

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نفت - اکتشاف

مدل سازی هیبریدی گسل ها و شکستگی ها با استفاده از نشانگرهای لرزه ای

و نمودار FMI در یکی از میادین نفتی خلیج فارس

نگارنده : ایمان صمدی

اساتید راهنما

دکتر مهرداد سلیمانی منفرد

دکتر معصومه کردی

اساتید مشاور

مهندس امیر حمدی

شهریور ۱۳۹۷



تقدیرم به

خدای متعال که هرچه دارم از اوست

با درود فراوان به روح پر فتوح پدر بزرگوارم

و سپاس بیکران بر همدلی و همراهی مادر دلسوز و مهربانم و همسر عزیزم که نشانه  
لطف الهی در زندگی من است.

## تقدیر و تشکر

از اساتید گرامی جناب آقای دکتر مهرداد سلیمانی منفرد و خانم دکتر معصومه کردی بسیار سپاسگزارم چرا که با راهنمایی‌ها و کمک‌هایشان همیشه مرا همراهی نمودند و قطعاً بدون زحمات ایشان ترویج این پایان‌نامه ممکن نبود. از استاد مشاور مترم مهندس امیر احمدی کمال تشکر را دارم که رهنمودهای مفیدشان همواره راهگشا بوده است. همچنین از همسر عزیزم خانم مهندس زهرا امیری صمیمانه متشکرم که بدون کمک‌های فراوان، تشویق و حمایتش کاری از پیش نمی‌رفت. از مهندس ممدور قاسمی و مهندس سجاد ذییمی به دلیل یاری‌ها و راهنمایی‌های بی‌شمراشت ایشان که حل بسیاری از مسائل را برایم آسان‌تر نمودند سپاسگزارم. باشد که این فردترین بتواند بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

## چکیده

مدل‌سازی شکستگی‌ها به‌عنوان بخشی از شبیه‌سازی و توصیف در مخازن شکسته طبیعی امری ضروری برای کاربردهای متعدد مخازن است. یک مدل شبکه شکستگی باید تمام عناصر و خواص شکستگی‌ها را که نقش مهمی در حیات تولید یک میدان دارند شامل شود. با توجه به تأثیر گسل‌های میدان بر روی شکستگی‌ها و تحت تأثیر قرار گرفتن خواص شکستگی‌های بزرگ و کوچک، برقرار کردن یک رابطه‌ی معنی‌دار بین همه‌ی این خواص یک موضوع چالش برانگیز است. روش‌های متفاوتی برای تعیین خصوصیات مخازن شکسته شده طبیعی و شبیه‌سازی جریان سیال وجود دارند که به سه دسته مدل‌های پیوسته، مدل گسسته و مدل‌های ترکیبی تقسیم می‌گردند. ساخت مدل هیبریدی توسط اطلاعات آماری حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده در یک میدان صورت می‌گیرد. در این مطالعه با استفاده از نمودارهای تصویری و دیگر نمودارهای پتروفیزیکی سه چاه و داده‌های مربوط به مکتب لرزه‌ای میدان مورد مطالعه مدل‌سازی هیبریدی انجام شده است. با کمک داده‌های حاصل از نمودارهای تصویری زون‌های شکستگی با شدت شکستگی‌های متفاوت شناسایی شدند. توزیع شدت شکستگی در میدان با عدم قطعیت‌هایی همراه است. برای این منظور از داده‌های ثانویه که محرک‌های شکستگی هستند می‌توان بهره برد. در اینجا با کمک الگوریتم GRFS در مدل‌سازی پتروفیزیکی، از نشانگرهای لرزه‌ای به‌عنوان داده‌های ثانویه برای بهبود توزیع شدت شکستگی استفاده شد. با استفاده از شبکه عصبی انواع شدت شکستگی‌های بهبود یافته به‌عنوان ورودی باهم ادغام شد و یک شدت شکستگی مطلوب به‌عنوان خروجی از آن حاصل شد. ضریب همبستگی بین خروجی شبکه عصبی و محرک‌های شکستگی ۰/۹۳ به دست آمد؛ این بیان‌کننده یک رابطه خیلی خوب بین محرک‌های شکستگی و شدت شکستگی حاصل از شبکه عصبی است. با کمک نشانگرهای لرزه‌ای به تعیین، تفسیر و مدل‌سازی گسل‌های میدان پرداخته شد. بر اساس اعتبار سنجی انجام‌شده، تفسیر گسل‌ها و مدل‌سازی آن‌ها از دقت بالایی برخوردار هستند. سپس با دسته‌بندی شکستگی‌ها و گسل‌ها

در ۴ زون شکستگی مدل شبکه گسسته شکستگی ساخته شد. در ادامه با تعیین حد آستانه ۲۵۰ ft برای طول شکستگی‌ها مدل شکستگی ضمنی ساخته شد. در آخر مدل هیبریدی با بزرگ‌نمایی کردن مدل‌های شبکه شکستگی (DFN و IFM) با استفاده از یک روش آماری (oda) به دست آمد. خروجی مدل هیبریدی شامل تخلخل شکستگی  $\phi_f$ ، تراوایی شکستگی  $K_f$  و فاکتور سیگما  $\sigma$  است که می‌تواند در شبیه‌سازی مخازن مورد استفاده قرار بگیرد. تخلخل شکستگی در ناحیه گسل خوردگی دارای بیشترین مقدار است و بیشترین تراوایی در انحنای مخزن و در جهت غربی دیده می‌شود. همچنین فاکتور سیگما در انحنای مخزن و به سمت غرب میدان دارای بیشترین میزان است. در قسمت شمال شرقی میدان، فاکتور سیگما به کمترین حد خود می‌رسد و این نشان‌دهنده عدم ارتباط بین ماتریکس و شکستگی‌ها در این قسمت میدان است.

**کلمات کلیدی:** مدل‌سازی هیبریدی، مدل شکستگی ضمنی، شبکه گسسته شکستگی،

نشانگرهای لرزه‌ای، FMI

## فهرست مطالب

### فصل اول: مقدمه و کلیات

- ۱-۱- مقدمه ..... ۲
- ۲-۱- اهمیت شکستگی ..... ۳
- ۳-۱- ضرورت مدل سازی شکستگی های طبیعی ..... ۴
- ۴-۱- بیان مسئله ..... ۵
- ۵-۱- سابقه تحقیق ..... ۷
- ۶-۱- ساختار پایان نامه ..... ۱۱

### فصل دوم: طبقه بندی و مشخصه های شکستگی ها

- ۱-۲- مقدمه ..... ۱۴
- ۲-۲- طبقه بندی شکستگی ها ..... ۱۴
- ۱-۲-۲- شکستگی های تکتونیکی ..... ۱۴
- ۲-۲-۲- شکستگی های ناحیه ای ..... ۱۶
- ۳-۲-۲- شکستگی های انقباضی ..... ۱۷
- ۳-۲- شکستگی در مخازن کربناته ..... ۱۷
- ۴-۲- انواع شکستگی ها ..... ۲۰
- ۱-۴-۲- شکستگی های طبیعی ..... ۲۰
- ۲-۴-۲- شکستگی های القایی توسط سرما ..... ۲۱
- ۳-۴-۲- شکستگی های توسعه یافته ..... ۲۲

- ۲۳ ..... ۵-۲-۵- مشخصه‌های شکستگی‌ها
- ۲۳ ..... ۲-۵-۱- فاصله بین شکستگی‌ها
- ۲۴ ..... ۲-۵-۲- بازشدگی (دهانه) شکاف
- ۲۵ ..... ۲-۵-۳- طول شکستگی
- ۲۵ ..... ۲-۵-۴- ریخت‌شناسی شکستگی
- ۲۶ ..... ۲-۵-۵- جهت‌گیری شکستگی‌ها
- ۲۷ ..... ۲-۵-۶- چگالی شکستگی

### فصل سوم: روش‌شناسی تحقیق

- ۳۰ ..... ۳-۱- مقدمه
- ۳۰ ..... ۳-۲-۲- انواع مدل‌سازی‌های شبکه شکستگی
- ۳۱ ..... ۳-۲-۱- مدل‌های پیوسته
- ۳۲ ..... ۳-۲-۲- مدل‌های شبکه گسسته شکستگی
- ۳۴ ..... ۳-۲-۳- روش‌های ترکیبی
- ۳۴ ..... ۳-۲-۳- روش‌های مطالعه شکستگی
- ۳۵ ..... ۳-۳-۱- نمودارهای تصویری
- ۳۸ ..... ۳-۳-۲- نمودار چگالی
- ۳۹ ..... ۳-۳-۳- نمودار صوتی
- ۴۰ ..... ۳-۳-۴- نمودار نوترون
- ۴۰ ..... ۳-۳-۵- اطلاعات مغزه

۴۱	۳-۳-۶- اطلاعات لرزه‌ای
۴۱	۳-۴- تفسیر و مدل‌سازی گسل‌ها
۴۲	۳-۴-۱- نشانگرهای لرزه‌ای
۴۳	۳-۵- مدل‌سازی هیبریدی
۴۶	۳-۵-۱- روش مبتنی بر جریان
۴۶	۳-۵-۲- روش Oda
۴۶	۳-۵-۳- شبکه گسسته شکستگی
۴۷	۳-۵-۴- مدل شکستگی ضمنی

#### فصل چهارم: آنالیز شکستگی‌ها و مدل‌سازی هیبریدی در میدان مورد مطالعه

۵۰	۴-۱- مقدمه
۵۰	۴-۲- زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه
۵۲	۴-۲-۱- اطلاعات و داده‌های مورد استفاده
۵۳	۴-۳- تحلیل شکستگی‌ها
۵۴	۴-۳-۱- تعیین شکستگی‌های مخزن در چاه 2S-50
۵۹	۴-۳-۲- تعیین شکستگی‌های مخزن در چاه 2skd-1
۶۲	۴-۴- شناسایی گسل‌ها
۶۷	۴-۴-۱- تفسیر گسل‌ها
۷۴	۴-۴-۲- اعتبار سنجی تفسیر گسل‌ها
۷۵	۴-۴-۳- مدل‌سازی قطعی گسل‌ها

- ۷۸ ..... ۵-۴- ساخت مدل های IFM و DFN
- ۷۹ ..... ۴-۵-۱- نمودار شدت شکستگی
- ۸۰ ..... ۴-۵-۲- بزرگ مقیاس کردن نمودار شدت شکستگی
- ۸۳ ..... ۴-۵-۳- تعیین زون های شکستگی
- ۸۶ ..... ۴-۵-۴- ساخت مدل پتروفیزیکی
- ۹۰ ..... ۴-۵-۵- بهبود مدل شدت شکستگی
- ۹۵ ..... ۴-۵-۶- ساخت مدل شدت شکستگی با استفاده از شبکه عصبی
- ۹۷ ..... ۴-۵-۷- ساخت مدل شبکه گسسته شکستگی
- ۱۰۳ ..... ۴-۵-۸- ساخت مدل شکستگی ضمنی
- ۱۰۴ ..... ۴-۵-۹- اعتبار سنجی مدل گسسته شکستگی
- ۱۰۷ ..... ۴-۶- مدل سازی هیبریدی

#### فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها

- ۱۱۶ ..... ۵-۱- نتیجه گیری
- ۱۱۷ ..... ۵-۲- پیشنهادها
- ۱۱۸ ..... منابع فارسی
- ۱۱۹ ..... منابع انگلیسی



## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: توسعه انواع شکستگی‌ها در ارتباط با چین خوردگی. .... ۱۶
- شکل ۲-۲: انواع مخازن شکسته از نظر تخلخل و تراوایی ..... ۱۹
- شکل ۳-۲: نمایش انواع شکستگی‌های طبیعی در چاه‌نمودارهای تصویری. .... ۲۱
- شکل ۴-۲: شکستگی‌های القایی در جهت تنش بیشینه و شکستگی‌های طبیعی در جهت تنش کمینه. .... ۲۲
- شکل ۱-۳: نمایش مدل پیوسته. الف: مدل چوب کبریتی ب: مدل لایه‌ای ج: مدل حبه قندی ..... ۳۲
- شکل ۲-۳: الف: تصویر بازه شده استوانه چاه و نمایش موج سینوسی حاصل از باز شدن پدیده‌ی صفحه‌ای ب: تصویر استوانه از دیوار چاه و صفحه‌ای که چاه را به صورت قائم قطع کرده است. .... ۳۶
- شکل ۳-۳: نمونه‌ای از شکستگی‌های باز در لاگ FMI. .... ۳۷
- شکل ۴-۳: الف: نمودار چگالی ب: نمودار صوتی ج: نمودار نوترون. در سه ناحیه مشخص شده بر روی نمودار چگالی با توجه به روند کاهش چگالی می‌توان نتیجه گرفت که میزان تخلخل و شکستگی افزایش یافته است. همچنین در نمودار صوتی با توجه به روند افزایشی در سه ناحیه مشخص شده می‌توان نتیجه گرفت که تخلخل و شکستگی افزایش یافته است. .... ۴۰
- شکل ۵-۳: روند ساخت مدل هیبریدی با ترکیب دو مدل IFM و DFN. .... ۴۵
- شکل ۱-۴: مکعب داده‌های لرزه‌ای میدان مورد مطالعه، که سازند عرب به‌عنوان افق مخزنی هدف روی آن مشخص شده است. .... ۵۲
- شکل ۲-۴: نمایش موقعیت چاه‌ها بر روی نقشه خطوط تراز زیرسطحی میدان مورد مطالعه ..... ۵۳
- شکل ۳-۴: نمایش In Line و X Line روی مکعب داده‌های لرزه‌ای میدان مورد مطالعه ..... ۵۳
- شکل ۴-۴: نمایش نمونه‌ای از شکستگی‌های باز در تصویر FMI در چاه 2S-50 به‌همراه شیب و آزیموت آن‌ها ..... ۵۵
- شکل ۵-۴: صحت تشخیص شکستگی‌های گرفته شده روی نمودار FMI، با کمک نمودارهای

- پتروفیزیکی (نوترون، صوتی و چگالی)..... ۵۷
- شکل ۴-۶: خصوصیات شکستگی‌های باز در چاه 2S-50. الف: تجمع غالب شکستگی‌ها با توجه به شیب و آزمون آن‌ها ب: آزمون شکستگی‌ها ج: امتداد شکستگی‌ها ..... ۵۸
- شکل ۴-۷: نمودار هیستوگرام مربوط به کمینه و بیشینه، میانگین و بیشترین فراوانی مقدار شیب به- دست آمده در چاه 2S-50 ..... ۵۹
- شکل ۴-۸: نمونه‌ای از شکستگی‌های باز شناسایی شده در چاه 2SKD1 ..... ۶۰
- شکل ۴-۹: خصوصیات شکستگی‌های باز در چاه 2SKD1. الف: تجمع شکستگی‌ها با توجه به شیب و آزمون آن‌ها ب: آزمون شکستگی‌ها ج: امتداد شکستگی‌ها ..... ۶۱
- شکل ۴-۱۰: نمودار هیستوگرام مربوط به شکستگی‌های چاه 2SKD1 ..... ۶۲
- شکل ۴-۱۱: اثر گسل‌ها بر روی مقطع نشانگر انحناء، در این شکل گسل‌های بزرگ‌مقیاس و اصلی میدان با پیکان نشان داده شده‌اند. اکثر گسل دارای جهت‌یافتگی شمال غرب-جنوب شرق هستند. ۶۳
- شکل ۴-۱۲: نمایش اثر گسل‌ها بر روی افق عرب پایینی توسط نشانگر سطحی واریانس. پیکان‌ها نشان‌دهنده‌ی محل گسل‌ها می‌باشند، بیشترین تمرکز گسل‌ها در مرکز و جنوب میدان مورد مطالعه است. ..... ۶۵
- شکل ۴-۱۳: اثر گسل‌ها بر روی سازند عرب پایینی توسط نشانگر سطحی آشفستگی. محل گسل‌ها با پیکان‌ها نشان داده شده است. .... ۶۵
- شکل ۴-۱۴: الگوریتم ردیابی مورچه بر روی مکعب لرزه‌ای، پیکان‌ها نشان‌دهنده گسل‌های استخراج شده از این الگوریتم می‌باشد. این الگوریتم توانسته است به‌خوبی علاوه بر گسل‌های بزرگ‌مقیاس، گسل‌های کوچک‌مقیاس را که نشانگرهای دیگر قادر به نمایش آن نبودند را نشان دهد. .... ۶۷
- شکل ۴-۱۵: مراحل انجام تفسیر و استخراج گسل‌ها از مکعب لرزه‌ای میدان مورد مطالعه. .... ۶۸
- شکل ۴-۱۶: گسل‌های استخراج شده از مکعب لرزه‌ای، با روش دستی. .... ۶۹
- شکل ۴-۱۷: مجموعه گسلی استخراج شده از مکعب الگوریتم ردیابی مورچه، با روش خودکار. .... ۷۰

