفت. سنگ‌شناسی یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده شکستگی‌ها می‌باشد. با بررسی حجم انواع سنگ و تراکم شکستگی، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش حجم دولومیت و آهک، تراکم شکستگی افزایش و با افزایش حجم ماسه و شیل، تراکم شکستگی کاهش می‌یابد. بیش‌ترین تراکم شکستگی به ترتیب در دولومیت، آهک، ماسه و شیل می‌باشد (Van Golf, 1982). همچنین زون‌های با چگالی کم‌تر در اطراف گسل‌ها و مناطقی با کلسیت بالا مشاهده می‌شود.

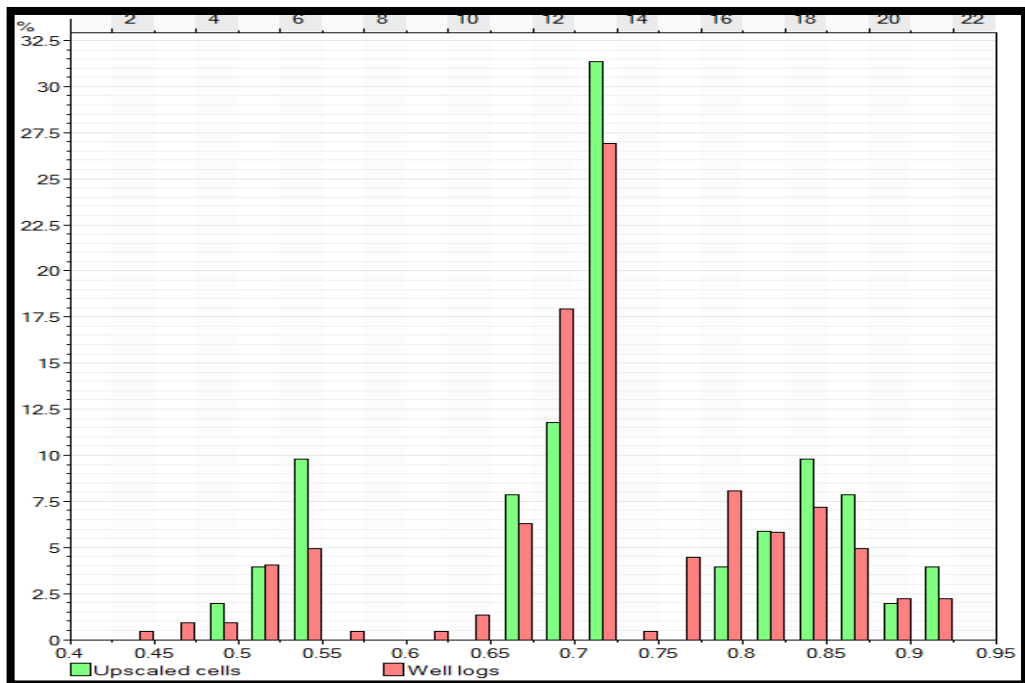
سختی سنگ نقش مهمی در شکستگی ایفا می‌کند. امیدانس حاصل از داده‌های لرزه‌ای، سختی سنگ را به خوبی مشخص کرده و یک عامل کلیدی در کنترل شکستگی می‌باشد. امیدانس صوتی نسبی، مجموع مقادیر دامنه‌هایی است که به صورت منظم نمونه‌گیری شده‌اند. این نشانگر، اختلاف امیدانس ظاهری را نشان می‌دهد که به مرزهای متوالی، سطوح دگرشیبی و ناپیوستگی اشاره دارد. به منظور قرار دادن داده‌های چاه در مدل ساختمانی مخزن، از روش درشت نمایی استفاده می‌شود (بیات و همکاران، ۲۰۱۴).

برای درشت نمایی متغیرهای گسسته از جمله نوع سنگ از روش حداکثری به منظور انتخاب سنگ با بیش‌ترین فرآوانی استفاده می‌شود. برای متغیرهای پیوسته نیز از روش‌های میانگین‌گیری حسابی و هندسی استفاده می‌شود. با توجه به چاه‌نمودارهای مربوط به حجم کلسیت و دولومیت، حجم مربوط به این سنگ‌ها در مخزن با استفاده از روش زمین آماری شبیه‌ساز گاوسی متوالی به دست آمد. همچنین نشانگر امیدانس صوتی نسبی به عنوان ورودی ثانویه کمکی مورد استفاده قرار گرفت.

شکل (۴-۱۴-الف)، تمرکز کلسیت موجود در مخزن را در بخش انحنای مخزن و قسمت‌های گسل-خورده نشان می‌دهد. وجود کلسیت در این ناحیه، این بخش را مکانی مستعد برای ایجاد شکستگی‌ها و گسل‌خوردگی کرده است. همچنین شکل (۴-۱۴-ب) نمودار ستونی مربوط به کلسیت قبل و بعد از بزرگ‌نمایی را نشان می‌دهد. شکل (۴-۱۵-الف)، تمرکز دولومیت در قسمت‌های نزدیک به انحنای مخزن و بخش‌های گسل‌خورده را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل و گزارش‌های زمین‌شناسی می‌توان به این موضوع پی برد که افزایش تخلخل در این ناحیه، ممکن است به دلیل وجود حجم دولومیت زیاد و کلسیت کم در این بخش باشد. شکل (۴-۱۵-ب)، نمودار ستونی مربوط به دولومیت قبل و بعد از بزرگ‌نمایی را نشان می‌دهد.

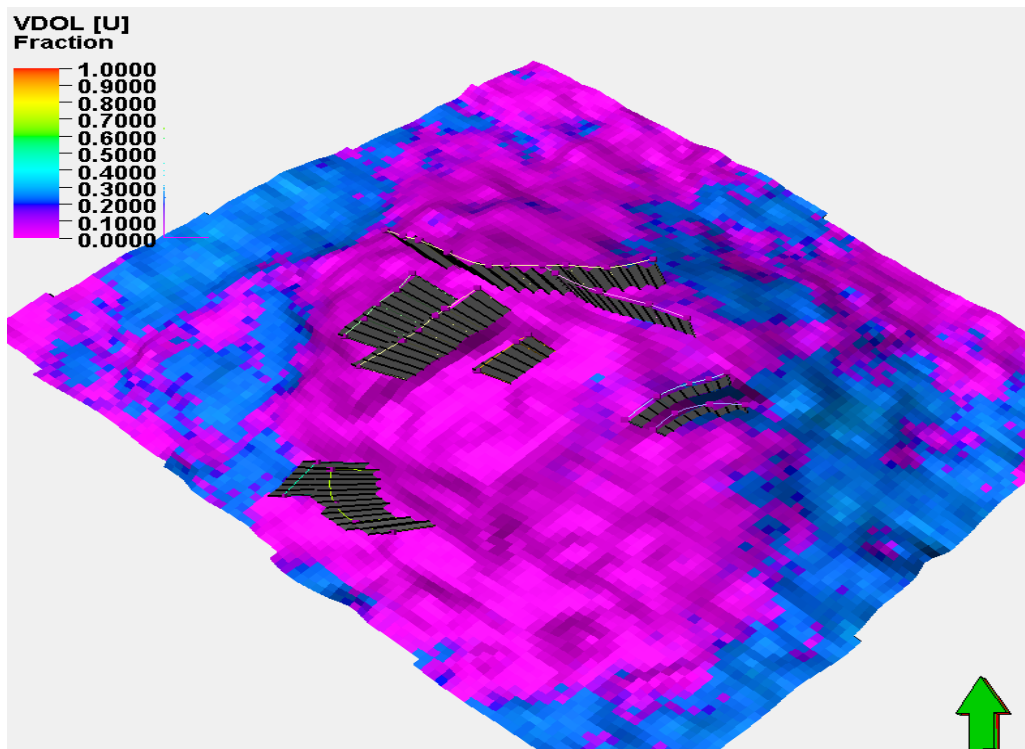


(الف)