- شکل ۴-۱۸: شیب گسل‌های استخراج شده با روش دستی. .... ۷۱
- شکل ۴-۱۹: شیب مجموعه گسلی استخراج شده با روش خودکار. .... ۷۱
- شکل ۴-۲۰: آزمون شیب گسل‌های استخراج شده با روش دستی. .... ۷۲
- شکل ۴-۲۱: آزمون شیب مجموعه گسلی استخراج شده با روش خودکار. .... ۷۲
- شکل ۴-۲۲: مساحت گسل‌های استخراج شده با روش دستی. .... ۷۳
- شکل ۴-۲۳: مساحت مجموعه گسلی استخراج شده با روش خودکار. .... ۷۳
- شکل ۴-۲۴: نمودار تصویری چاه 2S-50، منحنی آبی رنگ نشان‌دهنده گسل موجود در دیواره چاه است. این گسل دارای شیب ۴۶ درجه و آزمون شیب ۲۲۵ درجه می‌باشد. .... ۷۴
- شکل ۴-۲۵: در این شکل گسل‌های تفسیر شده مشاهده می‌شود که یکی از این گسل‌ها در محل چاه 2S-50 برخورد داشته و به خوبی قابل شناسایی است. .... ۷۵
- شکل ۴-۲۶: مدل قطعی گسل‌ها شامل گسل‌های استخراج شده به روش دستی (Code 1) و خودکار (Code 2) ..... ۷۷
- شکل ۴-۲۷: آزمون شیب هر یک از گسل‌های موجود در مدل قطعی گسل‌ها نشان می‌دهد اکثر گسل‌ها دارای روند شمال غربی-جنوب شرقی هستند. .... ۷۷
- شکل ۴-۲۸: نمایش شیب هر یک از گسل‌های موجود در مدل قطعی گسل‌ها نشان می‌دهد که اکثر گسل‌ها دارای شیب بالای ۸۰ درجه هستند. .... ۷۸
- شکل ۴-۲۹: نمایش طول هر یک از گسل‌های موجود در مدل قطعی گسل‌ها. بیشترین طول مربوط به گسل‌های مرکز میدان می‌باشد. .... ۷۸
- شکل ۴-۳۰: نمایش نمودارهای شدت شکستگی به همراه بزرگ‌نمایی این نمودارها در چاه‌های 2s-50 و 2skd-1 ..... ۸۲
- شکل ۴-۳۱: مقایسه نمودارهای ستونی شدت شکستگی، قبل و بعد از بزرگ‌مقیاس کردن. این اختلاف کم در میزان فراوانی، نشان‌دهنده صحت بزرگ‌مقیاس سازی است. .... ۸۳

شکل ۴-۳۲: تعیین زون‌های شکستگی با توجه به نمودار تجمعی و نمودار شدت شکستگی در چاه 2s50. در این شکل شیب و آزمون شیب شکستگی مربوط به هر زون به خوبی مشاهده می‌شود. ... ۸۵

شکل ۴-۳۳: تعیین زون‌های شکستگی با توجه به نمودار تجمعی و نمودار شدت شکستگی در چاه 2skd-1. در این شکل شیب و آزمون شیب شکستگی‌های مربوط به زون شکستگی ۴ به خوبی مشاهده می‌شود. .... ۸۶

شکل ۴-۳۴: مدل توزیع شدت شکستگی در زون ۱. .... ۸۸

شکل ۴-۳۵: مدل توزیع شدت شکستگی در زون ۲. .... ۸۹

شکل ۴-۳۶: مدل توزیع شدت شکستگی در زون ۳. .... ۸۹

شکل ۴-۳۷: مدل توزیع شدت شکستگی در زون ۴. .... ۹۰

شکل ۴-۳۸: ضریب همبستگی  $0/73$  بین شدت نشانگر واریانس به‌عنوان ورودی ثانویه و توزیع شدت شکستگی میدان. .... ۹۲

شکل ۴-۳۹: توزیع شدت شکستگی به‌دست آمده در زون ۲ توسط روش کوکریجینگ با اعمال نشانگر واریانس. .... ۹۲

شکل ۴-۴۰: ضریب همبستگی  $0/61$  بین شدت نشانگر انحنا به‌عنوان ورودی ثانویه و توزیع شدت شکستگی میدان. .... ۹۳

شکل ۴-۴۱: توزیع شدت شکستگی به‌دست آمده در زون ۲ توسط روش کوکریجینگ با اعمال نشانگر انحنا. .... ۹۳

شکل ۴-۴۲: ضریب همبستگی  $0/79$  بین شدت نشانگر آشفستگی به‌عنوان ورودی ثانویه و توزیع شدت شکستگی میدان. .... ۹۴

شکل ۴-۴۳: توزیع شدت شکستگی به‌دست آمده در زون ۲ توسط روش کوکریجینگ با اعمال نشانگر آشفستگی. .... ۹۴

شکل ۴-۴۴: ضریب همبستگی  $0/81$  بین شدت الگوریتم ردیابی مورچه به‌عنوان ورودی ثانویه و

- توزیع شدت شکستگی میدان. .... ۹۵
- شکل ۴-۴۵: توزیع شدت شکستگی به دست آمده در زون ۲ توسط روش کوکریچینگ با اعمال الگوریتم ردیابی مورچه. .... ۹۵
- شکل ۴-۴۶: داده‌های شکستگی‌ها، حاصل از چاه‌نمودارهای تصویری بر روی استریونت. .... ۱۰۰
- شکل ۴-۴۷: توزیع و تمرکز جهت‌گیری شکستگی‌ها در مدل‌سازی گسسته شکستگی. .... ۱۰۰
- شکل ۴-۴۸: مدل سه‌بعدی شبکه گسسته شکستگی ساخته شده در ۴ زون شکستگی مخزن مورد مطالعه. .... ۱۰۲
- شکل ۴-۴۹: مدل سه‌بعدی شبکه گسسته شکستگی به همراه دسته شکستگی‌ها و گسل‌ها. .... ۱۰۲
- شکل ۴-۵۰: توزیع طول شکستگی‌ها و تعیین حد آستانه ۲۵۰ فوت برای مشخص کردن مرز بین مدل‌سازی DFN و IFN. .... ۱۰۴
- شکل ۴-۵۱: مدل شکستگی ضمنی ساخته شده توسط شکستگی‌های کوچک مقیاس. .... ۱۰۴
- شکل ۴-۵۲: نمودار شدت شکستگی حاصل از مدل شبکه شکستگی (intensity NN) در چاه 2S-57 در مقابل نمودار شدت شکستگی حاصل از چاه‌نمودار تصویری (intensity [U]) در همان چاه. .... ۱۰۶
- شکل ۴-۵۳: ضریب همبستگی  $0/83$  بین شدت شکستگی حاصل از چاه نمودار تصویری (intensity) در چاه 2S-57 با شدت شکستگی حاصل از مدل شبکه شکستگی (intensity NN) در همان چاه. .... ۱۰۷
- شکل ۴-۵۴: ورودی‌های لازم جهت ساخت مدل هیبریدی، ادغام دو مدل DFN و IFM توسط مدل‌سازی هیبریدی. .... ۱۰۸
- شکل ۴-۵۵: تخلخل ماتریکس حاصل از مدل‌سازی هیبریدی، کمترین مقدار تخلخل ماتریکس در قسمت گسل خوردگی مشاهده می‌شود. .... ۱۰۹
- شکل ۴-۵۶: تخلخل شکستگی حاصل از مدل‌سازی هیبریدی، همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار تخلخل شکستگی مربوط به ناحیه گسل خورده میدان می‌باشد. .... ۱۱۰

- شکل ۴-۵۷: میزان تراوایی شکستگی در جهت i سلولها در شبکه مدل سازی هیبریدی ..... ۱۱۱
- شکل ۴-۵۸: میزان تراوایی شکستگی در جهت j سلولها در شبکه مدل سازی هیبریدی ..... ۱۱۱
- شکل ۴-۵۹: میزان تراوایی شکستگی در جهت k سلولها در شبکه مدل سازی هیبریدی ..... ۱۱۲
- شکل ۴-۶۰: فاکتور سیگمای حاصل از مدل سازی هیبریدی، این فاکتور نشان دهنده میزان ارتباط ماتریکس و شکستگی در مخزن می باشد. این پارامتر در بخش انحنای مخزن به سمت غرب دارای بیشترین مقدار و در سمت شمال شرقی دارای کمترین مقدار است. .... ۱۱۳
- شکل ۴-۶۱: نمودار هیستوگرام فراوانی فاکتور سیگما در میدان مورد مطالعه ..... ۱۱۴

## فهرست جداول

جدول ۴-۱: پارامترهای مختلف الگوریتم ردیابی مورچه، استفاده شده در این مطالعه..... ۶۷

جدول ۴-۲: رابطه همبستگی بین محرکهای شکستگی و شدت شکستگی حاصل از شبکه عصبی ۹۶

جدول ۴-۳: پارامترهای جهت‌گیری شکستگی‌های میدان مورد مطالعه..... ۹۹





-فصل اول

مقدمه و کلیات

## ۱-۱- مقدمه

با توجه به اینکه مخازن کربناته در ایران به‌عنوان مهم‌ترین، پیچیده‌ترین و اصلی‌ترین منابع نفت و گاز کشور به شمار می‌روند و با توجه به اهمیت شکستگی‌ها در تولید از مخازن شکسته، یکی از چالش‌های متخصصان صنعت نفت در این مناطق، شناسایی سیستم‌های شکستگی، مدل‌سازی و تعیین مسیر جریان سیالات است [مهدی تدینی، ۱۳۹۳]. وجود شکستگی‌های سنگ مخزن گاهی باعث ایجاد مشکل و در برخی موارد باعث ایجاد فرصت در مراحل مختلف توسعه مخزن از اکتشاف تا تولید می‌شوند. در مخازن با شکستگی‌های زیاد، ویژگی‌هایی مثل چگالی شکستگی و جهت‌گیری آن‌ها از جنبه‌های اقتصادی توسعه‌ی مخزن حائز اهمیت هستند که این موضوع اغلب به دلیل اثری است که بر تراوایی سنگ مخزن می‌گذارد [Van Golf, 1982].

مدل‌سازی جامع مخازن شکافدار، در زمینه‌های مختلف علوم زمین خصوصاً در مهندسی نفت حائز اهمیت است. با توجه به ناهمگنی عظیم این نوع مخازن، نقش اساسی شکستگی‌ها در کیفیت مخازن شکافدار روشن است. بنابر عوامل مختلفی همچون جنس سنگ، اغلب این مخازن تراوایی زمینه پایینی دارند و شکستگی‌ها هدایت‌کننده اصلی سیال محسوب می‌شوند. علاوه بر این، مشکلات مهندسی بسیاری در رویارویی با شکستگی‌ها در مخازن شکافدار وجود دارد. برای مثال هرزروی گل حفاری در نواحی دارای شکستگی مشکل افزایش زمان و هزینه حفاری را به وجود می‌آورد.

هدف از مدل‌سازی مخازن شکسته طبیعی ساختن مدل‌های عددی از سنگ و شکستگی‌ها، آماده‌سازی داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی و آنالیزهای شبیه‌سازی جریان سیال است. لازمه این کار، داشتن دانش کافی از شکستگی‌ها و تطابق آن‌ها در موقعیت چاه و نواحی بین چاه‌ها است. تعیین باز و بسته بودن آن‌ها، میزان بازشدگی دهانه، امتداد و جهت شیب آن‌ها، تراکم شکستگی‌ها و درنهایت ارائه الگویی مناسب از شکستگی‌های مخازن، کمک فراوانی به برنامه‌های توسعه و تولید میدان‌ها نفتی می‌نماید

[Tran, 2004]. با توجه به مطالب ذکرشده، آگاهی از شبکه شکستگی‌های تحت الارضی، در گسترش میدان‌های نفتی و استخراج منابع نفتی حائز اهمیت است و تخمین دقیق ذخایر و پروفیل‌های تولیدی با بازدهی بیشینه را مقدور می‌سازد.

## ۱-۲- اهمیت شکستگی

شکستگی‌ها یکی از مهم‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی محسوب می‌شوند. البته به علت فرآیندهای پیچیده‌ای که در تشکیل آن‌ها دخالت دارد، تحلیل و بررسی آن‌ها به‌ویژه از دیدگاه ساختاری، مشکل بوده اما در چند سال گذشته به دلیل اهمیت زیاد آن‌ها، شکستگی‌ها بیشتر مورد توجه زمین‌شناسان قرار گرفته‌اند.

شکستگی‌ها یکی از مهم‌ترین مسیرهای جریان سیال در مخازن کربناته هستند. در این مخازن، غالباً تولید متناسب با تراوایی مرتبط با تخلخل اولیه سنگ نیست و به‌مراتب بیشتر از آن است. لذا نقش شکستگی‌ها در تخلیه طبیعی و بازیافت ثانویه بسیار پراهمیت است. به همین دلیل، مطالعه و بررسی شکستگی‌ها و شناخت موقعیت و چگونگی گسترش آن‌ها در سرتاسر مخزن، می‌تواند به طرح توسعه میدان، تعیین مکان‌های مناسب برای حفر چاه‌های جدید، افزایش طول عمر و تولید مناسب مخزن، کاهش هزینه‌ها و درک کلی ما از سیستم شکستگی در میدان نفتی، کمک شایانی نماید. شکستگی‌ها از مشخصه‌های بیشتر میدان‌های عظیم نفتی در سازندهای کربناته هستند. در سنگ‌های کربناته فشارهای تکتونیکی، انحلال در سازند و تبلور مجدد هر یک می‌تواند شکستگی‌هایی را در این سنگ‌ها به وجود آورد. معمولاً شکستگی‌ها در برابر تخلخل اولیه، حجم بسیار اندکی دارند و بیشترین حجم تخلخل ناشی از شکستگی‌ها حدوداً دو درصد حجم کل سنگ مخزن است [Jambayev, 2002].

از آنجا که ناهمسانگردی ایجاد شده در تراوایی توسط سیستم شکستگی‌ها نقش مهمی در توسعه میدان و ضریب بازیافت نهایی بازی می‌کند، تعیین خواص مخزنی شبکه‌ی شکستگی و چگونگی تغییر آن‌ها با عمق و کاهش فشار مخزن و تعیین درجه برهم‌کنش میان سنگ و سیستم شکستگی اهمیت

دارد. از طرفی پیش‌بینی رفتار تولیدی مخازن شکسته شده به چگونگی توصیف و مشخص کردن شبکه به هم متصل شکستگی‌های موجود در سنگ مخزن و سطح تبادل جریان بین دو محیط زمینه و شکستگی بستگی دارد [Saedi, 1996].

شکستگی‌های طبیعی به‌عنوان یک عامل بسیار مهم در اکتشاف و تولید هیدروکربن‌ها شناخته می‌شوند و بسیاری از میدان‌های مهم نفت و گاز بر اساس میزان تولید از مخازن شکسته شده طبقه‌بندی می‌شوند. نزدیک به نیم قرن است که متخصصین صنعت نفت ایران درباره سیستم‌های شکستگی پژوهش‌هایی را انجام داده‌اند. با توجه به اینکه کشور ما دارای منابع بزرگی از مواد نفتی بوده و بسیاری از این مواد نیز در مخازن کربناته ذخیره شده‌اند و شکستگی در این نوع مخازن نقش بسیار زیادی در تولید و دستیابی به نفت و گاز دارد، مطالعه و بررسی در زمینه‌ی شکستگی از وظایف مهم زمین‌شناسان و مهندسان نفت است. اطلاعات و دانش به‌دست آمده در مورد شکستگی نه‌تنها در بررسی‌های اولیه جهت استخراج هیدروکربن از مخازن مهم است، بلکه می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آینده نیز مفید باشد [رضایی، ۱۳۹۲].

### ۳-۱- ضرورت مدل‌سازی شکستگی‌های طبیعی

شکستگی‌های طبیعی نقش بسیار مهمی را در جریان سیال در مخازن شکسته طبیعی بازی می‌کنند. به دلایل زمین‌شناختی بیشتر مخازن شکسته طبیعی دارای تراوایی بسیار اندکی بوده به‌گونه‌ای که شکستگی‌ها محیط اصلی را جهت هدایت سیال فراهم می‌کنند. به‌طور معمول هیدروکربن‌ها در محیط متخلخل سنگ انباشته و از طریق شکستگی‌های تراوا به چاه‌های تولیدی منتقل می‌شوند. سیستم‌های شکستگی می‌توانند به‌طور عمده درجه تخلخل و میزان ذخیره هیدروکربن را نیز افزایش دهند

[Tran, 2004]. مشکلات مهندسی زیادی در تولید از مخازن شکسته وجود دارد؛ هرزروی گل مشکل پرهزینه‌ای است که در هنگام حفاری در نواحی شکسته شده کم‌فشار رخ می‌دهد. سیال

حفاری از طریق شکستگی‌هایی که چاه را قطع کرده‌اند به هدر می‌رود که این مسئله سبب افزایش هزینه و زمان حفاری خواهد شد [Glowka et al., 1992]. به‌طور کلی آشنایی به مدل شکستگی زیرزمینی در توسعه میدان‌های نفتی، مسائل اقتصادی تولید حرارت از مخازن زمین‌گرمایی و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی از اهمیت زیادی برخوردار است. این دانش به تخمین دقیق‌تر ذخایر و نمودارهای پیش‌بینی تولید و در نتیجه بهینه کردن میزان بازیافت منجر خواهد شد [Tran, 2004].

در وهله‌ی اول، یکی از اهداف برنامه‌ریزی مخازن، شناسایی مناطق شکسته شده با شدت زیاد و اندک است. چاه‌های حفاری شده را نیز می‌توان به‌گونه‌ای تعیین مکان و مسیریابی نمود که شکستگی‌های کنترل‌کننده جریان سیال را قطع کنند. از این رو ایجاد مدل‌های توزیع چگالی شکستگی ضروری به نظر می‌رسد. علاوه بر آن جزئیات مربوط به دیگر خواص شکستگی نیز موردنیاز خواهد بود. چراکه شکستگی‌هایی با خواص متفاوت (نظیر اندازه، شیب و پیوستگی) تأثیرات متفاوتی بر جریان سیال مخزن خواهند گذاشت. شکستگی‌های طولانی‌تر و عریض‌تر به‌طور عادی سیال بیشتری را به‌طور مؤثر از خود عبور می‌دهند. شیب شکستگی‌ها نیز ناهمسانگردی مخزن و تراوایی در جهت مختلف را کنترل می‌کند [Tran2004]. به‌عنوان مثال، شکستگی‌های موازی نمی‌توانند به یکدیگر متصل شده تا یک شبکه پیوسته و به هم متصل را جهت جریان سیال ایجاد کنند. در چنین مواردی چاه‌های حفاری شده را می‌بایست به‌گونه‌ای مناسب منحرف نمود تا به‌منظور افزایش بازدهی تولید شکستگی‌های موجود را قطع کنند.

## ۱-۴- بیان مسئله

از آنجایی که بخش قابل توجهی از منابع هیدروکربنی جهان در مخازن کربناته است، بهینه‌سازی و توسعه میدان‌های موجود و اکتشافات جدید در این مخازن نیاز به پیش‌بینی قابل اعتماد برای بازیابی هیدروکربن‌ها دارد [Burchette, 2012]. بیشتر مخازن کربناته به‌طور طبیعی شکسته هستند

که این شکستگی‌ها در طیف گسترده‌ای از مقیاس قرار دارند و این موضوع معمولاً باعث ایجاد شبکه‌های پیچیده‌ی متصل به هم می‌شود [Amour et al., 2012]. مخازن کربناته در بیشتر موارد از جمله مقیاس طول (از منفذ تا میدان) بسیار ناهمگن هستند، بنابراین ارائه‌ی مدل پیش‌بینی رفتار جریان برای این مخازن دشوار است. از این رو مدل‌سازی شبکه‌های شکستگی به‌عنوان بخشی از شبیه‌سازی و توصیف در مخازن شکسته طبیعی امری ضروری برای کاربردهای متعدد مخازن است [Agada et al., 2014].

روش‌های متفاوتی برای تعیین خصوصیات مخازن شکسته شده طبیعی و شبیه‌سازی جریان سیال وجود دارند که به سه دسته مدل‌های پیوسته، مدل گسسته و مدل‌های ترکیبی تقسیم می‌گردند. در مدل‌های پیوسته، میدان مورد مطالعه به بلوک‌های مختلف شبکه‌بندی شده تقسیم می‌شوند، که در آن شکستگی‌ها به‌صورت مستقل عمل نمی‌کنند و خصوصیات آن‌ها در هر بلوک به‌صورت میانگین مشخص می‌شوند. در مدل‌های گسسته، خصوصیات شکستگی‌ها به‌صورت مستقل شبیه‌سازی می‌شوند. از سوی دیگر مدل‌های ترکیبی پیشرفته‌تری برای شبیه‌سازی مخازن شکافتار وجود دارد [Kazemi and Gilman, 1993].

در وهله‌ی اول، یکی از اهداف برنامه‌ریزی مخازن، شناسایی مناطق شکسته شده است. منابع داده‌های میدانی مختلف دارای مقیاس‌ها و در نتیجه درجه تفکیک متفاوتی می‌باشند. علاوه بر این هیچ ابزار واحدی نمی‌تواند تمامی اطلاعات موردنیاز جهت توصیف کامل یک مخزن شکسته را فراهم آورد. به‌عنوان مثال، لرزه‌نگاری و نقشه‌های رخنمون، داده‌هایی از مقیاس منطقه‌ای هستند که تنها شیب و اندازه گسل‌های اصلی و برخی از انواع شکستگی را می‌توان از آن‌ها به دست آورد. داده‌های چاه پیمایی، مغزه و نمودارهای تصویرگر چاه دارای درجه وضوح بالا اما شعاع بررسی اندک می‌باشند. این داده‌ها صرفاً شیب، عرض و چگالی شکستگی‌های محلی را در اختیار قرار می‌دهند [Souche et al., 2012]. بنابراین برای تلفیق داده‌های میدان که دارای مقیاس‌ها مختلفی است نیاز به یک مدل-

سازی ترکیبی می‌باشد. برای مشخص کردن خصوصیات مخزن و مدل‌سازی جریان، علاوه بر تخمین پارامترهای معمول مخزن مانند تخلخل و نفوذپذیری برای شکستگی و ماتریکس؛ پارامتر فاکتور شکل نیز برای محاسبه انتقال سیال بین ماتریکس و شبکه شکستگی مورد نیاز است [Gilman, 2003]. از این جهت مدل‌سازی هیبریدی یک رویکرد مناسب برای استفاده بهینه از همه اطلاعات موجود در یک میدان جهت محاسبه پارامترهای لازم برای شبیه‌سازی جریان است.

## ۱-۵- سابقه تحقیق

تام‌گاوا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۲) روش نوینی در ساخت مدل شبکه شکستگی گسسته (DFN<sup>۲</sup>) ارائه کردند، که خواص استاتیک مختلف شبکه شکاف را از اطلاعات لاگ‌های تصویری و اطلاعات فشار به دست آورند. در این روش مدل شبکه شکستگی گسسته با ساخت دسته‌های شبکه شکستگی دیسکی تعریف گردیده است. ساخت مدل از دو مسیر مجزا انجام پذیرفت. یکی برای شبکه شکستگی با بازشدگی زیاد که مسیر اصلی حرکت سیال را نشان می‌دهد و دیگری برای شکستگی‌هایی با بازشدگی کم که بیشتر محل ذخیره سیال هستند. هر یک از مدل‌ها با استفاده از روش‌های زمین‌آماري ساخته شد. سپس دو مدل با هم ترکیب شدند و از مدل به دست آمده، مدل تخلخل دوگانه و تراوایی نهایی برای به‌کارگیری در شبیه‌ساز مخزن استخراج گردید.

ابوالخیر<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۱) در جنوب غربی رودخانه کوپر در استرالیا به منظور اهداف اکتشافی شیل‌های گازی، با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای بر روی داده‌های سه بعدی لرزه‌ای موفق به تحلیل و بررسی گسل‌های منطقه مورد مطالعه شدند. آن‌ها با اعمال الگوریتم ردیابی مورچه و نشانگر انحنا گسل‌ها و شکستگی‌هایی را در جهت شمال غربی- جنوب شرقی شناسایی کردند و با کمک نمودارهای تصویری نتیجه به دست آمده را اعتبار سنجی کردند که از اعتبار بالایی برخوردار بود. آن‌ها نتیجه

<sup>1</sup> Tamagava

<sup>2</sup> Discreat Fracture Network

<sup>3</sup> Abul Khair

گرفتند که شکستگی‌های مشاهده شده در لاگ تصویری، شکستگی‌هایی هستند که درون زون شکستگی اطراف گسل قرار دارند.

ینوگو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱) مطالعات خود را بر روی سنگ آهک می‌سی‌سی‌پی و مخازن چرت آغاز کردند. از آنجایی که تعداد و جهت‌گیری شکستگی‌های باز می‌تواند در موفقیت چاه‌های افقی برای تولید بیشتر بسیار مؤثر باشد، آن‌ها زون‌هایی که دارای تراکم بالای شکستگی‌های باز بود را توسط لاگ تصویری شناسایی و اندازه‌گیری کردند. سپس میزان همبستگی آن را با نشانگرهای استخراج شده از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی بررسی کردند. با استفاده از جهت شکستگی‌های به‌دست آمده از لاگ تصویری می‌توان مناطق شکستگی‌های باز را روی نشانگر انحنای استخراج شده به‌خوبی نشان داد.

خوشبخت و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی توانایی نمودارهای تصویری در شناسایی شکستگی‌ها و سایر مشخصات زمین‌شناسی در مخازن کربناته پرداخته و تطبیق بین نمودار تصویری و مغزه را تشریح نمودند. در این مقایسه مشخص شد که نمودار FMS<sup>۲</sup> در تشخیص شکستگی‌های باز و انیدریت بسیار پرتوان ولی در تعیین و تشخیص شکستگی‌های پرشده و ترکیبات متراکم در مخازن کربناته ضعیف عمل می‌کند. این نتایج با بررسی بین دو روش نمودارگیری FMI<sup>۳</sup> و مغزه از هفت چاه نزدیک به هم تأیید شده است.

مطالعاتی نیز در رابطه با تولید از مخازن گازی فشرده عمیق توسط ایشیباشی<sup>۴</sup> و همکارانش (۲۰۱۲) انجام شده است که افزایش تولید از این میدان‌ها با افزایش ضریب نفوذپذیری و استفاده از شبکه شکاف طبیعی این میدان‌ها همراه است. در نتیجه حفر چاه‌های انحرافی و افقی جهت تماس با شبکه شکاف آن‌ها به‌عنوان روشی کارآمد مدنظر است. شبکه شکاف این‌گونه میدان‌ها به‌شدت ناهمگن

---

<sup>1</sup> Yenugu

<sup>2</sup> Formation Micro Scanner

<sup>3</sup> Formation Micro Imager

<sup>4</sup> Ishibashi



است و در نتیجه با روش‌های آماری و مدل‌های شبکه شکاف گسسته مدل‌سازی می‌شود. رابطه بین میزان تولید مدل و پارامترهای شبکه شکاف مدل به شدت غیرخطی است و تعیین این پارامترها چالشی گسترده در امر مدل‌سازی این میدان‌ها به شمار می‌رود. آن‌ها از روش‌های بر مبنای مونت کارلو<sup>۱</sup> جهت ایجاد اطلاعات اولیه استفاده کرده و سپس هریکی از خروجی‌های DFN این روش، جهت اجرای شبیه‌سازی آماده شد.

سوشه<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۲) مطالعات خود را با عنوان، نمایش دوگانه مدل‌سازی شبکه شکستگی چندمقیاسی بر روی یکی از میدان‌های بزرگ کربناته امارات متحده عربی آغاز کردند. در این مطالعه از روش جدید مقیاس دوگانه در مدل شبکه شکستگی استفاده کردند. به این صورت که: از شبکه‌های شکستگی گسسته برای نشان دادن شکستگی‌های بزرگ مقیاس که اتصال بین سلول‌های شبکه را فراهم می‌کنند؛ و از مدل شکستگی ضمنی برای نشان دادن شکستگی‌های کوچک مقیاس که احتمالاً باعث زیاد شدن تراوایی ماتریکس و ناهمسانگردی در مخزن می‌شود، استفاده کردند. یک مدل که فقط شکستگی‌های گسسته را تشکیل می‌دهد و کوچک‌ترین شکستگی‌ها را به خاطر محدودیت‌های محاسباتی نادیده می‌گیرد، ساعت‌ها برای اجرا زمان می‌برد. درحالی‌که ساخت مدل هیبریدی در چند دقیقه انجام شد.

لفرانک<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۲) برای شناسایی شکستگی‌های احتمالی مخزن و جریان‌های ایجادشده از مدل شکستگی پیوسته (CFM<sup>۴</sup>) و مدل شبکه شکستگی گسسته (DFN) استفاده کردند. آن‌ها با به‌کارگیری داده‌های حاصل از تجزیه و تحلیل نمودارهای تصویری، صوتی و دیگر نمودارها و با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای موفق به استخراج شکستگی‌ها در زون مخزنی شدند. با تخمین و تعیین چگالی شکستگی‌ها در زون مخزنی، مدل شکستگی گسسته را ساختند. سپس با استفاده از ویژگی‌های

---

<sup>1</sup> Monte Carlo

<sup>2</sup> Suoche

<sup>3</sup> Lefranc

<sup>4</sup> Continuous Fracture Modeling

شکستگی‌ها، مدل شبکه شکستگی گسسته ساخته شد. در شبکه شکستگی گسسته با روش‌های مبتنی بر جریان می‌توان توزیع تخلخل سه‌بعدی و تراوایی را انجام داد و درنهایت، خواص شکستگی از طریق مدل‌سازی محاسبه می‌شود.

آره<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۲) دریکی از میدان‌های امارات متحده عربی برای ارزیابی و تخمین گسل‌ها و شکستگی‌ها از داده‌های لرزه‌ای استفاده کردند. همچنین آن‌ها با کمک نشانگرهای لرزه‌ای و لاگ-های تصویری توانستند برآوردی از محل شکستگی‌ها و گسل‌ها به دست آورند. در این مطالعه شکستگی‌های بزرگ به‌طور صریح با استفاده از یک شبکه شکستگی گسسته و شکستگی‌های کوچک که به نظر می‌رسد باعث تقویت نفوذپذیری ماتریکس می‌شوند با استفاده از مدل تحلیل شکستگی ضمنی مدل‌سازی شدند. این دو مدل برای مقاصد شبیه‌سازی مخزن می‌توانند با یکدیگر توسط روش بزرگ‌مقیاس<sup>۲</sup> کردن ترکیب شوند. مدل ساخته شده یک مدل ترکیبی است که شامل شکستگی‌های بزرگ با مشارکت شکستگی‌های کوچک است.

فنگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۷) یک رویکرد یکپارچه از مدل‌سازی شبکه‌های گسسته شکستگی را برای یک مخزن کربناته در میدان نفتی جینگی ارائه کردند. آن‌ها از الگوریتم ردیابی مورچه برای شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌ها استفاده کردند. در این مطالعه با کمک نمودارهای تصویری، چگالی شکستگی، شیب و جهت شیب شکستگی‌ها در هر چاه مورد بررسی قرار گرفتند. آن‌ها با استفاده از یک مدل شبکه عصبی توزیع تراکم شکستگی در فضای سه‌بعدی مخزن را بهبود دادند. سپس برای ساخت مدل شبکه شکستگی از دو روش قطعی و احتمالی برای مدل‌سازی شکستگی‌ها استفاده کردند؛ که شکستگی‌ها و گسل‌های بزرگ‌مقیاس به‌طور قطعی و شکستگی‌های کوچک‌مقیاس به‌طور تصادفی مدل‌سازی شدند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد جریان کار ارائه شده، برای ساخت مدل

---

<sup>1</sup> Aarre

<sup>2</sup> Scale up

<sup>3</sup> Fang

شبکه گسسته شکستگی موفق بوده است.

ریچارد و لامین<sup>۱</sup> (۲۰۱۷) به توصیف و مدل سازی شکستگی های موجود در مخازن کربناته شمال کویت با استفاده از نمودارهای تصویری چاه، داده های مغزه و اطلاعات دینامیکی پرداختند. از مدل گسسته شکستگی به دست آمده در طرح ریزی برنامه حفاری و همچنین برآورد و پیش بینی تولید استفاده شد. همچنین از بررسی اطلاعات مغزه برای کالیبره کردن تراوایی و تخلخل مدل ساخته شده استفاده کردند.

## ۱-۶- ساختار پایان نامه

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

در فصل اول، به بیان اهمیت شکستگی در مخازن شکافدار طبیعی، بیان مسئله و بررسی مطالعات پیشین در این زمینه پرداخته می شود. در فصل دوم شکستگی ها بر اساس منشأ ایجاد آن ها مورد بررسی قرار می گیرند و انواع شکستگی ها از لحاظ شکل شناسی معرفی می شوند، همچنین مشخصه های شکستگی ها بیان می شوند. در فصل سوم، به ضرورت مدل سازی شکستگی ها و انواع مدل سازی شکستگی ها پرداخته می شود و منابع داده ای متعددی که برای مطالعه شکستگی در مخازن شکسته طبیعی وجود دارند بررسی می شوند. در ادامه فصل سوم به تفسیر و شناسایی گسل ها و مبانی مدل سازی هیبریدی پرداخته می شود. در فصل چهارم ابتدا زمین شناسی میدان مورد مطالعه و داده های مورد استفاده بیان می شوند. در ادامه شکستگی ها از روی چاه نمودارهای تصویری و گسل ها با کمک نشانگرهای لرزه ای استخراج می شوند و مدل قطعی گسل ها ساخته می شود. با استفاده از ویژگی های گسل ها و شکستگی های تشخیص داده شده در این مرحله، ساخت مدل شبکه شکستگی گسسته انجام شده و سپس به ساخت مدل DFN و IFM به صورت مرحله به مرحله پرداخته شده و بر اساس نتایج به دست آمده مورد تفسیر قرار می گیرند. مدل گسسته شکستگی در این فصل اعتبار

---

<sup>1</sup> Richard and Lamine

سنجی می‌شود. در آخر به مدل‌سازی هیبریدی پرداخته می‌شود و نتایج حاصل از آن مورد تفسیر قرار

می‌گیرند.

## فصل دوم

### طبقه‌بندی و مشخصه‌های

### شکستگی‌ها

## ۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به تعریف شکستگی و گسل پرداخته می‌شود. شکستگی‌ها بر اساس منشأ ایجادشان به چهار گروه تکتونیکی، ناحیه‌ای، انقباضی و سطحی تقسیم‌بندی می‌شوند که هر کدام شرح داده می‌شوند. مخازن کربناته شکافدار را بر اساس تداخل بین دانه‌ای و تراوایی و نقشی که شکستگی‌ها در ایجاد فضا برای جریان سیال ایجاد می‌کنند به شش دسته طبقه‌بندی می‌کنند [Nelson, 2001; Bartton et al., 2006]. سپس به بیان انواع شکستگی‌ها از لحاظ شکل‌شناسی پرداخته می‌شود. در ادامه این فصل به بیان مشخصه‌های شکستگی از جمله فاصله بین شکستگی‌ها، بازشدگی، طول، ماهیت، جهت‌گیری و چگالی شکستگی پرداخته می‌شود.

## ۲-۲- طبقه‌بندی شکستگی‌ها

شکستگی‌ها سطوحی هستند که سنگ‌ها یا کانی‌ها در آن‌ها فاقد پیوستگی هستند و در عرض آن‌ها سنگ چسبندگی خود را از دست داده است. شکستگی‌ها را می‌توان به شیوه‌های متفاوتی طبقه‌بندی نمود. شکستگی‌ها بر اساس منشأ ایجادشان به چهار گروه تکتونیکی، ناحیه‌ای، انقباضی و سطحی تقسیم‌بندی می‌شوند [Nelson, 2001].

## ۲-۲-۱- شکستگی‌های تکتونیکی

شکستگی‌های تکتونیکی به آن دسته از شکستگی‌ها اطلاق می‌شود که منشأ پیدایش آن‌ها بر پایه جهت‌گیری، توزیع و ریخت‌شناسی به رخداد‌های تکتونیکی و زمین‌ساختاری محلی بر می‌گردد. شکستگی‌های تکتونیکی نتیجه شکست برشی سنگ بوده و در بسیاری از رخنمون‌ها قابل مشاهده‌اند. این‌گونه شکستگی‌ها در جهت‌های خاصی قرار داشته و جهت‌گیری‌شان تا حد بسیار زیادی به جهت شکل‌گیری گسل‌ها و چین‌های محلی مرتبط است. ترتیب زمانی ایجاد مجموعه‌های شکستگی نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. پیدایش شکستگی‌های جوان‌تر تحت تأثیر مجموعه‌های شکستگی از

پیش وجود داشته قرار دارد. رخدادهای تکتونیکی متعدد منجر به ایجاد شبکه‌های متقاطع شده که در نهایت سبب پیدایش شبکه‌های سه‌بعدی مرتبط و ایده آل جهت برقراری جریان سیال می‌گردد. شکستگی‌های تکتونیکی خود نیز به دو دسته متفاوت تقسیم‌بندی می‌شوند.