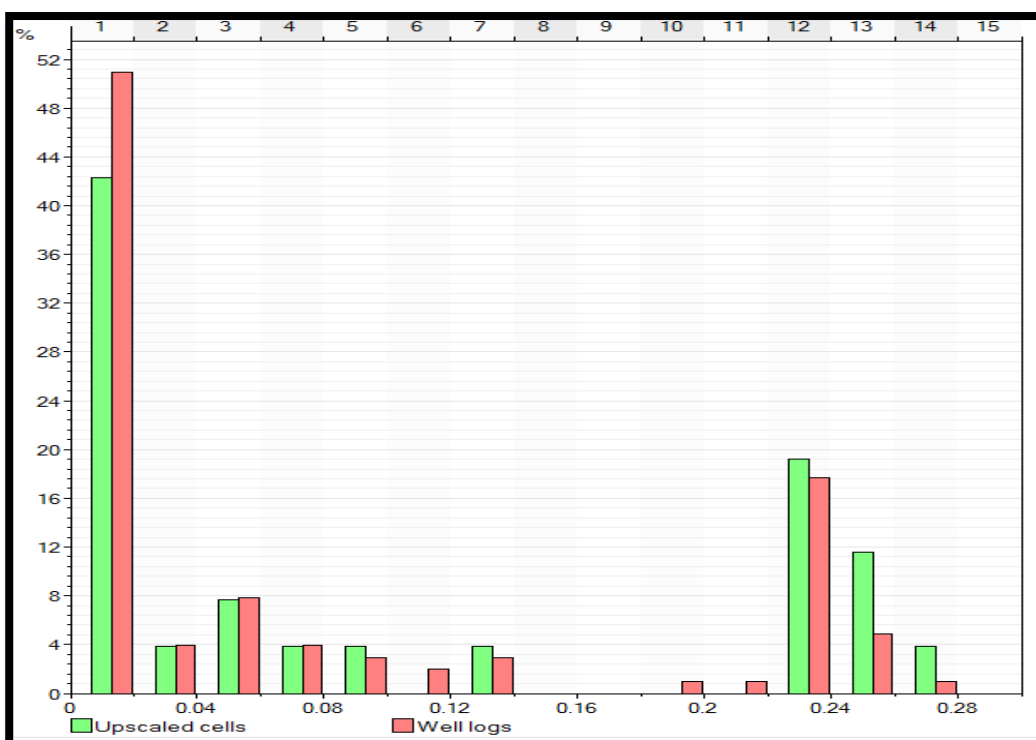


(ب)

شکل (۴-۱۴) الف) مدل سه بعدی تمرکز کلسیت در مخزن ب) نمودار ستونی مربوط به کلسیت قبل و بعد از بزرگ‌نمایی



(الف)

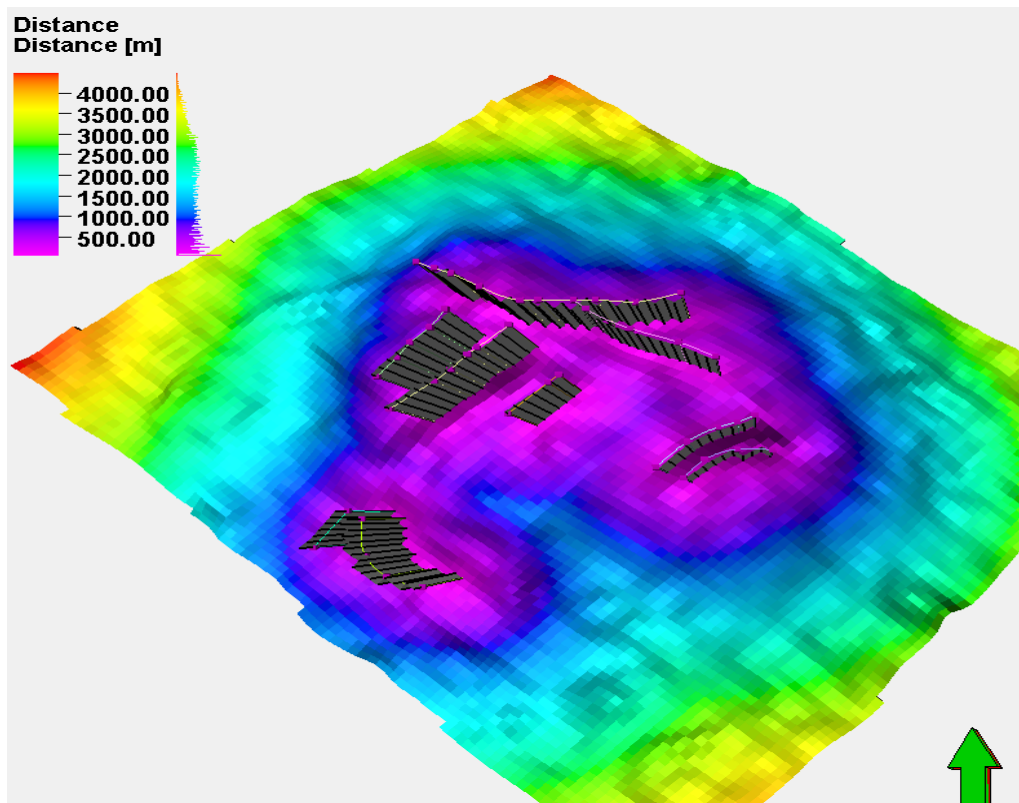


(ب)

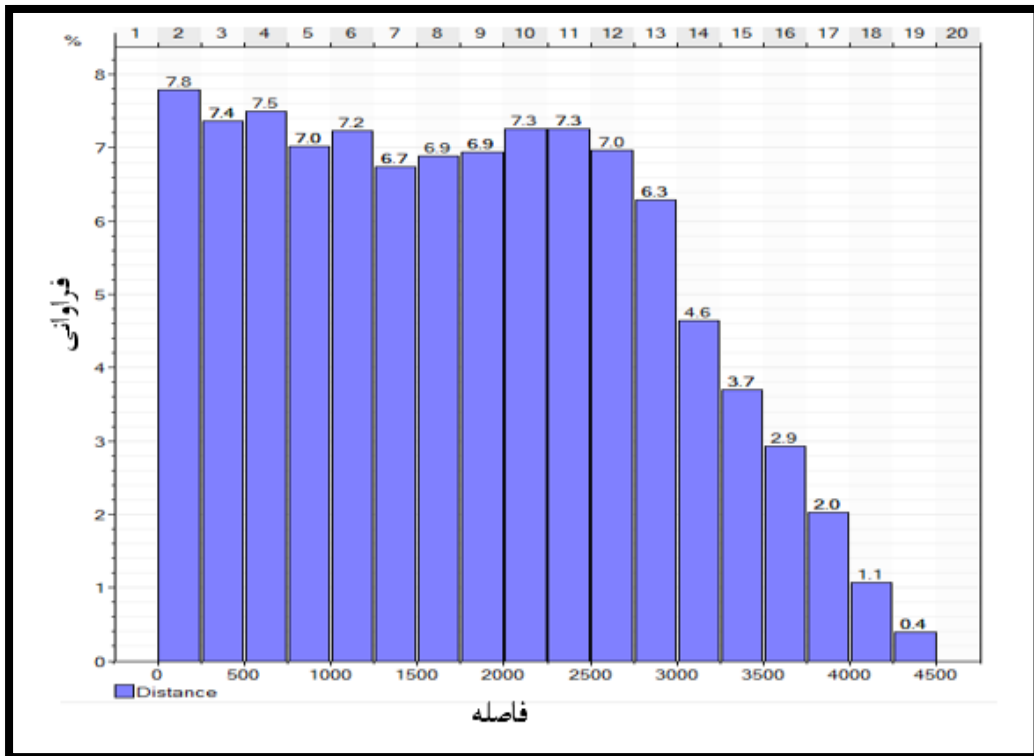
شکل (۴-۱۵) الف) مدل سه بعدی تمرکز دولومیت در مخزن ب) نمودار ستونی مربوط به دولومیت قبل و بعد از بزرگ‌نمایی

۳-۸-۴-۴ مدل ساختمانی فاصله از گسل

فاصله از گسل یک پارامتر تعیین کننده به عنوان محرک شکستگی از دید ژئومکانیک می باشد. نظر به این که شکستگی های مربوط به گسل ها عمدتاً در نزدیکی آنها واقع می شوند، یک مدل قطعی از نزدیکی به گسل ها ساخته می شود (Ouenes, 2000). این مدل بیانگر این موضوع می باشد که هر چه از گسل های موجود در مخزن فاصله بگیریم شدت شکستگی کاهش می یابد (El-Ouahed et al., 2005). بنابراین با معرفی این محرک شکستگی به عنوان ورودی برای شبکه عصبی می توان اطلاعات دقیق تر و مفیدتری از توزیع شکستگی در نواحی گسل خوردگی داشته باشیم. شکل (۴-۱۶-الف)، مدل قطعی محرک شکستگی فاصله از گسل را نشان می دهد. با استفاده از این محرک شکستگی می توان تأثیر فاصله از گسل ها را با شدت شکستگی بررسی نمود. شکل (۴-۱۶-ب)، نمودار ستونی مقدار فاصله از گسل را نشان می دهد.