### ۲-۲-۱-۱- شبکه‌های شکستگی مرتبط با گسل

نیروهای زمین‌شناختی ناشی از گسل خوردگی سبب ایجاد مجموعه‌ای از شکستگی‌ها در مجاورت صفحه گسل می‌شود. این مجموعه‌ها در سه جهت اصلی و مجزا شامل: موازی با گسل، مزدوج با گسل (دارای شیب یکسان اما جهت‌گیری مخالف نسبت به صفحه گسل) و در جهت نیمساز زاویه‌ی حاده میان دو مجموعه شکستگی دیگر، رخ می‌دهند. دسته‌ای دیگر از شکستگی‌ها در زون لغزش گسل یا زون میلونیتی به وجود می‌آیند که فاقد اهمیت هستند.

### ۲-۲-۱-۲- شبکه‌های شکستگی مرتبط با چین

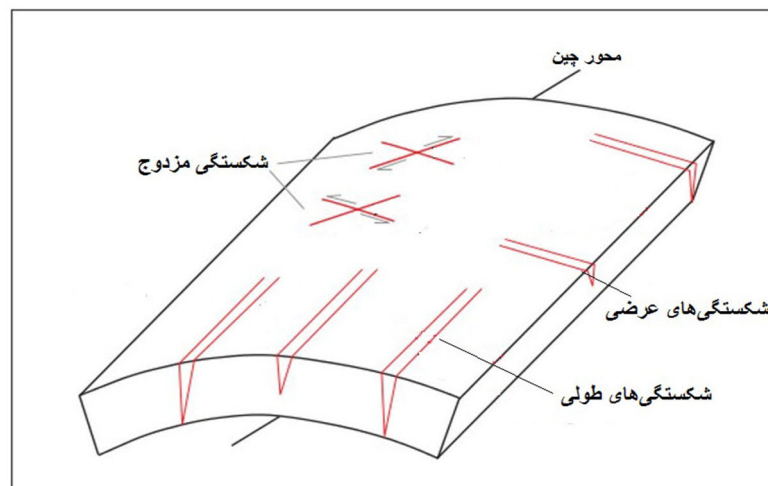
جهت‌گیری شکستگی‌های حاصله از چین‌خوردگی بسیار پیچیده بوده و به تاریخچه تنش و کرنش سنگ در زمان شکل‌گیری و رشد چین ارتباط دارد. با توجه به شکل (۲-۱)، شکستگی‌های ایجاد شده در طی فرایند چین‌خوردگی را می‌توان در سه گروه قرار داد. شکستگی‌های مزدوج<sup>۱</sup> (نسبت به جهت حداکثر کوتاه شدگی زاویه کمتر از ۴۵ درجه می‌سازد)، شکستگی‌های طولی<sup>۲</sup> (روند آن‌ها به موازات چین و عمود بر روند کوتاه شدگی است) و شکستگی‌های عرضی<sup>۳</sup> (روند آن‌ها عمود بر محور چین و به موازات حداکثر کوتاه شدگی است) [Singhal and Gupta, 2010].

---

<sup>1</sup> Conjugate joints

<sup>2</sup> Longitudinal joints

<sup>3</sup> Transverse joints



شکل ۱-۲: توسعه انواع مختلف شکستگی‌ها در ارتباط با چین خوردگی [Singhal and Gupta, 2010].

## ۲-۲-۲- شکستگی‌های ناحیه‌ای<sup>۱</sup>

این‌گونه شکستگی‌ها در نواحی وسیعی از سطح زمین دیده می‌شوند. تفاوت آن‌ها با شکستگی‌های تکتونیکی در هندسه‌ی ساده و فواصل زیاد میان آن‌هاست و تمامی ساختارهای محلی را نیز قطع می‌کنند. این شکستگی‌ها معمولاً به یکدیگر عمودند و در برخی از متون به‌عنوان شکستگی‌های سیستماتیک از آن‌ها یاد می‌شود. در مورد منشأ پیدایش این‌گونه شکستگی‌ها نمی‌توان به‌صورت قاطع اظهار نظر نمود، با این حال بسیاری بر این باورند که این شکستگی‌ها نتیجه حرکات عمودی زمین‌اند. از دیدگاه جریانی این دسته از شکستگی‌ها ماکرو شکستگی‌هایی هستند که در مقیاس میدانی گسترش یافته‌اند. شکستگی‌های ناحیه‌ای را در تولید از مخازن نفتی مؤثر به‌حساب می‌آورند و تأثیر آن‌ها زمانی بیشتر است که همراه با شکستگی‌های تکتونیکی، سیستم شکستگی‌های یک مخزن را تشکیل دهند.

<sup>1</sup> Regional fractures



## ۲-۲-۳- شکستگی‌های انقباضی

این شکستگی‌ها مجموعه‌ای از شکستگی‌های تنشی یا کششی بوده که به علت کاهش حجم توده کلی سنگ ایجاد می‌شوند. این کاهش ممکن است در نتیجه خشک‌شدگی، گرادیان دمایی و تغییرات فاز کانی‌ها رخ دهد. تأثیر شکستگی‌های انقباضی بر روی رفتار جریانی به‌خوبی روشن نیست. با این حال آن‌ها با ایجاد بخشی از شبکه شکستگی گذرگاه‌هایی تراوا را برای مسیر جریان باز می‌کنند. مشکل اصلی در اینجاست که پیش‌بینی حضور و میزان گسترش این‌گونه شکستگی‌ها در زیر زمین بسیار دشوار است.

## ۲-۳- شکستگی در مخازن کربناته

بیش از ۶۰ درصد مخازن اثبات شده نفتی و ۴۰ درصد از مخازن اثبات شده گازی جهان، از نوع مخازن شکسته کربناته هستند. از طرفی، حدود ۹۰ درصد مخازن کربناته دنیا در خاورمیانه قرار دارد. بیشتر مخازن کربناته به‌صورت طبیعی دارای شکستگی هستند. این شکستگی‌ها مسیرهای پیچیده‌ای را جهت جریان هیدروکربن‌ها فراهم می‌کنند که بر روی مراحل تولید و تخلیه کلی مخزن اثرگذار است. طول این شکستگی‌ها از مقیاس میکروسکوپی تا کیلومتری متغیر است. بررسی، تخمین و توسعه میادین شکسته، نسبت به مخازن معمولی پیچیده‌تر است. این پیچیدگی به دلیل حضور شکستگی‌ها و نقش اساسی آن‌ها در انتقال هیدروکربن است.

شکستگی‌ها نقایص مکانیکی مقاومت سنگ هستند که نسبت به تنش‌های زمین‌شناختی طبیعی مانند حرکت تکتونیکی، تنش‌های گرمایی، تغییرات فشار سنگ، فشار بالای سیال، فعالیت‌های حفاری و بیرون کشیدن سیال (چون سیال نیز به‌طور جزئی وزن سنگ روباره را حفاظت می‌کند) ایجاد می‌شوند [Tiab and Donaldson, 2004].

بسته به نوع سنگ، شرایط تکتونیکی و ضخامت رسوبات، الگوی شکستگی‌ها می‌تواند تغییر کند. با توجه به شکل (۲-۲) برخی محققان، مخازن کربناته شکافدار را بر اساس تخلخل بین دانه‌ای و تراوایی و نقشی که شکستگی‌ها در ایجاد فضایی برای جریان سیال ایجاد می‌کنند به شش دسته زیر طبقه‌بندی می‌کنند [Nelson, 2001; Bartton et al., 2006]:

**مخازن نوع اول:** دارای تخلخل شکستگی متوسط به بالا و تراوایی خوب هستند. این مخازن به‌طور معمول فضای زهکشی وسیعی در اطراف چاه دارند و لذا در این گروه به تعداد کمتری چاه برای استخراج هیدروکربن نیاز است. نرخ تولید اولیه این نوع مخازن بالا است؛ اما در عین حال افت تولید نیز در آن‌ها به سرعت رخ می‌دهد. چنین شکستگی‌هایی تراوایی کلی را بالا برده و ناهمگنی مخزن را افزایش می‌دهند.

**مخازن نوع دوم:** دارای زمینه سنگ با تخلخل متوسط تا بالا است. فضای منافذ موجود در زمینه سنگ، فضای ذخیره‌سازی مخزن و شکستگی‌ها تنها مسیر جریان سیال را فراهم می‌کنند. نرخ تولید اولیه، حتی اگر تراوایی زمینه سنگ ضعیف باشد، بسیار خوب است. اما اگر ارتباطات هیدرولیکی بین زمینه سنگ و شکستگی‌ها ضعیف باشد، بازیافت ثانویه این نوع مخازن مشکل و کم بهره خواهد بود.

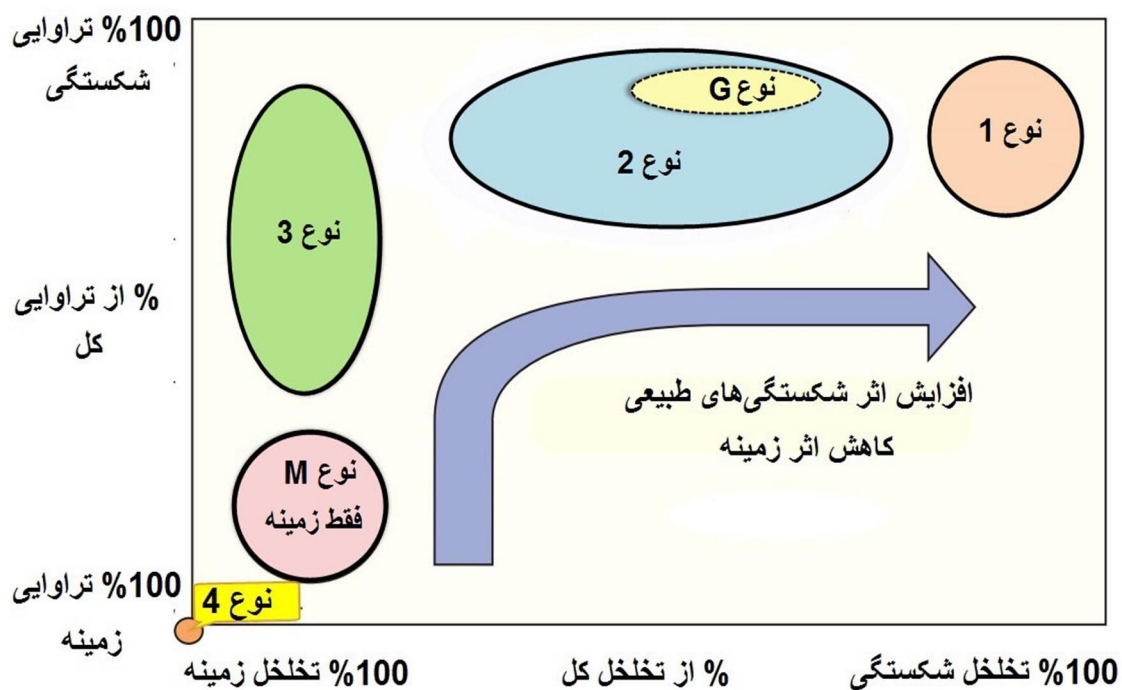
**مخازن نوع G:** مخازن غیرمتعارف شکسته گازی، همچون لایه‌های زغالی متان‌دار، و مخازن شکسته میعانات گازی در این دسته قرار می‌گیرند. این نوع از مخازن نزدیک به مخازن نوع دوم طبقه‌بندی می‌شوند.

**مخازن نوع سوم:** مخازنی اقتصادی هستند و تولید با ثباتی دارند در این مخازن، زمینه دارای تخلخل و تراوایی خوبی است و شکستگی‌ها در مقدار تخلخل و تراوایی سنگ سهیم می‌باشند، اما تراوایی آن‌ها در جهات مختلف متفاوت و رفتارشان پیچیده است. در این نوع مخازن فضای تخلخل زمینه سنگ، فضای ذخیره‌سازی را تشکیل می‌دهد؛ و شکستگی‌ها مسیری را برای حرکت جریان

سیال فراهم می‌کنند. در این مخازن تخلخل بین دانه‌های بیش از ۱۰ تا ۱۵ درصد و تراوایی به‌طور میانگین ۱۰ میلی داری است. به نظر می‌رسد بیشتر مخازن کربناته ایران، در این دسته قرار گیرند.

**مخازن نوع M:** مخازنی که شکستگی‌های طبیعی نقش چندانی در تخلخل و تراوایی ندارند و زمینه سنگ نقش مؤثری در تراوایی دارد. در این نوع مخازن تولید اولیه ضعیف‌تر از انواع قبلی بوده و طراحی عملیات بازیافت ثانویه در آن‌ها ضروری و مؤثر است.

**مخازن نوع چهارم:** مخازنی هستند که شکستگی‌ها هیچ‌گونه تأثیری بر افزایش ظرفیت ذخیره-سازی (تخلخل) و یا افزایش تراوایی نداشته‌اند و برعکس موجب ایجاد مشکلاتی بر راه حرکت سیالات و یا به عبارتی موجب ناهمگونی در مخزن می‌شوند.



شکل ۲-۲: انواع مخازن شکسته از نظر تخلخل و تراوایی [Bartton et al., 2006]

## ۲-۴- انواع شکستگی‌ها

یکی از عوامل مهم تأثیر شکستگی در تخلخل و تراوایی، شکل شناسی سطح شکستگی‌ها است. بررسی شکل شناسی می‌تواند با مطالعه نمودارهای تصویری و نیز مغزه‌ها و رخنمون‌ها صورت گیرد.

### ۲-۴-۱- شکستگی‌های طبیعی

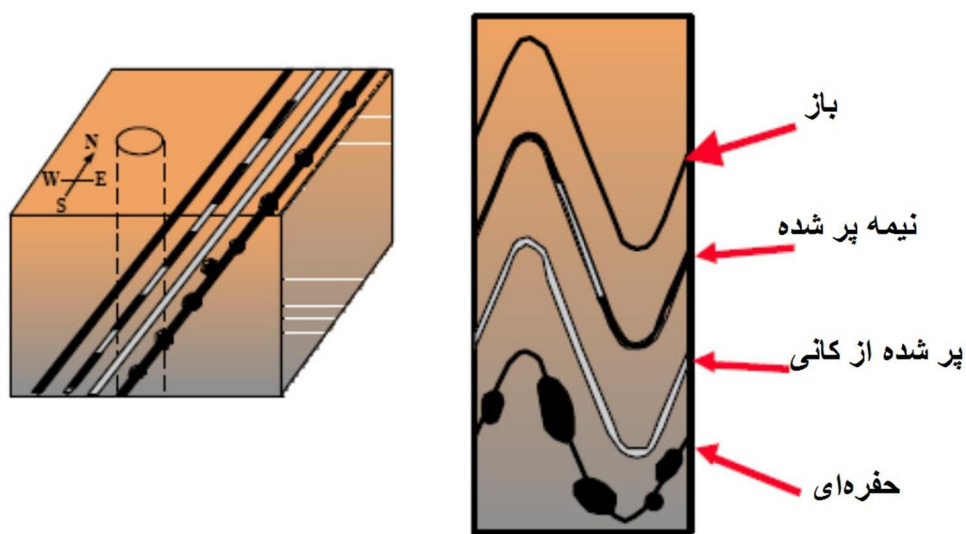
شکستگی‌های طبیعی غالباً توسط نیروهای تکتونیکی ایجاد می‌شوند. این‌گونه شکستگی‌ها در سنگ‌های کربناته بیشتر از ماسه سنگ‌ها یافت می‌شوند و عموماً با جهت اعمال نیروهای تکتونیکی حاکم رابطه دارند. روند کلی این دسته شکستگی‌ها به کمک جهت تنش‌های تکتونیکی محلی تعیین می‌شود و به دو دسته برشی و کششی قابل تقسیم هستند و از لحاظ تکتونیکی بر اساس روند، گسترش، مورفولوژی و رژیم تکتونیکی محلی به دو دسته شکستگی‌های وابسته به چین‌خوردگی و شکستگی‌های وابسته به گسل خوردگی تقسیم‌بندی می‌شوند [Nelson, 2001].

در چاه‌ها شکستگی‌های طبیعی به دو دسته شکستگی‌های باز و شکستگی‌های بسته تقسیم می‌شوند. باز یا بسته بودن شکستگی‌ها به چرخش جریان آب در شکستگی‌ها و پدیده رسوب‌گذاری کانی‌ها مانند انیدریت و مسدودسازی آن‌ها بستگی دارد [Van Golf, 1982].

**شکستگی‌های باز:** در این شکستگی‌ها، فضای میان دو دیواره شکستگی پر شده نیستند. چنین شکستگی‌هایی کانال‌هایی با تراوایی بالا را برای جریان سیالات در سنگ به وجود می‌آورند. مقدار تراوایی آن‌ها تابعی از فضای بین دو دیواره شکستگی و زبری سطح دیواره‌ها است. با ورود گل حفاری به داخل این شکستگی‌ها و با توجه به رسانا بودن گل، مقاومتی که در این قسمت توسط ابزار تصویری مانند FMI ثبت می‌شود از زمینه کمتر است و به صورت یک موج سینوسی کامل یا ناپیوسته تیره رنگ در نمودارهای تصویری دیده می‌شوند (شکل ۲-۳). در صورتی که مخزن دارای تعداد زیادی از این نوع شکستگی‌ها باشد پتانسیل تولید بالایی دارد. شکستگی‌های باز طبیعی بر اساس ظاهر و

پیوستگی در اطراف گمانه به شکستگی‌های باز، شکستگی‌های باز ناپیوسته و شکستگی‌های باز احتمالی دسته‌بندی می‌شوند. شکستگی‌های باز مسیرهای تراوایی را تشکیل می‌دهند و باید در مدل‌سازی مخزن مورد توجه قرار گیرند [Gilma, 2003].