شکل (۴-۱۶-الف) مدل قطعی محرک شکستگی فاصله از گسل



ادامه شکل (۴-۱۶-ب) نمودار ستونی فاصله از گسل

با استفاده از روش شبکه عصبی، مقادیر متغیرهای خروجی بر اساس داده‌های ورودی مدل تعیین می‌شود. این ورودی‌ها ممکن است مقادیر نمودارهای پتروفیزیکی، نشانگرهای لرزه‌ای، محرک‌های شکستگی و یا خواص مخزن باشد. هر ورودی در یک وزن ضرب شده و باهم جمع می‌شوند. سپس نتیجه حاصل در یک تابع غیر خطی قرار داده می‌شود تا خروجی حاصل شود.

در این مرحله از روش نظارت شده برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. در این روش از جفت‌های ورودی و خروجی برای آموزش استفاده می‌شود. وقتی داده خروجی وجود داشته باشد، از این داده‌ها همراه با داده‌های ورودی به منظور بهینه کردن وزن‌ها استفاده می‌شود. با استفاده از داده‌های ورودی آموزشی و محاسبه نتایج خروجی آن، خطای شبکه محاسبه می‌شود. با محاسبه ریشه میانگین مربعات خطا می‌توان بهترین برازش را برای همه داده‌ها به دست آورد.

برای مدل‌سازی از روش نظارت شده استفاده شد. همچنین همه عوامل کنترل‌کننده شکستگی به صورت نظارت شده با داده‌های تراکم شکستگی موجود در چاه آموزش داده شد. از داده‌های تراکم شکستگی ۷۰٪ برای آموزش و ۳۰٪ آن برای اعتبار سنجی به کار گرفته شد. برای آموزش مدل از ۱۰۰ و ۵۰۰ مرتبه تکرار استفاده شد تا مدل به خوبی آموزش دیده شود. همچنین حد خطا برای متوقف کردن الگوریتم ۵٪ انتخاب شد. در نهایت، نتایج تکرارهای مختلف باهم مورد مقایسه قرار گرفت. جدول (۳-۴)، رابطه موجود بین محرک‌های شکستگی و شدت شکستگی را در ۱۰۰ مرتبه تکرار نشان می‌دهد. رابطه بین محرک‌های شکستگی کل با شدت شکستگی ۰/۵۷ به دست آمد. همچنین بیش‌ترین رابطه با شدت شکستگی به ترتیب مربوط به محرک‌های شکستگی آشفستگی، واریانس، فاصله از گسل، برجستگی و حجم کلسیت می‌باشند. جدول (۴-۴)، رابطه موجود بین محرک‌های شکستگی و شدت شکستگی را در ۵۰۰ مرتبه تکرار نشان می‌دهد. با تکرار آموزش، رابطه بین محرک‌های شکستگی کل با شدت شکستگی به ۰/۷۲۴ افزایش یافت. لازم به ذکر است که با افزایش تکرار، تغییری در نتیجه حاصل شده ایجاد نشد. همچنین بیش‌ترین رابطه با شدت شکستگی در ۵۰۰ مرتبه تکرار به ترتیب مربوط به محرک‌های شکستگی واریانس، برجستگی، آشفستگی، حجم دولومیت، فاصله از گسل و حجم کلسیت می‌باشد. با مقایسه این جداول با هم، دریافتیم که با تکرار آموزش بیش‌تر، رابطه بهتری بین محرک‌های شکستگی و شدت شکستگی برقرار شد.

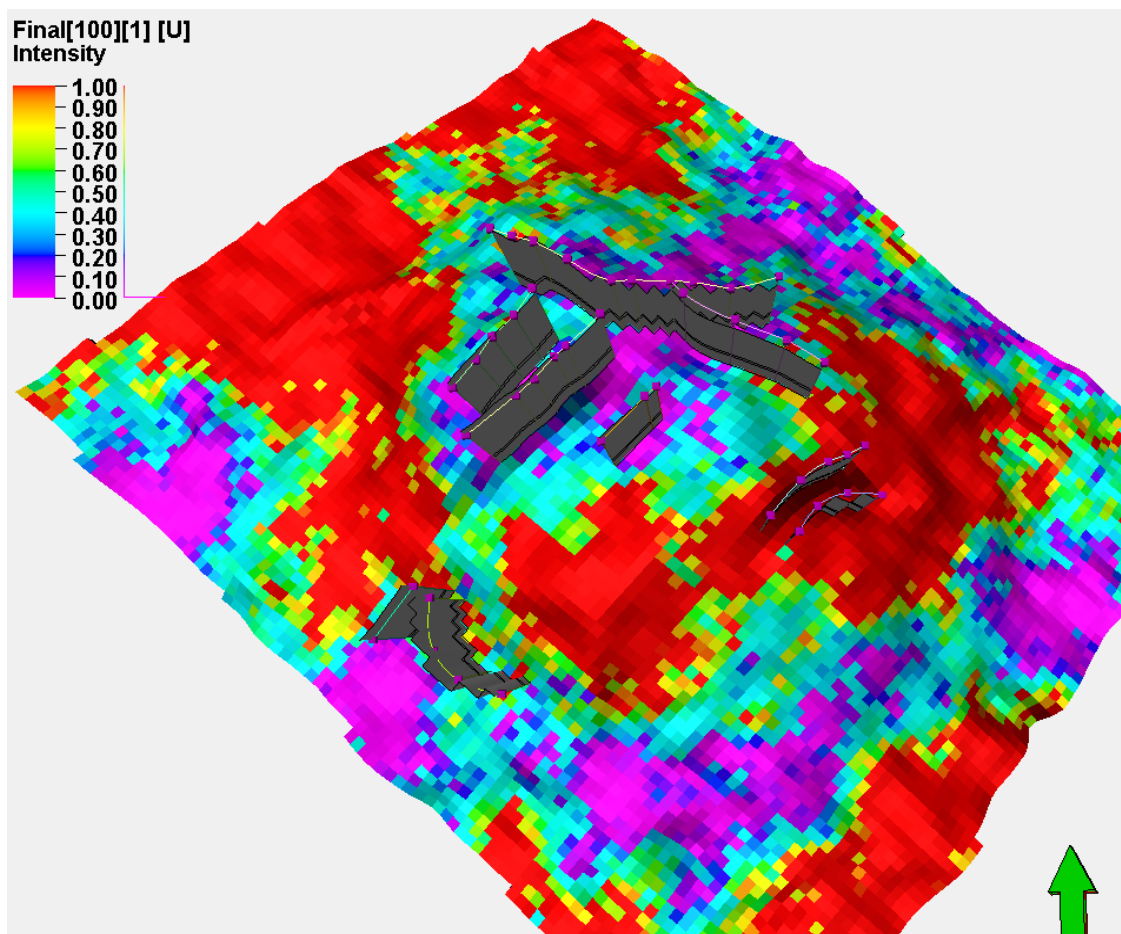
جدول (۳-۴) رابطه همبستگی بین محرک‌های شکستگی و شدت شکستگی با ۱۰۰ مرتبه تکرار

	Distance	Chaos	Edge	Variance	Curvature	Rel-AI	Ant-tracking	Porosity	VCal	VDol	Intensity Total
Distance	1.000	0.811	0.725	0.734	0.421	0.871	0.026	0.001	0.637	0.268	0.460
Chaos	0.811	1.000	0.823	0.930	0.107	0.503	0.160	0.277	0.595	0.280	0.494
Edge	0.725	0.823	1.000	0.918	0.019	0.483	0.042	0.040	0.545	0.260	0.456
Variance	0.734	0.928	0.918	1.000	0.000	0.352	0.029	0.104	0.499	0.261	0.471
Curvature	0.421	0.107	0.019	0.000	1.000	0.467	0.539	0.589	0.043	0.009	0.022
Rel-AI	0.871	0.503	0.483	0.352	0.467	1.000	0.145	0.035	0.591	0.207	0.331
Ant-tracking	0.026	0.160	0.042	0.029	0.539	0.145	1.000	0.651	0.255	0.010	0.134
Porosity	0.001	0.277	0.040	0.104	0.589	0.035	0.651	1.000	0.142	0.040	0.066
VCal	0.637	0.595	0.545	0.499	0.043	0.591	0.255	0.142	1.000	0.373	0.413
VDol	0.268	0.280	0.260	0.261	0.009	0.207	0.010	0.039	0.373	1.000	0.372
Total	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.769	0.723	0.420	0.570

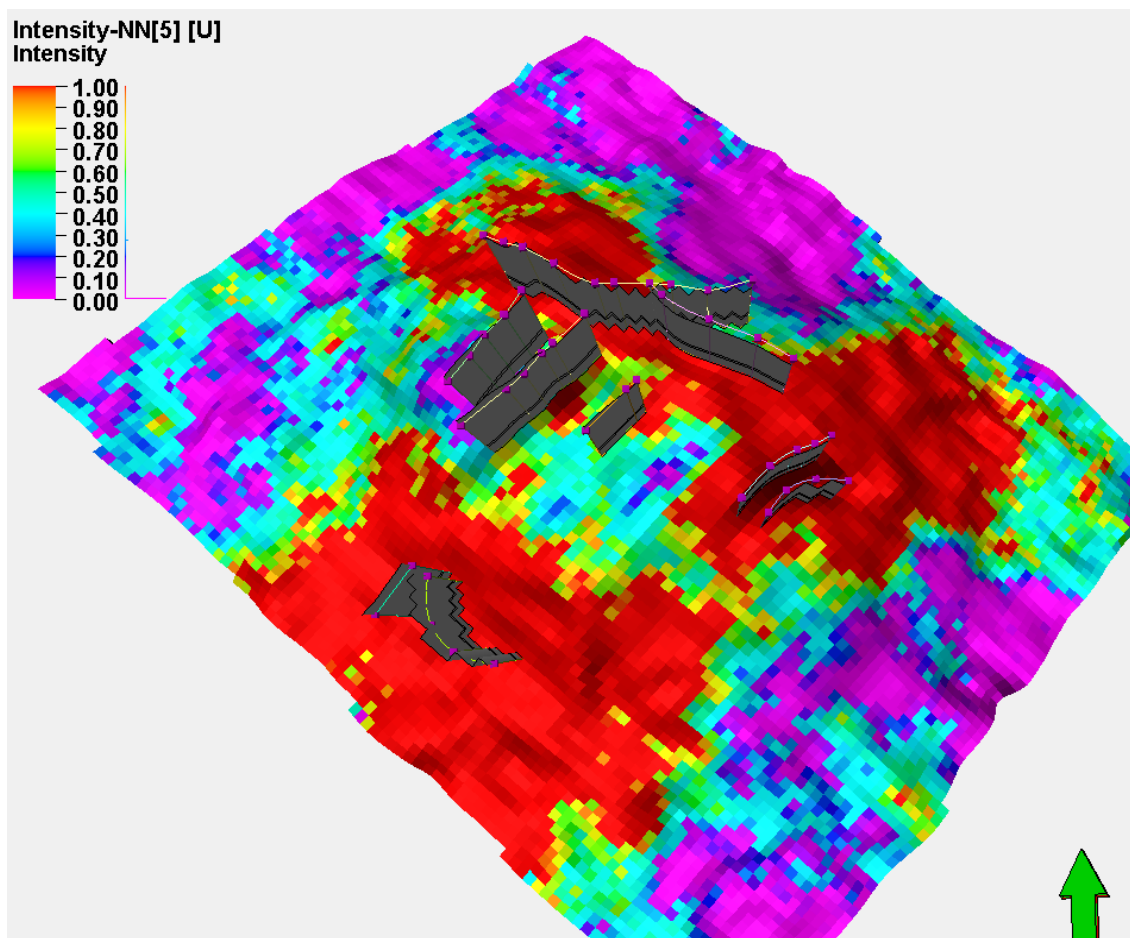
جدول (۴-۴) رابطه همبستگی بین محرک‌های شکستگی و شدت شکستگی با ۵۰۰ مرتبه تکرار

	Distance	Chaos	Edge	Variance	Curvature	Rel-AI	Ant-tracking	porosity	VCal	VDol	Intensity Total
Distance	1.000	0.70	0.760	0.578	0.221	0.845	0.278	0.023	0.624	0.634	0.516
Chaos	0.70	1.000	0.658	0.803	0.332	0.212	0.193	0.195	0.535	0.564	0.575
Edge	0.760	0.658	1.000	0.813	0.180	0.488	0.036	0.054	0.557	0.585	0.599
Variance	0.578	0.803	0.813	1.000	0.184	0.142	0.016	0.030	0.384	0.435	0.625
Curvature	0.221	0.332	0.180	0.184	1.000	0.570	0.868	0.578	0.151	0.156	0.109
Rel-AI	0.845	0.212	0.488	0.142	0.570	1.000	0.550	0.205	0.447	0.434	0.251
Ant-tracking	0.278	0.193	0.037	0.016	0.868	0.547	1.000	0.814	0.100	0.105	0.003
Porosity	0.023	0.195	0.054	0.030	0.578	0.204	0.814	1.000	0.162	0.140	0.015
VCal	0.624	0.535	0.557	0.384	0.151	0.447	0.100	0.162	1.000	0.970	0.461
VDol	0.634	0.564	0.585	0.435	0.156	0.434	0.105	0.140	0.971	1.000	0.540
Total	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.897	0.974	0.975	0.724

از دو رابطه به دست آمده از آموزش شبکه عصبی، برای توزیع شدت شکستگی در مخزن استفاده شد. شکل (۴-۱۷-الف)، توزیع شدت شکستگی را با ۱۰۰ مرتبه تکرار نشان می‌دهد. همچنین این شکل توزیع متوسطی از شدت شکستگی را در نواحی گسل خورده و انحنای مخزن نشان می‌دهد. شکل (۴-۱۷-ب)، توزیع شدت شکستگی را در مخزن با ۵۰۰ مرتبه تکرار با همان حد خطا نشان می‌دهد به طوری که توزیع شدت شکستگی بسیار مناسبی را در نواحی گسل خورده و انحنای مخزن نشان داد. با بررسی مدل‌های توزیع شدت شکستگی توسط شبکه عصبی به این مهم دست یافتیم که با افزایش تکرار نتایج قابل قبولی را در توزیع شدت شکستگی به دست آوردیم. بر همین اساس از مدل به دست آمده با ۵۰۰ مرتبه تکرار در مدل‌سازی گسسته شکستگی استفاده شد.



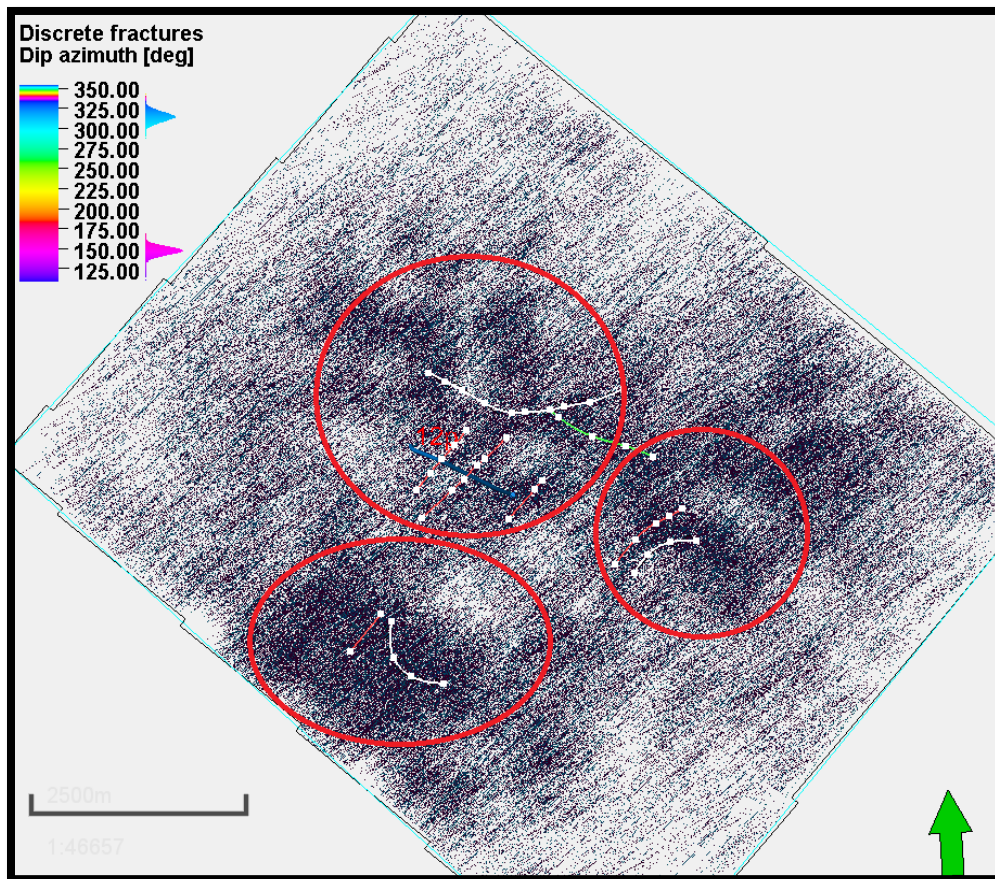
شکل (۴-۱۷-الف) توزیع شدت شکستگی به دست آمده با ۱۰۰ مرتبه تکرار