**شکستگی‌های بسته:** این شکستگی‌ها، ابتدا دارای دهانه باز بوده، اما در طی دیاژنز توسط سیمان‌های دیاژنتیکی که اغلب شامل کلسیت، کوارتز، دولومیت و انیدریت می‌باشند، پر شده‌اند. پر شدگی شکستگی‌ها گاهی کامل و گاهی ناقص است. تأثیر این گونه شکستگی‌ها بر تراوایی سنگ تابعی از کامل و یا ناقص بودن آن است. این شکستگی‌ها بر روی نمودارهای تصویری به صورت یک موج سینوسی روشن ظاهر می‌شوند (شکل ۲-۳). عرض دهانه این شکستگی‌ها در طول گمانه ممکن است تغییر کند [Nelson, 2001].

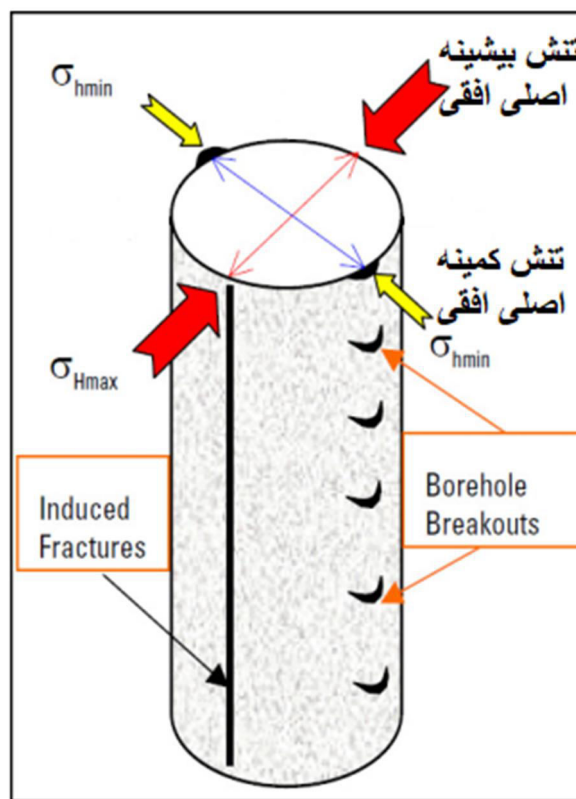


شکل ۲-۳: نمایش انواع شکستگی‌های طبیعی در چاه نمودارهای تصویری [Nelson, 2001].

## ۲-۴-۲- شکستگی‌های القایی توسط سرمته

ابزارهای تصویرگر می‌توانند کلیه پدیده‌های سطحی دیواره چاه را نشان دهند. یکی دیگر از

شکستگی‌های موجود در دیواره چاه شکستگی‌هایی هستند که در اثر عملیات حفاری به وجود می‌آیند. این شکستگی‌ها در اثر عوامل مرتبط با حفاری، به صورت مصنوعی و در اثر توزیع غیر یکسان و نامساوی تنش‌های مماسی<sup>۱</sup> که بر روی دیوار چاه در محل تلاقی با تنش‌های افقی حداکثر ( $\sigma_{HMAX}$ ) و تنش‌های افقی حداقل ( $\sigma_{HMIN}$ ) اعمال می‌شوند، به وجود می‌آیند [ Aadnoy and Looyeh, 2011] (شکل ۲-۴). الگوهای این دسته شکستگی‌ها می‌تواند کاملاً قائم و یا دندانه‌دار و به دو صورت کششی و برشی باشد. سطوح این دسته از شکستگی‌ها ناصاف و فاقد هرگونه عوارض حاصل از انحلال است [Wikel, 2011].



شکل ۲-۴: شکستگی‌های القایی در جهت تنش بیشینه به وجود می‌آیند [after Alizadeh et al., 2015].

## ۲-۴-۳- شکستگی‌های توسعه یافته

علاوه بر شکستگی‌های طبیعی و شکستگی‌های القایی، عملیات حفاری ممکن است سبب توسعه

<sup>۱</sup> Tangential stress

و یا بازشدگی شکستگی‌هایی که از قبل وجود داشتند، شود که به آن‌ها شکستگی‌های توسعه یافته می‌گویند. آن‌ها ممکن است در دو یا چند جهت توسعه یافته باشند. جهت شکستگی‌های توسعه یافته تقریباً در جهت موازی با مؤلفه‌های افقی تنش است. این‌گونه شکستگی‌ها معمولاً به علت پهنای بسیار کم، در دبی تولید از سنگ مخزن خیلی مؤثر نمی‌باشند.

## ۲-۵- مشخصه‌های شکستگی‌ها

یک شکستگی با پارامترهایی مثل بازشدگی، اندازه، ماهیت و جهت شکستگی توصیف شده در حالی که برای دسته شکستگی‌ها پارامترهایی مانند نحوه توزیع و آرایش شکستگی‌ها، چگالی شکستگی‌ها

(یا شدت شکستگی‌ها با در نظر گرفتن نوع سنگ) و فاصله بین شکستگی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این بخش به بررسی این پارامترها پرداخته می‌شود.

### ۲-۵-۱- فاصله بین شکستگی‌ها<sup>۱</sup>

فاصله بین شکستگی‌ها یکی از عوامل بسیار پر اهمیت در برآورد کمی سیستم شکستگی و از الزامات پیش‌بینی مقادیر تخلخل شکستگی‌ها و تراوایی آن‌هاست. فواصل بین شکستگی‌ها قابل مشاهده و قابل اندازه‌گیری مستقیم هستند. ولی گاهی اوقات تعیین آن‌ها ساده نیست، چون احتمال اینکه مغزه و یا چاه دقیقاً شکستگی‌ها را قطع کرده باشد چندان قوی نیست یا به عبارتی مشاهدات زیرسطحی با مسئله مقیاس تداخل می‌نماید. تفاوت در فواصل بین شکستگی‌ها تأثیر ناهنجاری بر برآورد تخلخل و تراوایی شکستگی‌ها دارد [Nelson, 2001].

در سنگ‌های شکسته شده با توسعه ضعیف شکستگی<sup>۲</sup>، معمولاً طول شکستگی‌ها کوچک‌تر از

<sup>1</sup> Fracture Spacing

<sup>2</sup> Poorly developed fractured rocks

فاصله شکستگی‌ها است؛ در حالی که در سنگ‌های شکسته شده با شکستگی‌های توسعه یافته<sup>۱</sup>، طول شکستگی‌ها بیشتر از فاصله شکستگی‌ها است. روش‌های سطحی و خطی برای اندازه‌گیری فاصله شکستگی‌ها پیشنهاد شده است. برای ارزیابی فاصله شکستگی‌ها در دسته شکستگی‌هایی که به‌طور کامل توسعه یافته‌اند روش خطی<sup>۲</sup> پیشنهاد می‌شود. در این روش خطی عمود بر جهت دسته شکستگی‌ها رسم شده و فاصله بین شکستگی‌ها مورد بررسی آماری قرار می‌گیرد. برای ارزیابی فاصله شکستگی‌ها با توسعه ضعیف روش سطحی به‌صورت مجموع طول شکستگی‌ها در واحد سطح پیشنهاد می‌شود. میزان تغییرپذیری فضایی<sup>۳</sup> شکستگی‌ها در سنگ مخزن می‌تواند از طریق اطلاعات آماری فاصله شکستگی‌ها ارزیابی شود. به‌طور خاص با مقایسه‌ی میزان انحراف معیار و میانگین داده‌های فاصله شکستگی‌ها می‌توان به توزیع فضایی شکستگی‌ها پی برد [Adler, 1999].

## ۲-۵-۲- بازشدگی (دهانه) شکاف

بازشدگی شکستگی به فاصله عمودی میان دو سطح روبروی صفحات شکستگی گفته می‌شود. بازشدگی شکستگی می‌تواند به عواملی مانند عمق، سنگ‌شناسی محیط و فشار منفذی وابسته باشد. دهانه شکستگی به‌طور معمول بین ۱۰ تا ۲۰۰ میکرون است. در دوره تولید از یک مخزن به دلیل کاهش فشار مخزن و به دنبال آن انبساط سنگ، دهانه شکستگی‌ها کاهش می‌یابد. البته میزان بازشدگی شکستگی در تمام نقاط سطح شکستگی‌ها ثابت نیست و ممکن است در طول صفحه شکستگی به علت پارامترهای مختلفی مثل زبری سطح، مواد رسوبی و آزاد شدن تنش‌های درگیر، تغییر کند. بازشدگی شکستگی با اندازه شکستگی‌ها همبستگی مثبت دارد. تابع توزیع بازشدگی معمولاً به‌صورت لگاریتم نرمال، توانی و یا نمایی بیان می‌شود [Vermily and Scholz, 1995].

<sup>1</sup> Well developed fracture rocks

<sup>2</sup> Line method

<sup>3</sup> Spatial variability



## ۲-۵-۳- طول شکستگی

در مقایسه طول شکستگی‌ها با ضخامت لایه سنگ مخزن، اندازه‌ی شکستگی می‌تواند کوچک، متوسط و بزرگ در نظر گرفته شود. شکستگی‌های کوچک، طول کوچک‌تر از یک لایه سنگ مخزن دارند، شکستگی‌های متوسط از لایه‌های بیشتری عبور می‌کنند و شکستگی‌های بزرگ گستردگی خیلی زیادی داشته و اغلب ده‌ها یا صدها متر طول دارند. شکستگی‌های کوچک بازشدگی کمتری دارند و اغلب از مواد کانی پر شده‌اند. در حالی که شکستگی‌های بزرگ بازشدگی بیشتری داشته و به ندرت به وسیله کانی‌ها پر شده‌اند. طول شکستگی‌ها پارامتری مهم برای ارزیابی به هم پیوستگی در شبکه شکستگی است که می‌تواند رفتار جریان درون سنگ را کنترل کند. 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 شکستگی نیست (مانند لایه‌های نمکی که دارای رفتار خمیری هستند) طول شکستگی‌ها شدیداً کاهش می‌یابد [Van Dijk, 1998].

## ۲-۵-۴- ریخت‌شناسی<sup>۱</sup> شکستگی

طبیعت یا ماهیت شکستگی‌ها با میزان بازشدگی، پرشدگی و ویژگی‌های دیواره‌های شکستگی ارتباط دارد. در حالت کلی با در نظر گرفتن مواردی مانند:

الف: دهانه شکستگی (باز، بسته)

ب: پرشدگی (توسط یک کانی، کانی‌های مختلف)

ج: نحوه مسدود شدن (مواد همگن یا پراکنده)

د: دیواره‌های شکاف (صاف، سطوح صیقلی<sup>۲</sup>، خش‌دار یا خزشی<sup>۳</sup>)

---

<sup>1</sup> Morphology

<sup>2</sup> Slickensided

<sup>3</sup> Creeping

مورد بررسی قرار می‌گیرند. شکستگی با سطوح صیقلی دارای تخلخل و تراوایی بیشتری نسبت به شکاف با سطوح پرشده با مواد رسوبی است. موادی که شکاف‌ها را پر می‌کنند ناشی از تغییرات رخساره‌ای، رسوب‌گذاری یک یا چند کانی (مانند کلسیت، کوارتز، رس، اکسید آهن) است. پرشدگی و ترکیب کانی‌ها ویژگی‌های انتقال‌پذیری شکستگی‌ها را تغییر یا کاهش می‌دهند و از این رو باید مورد مطالعه و آزمایش لازم قرار گیرند. شکستگی‌ها متشکل از تنها دو سطح صاف و موازی نیستند. سطوح دیواره یک شکستگی اغلب ناهموار بوده که می‌تواند بر ویژگی‌های جریانی تأثیر زیادی بگذارد. مدل‌سازی جریان سیال بین دو سطح صاف نشان می‌دهد که جریان سیال با توان سوم بازشدگی متناسب است اما در یک محیط دارای شکستگی با سطوح ناهموار، جریان با توان بازشدگی به بزرگی ۶ می‌تواند متناسب باشد [Sahimi, 1995].

## ۲-۵-۵- جهت‌گیری<sup>۱</sup> شکستگی‌ها

جهت‌گیری شکستگی‌ها (شامل شیب و جهت شیب) با استفاده از داده‌های تحلیلی زمین‌شناسی اندازه‌گیری می‌شوند. شیب زاویه‌ی بین صفحه‌ی سطح دیواره شکستگی با جهت افقی است. امتداد یا آزیموت<sup>۲</sup> در مقایسه امتداد برخورد شکستگی با یک صفحه‌ی افقی نسبت به شمال و در جهت گردش ساعت بیان می‌شود. یکی از روش‌های آماری توصیف‌کننده فراوانی شکستگی‌ها بر اساس جهت‌گیری آن‌ها استفاده از نمودار استریونوت است. جهت شکستگی می‌تواند از صفر تا نود درجه متغیر باشد. جهت شکستگی در هر دسته شکستگی می‌تواند با یک توزیع یکنواخت یا غیریکنواخت توصیف شود. توابع توزیع پیشنهادی، تابع فیشر<sup>۳</sup> برای سیستم‌های همسانگرد و تابع بینگهام<sup>۴</sup> برای سیستم‌های ناهمسانگرد یا غیریکنواخت می‌تواند در نظر گرفته شوند [Bear et al., 1993].

---

<sup>1</sup> Orientation

<sup>2</sup> Azimuth

<sup>3</sup> Fisher

<sup>4</sup> Bingham

## ۲-۵-۶- چگالی شکستگی

چگالی و شدت شکستگی از مهم‌ترین مشخصه‌های یک شبکه شکستگی می‌باشند. به لحاظ کیفی، شکستگی‌های بسیاری در مناطقی با چگالی بالا وجود داشته و دسته‌هایی را شکل می‌دهند. از آنجا که شکستگی‌ها جریان سیال را تسهیل می‌بخشند، این نواحی به‌منظور بسیاری از کاربردهای مخزنی، ترجیح داده می‌شوند. در بسیاری از کارهای پیشین، چگالی شکستگی به‌صورت تعداد شمارش یافته شکستگی‌ها در هر واحد مساحت یا واحد حجم تعریف شده است. اگرچه این تعریف قراردادی به‌صورت کیفی مناطق با شدت شکستگی اندک و زیاد را نشان می‌دهد، اما به لحاظ کمی در این امر موفق نمی‌باشد. به دلیل تأثیر متفاوت شکستگی‌های کوچک و بزرگ در جریان سیال، ابتدا می‌بایست آن‌ها را از یکدیگر تشخیص داد.

بر اساس نظریه دیگری، چگالی شکستگی به‌صورت مجموع طول شکستگی‌ها در هر واحد مساحت (در دو بعد) و یا مجموع مساحت شکستگی‌ها در هر واحد حجم (در سه بعد) تعریف شده است. این تعریف که تعداد کل شکستگی‌های شمارش یافته و اندازه نسبی آن‌ها را در نظر می‌گیرد، مفیدترین روش اندازه‌گیری چگالی برای توصیف شکستگی‌ها است. مقدار بالای چگالی شکستگی بخش خاصی از مخزن را نشان می‌دهد که توسط شکستگی‌های فراوانی پوشانده شده است [Tran, 2004].



## فصل سوم

# روش‌شناسی تحقیق

## ۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به ضرورت مدل‌سازی شکستگی‌ها و انواع مدل‌سازی شبکه شکستگی پرداخته می‌شود. سپس روش‌های مختلف مطالعه شکستگی‌ها بیان می‌شود، شکستگی‌ها را می‌توان با کمک نمودارهای پتروفیزیکی از جمله چاه نمودارهای تصویری، چگالی، صوتی، نوترون، اطلاعات مغزه و همچنین اطلاعات استخراج شده از داده‌های لرزه‌ای مورد مطالعه قرار داد. نشانگرهای لرزه‌ای ابزارهای قدرتمندی به منظور تفسیر شکستگی‌ها و گسل‌ها هستند. در ادامه مفهوم، ضرورت و به‌طور مختصر به نحوه ساخت مدل هیبریدی پرداخته می‌شود.

## ۳-۲- انواع مدل‌سازی‌های شبکه شکستگی

فرآیند پیچیده شکسته شدن سنگ که بر اثر تغییر شرایط زمین‌شناسی رخ می‌دهد، باعث ایجاد الگوهای مختلف شکستگی می‌شود و در نتیجه خصوصیات مختلف مخازن شکافدار طبیعی را ایجاد می‌کند. با وجود ارائه مدل‌ها و رویکردهای متفاوت در زمینه‌ی مطالعه شبکه شکستگی‌ها در مخازن شکافدار، هنوز هم بحث‌های زیادی در پیش‌بینی جریان سیال از طریق شکستگی‌ها مطرح است. روش‌های متفاوتی برای سرشت‌نمایی مخازن شکسته طبیعی و شبیه‌سازی جریان سیال وجود دارند که به سه دسته عمده تقسیم می‌گردند: مدل پیوسته، مدل گسسته و مدل‌های ترکیبی [ Kazemi and Gilman, 1993 ].

در مدل‌های پیوسته، منطقه مورد مطالعه به بلوک شبکه‌بندی شده تقسیم می‌شود. اما در مدل‌های گسسته، شکستگی‌ها به صورت مستقل و با توجه به خصوصیاتشان مدل می‌شوند. از سوی دیگر مدل‌های ترکیبی پیشرفته‌تری برای شبیه‌سازی مخازن ناهمگن شکافدار وجود دارند که قادرند از کلیه داده‌ها با مقیاس‌های مختلف استفاده کنند. این روش‌ها، رویکردهای قطعی و تصادفی را با هم ترکیب می‌کنند و در هر دو مدل پیوسته و گسسته وجود دارند.

### ۳-۲-۱- مدل‌های پیوسته<sup>۱</sup>

اولین مدل پیوسته برای مطالعه جریان در محیط شکافدار بر اساس تعریف دو محیط جدا از هم ارائه گردید. این دو محیط شامل محیط ماتریکس با درجه تخلخل بالا و نفوذپذیری کم و محیط شکافها با درجه تخلخل کم اما نفوذپذیری زیاد بوده که امکان تبادل سیال بین این دو محیط وجود دارد. مدل تخلخل منفرد<sup>۲</sup>، مدل پیوسته تخلخل دوگانه<sup>۳</sup>، مدل تراوایی دوگانه<sup>۴</sup> در این گروه جای می‌گیرد [Van Golf, 1982].