ادامه شکل (۴-۱۷-ب) توزیع شدت شکستگی به دست آمده با ۵۰۰ مرتبه تکرار

از مدل شدت شکستگی به دست آمده با ۵۰۰ مرتبه تکرار در تهیه مدل گسسته شکستگی استفاده شد و بنابر دسته‌بندی شکستگی‌ها، توزیع و جهت‌گیری آن‌ها در مخزن که در مراحل قبل برای مدل گسسته شکستگی با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای توسط روش کوکریجینگ هم مختصات صورت گرفت، مدل گسسته شکستگی در دو بعد به دست آمد.

شکل (۴-۱۸)، مدل گسسته شکستگی دو بعدی با استفاده از شبکه عصبی به کمک محرک‌های شکستگی را نشان می‌دهد. در مدل گسسته شکستگی به دست آمده تمرکز شدت شکستگی در نواحی انحنای مخزن به خصوص در نواحی گسل خوردگی مشاهده شد که مدل گسسته اولیه ساخته شده با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای را کاملاً تأیید می‌کند.

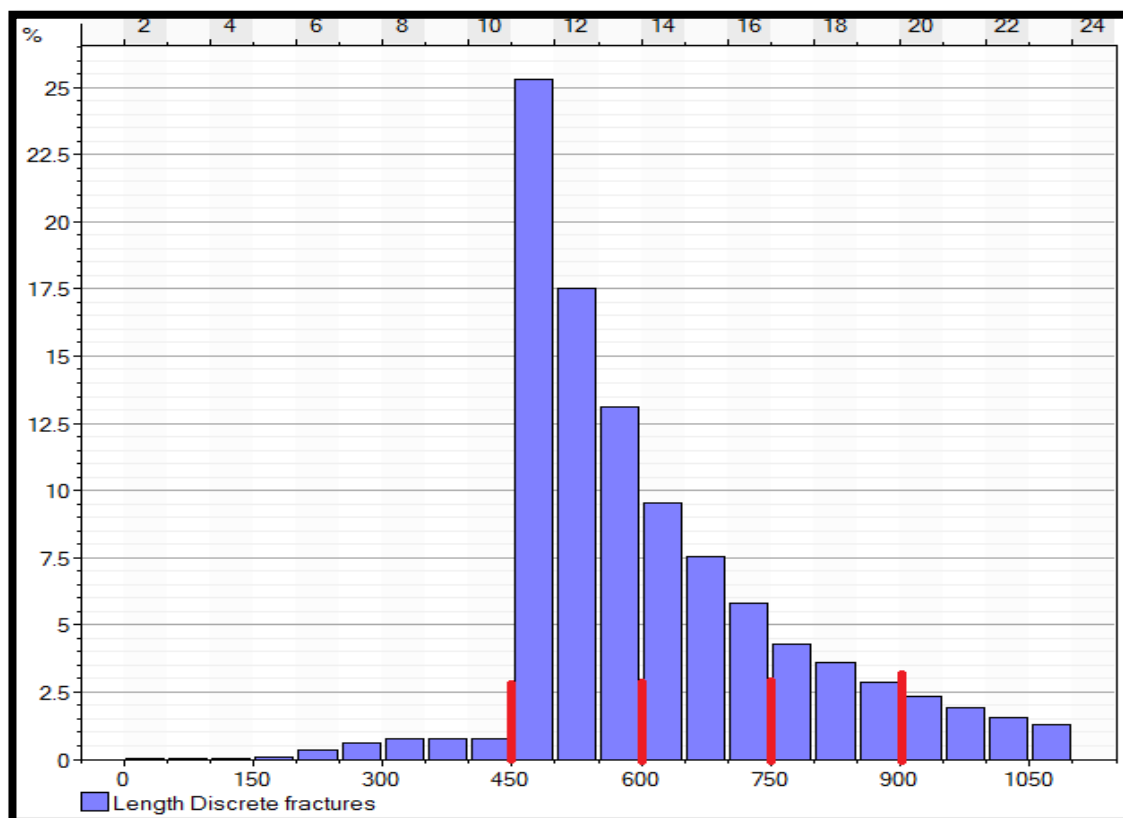


شکل (۴-۱۸) مدل گسسته شکستگی به دست آمده با استفاده از مدل توزیع شدت شکستگی با ۵۰۰ مرتبه

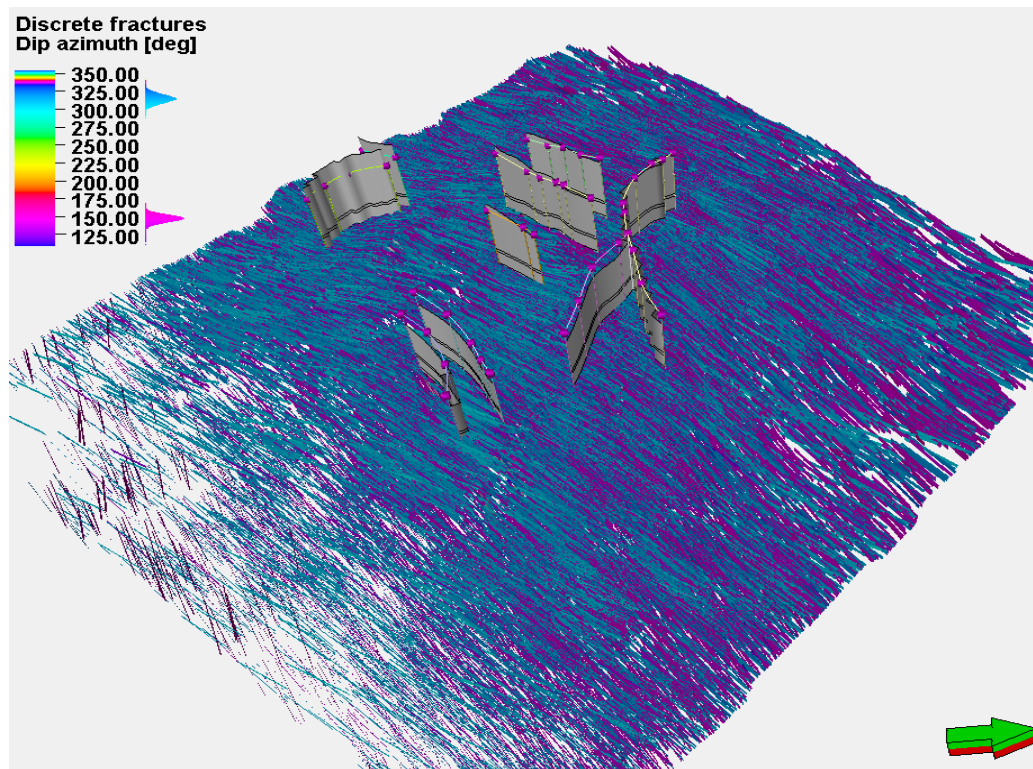
تکرار

با استفاده از رابطه توزیع توانی برای توزیع طول شکستگی در مخزن، شکل (۴-۱۹)، نمودار توزیع در محدوده اندازه‌های مختلف طول شکستگی را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار به دست آمده، محدوده اندازه شکستگی به پنج کلاس دسته‌بندی شد. طبق نمودار شکل فلان، شکستگی‌های مربوط به محدوده اندازه‌های ۰-۴۵۰ فوت، فراوانی مناسبی در مخزن از خود نشان ندادند و از آنجا که شکستگی‌های کوچک مقیاس تأثیری در جریان سیال نشان نمی‌دهند در مدل‌سازی شکستگی‌ها در نظر گرفته نشدند. شکل (۴-۲۰-الف)، مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌های ۴۵۰-۶۰۰ فوت را نشان می‌دهد. در این محدوده اندازه‌های مقدار فراوانی شکستگی، حداکثر به دست آمد که در این مقیاس، تمرکز