در مدل‌های پیوسته، مخازن شکافدار به تعداد محدودی بلوک شبکه‌بندی شده تقسیم می‌گردد. در مدل‌های تخلخل منفرد، جریان سیال صرف‌نظر از تراوایی ماتریکس فقط به شکستگی‌های باز و متصل به هم نسبت داده می‌شود. هر بلوک با تخلخل یکسانی که میانگین همه شکستگی‌های موجود در آن بلوک است، مشخص می‌گردد. در تخلخل دوگانه - تراوایی دوگانه نیز نمایش مشابهی به کار می‌رود. در این مدل‌ها، ماتریکس و شکستگی به‌عنوان دو محیط متخلخل هم تداخل در نظر گرفته می‌شوند و معادلات جریان سیال در محیط‌های متخلخل برای تخمین تخلخل و تراوایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به شکل (۳-۱) مدل‌های حبه قندی<sup>۵</sup>، لایه‌ای<sup>۶</sup> و چوب کبریتی<sup>۷</sup>، سه مدل شاخص ایده آل سازی سیستم شکستگی‌ها هستند [Reiss, 1980].

---

<sup>1</sup> Continuum Models

<sup>2</sup> Single porosity

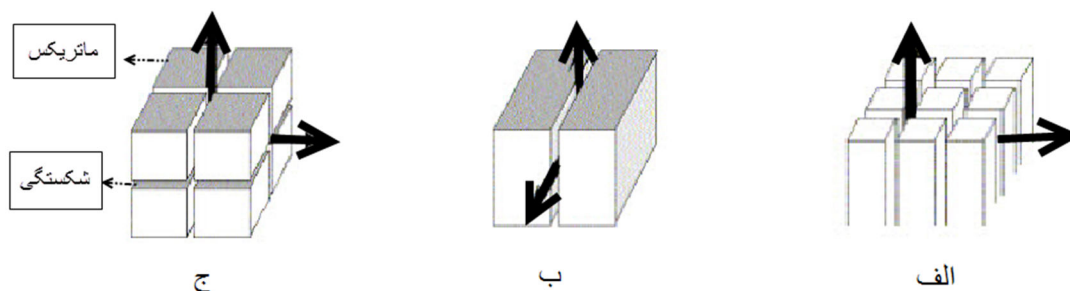
<sup>3</sup> Dual porosity

<sup>4</sup> Dual permeability

<sup>5</sup> Sugar cube

<sup>6</sup> Layered

<sup>7</sup> Matchstick



شکل ۱-۳: نمایش مدل‌های پیوسته. الف: مدل چوب کبریتی ب: مدل لابه‌ای ج: مدل حبه قندی [Reiss, 1980]

علاوه بر اینکه این روش فوایدی از لحاظ سادگی در شبیه‌سازی دارد، در رویکردهای پیوسته به ناهمگنی سنگ به‌عنوان یک میدان تصادفی پیوسته توجه می‌شود. این کار می‌تواند به‌طور مؤثری با مشکل مقیاس در مواردی که اطلاعات شکستگی‌های به دست آمده متعلق به مقیاس‌هایی است که موردنظر نیست، مقابله کند. ولی در این رویکرد جزئیات نحوه به هم پیوستگی شکستگی‌ها، زبری سطح صفحه شکستگی‌ها تعیین نمی‌شود. در این روش، تنها شدت شکستگی‌ها مورد توجه است که برای مدل کردن مخازن شکستگی طبیعی کافی نیست.

### ۳-۲-۲- مدل‌های شبکه گسسته شکستگی<sup>۱</sup>

مدل‌های گسسته، خصوصیات شکستگی‌ها را به‌طور منحصربه‌فردی شبیه‌سازی می‌کنند و جریان سیال را با توجه به هندسه شکستگی‌ها و جهت جریان در آن‌ها پیشگویی می‌کنند. این روش بر این فرض استوار است که توده سنگ محیطی پیوسته بوده و خواص توده سنگ‌های شکسته شده، به وسیله رفتار شکستگی‌های منفرد تعیین می‌شود [Vincent and Caumon, 2009].

در این نوع مدل‌سازی فضای شکستگی‌ها به‌صورت مجموعه‌ای از اشکال هندسی مانند خط در فضای دوبعدی و صفحات دایره‌ای یا چندضلعی در فضای سه‌بعدی متناظر شده و تحلیل اندرکنش این اشکال بیانگر رفتار شکستگی‌ها محسوب می‌شود [ملایوسفی و همکاران، ۱۳۹۰]. این نوع مدل‌ها

<sup>1</sup> Discrete Fracture Network (DFN)



قطعی و احتمالی می‌باشند.

روش‌های گسسته قطعی<sup>۱</sup> از تحلیل‌های ریاضی و ژئومکانیکی که شبیه به روش‌های پیوسته قطعی است استفاده می‌کنند. محدود بودن اطلاعات موجود در توصیف یک مخزن شکافدار، باعث ایجاد عدم قطعیت بسیار زیادی در خصوصیات و پارامترهای بکار گرفته شده در مدل‌های تولیدی می‌شود. بنابراین، استفاده از روش‌های قطعی در مدل‌سازی شکاف‌ها به‌جز در مورد گسل‌های با مقیاس بزرگ تقریباً غیرممکن بوده و نیاز به به‌کارگیری روش‌های احتمالی<sup>۲</sup> است [مسیحی، ۱۳۹۰]. روش‌های قطعی به‌خصوص در مواردی که به‌منظور مدل‌سازی شکستگی در زمین‌شناسی پیچیده مخازن شکسته مورد استفاده قرار می‌گیرند، محدودیت‌های ذاتی دارند.

رویکرد احتمالی در مدل‌سازی شکستگی‌ها می‌تواند بازه گسترده‌ای از روش‌های مدل‌سازی را شامل شود. به علت درجه بالای عدم قطعیت ناشی از تعداد محدود داده‌های در دسترس، نیاز به به‌کارگیری روش‌های احتمالی وجود دارد. در روش مدل‌سازی احتمالی ابتدا اطلاعات شکستگی‌ها مانند طول، فاصله، جهت‌گیری، بازشدگی و چگالی که در محل چاه‌ها موجود هستند، به‌صورت آماری تحلیل می‌شوند. بنابراین توزیع خصوصیات شکستگی‌های خارج از چاه‌ها قابل پیش‌بینی است. سپس شکستگی‌ها توسط فرایند پواسون (این فرایند بر اساس مفاهیم زمین‌آماري و فرایندهای تصادفی است)، مطابق با توزیع‌های بزرگ‌نمایی شده به‌صورت خصوصیات منحصر به فرد تولید می‌شوند [Bear et al., 1993].

برخی خواص شبکه شکستگی‌ها مانند خاصیت هم‌اتصال شکستگی‌ها<sup>۳</sup> زبری دیواره صفحه شکستگی یا ماهیت فرکتالی پراکندگی شکستگی‌ها در شبکه شکستگی می‌تواند با به‌کارگیری رویکرد احتمالی توصیف گردد. عدم امکان در نظر گرفتن همه شکاف‌ها در مدل و سرعت پایین مدل‌سازی از

---

<sup>1</sup> Deterministic

<sup>2</sup> Probabilistic

<sup>3</sup> Fracture connectivity

نقاط ضعف این رویکرد است. همچنین، در نظر گرفتن پیچیدگی‌هایی چون جریان‌های چند فازی و لحاظ کردن اثرات گرمایی در مدل از دیگر نقاط ضعف این رویکرد مدل‌سازی است [مسیحی، ۱۳۹۰].

### ۳-۲-۳- روش‌های ترکیبی

اگرچه هر دو روش پیوسته و شبکه شکستگی گسسته می‌تواند برای مدل‌سازی هندسی مخازن شکافدار بکار رود، در نظر گرفتن همه شکاف‌ها در مخزن به شکل صریح با این فرض که می‌توان آن‌ها را به شکل کامل تشخیص داد امکان‌پذیر نیست. بنابراین ترکیب روش‌های مختلف مدل‌سازی می‌تواند مفید باشد. مدل‌های ترکیبی می‌توانند منابع داده‌های مختلف را باهم تطبیق دهند و مقیاس‌های مدل‌سازی مختلف را پوشش دهند. محققان زیادی ترکیب روش‌های شبکه شکاف گسسته و روش پیوسته را به کار برده تا بتوانند از مزیت‌های هر دو روش بهره ببرند [Dershowitz et al., 2000]. روش کار به این ترتیب است که با روش شبکه شکستگی گسسته مدل‌سازی یک ناحیه از مخزن انجام می‌شود سپس خواص معادل آن ناحیه در مدل پیوسته با انطباق دادن<sup>۱</sup> رفتار هیدرولیکی آن در مدل به دست می‌آید.

### ۳-۲-۳- روش‌های مطالعه شکستگی

منابع داده‌ای متعددی برای توصیف شکستگی در مخازن شکسته طبیعی وجود دارند؛ ابزارهای متفاوت، مقیاس‌های متفاوتی را تحت پوشش قرار داده و دارای دقت وضوح متفاوتی‌اند. منابع داده بزرگ مقیاس شامل داده‌های لرزه‌نگاری و رخنمون می‌باشند. منابع داده کوچک مقیاس نیز مجموعه‌ای از داده‌های مختلف شامل نمودارهای چاه پیمایی، تصاویر درون‌چاهی، آنالیز مغزه‌ها، داده‌های حفاری و تست‌های تولیدی و فشار را در بر دارند. هر یک از داده‌های فوق به شناسایی جنبه‌ای از شکستگی‌ها کمک می‌کند. به‌طور کلی داده‌های مورد استفاده در مطالعات ارزیابی شکستگی‌ها، می‌تواند به دو دسته داده‌های مستقیم و غیر مستقیم تقسیم‌بندی کرد.

---

<sup>1</sup> Fiting

**داده‌های مستقیم:** این گروه اطلاعات شامل داده‌های رخنمون‌ها، مطالعات مغزه، تصاویر حاصل از نمودارهای تصویری، اطلاعات هرزروی گل حفاری و داده‌های نمودارهای تولید است.

**داده‌های غیرمستقیم:** این گروه اطلاعات شامل داده‌های به‌دست آمده از مقاطع لرزه‌ای، چاه آزمایی و ابزار مختلف نمودارگیری مانند نمودار صوتی نمودارهای قطرسنج و غیره است.

هم‌چنین در روش دیگر طبقه‌بندی اطلاعات و داده‌های به‌کاررفته در ارزیابی شکستگی‌های سنگ مخزن، می‌توان منابع داده‌ای را به دو گروه استاتیک و دینامیک تقسیم‌بندی کرد:

**داده‌های استاتیک:** این داده‌ها شامل اطلاعات حاصل از مقاطع لرزه‌ای، اطلاعات مغزه و مقاطع نازک، مطالعات رخنمون‌ها، نمودارهای تصویری و یا سایر نمودارهای چاه پیمایی است.

**داده‌های دینامیک:** از جمله اطلاعات دینامیک که می‌تواند در مورد مطالعه شکستگی‌ها مورد استفاده قرار بگیرد، می‌توان به اطلاعات چاه آزمایی، هرزروی گل و نیز تاریخچه تولید چاه و مخزن اشاره کرد. البته هیچ یک از اطلاعات دینامیکی، اطلاعات دقیقی راجع به خواص شکستگی‌ها ارائه نمی‌دهند، اما بررسی آن‌ها می‌تواند در بررسی رفتار جریان‌ی مخازن شکافدار به ما کمک کند [Van Dijk, 1998].

### ۳-۳-۱- نمودارهای تصویری

در سال ۱۹۸۶ شرکت شلمبرژه اولین تصویرگر میکروالکتریکی به نام تصویرگر FMS را وارد صنعت نمود که تحولی بزرگ در عرصه تصویرگرها به وجود آورد. این دستگاه برای نخستین بار در ایران در سال ۱۹۹۰ میلادی در چاه شماره ۶۰ میدان رگ سفید مورد استفاده قرار گرفت. پس از آن در سال ۱۹۹۱ تصویرگر FMI به بازار عرضه شد که دارای قدرت تفکیک‌پذیری بالاتر و پوشش بیشتری نسبت به FMS است. دستگاه FMI با دارا بودن ۱۹۲ سنسور مقاومتی روی ۴ بالشتک<sup>۱</sup> و ۴

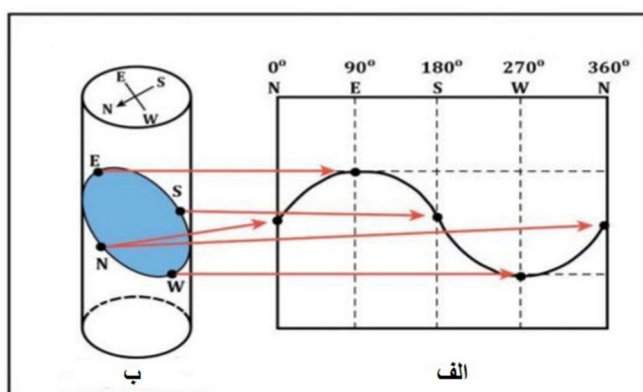
---

<sup>۱</sup> Pad

زبان<sup>۱</sup> متحرک این قابلیت را دارد که در چاه‌هایی با قطر ۸/۵ اینچ، پوششی برابر با ۸۰ درصد از دیواره چاه را داشته باشد [قاسم العسکری، ۱۳۹۰].

اگر قطر چاه افزایش یابد پوشش چاه کمتر می‌شود. در شروع تهیه نمودارگیری، دستگاه که در انتهای چاه قرار دارد، تمام بالشتک‌ها و زبان‌ها بر روی دیوار چاه فشرده می‌شوند و مقاومت ویژه سازند با استفاده از عبور یک جریان الکتریکی از داخل سازند اندازه‌گیری می‌شود. در طول نمودارگیری هر میکروالکتروود، جریانی ساطع می‌کند و جریان به‌سوی سازند متمرکز می‌شود. شدت جریان که بازتاب‌کننده تغییرات مقاومت میکرو است، اندازه‌گیری شده و به تصاویر خاکستری و یا رنگی تبدیل می‌شود.

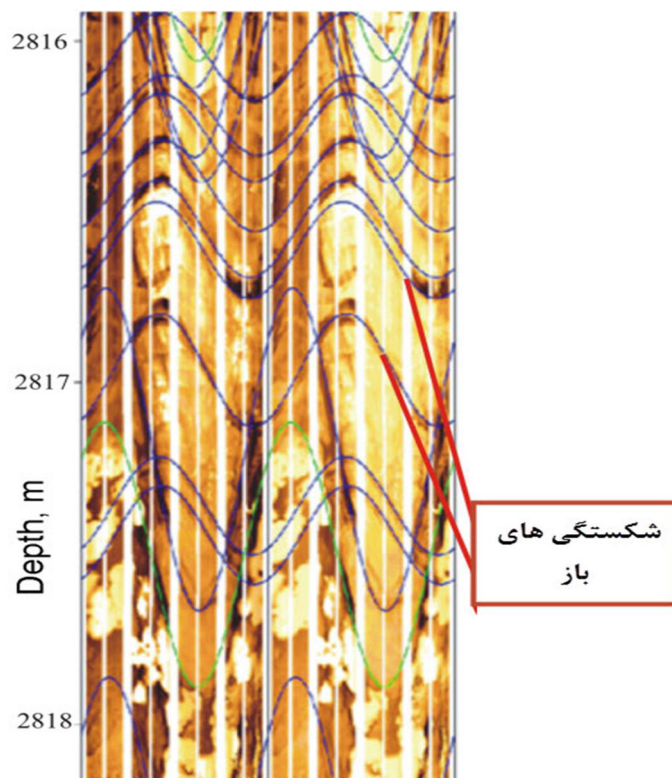
با توجه به شکل (۲-۳)، تصویر حاصل از نمودار FMI در واقع به‌صورت یک تصویر استوانه‌ای شکل از دیواره چاه است. برخورد هر صفحه غیر عمود بر محور چاه به‌صورت یک بیضی در این تصاویر، مشاهده می‌شود. وقتی استوانه از نقطه‌ای مشخص (معمولاً از جهت شمال مغناطیسی) باز می‌شود، این صفحات به‌صورت سینوسی با دامنه خاص ظاهر می‌شوند. محور افقی نشان‌دهنده آزیموت و محور قائم نشان‌دهنده عمق است.



شکل ۲-۳: الف: تصویر بازه شده استوانه چاه و نمایش موج سینوسی حاصل از باز شدن پدیده‌ی صفحه‌ای ب: تصویر استوانه‌ای از دیوار چاه و صفحه‌ای که چاه را به‌صورت قائم قطع کرده است.

<sup>1</sup> Flap

از آنجا که قدرت تفکیک‌پذیری تصویرگر FMI در حد یک‌دهم اینچ است، می‌توان درصد بسیار زیادی از شکستگی‌ها را بررسی نمود و شیب و آزیموت شکستگی‌ها را محاسبه کرد. شکستگی‌ها روی نمودارهای تصویری به‌وضوح ظاهر می‌شوند. به‌طوری که می‌توان حالت، شکل، طول، عرض و نوع آن‌ها را مشخص نمود. این پدیده به علت تفاوت در مقاومت ویژه الکتریکی مواد مختلف به وجود می‌آید. با توجه به شکل (۳-۳)، در شکستگی‌های باز مایع حفاری قادر است به درون شکستگی‌ها نفوذ کند و به علت رسانا بودن مایع حفاری، تأثیر خود را به‌صورت خطوط سیاه سینوسی روی تصویر نشان دهد. مناطق با رنگ سفید در تصاویر FMI شاخص نواحی با مقاومت بالا (پر شدگی شکستگی) است و نواحی با مقاومت پایین، نشان‌دهنده منافذ پرشده از آب و یا گل حفاری است که با رنگ تیره نشان داده می‌شود.



شکل ۳-۳: نمونه‌ای از شکستگی‌های باز در نمودار تصویری FMI [Soleimani, 2016].

### ۳-۲- نمودار چگالی

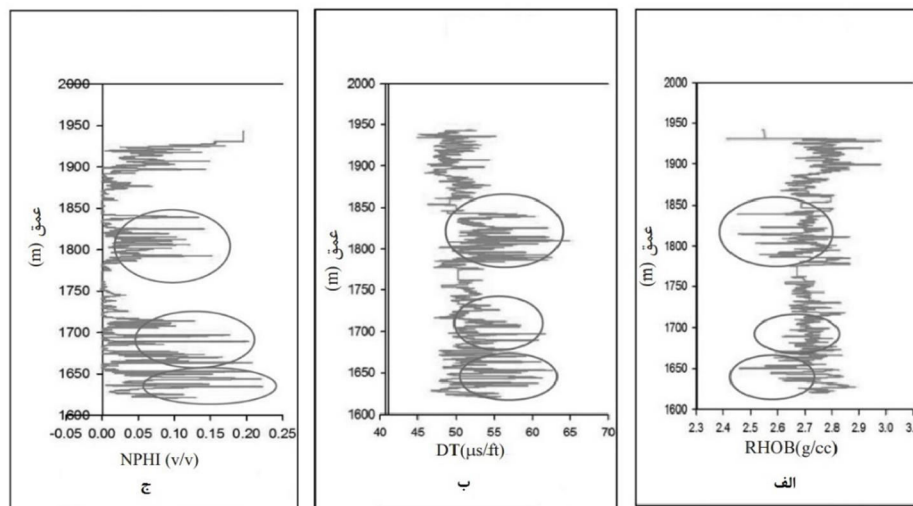
در این نمودار، پرتو گاما از منبع به سازند ساطع شده و توسط ثبت کننده دریافت می‌شود. چون جذب و پراکندگی پرتو گاما در سازند تا درجه زیادی به تراکم مواد و یا به عبارت دیگر به مقدار الکترون‌های موجود در مسیرش بستگی دارد، بنابراین توسط این نمودار، چگالی کل و تخلخل سنگ اندازه‌گیری می‌شود. نمودار چگالی (RHOB) و منحنی تصحیح چگالی ( $\Delta\rho$ ) نیز می‌توانند اختلالات تخلخل را به دلیل وجود لبه‌های شکستگی که در هنگام حفاری قطع شده‌اند تشخیص دهند. بنابراین زمانی که چاه ریختگی و ناهمواری نداشته باشد، منحنی تصحیح چگالی با تغییرات زیاد می‌تواند گواه وجود شکستگی باشد و به‌عنوان یکی از ابزارهای مفید در تشخیص شدت شکستگی‌ها به کار رود. همچنین به کمک این نمودارها می‌توان نواحی شکستگی تراوا را به دلیل وجود سیال قابل حرکت درون آن‌ها مشاهده نمود. منحنی تصحیح نمودار چگالی، معمولاً نشانگر خوبی برای ناهمواری دیواره چاه است.

در بعضی از موارد رفتار نمودار چگالی در زون‌های شکسته دوگانه است. این نمودار غالباً در زون‌های شکسته روند کاهشی از خود نشان می‌دهد، چون در زون‌های شکسته از تراکم سنگ کاسته و بر تراکم سیال افزوده می‌شود و چگالی سیال نسبت به سنگ پایین‌تر است (شکل ۳-۴ الف). اما در زمان حفاری چون فشار گل از فشار سازند بالاتر است، لذا در موقعیت زون‌های شکسته امکان نفوذ گل به درون شکستگی‌های باز، پس زدن نسبی سیال درون شکستگی‌ها و رسوب نمودن بخش‌های جامد گل وجود دارد. به‌طور معمول چگالی مواد بخش جامد گل حفاری از چگالی سازند بیشتر است. بنابراین اگر فراوانی شکستگی‌های باز در یک زون بالا باشد و فشار گل نیز نسبت به فشار سازند در حدی بالا باشد که امکان رسوب کردن گل در شکستگی‌ها فراهم گردد. در موقعیت زون‌های شکسته انتظار افزایش در نمودار RHOB دور از انتظار نخواهد بود. بنابراین استفاده از این نمودار به‌منظور شناسایی زون‌های شکسته نیاز به دقت بالایی خواهد داشت [عقلی و همکاران، ۱۳۹۵].

### ۳-۳-۳- نمودار صوتی

نمودارهای صوتی (DT) با شعاع بررسی ۰/۱ متر، به شیوه‌های مختلف به تعیین نواحی شکستگی کمک می‌کنند. این نمودار، بر اساس زمانی که ارتعاشات صوتی در ضخامت معینی از طبقه انتشار می‌یابد، تهیه می‌شود. این زمان که به‌طور ممتد، ضمن بالا آمدن سوند مخصوص از داخل چاه ثبت می‌شود، با سرعت صوت در لایه‌ها رابطه‌ی عکس دارد. سرعت صوت در لایه‌های زیرزمینی به خاصیت ارتجاعی یا کشسانی سنگ‌ها، میزان تخلخل لایه‌ها، مایعات محتوی آن‌ها و فشار مایعات داخل لایه بستگی دارد.

در لایه‌های سخت و نیمه سخت، که مقدار تخلخل پایین است، نمودار صوتی به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر آب و مقدار آن در داخل طبقه قرار می‌گیرد. بنابراین نمودار موردنظر علاوه بر سختی، کم و کیف تخلخل را هم به‌خوبی روشن می‌کند. در لایه‌های نیمه سخت و سخت میزان تخلخلی که از روی لاگ قرائت می‌شود به واقعیت نزدیک است. زیرا عواملی از قبیل نوع گل حفاری، اندازه قطر چاه، منطقه اشغالی گل و کنتاکت لایه‌ها اثری در تهیه و دقت لاگ ندارد. در لایه‌های نرم با تخلخل بالا، نسبت به نوع و خواص فیزیکی مایع داخل فضاها، نمودار صوتی حساسیت نشان می‌دهد. حتی در بعضی مواقع این نمودار برای تعیین میزان نفت آغشتگی سنگ مخزن، کاربرد پیدا می‌کند. در لایه‌های نرم چنانچه این نمودار با یکی از انواع نمودارهای الکتریکی یا اشعه گاما به درون چاه رانده شود، بسیاری از مسائل از قبیل لیتولوژی، تخلخل و مقایسه چینه‌شناسی را می‌توان انجام داد. بدیهی است زون‌های شکسته به دلیل کاهش چگالی و کاهش فشردگی سازند، سرعت عبور را کاهش خواهند داد، مخصوصاً اگر شکستگی باز باشد [Darling, 2005]. با توجه به شکل (۳-۴ ب) روشن است که در موقعیت زون‌های شکسته می‌بایست انتظار افزایش زمان رسیدن موج را داشت.



شکل ۳-۴: الف: نمودار چگالی ب: نمودار صوتی ج: نمودار نوترون را نشان می‌دهد. در سه ناحیه مشخص شده بر روی نمودار چگالی با توجه به روند کاهش چگالی می‌توان نتیجه گرفت که میزان تخلخل و شکستگی افزایش یافته است. همچنین در نمودار صوتی با توجه به روند افزایشی در سه ناحیه مشخص شده می‌توان نتیجه گرفت که تخلخل و شکستگی افزایش یافته است [عقلی و همکاران، ۱۳۹۵].

### ۳-۳-۴- نمودار نوترون

نمودارهای نوترون (NPHI) با شعاع بررسی ۰/۱ متر، می‌تواند به‌گونه‌ای مؤثر در مشاهده شکستگی‌ها مورد استفاده قرار گیرند. این نمودار ضمن ارسال نوترون پرنرژی به درون سازند، به‌طور پیوسته هسته مولکول‌های سازند را در معرض برخورد با نوترون‌ها قرار می‌دهد. این نمودار کاهش نوترون ساطع شده را اندازه‌گیری می‌کند. هرچه این کاهش انرژی بیشتر باشد، به معنای بیشتر بودن اتم هیدروژن تلقی می‌شود. بیشتر بودن اتم هیدروژن نیز به مفهوم بیشتر بودن آب یا هیدروکربور است که مفهوم بیشتر بودن تخلخل را نیز به همراه دارد. در نتیجه به نظر می‌رسد که در موقعیت زون‌های شکسته، که انتظار افزایش میزان سیال درون سازندی می‌رود، باید انتظار افزایش در مقدار نمودار نوترون را داشت (شکل ۳-۴ ج).

### ۳-۳-۵- اطلاعات مغزه

آنالیز مغزه نیز در بسیاری از موارد برای مطالعات زیرزمینی استفاده می‌گردد. کاربردها و



محدودیت‌های زیادی برای بهره‌گیری از مغزه‌ها در توصیف مخازن شکسته وجود دارد. مغزه‌ها، اندازه-گیری‌ها و مشاهدات مستقیمی را در رابطه با سنگ‌شناسی، ضخامت لایه، اندازه دانه، تخلخل و تراوایی فراهم

می‌آورند. به کمک آن‌ها می‌توان به توصیف ویژگی‌های شکستگی‌ها نظیر ارتفاع، عرض، فاصله، جهت، چگالی، تراوایی و شدت پرشدگی آن دست یافت. سنگ‌شناسی نیز نکات معینی را در مورد حضور شکستگی بیان می‌کند. به‌عنوان مثال، بیشترین احتمال شکسته شدن مربوط به کوارتزیت، پس از آن در دولومیت، ماسه سنگ سیمان شده و در انتها سنگ آهک است.

### ۳-۳-۶- اطلاعات لرزه‌ای

لرزه‌نگاری یکی از مهم‌ترین منابع داده در کسب اطلاعات معتبر شکستگی برای کل مخزن شکسته و به‌ویژه برای مناطق بین چاهی است. نمودارهای لرزه‌نگاری دو یا سه‌بعدی، داده‌هایی از مقیاس منطقه‌ای هستند که درجه وضوح آن‌ها بسته به دامنه و طول موج سیگنال از ده‌ها تا صدها متر تغییر می‌کند. به کمک داده‌های لرزه‌نگاری می‌توان به توصیف ساختار مخزن، ضخامت، سنگ‌شناسی و انحنای سازندهای مختلف پرداخت. می‌توان از نقشه‌های لرزه‌نگاری گسل‌ها و شکستگی‌های بزرگ را تفسیر نمود.

سیگنال‌های لرزه‌ای دارای ویژگی‌های مجزایی هستند که اکثر آن‌ها توسط ناهمگنی‌های مخزن مثل شکستگی‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرند. این ویژگی‌ها بر اساس دامنه، فاز و سرعت سیگنال‌های لرزه‌ای می‌باشند. هر ویژگی قادر خواهد بود یکی از جنبه‌های شبکه شکستگی را مشخص کند [Gong, 2007].

### ۳-۴- تفسیر و مدل‌سازی گسل‌ها

یکی از پارامترهای مخزن که مطالعه و توصیف آن‌ها نقش مهمی در مدیریت تولید ایفا می‌کند،

گسل‌ها هستند. با مطالعه گسل‌های مخزن، شامل مطالعه گسل‌های کوچک و بزرگ با استفاده از داده‌های لرزه‌ای بازتابی، می‌توان به مدل‌سازی گسل‌های موجود در مخزن پرداخت و آن‌ها را مورد تفسیر قرارداد [وارسته و همکاران، ۱۳۹۱]. داده‌های لرزه‌نگاری تنها منابع حاوی اطلاعات زمین-شناسی زیرسطحی برای مناطق بین چاهی در مخزن به حساب می‌آیند، لذا داده‌های لرزه‌ای می‌تواند به کاهش عدم قطعیت در شناخت چارچوب ساختمانی مخزن و برآورد بهتر مشخصات گسل‌های مخزن کمک شایانی کند. در این موارد داده‌های لرزه‌ای دارای دقت کافی می‌باشند. مشخصاً در داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی، قدرت تفکیک و شناسایی ساختارهای زیرسطحی و ضریب اطمینان آن بالاتر خواهد رفت. بنابراین می‌توان به کمک تفسیر داده‌های لرزه‌ای بازتابی، گسل‌های میدان را به صورت شبکه ناپیوستگی مدل‌سازی کرد. گسل‌ها به‌طور معمول با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای تفسیر می‌شوند. نشانگرهای لرزه‌ای می‌تواند در تعیین شبکه گسل‌های زیرسطحی، شناسایی امتداد آن‌ها، ابعاد جانبی و عمودی گسل‌ها کمک بزرگی باشند [Yenugu et al., 2010].

### ۳-۴-۱- نشانگرهای لرزه‌ای

نشانگرهای لرزه‌ای می‌توانند از مقاطع قبل و بعد از برانبارش استخراج گردند. نشانگرهای لرزه‌ای توابع ریاضی مشتق شده از داده‌های لرزه‌ای هستند؛ که در حوزه‌های زمان، فرکانس و یا زمان-فرکانس از داده‌های لرزه‌ای استخراج می‌شوند [Brown, 2001]. بر اساس مطالعات انجام‌شده [Chopra and Marfurt, 2005; Avseth and Mukerji, 2010]، نشانگرهای مشتق شده از زمان شامل داده‌های ساختمانی و نشانگرهای مشتق شده از دامنه شامل داده‌های چینه‌شناسی و مخزنی هستند.

در بین انواع داده‌های لرزه‌ای، نشانگرهای لرزه‌ای ابزار مفیدی به‌منظور تفسیر شکستگی‌ها و گسل‌ها هستند (Bake et al, 2011). برای تفسیر شکستگی‌ها و گسل‌ها در میان ده‌ها نشانگر لرزه‌ای که در مطالعات لرزه‌ای استفاده می‌شوند؛ نشانگرهای انحنا، آشفستگی، واریانس و الگوریتم ردیابی

مورچه بیشترین کاربرد را دارند [Hunt et al, 2010]. استفاده از چندین نشانگر این امکان را برای مفسر فراهم می‌کند تا به‌طور هم‌زمان بر روی چند نشانگر کار کنند و با ترکیب چندین نوع اطلاعات متفاوت با یکدیگر، بتوانند از طریق داده‌های لرزه‌ای راحت‌تر به اطلاعات مورد نیاز خود دست یابند. ترکیب نشانگرهای لرزه‌ای باعث افزایش دقت عمل در نقشه‌برداری گسل‌های کوچک‌مقیاس می‌شود که تشخیص آن‌ها در داده‌های لرزه‌ای دشوار است [Odoh et al, 2014].

### ۳-۵- مدل‌سازی هیبریدی

یک مدل شبکه شکستگی باید تمام عناصر و خواص شکستگی‌ها را که نقش مهمی در حیات تولید یک میدان دارند شامل شود. با توجه به تأثیر گسل‌های میدان بر روی شکستگی‌ها و تحت تأثیر قرار گرفتن خواص شکستگی‌های بزرگ و کوچک، برقرار کردن یک رابطه‌ی معنی‌دار بین همه‌ی این خواص یک موضوع چالش برانگیز است. مهندسين مخزن با استفاده از انواع نمودارهای پتروفیزیکی شکستگی‌ها را در مقیاس کوچک ولی با تفکیک‌پذیری<sup>۱</sup> بالا مدل‌سازی می‌کنند؛ از طرفی مفسرهای لرزه‌ای با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و نشانگرها، شکستگی‌ها را در مقیاس بزرگ ولی با تفکیک‌پذیری پایین مدل‌سازی می‌کنند. با این حال مسئله‌ی اصلی داشتن یک مدل با مقیاس‌ها و رزولوشن‌های مختلف است که هم گسل‌های با مقیاس بزرگ که مسئول بخشی از انتقال سیال، و هم گسل‌های با مقیاس کوچک که مسئول بخش دیگری از انتقال سیال هستند را داشته باشد. برای این منظور مدل هیبریدی با استفاده از نمایش چند مقیاسه، گسل‌ها و شکستگی‌های بزرگ‌مقیاس که کنترل‌کننده اصلی جریان در مخزن هستند را به صراحت توسط شبکه‌ی گسسته شکستگی<sup>۲</sup> مدل می‌کند. در مدل‌سازی هیبریدی شکستگی‌های کوچک‌مقیاس که بیشتر نفوذپذیری ماتریکس را افزایش می‌دهند، توسط مدل شکستگی ضمنی<sup>۳</sup> به‌صورت آماری نشان داده می‌شوند [Aarre et al, 2012].

---

<sup>1</sup> Resolution

<sup>2</sup> discrete fracture network (DFN)

<sup>3</sup> Implicite fracture modeling (IFM)

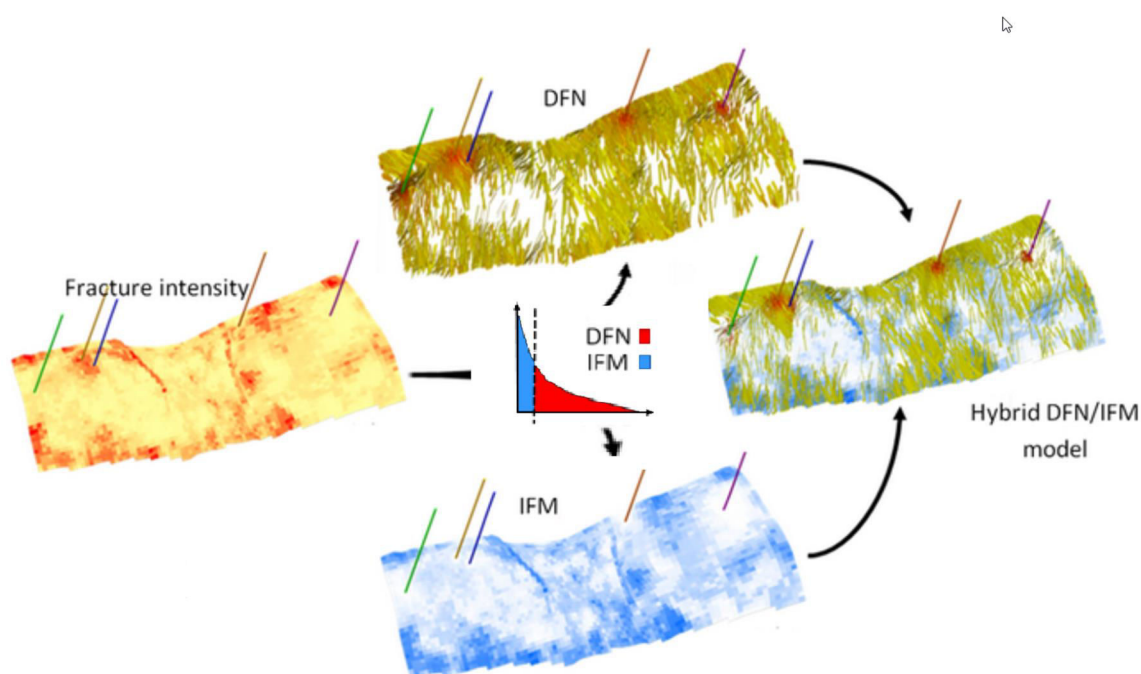
یک محدودیت مرسوم مدل‌سازی شکستگی به صورت مجزا تعداد بسیار زیاد شکستگی‌های مدل شده در میدان است، که به نمایش گذاشتن همه شکستگی‌ها با توجه به محدودیت‌های حافظه‌ای سیستم محاسبه کننده سخت و زمان‌بر است. هرچند شکستگی‌های گسسته در توصیف تغییرات در یک شبکه شکستگی خوب عمل می‌کنند. از این رو با توجه به اینکه ویژگی‌های شبکه پیوسته خیلی روان و تطبیق‌پذیر هستند و غالباً آسان به کار می‌روند می‌توان با کمک مدل‌سازی هیبریدی شکستگی‌های پیوسته و گسسته را باهم ترکیب کرد و به نمایش گذاشت. در فرایند مدل‌سازی هیبریدی با تعریف یک حد آستانه برای پارامتر طولی همه شکستگی‌ها با طول‌های بین حداقل تا حد آستانه به صورت ضمنی مدل می‌شوند در صورتی که همه شکستگی‌هایی که دارای طول بین حد آستانه تا حداکثر طول می‌باشند به صورت شکستگی‌های گسسته مدل می‌شوند (شکل ۳-۶). در مدل‌سازی هیبریدی حد آستانه طولی بین شکستگی‌های کوچک و بزرگ مقیاس وابسته به سایز سلول‌های شبکه است.