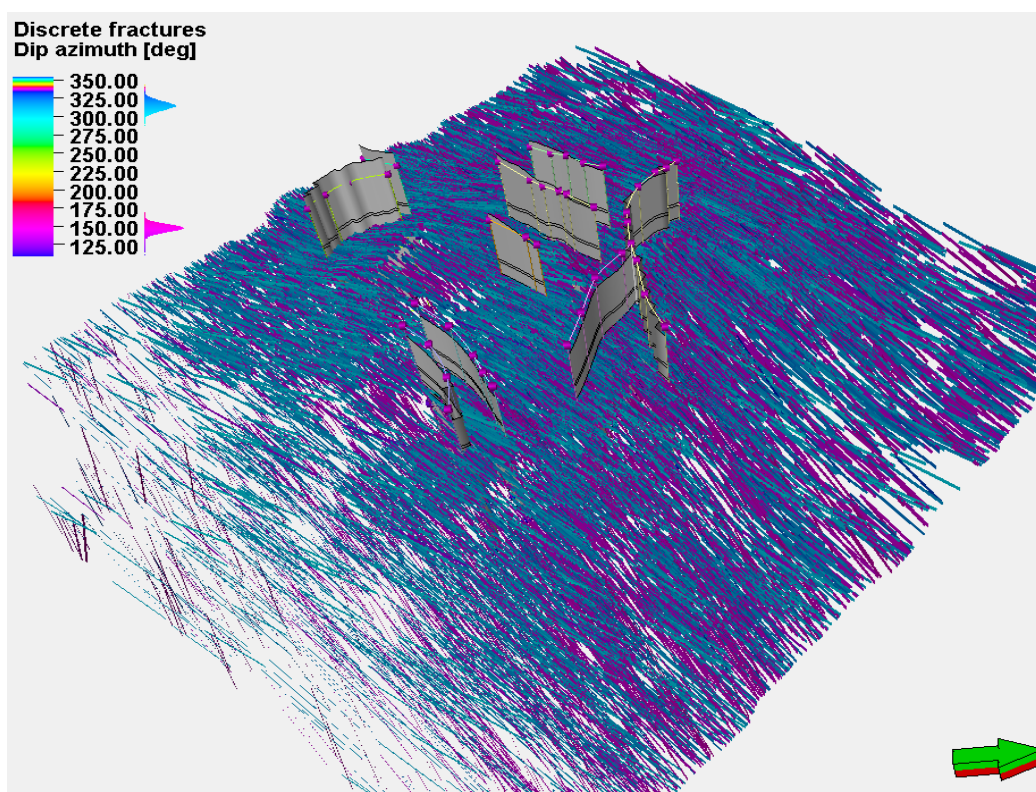
شکستگی در قسمت انحنای مخزن و بخش‌های دارای گسل خوردگی دیده شد. شکل (۴-۲۰-ب)، مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌های ۶۰۰-۷۵۰ فوت را نشان می‌دهد. این محدوده دارای فراوانی کمتری نسبت به مقیاس قبلی می‌باشد که بیش‌ترین تمرکز شکستگی را در قسمت انحنای مخزن نشان داد. شکل (۴-۲۰-ج)، مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌های ۷۵۰-۹۰۰ فوت را نشان می‌دهد. در این محدوده اندازه‌ای، شکستگی با طول بیش‌تر و فراوانی کمتری را نسبت به دو مقیاس قبل نشان داد. شکل (۴-۲۰-د)، مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌های ۹۰۰-۱۰۵۰ را نشان می‌دهد. در این مقیاس حداکثر طول شکستگی با کم‌ترین فراوانی به‌دست آمد به طوری‌که تمرکز شکستگی در نواحی گسل خورده دیده شد.



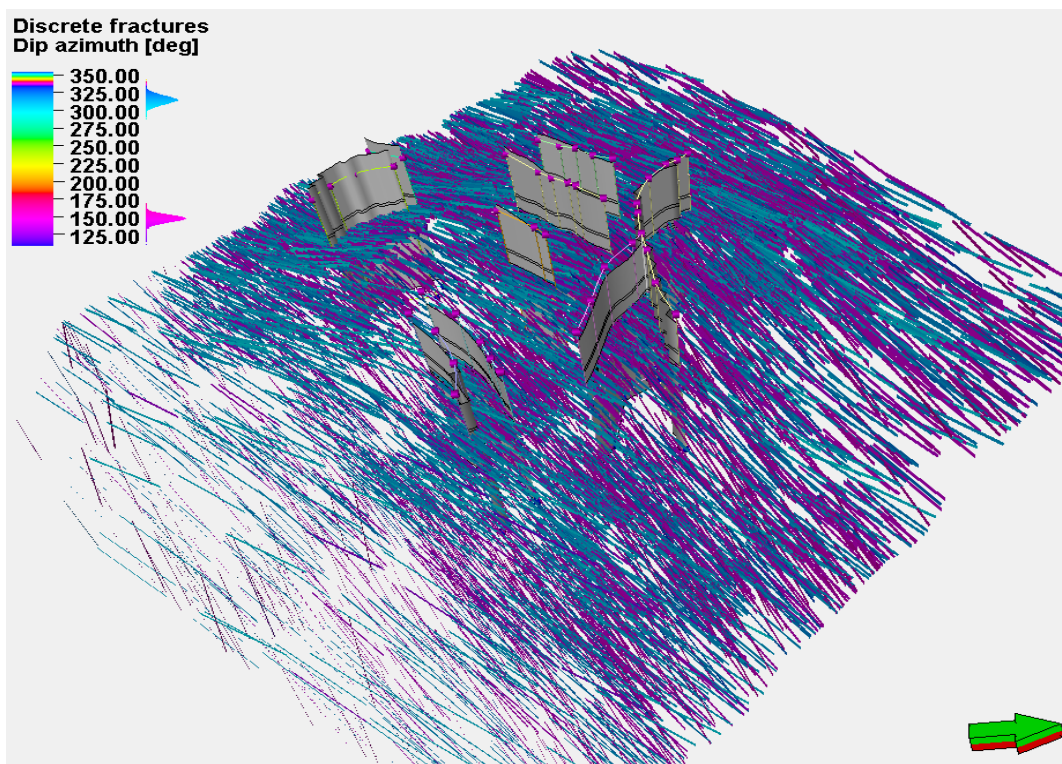
شکل (۴-۱۹) نمودار توزیع طول شکستگی و دسته‌بندی این نمودار به ۵ کلاس با محدوده اندازه‌ای متفاوت



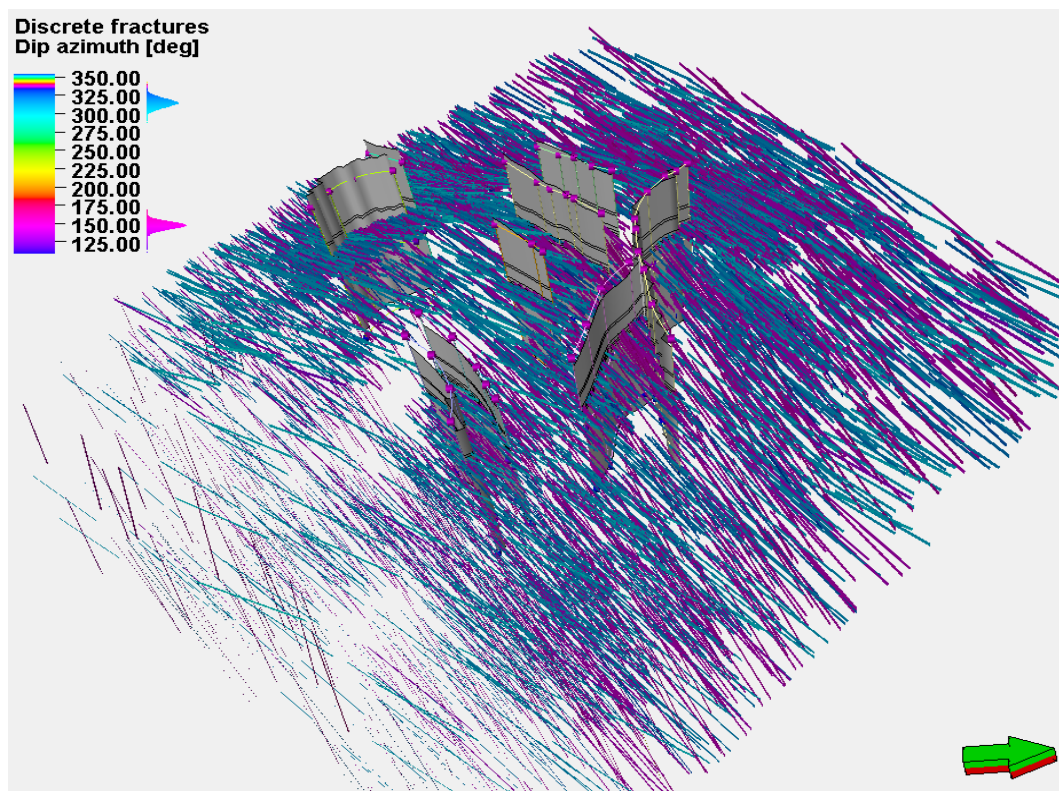
شکل (۴-۲۰-الف) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۴۵۰-۶۰۰ فوت



شکل (۴-۲۰-ب) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۶۰۰-۷۵۰ فوت



ادامه شکل (۴-۲۰-ج) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۷۵۰-۹۰۰ فوت



ادامه شکل (۴-۲۰-د) مدل گسسته شکستگی در محدوده اندازه‌ای ۹۰۰-۱۰۵۰ فوت

فصل پنجم

نتایج و پیشنهادات

نتایج و پیشنهادات حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

- منابع داده‌های موجود برای مطالعه و بررسی شکستگی‌ها، از مقیاس‌های مختلفی می‌باشند. بنابراین یافتن روشی که قادر به استفاده از تمامی داده‌های در دسترس باشد، به مدل‌سازی واقعی و دقیق‌تر شکستگی‌ها کمک شایانی خواهد کرد.
- استفاده از روش‌های زمین آماری به تنها برای توزیع شدت شکستگی مناسب نمی‌باشند. همچنین مدل‌سازی حاصل از این روش‌ها به تنهایی، دارای عدم قطعیت‌های فراوانی می‌باشند.
- استفاده از داده‌های لرزه‌ای اطلاعات بسیار ارزشمندی را در ارتباط با ساختمان مخزن در اختیار قرار می‌دهد. همچنین با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای مرتبط با شکستگی‌ها و گسل‌ها می‌توان به نحوه توزیع آن‌ها در مخزن و بررسی شکستگی‌های ایجاد شده در اثر چین‌خوردگی و یا گسل خوردگی پرداخت.
- با استفاده از روش کوکریجینگ هم‌مختصات می‌توان از اطلاعات ثانویه به عنوان ورودی، به منظور توزیع هرچه بهتر شکستگی‌ها بهره برد که در این مطالعه از نشانگرهای لرزه‌ای مرتبط با شکستگی‌ها به عنوان ورودی ثانویه استفاده شد.
- در مدل گسسته شکستگی، تولید محل شکستگی‌ها بر اساس نقشه توزیع شدت شکستگی است. با استفاده از این روش می‌توان اطلاعات پیوسته را در مدل گسسته جای داد، که این یک بهبود مشخص نسبت به مدل‌های شبکه‌ای است.
- در مدل‌های گسسته خصوصیات مختلف شکستگی‌ها مثل جهت‌یابی، اندازه و بازشدگی، جداگانه شبیه‌سازی می‌شوند و در مراحل بعدی مطالعات مخزنی، شبیه‌سازی جریان سیال با توجه به هندسه شکستگی‌ها صورت می‌پذیرد.
- با در نظر گرفتن عوامل کنترل‌کننده شکستگی از جمله سنگ شناسی، تخلخل و فاصله از گسل می‌توان به توزیع بسیار مناسبی از شکستگی‌ها در مخزن دست یافت.

- استفاده از ابزار هوش مصنوعی در یکپارچه‌سازی و سرعت بخشیدن به ترکیب داده‌های ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی کمک شایانی می‌کند. همچنین با ترکیب تمامی اطلاعات در دسترس، مدل بسیار مطلوبی را از توزیع شدت شکستگی ارائه می‌کند که این مدل به واقعیت بسیار نزدیک می‌باشد.
- با توجه به مدل‌های تراکم شکستگی به‌دست آمده توسط روش‌های کوکریجینگ هم مختصات و همچنین شبکه عصبی می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های به‌دست آمده از این دو روش با هم هم‌خوانی داشته و هر دو شدت شکستگی در بخش‌های انحنای مخزن و نواحی گسل خورده را تأیید می‌کنند.
- نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و عوامل کنترل-کننده شکستگی می‌توان عدم قطعیت در مدل‌سازی شکستگی‌ها در محل‌هایی که فاقد چاه-نمودارهای تصویری هستند را کاهش داد. بنابراین مطالعه و بررسی بر مدل‌هایی که ترکیب منابع مختلف داده‌ها را مقدور می‌سازند لازم و ضروری هستند.

پیشنهادات

- علاوه بر اطلاعات مربوط به چاه‌نمودارهای تصویری می‌توان از اطلاعات مربوط به مغزه، رخنمون، داده‌های تولید و چاه‌آزمایی برای بررسی و مطالعات دقیق‌تر شکستگی‌ها و پیش-بینی رخداد آن‌ها در مخزن بهره برد.

منابع

۱. کشاورز ا. و حسن پور ح. و تخم‌چی ب، (۱۳۹۲) "شناسایی هوشمند زون‌های شکسته با استفاده از چاه‌نمودارهای پتروفیزیکی"، اولین کنفرانس ملی مهندسی اکتشاف منابع زیرزمینی.

۲. شفیع‌زاده م. و تخم‌چی ب، (۱۳۹۰) "روشی نوین در شناسایی دقیق شکستگی‌های مخازن هیدروکربوری توسط آنالیز تصاویر FMI" ماهنامه بین‌المللی نفت و انرژی، سال هفتم، شماره شصت و چهار، ص ۵۹.

۳. ملایوسفی ا. و باغبانان ع. و فتحیان‌پور ن، (۱۳۸۹) "تعیین پارامترهای مدل‌سازی عددی شبکه درزه‌ای مجزا با استفاده از داده‌های لاگ تصویری FMI"، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن. شماره ۱۱، دوره ششم، ص ۷۱-۷۷.

۴. محبی ع. و شریفی م. و صادق شکیب م. و قزوینی ا، (۱۳۹۰) "فناوری مطالعه و مدل‌سازی شکستگی‌ها در مخازن نفت و گاز (از زمین‌شناسی تا شبیه‌سازی مخزن)" ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۸۳، ص ۲۰.

۵. بیات ع. و اصغری ا. و بحروردی ع. و توکلی م، (۱۳۹۳) "مدل‌سازی پیوسته شکستگی در مخازن کربناته با تلفیق داده‌های لرزه‌ای، زمین‌شناسی و پتروفیزیکی"، نشریه علمی-پژوهشی پژوهش نفت. شماره ۸۳، ص ۹۶-۱۰۷.

6. Anees, M. (2013), "Seismic Attribute Analysis for Reservoir Characterization", 10th Biennial International Conference and Exposition.

7. Arpat, G.B., (2005), PhD. Thesis, "Sequential simulation with patterns". Stanford University, Stanford, CA, USA.

8. Brown, A. (2001), "Understanding seismic attributes": Geophysics, 66: 47-49.

9. Bohling, G. (2005), "Introduction to geostatistics and variogram analysis". Kansas geological survey, 2.

10. Botros, F.E., Ahmad E., Reeves, D.M., and Pohll G., (2008), “on mapping fracture networks on continuum”. Water resources research.
11. Chopra, S., Marfurt, K. J. (2007), “Seismic attributes”: A new hisistoricalperspective, *Geophysics*, 70(4): 3S0-28S0.
12. 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: 208-216.
13. 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.
14. Dershowitz W. S., Einstein H.H., (1988), “Characterizing rock joint geometry with joint system models”: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 21, p. 21-51.
15. Dershowitz W. S., (1984), PhD. Thesis, “Rock joint systems: Massachusetts” *Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts*.
16. Dershowits W., P.La Pointe, and T. Doe, (2004), “Advance in discrete fracture network modeling”: *Proceedings of the U.S. Enviromental Protection Agency/National Groundwater Association Fractured Rock Conference*, P.882-894.
17. El-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): 122-141.
18. Einstein H. H., Beacher G. B. and Veneziano D., (1980), “Risk Analysis for rock slopes in open pit mines”. *Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, R80-17, Cambridge*.
19. Fossen, H. (2010). “Structural geology”. *Cambridge University Press*.
20. Ferrill, D. A., Morris, A. P., McGinnis, R. N., Smart, K. J., William, C. W., (2011), “Fault zone deformation and displacement partitioning in mechanically layered carbonates”: *The Hidden Valley fault, central Texas: AAPG Bulletin*, 95, 1383-1397, doi: 10.1306/12031010065
21. Guaiquirian, 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*.
22. Gong B., (2007), PhD. Thesis, “Effects model of fractured systems, Energy resources engineering”. *Depart, Stanford University*.
23. Glowka D. A., Schafer, Leoppe G. E., Scot D. D., Wernig M. D. And Wright E. K., (1992), “Lost Circulation Technology Development Status”. *Conf/920378*

Proceeding of Department of Energy Geothermal Program Review X, San Francisco, USA, pp.81-88.

24. Gilman J. R., (2003), "Practical Aspects of simulation of Fractured Reservoir": International forum on reservoir simulation, Baden-Baden, Germany.
25. 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): 28-35
26. Hong Tran N., (2004), PhD. Thesis, "Characterization and modeling of naturally fractured reservoirs". School of petroleum engineering. The University of New SouthWales Sydney, Australia.
27. Jenkins C, Ouenes A, Zellou A, and Wingard J., (2009), "Quantifying and predicting naturally fractured reservoir behavior with continuous fracture models". *AAPG BULLETIN*, v. 93, No.11 (November 2009), pp.1597-1608.
28. Lorenz, J., Hill, R. (1992), "Measurement and Analysis of Fracture in Core, in *Geological Studies Relevant to Horizontal Drilling*".
29. 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.
30. Long J. C. S and Billaux D. M., (1987), "From Field Data to Fracture Modelling": an Example Incorporating Spatial Structure. *Water Resources Research*, 23(7), pp.1201-1216.
31. Liao Z, Liu H, Jiang Z, Marfurt K.J, and Reches Z., (2017), "Fault damage zone at subsurface: A case study using 3D seismic attributes and a clay model analog for the Anadarko Basin, Oklahoma". *Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologists*. Vol. 5, No 2, (May 2017), p. T143-T150, 6 FIGS.
32. Meldahl, P., Hegglund, R., Bril, B., de Groot, P. (2001), "Identifying faults and gas chimneys using multiattributes and neural networks": *The Leading Edge*, 20: 474-482.
33. Marfurt, K.J., Chopra, S. (2006). "Seismic attribute mapping of structure and stratigraphy".
34. Martinez L.P., (2002), Master. Thesis, "Characterization of naturally fractured reservoirs from conventional well logs", Oklahoma University.
35. Nelson, R. A. (2001), "Geologic analysis of naturally fractured reservoirs" Second edition, Gulf Professional Publishing, Boston, USA.
36. Narr W., Tankersley T., King G., Camerlo R., Zhumagulova A., Skalinski M., Pan Y., (2010), 'Reservoir modeling to characterize dual porosity', Tengiz field, Republic of Kazakhstan: Paper SPE 139836 presented at the SPE Caspian Carbonates Technology Conference, 8-10 November.

37. Narr W., Schechter D. S., Thampson L. B., (2006), "Naturally fractured reservoir characterization": Society of Petroleum Engineers, P. I.
38. 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.
39. 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 CO₂ injection design", SPE Western Regional Meeting. Society of Petroleum Engineers.
40. Ouenes, A. (2000), "Practical application of fuzzy logic and neural networks to fractured reservoir characterization". *Computers & Geosciences*, 26(8): 953-962.
41. Ouenes, A. (2010), "Mapping natural fractures using 3D seismic and well data": Application to a shale play, Prism Seismic.
42. Pedersen, S.I., Randen, T., Sonneland, L., steen, O. (2002), "Automatic 3D fault interpretation by artificial ants", 64th EAGE conference & exhibition.
43. Price N.J., (1966), "Fault and joint development in brittle and semi-brittle Rocks," Pergamon, Oxford.
44. Roberts, A. (2001), "Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons". *First break*, 19(2): 85-100
45. 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.
46. Richard P. and Lamine S., (2017), "Integrated Fracture Characterization and Modeling in North Kuwait Carbonate Reservoirs": A case Study. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 13-16 November.
47. Rezaie, A., Nogole-Sadat, M., (2004), "fracture modeling in asmari reservoir of rage sefid oil-field by using multiwell image log", *Iranian Int. J. Sci.* 5(1), p. 107-121.
48. Stearns, D.W., Friedman, M. (1972). "Reservoirs in fractured rock": Geologic exploration methods.
49. Song, X., Shen, p. and Yuan, S. (2000), "The integrated Characterization Techniques on Reservoir Fractures", SPE paper 64766 presented at the SPE international Oil and Gas conference in China.
50. Taner, M. T., Schuelke, J. S., ODoherty, R., Baysal, E. (1994), 'Seismic attributes revisited": 64th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1104-1106.
51. Tran N.H., Chen Z. and Rahman, S.S (2003), "Object-Based Global Optimization in Modelling Discrete-Fracture Network map": A case Study. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Colorado, U.S.A., Oct 5-8.

52. Tran N.H., Rahman M.K. and Rahman S.S., (2002), "A Nested Neuro-Fractal-Stochastic Technique for Modelling Naturally Fractured Reservoirs". SPE77877, Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Melbourne, Australia, Oct.8-10.
53. Van Golf T.D., (1982), "fundamentals of fractured reservoirs engineering".
54. Wilson T.H, Smith V, and Brown A., (2015), "Developing a model discrete fracture network, drilling, and enhanced oil recovery strategy in an unconventional naturally fractured reservoir using integrated field, image log, and three-dimensional seismic data". The American Association of Petroleum Geologists. V. 99, No. 4, pp. 735-762.
55. 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.
56. 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.

Abstract

Providing a precise fracture model and distributing them in naturally fractured reservoir is one of the most complex cases in the engineering of reservoirs. Fracture modeling is only based on well data with a low impact range and hence leads to high uncertainty. Conventional fracture modeling techniques usually use intrusion detection algorithms to predict the spatial distribution of fractures. In this research, using fracture controlling factors, the fracture distribution model is obtained by combining three-dimensional seismic data and wells. For this purpose, after determining the fracture zones and their orientation using well data, the fracture determinant attributes were extracted from seismic data. These attributes have been used as fracture controller to build fracture distribution model. Fracturing algorithms were implemented on seismic data and fracture distribution models were co-motivated by collocated co-kriging method on attributes. Then, by classifying the fractures of the reservoir, a discrete fracture network model was obtained for different scales. The comparison of the discrete fracture network obtained with the proposed strategy with the conventional method showed that fracture controlling factors as fracture stimuli for distributing fractures in the reservoir can be obtained by using 3D seismic data in There are cases where there are fewer wells in the reservoir. The proposed strategy was implemented on a fractured reservoir in one of the Gulf fields, and a discrete fracture network was obtained more accurately than the conventional method. But due to the complex nature of fractures and the lack of data associated with them, the resulting models are always associated with uncertainty.

In the second phase of this research, a new method for constructing a fracture model is used to determine the model made in the first stage. This modeling is done through the relationship that may exist between fracture intensity and fracture drivers. Artificial intelligence tools are used to establish a correlation between fracture intensity and a group of fracture drivers. Fractures controlling factors such as porosity, lithology, distance from faults and seismic attributes including relative acoustic impedance, ant tracking algorithm, edge enhancement, chaos, curvature, and variance were considered as fracture drivers. We used the neural network to establish a relationship between fracture intensity and fracture drivers. For modeling, the supervised method was used. Also, all fracture controlling factors were monitored with fracture density data in wells. For training the model, 100 and 500 iteration were used. The relationships were

compared with two different replications and we found that with 500 iteration, a good correlation was found between the fracture intensity and fracture drivers, which was eventually used to construct a discrete fracture model. In the end, we came to the conclusion that in addition to the fact that the controlling factors of the fractures, with the absence of sufficient wells, play important and important role in the fracture modeling, a very good distribution of fracture intensity In the reservoir they offer.

Keywords: Fractured Reservoir, Fracture Modeling, Discrete Fractures Network, FMI, Neural Network, Fracture Intensity, Seismic Attributes, Fracture sets, Fractures Distribution



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering
M.Sc. Thesis in Petroleum Engineering-Exploration

**Fracture modeling in naturally fractured reservoir by
discrete fracture model in one of the oil fields of the Persian
Gulf**

By

Saeed Mollaesmaeili

Supervisor:

Dr. Mehrdad Soleimani

Dr. Seyed Reza Ghavami

January 2018