شکستگی‌های بزرگ مقیاس اتصال بین سلول‌های مدل را فراهم می‌کنند و شکستگی‌های کوچک مقیاس در خواص سلول شرکت دارند. خروجی مدل هیبریدی یک مدل واحد از ترکیب مدل‌های IFM و DFN است که نشان‌دهنده خواص شکستگی‌های بزرگ مقیاس در کنار خواص شکستگی‌های کوچک مقیاس است (شکل ۳-۵). در واقع مدل هیبریدی با بزرگ‌نمایی<sup>۱</sup> کردن مدل‌های شبکه شکستگی (IFM و DFN) با استفاده از یک روش آماری (oda) ساخته می‌شود. مدل‌سازی هیبریدی با استفاده از نمایش چند مقیاسه، گسل‌ها و شکستگی‌های بزرگ را که مسئول جریان سیال در مخزن می‌باشند، در کنار شکستگی‌های کوچک که در میزان تراوایی مخزن مؤثر هستند، در یک مدل به تصویر می‌کشد. در واقع خروجی مدل‌سازی هیبریدی یک مدل یکنواخت از ویژگی‌های گسل‌ها و شکستگی‌های بزرگ با مشارکت شکستگی‌های کوچک‌تر است. خروجی مدل‌سازی هیبریدی،

---

<sup>1</sup> Scale up

یک مدل چند مقیاسه<sup>۱</sup> از ویژگی‌های شکستگی‌ها و گسل‌ها است که این دارای اهمیت ویژه در مطالعه مخزن است. در واقع این ویژگی‌ها شامل خواص سلول‌های شکستگی شبکه از جمله تخلخل شکستگی  $\phi_f$ ، تراوایی شکستگی  $K_f$  و فاکتور سیگما  $\sigma$  است، که می‌تواند در شبیه‌سازی مخازن مورد استفاده قرار بگیرد. با ساخت مدل هیبریدی می‌توان زمان محاسبات مربوط به انتقال سیالات در مخزن را تا حد مطلوبی کاهش داد و زمان محاسبات را از چندین ساعت به چند دقیقه رساند [Souche et al, 2012].



شکل ۳-۵: روند ساخت مدل هیبریدی با ترکیب دو مدل IFM و DFN [Suoshe et al., 2012].

برای ادغام کردن دو مدل DFN و IFM باید این دو مدل را بزرگ‌مقیاس کرد تا بتوان در هر سلول خواص مربوط به تراوایی و تخلخل را برای شبیه‌سازی جریان به‌دست آورد. برای بزرگ‌مقیاس کردن از دو روش مبتنی بر جریان و روش Oda استفاده می‌شود.

<sup>1</sup> multiscale

### ۳-۵-۱- روش مبتنی بر جریان

در این روش از یک شبکه اجزاء محدود برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود و جریان را در هر سلول شبکه تحت یک شیب فشار شبیه‌سازی می‌کند که از طریق آن نفوذپذیری محاسبه می‌گردد. این به‌طور جداگانه در هر سه جهت (I,J,K) با یک واحد محاسبه می‌شود. در این روش شبیه‌سازی جریان بسیار آهسته انجام می‌شود و احتمالاً برای مخازن بزرگ که تعداد شکستگی بالایی دارند غیر عملی خواهد بود. این روش تنها می‌تواند به‌صورت تک فاز، برای بزرگ‌نمایی کردن شکستگی‌های گسسته استفاده شود [Lefranc et al., 2012]. علت این امر این است که در این روش به جای سلول از سطوح استفاده می‌شود و هر جایی که سطوح شکستگی به یکدیگر می‌رسند و ادامه پیدا می‌کنند، جریان در طول این سطوح شبیه‌سازی می‌شود.

### ۳-۵-۲- روش Oda

ادا (۱۹۸۵) روابط تحلیلی را برای محاسبه واحد نفوذپذیری یک توزیع شکستگی که در آن تمرکز شکستگی‌ها بالای نقطه نفوذ قرار دارند را، توسعه داد. فرایند بزرگ‌نمایی کردن برای ساخت مدل هیبریدی با کمک متد Oda که یک متد آماری است، انجام می‌شود. در این روش نفوذپذیری بر اساس کل مساحت شکستگی‌های گسسته در هر سلول تخمین زده می‌شود. با توجه به هندسه‌ی صفحات شکستگی بر اساس تعداد و اندازه شکستگی‌ها در هر سلول از یک متد آماری استفاده می‌شود. برای شکستگی‌های ضمنی یک انتگرال عددی در کل بخش‌های شکستگی برای ساختن واحد نفوذپذیری انجام می‌شود [Oda, 1985].

### ۳-۵-۳- شبکه گسسته شکستگی

مدل‌سازی شبکه گسسته شکستگی، نمایش تصادفی از شبکه شکستگی‌های طبیعی است. تولید شبکه شکستگی توسط اطلاعات آماری حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده میدان، صورت می‌گیرد. این مدل بر این فرض استوار است که خواص توده سنگ‌های شکسته شده به وسیله رفتار شکستگی-

های منفرد تعیین می‌شوند و توده سنگ محیطی پیوسته است. در نتیجه توده سنگ به‌عنوان شبکه‌ای از عناصر گسسته که معرف شکستگی‌ها هستند مشخص می‌گردند. در این نوع مدل‌سازی فضای شکستگی‌ها به‌صورت مجموعه‌ای از اشکال هندسی مانند خط در فضای دوبعدی و صفحات دایره‌ای یا چندضلعی در فضای سه‌بعدی متناظر شده و تحلیل برهمکنش این اشکال بیانگر رفتار شکستگی‌ها محسوب می‌شود. [Vinsent and Caumon, 2009]. در شبکه گسسته شکستگی، شکستگی‌ها بر مبنای ویژگی‌هایی همچون موقعیت فضایی، جهت‌یابی طول، نحوه تقاطع و بازشدگی، در فضا توزیع می‌شوند. بنابراین، در این روش، علاوه بر اینکه توزیع چگالی مشخص می‌شود، تمام جزئیات در مورد شکستگی‌ها نیز مشخص می‌شود. در این راستا، نتایج مدل‌سازی شیء‌گرا دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتر هستند، زیرا از این طریق، امکان تحلیل خواص شکستگی به‌صورت منحصر به‌فرد و مطالعه روابط داخلی آن‌ها، فراهم می‌شود.

برای ساخت مدل‌های عددی نحوه حرکت سیال از درون شکستگی‌ها، ابتدا باید به ساخت مدل شبکه گسسته شکستگی‌ها پرداخت. مدل‌های شبکه گسسته شکستگی با کاربرد شبیه‌سازی مونت کارلو<sup>۱</sup> و توابع توزیع آماری طول، جهت و موقعیت فضایی سیستم‌های شکستگی ایجاد می‌شوند. هرکدام از پارامترهای شکستگی‌ها مانند فاصله، مکان فضایی، جهت‌گیری و اندازه می‌تواند با توابع توزیع آماری مانند توزیع‌های نرمال، لاگ نرمال، گوسی و یا توابع توزیع دیگر بیان شوند.

### ۳-۵-۴- مدل شکستگی ضمنی

از آنجایی که تنها شکستگی‌هایی با مقیاس بزرگ به‌عنوان کانال‌های جریان در سلول‌های شبکه شکستگی تأثیرگذار هستند و باعث اتصال این سلول‌ها به یکدیگر می‌شوند، در واقع نیازی به نشان دادن شکستگی‌های کوچک مقیاس به‌طور صریح نیست. بلکه می‌توان این شکستگی‌ها را به‌صورت کارآمدتری با استفاده از یک روش آماری به‌صورت یک مدل شکستگی ضمنی به نمایش گذاشت. با

---

<sup>1</sup> Monte Carlo Simulation (MCS)

استفاده از مدل شکستگی ضمنی می‌توان کوچک‌ترین عناصر یک شبکه شکستگی را به‌عنوان مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی محلی مانند ضرایب تراکم شکست، هندسه و جهت‌گیری به نمایش گذاشت. در این مدل هر یک از پارامترهای مورد نیاز برای توصیف هندسه و خواص شکستگی با توابع توزیع احتمالی نشان داده می‌شوند [Souche et al, 2012].



## فصل چهارم

آنالیز شکستگی‌ها و مدل‌سازی

هیبریدی در میدان مورد مطالعه

## ۴-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به اختصار منطقه‌ی مورد مطالعه و داده‌های استفاده شده در پایان‌نامه شرح داده می‌شود. سپس به تحلیل شکستگی‌ها از روی چاه نمودارهای تصویری پرداخته می‌شود. در ادامه تفسیر گسل‌ها با کمک نشانگرهای لرزه‌ای انجام می‌شود و گسل‌ها با روش دستی و خودکار مدل می‌شوند. سپس مراحل ساخت مدل DFN و IFM به تفصیل بیان می‌شود. در پایان به ساخت مدل هیبریدی و تحلیل نتایج حاصل از آن پرداخته می‌شود.

## ۴-۲- زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه

میدان مورد مطالعه واقع در خلیج فارس و در مجاورت مرز مشترک با آب‌های امارات متحده عربی قرار گرفته است. این میدان گنبدی شکل که تقریباً بیضوی شکل است، قطر بزرگ آن با طول تقریبی ۱۴/۵ کیلومتر دارای روند شمال شرقی - جنوب غربی است و قطر کوچک آن حدود ۱۲/۵ کیلومتر است. این میدان در افق‌های شعیبا (داریان)، بوئیب (گدون)، عرب (سورمه)، خوف (کنگان و دالان) دارای پتانسیل نفت و گاز است.

ساختمان میدان مورد مطالعه یک ساختمان حاصل از فعالیت دیاپیرسم است و به صورت گنبد متمایل به بیضوی است که احتمالاً مربوط به حرکت گسل‌های عمیق پی‌سنگی<sup>۱</sup> و فشار نمک به بالا است. لازم به ذکر است علاوه بر تأثیر فازهای تکتونیکی بر منطقه خلیج فارس به همراه سایر نقاط زاگرس، حرکات گنبدی‌های نمکی نیز اثر فازهای تکتونیکی را تشدید کرده است. فعالیت کوهزایی هرسنین پسین علاوه بر حرکات ناحیه‌ای کلی حرکات مدور و بالارو محلی در هر دو قسمت شرقی و غربی حوضه نمکی (سری هرمز) حاصل نموده است که باعث تولید ساختمان‌هایی مانند ساختمان میدان مورد مطالعه شده است [لک و همکاران، ۱۳۹۱].

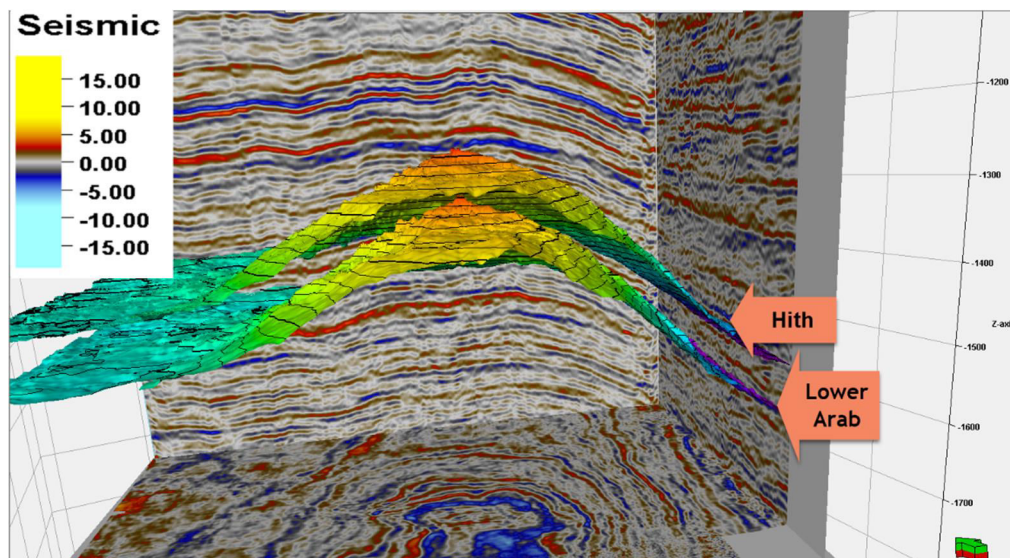
---

<sup>1</sup> Basement

این نوع ساختمان‌ها دارای گسل‌های نرمال در بخش‌های مختلف بخصوص در ستیغ است. این گسل‌ها باعث بروز حذف شدگی قسمتی از سازند که ممکن است مخزن هم باشند در چاه‌ها می‌گردد، که با توجه به شدت گسل خوردگی میزان حذف شدگی متفاوت است. از طرف دیگر وجود این گسل‌ها در یک افق و میزان جابجایی آن‌ها نشانه خوبی برای به دست آوردن مدت زمان و شدت حرکت بلوک‌های نمکی زیرین است. با مطالعه دقیق این گسل‌ها می‌توان به مسدود شدگی برخی افق‌ها و تجمع نفت و یا برعکس فرار نفت از افقی به افق‌های دیگر پی برد و درنهایت محل تجمع هیدروکربن را در تله‌های ساختمانی پیدا کرد.

در این پژوهش سازند عرب که از لحاظ نفتی در میدان مورد مطالعه از اهمیت خاصی برخوردار است به‌طور دقیق مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این سازند به دو بخش عرب بالایی و تحتانی و سپس هرکدام به چند زیر بخش تقسیم شده است. بخش تبخیری هیث به‌عنوان پوش‌سنگ اصلی مخزن عرب می‌باشد. در شکل (۴-۱)، مکعب لرزه‌ای به همراه افق هیث و عرب به نمایش گذاشته شده است. بخش عرب بالایی متشکل از تناوب دولومیت‌های قهوه‌ای با انیدریت‌های توده‌ای سفید و مقداری سنگ آهک بوده و به ۹ لایه نفت ده تقسیم می‌گردد که عبارت‌اند از:

U-1, U-2, U-2A, U-3, U-4, U-5, U-6, U-7, U-8. وجود تخلخل‌های حفره‌ای در دولومیت‌ها و وجود لایه‌های انیدریتی باعث ایجاد مخزنی چند طبقه گردیده است. ترکیب سنگ-شناسی و فسیل‌شناسی این سازند نشان‌دهنده چند سیکل پیشروی و پسروی دریا است که موجب رسوب‌گذاری متناوب انیدریت و دولومیت آهکی فسیل‌دار گردیده است.

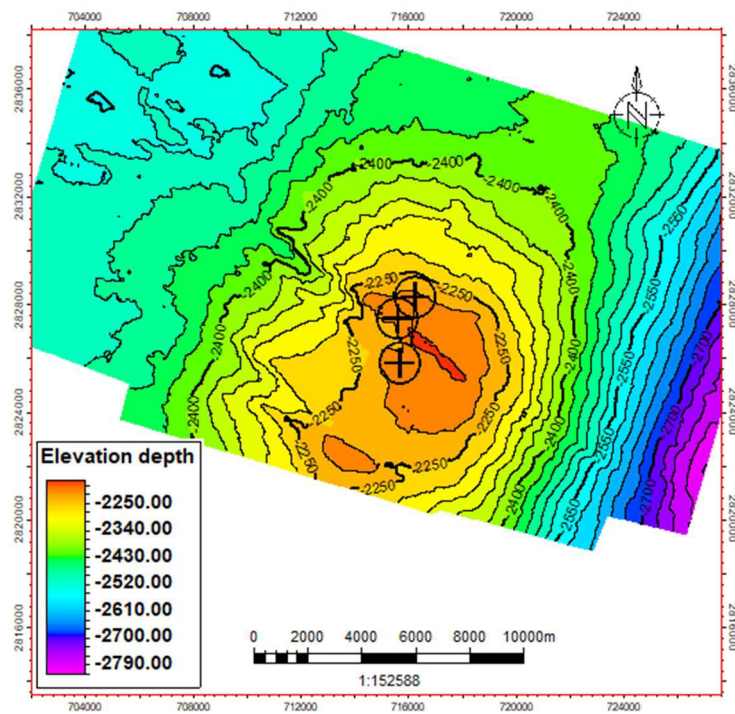


شکل ۴-۱: مکعب داده‌های لرزه‌ای میدان مورد مطالعه، که سازند عرب به‌عنوان افق مخزنی هدف روی آن مشخص شده است.

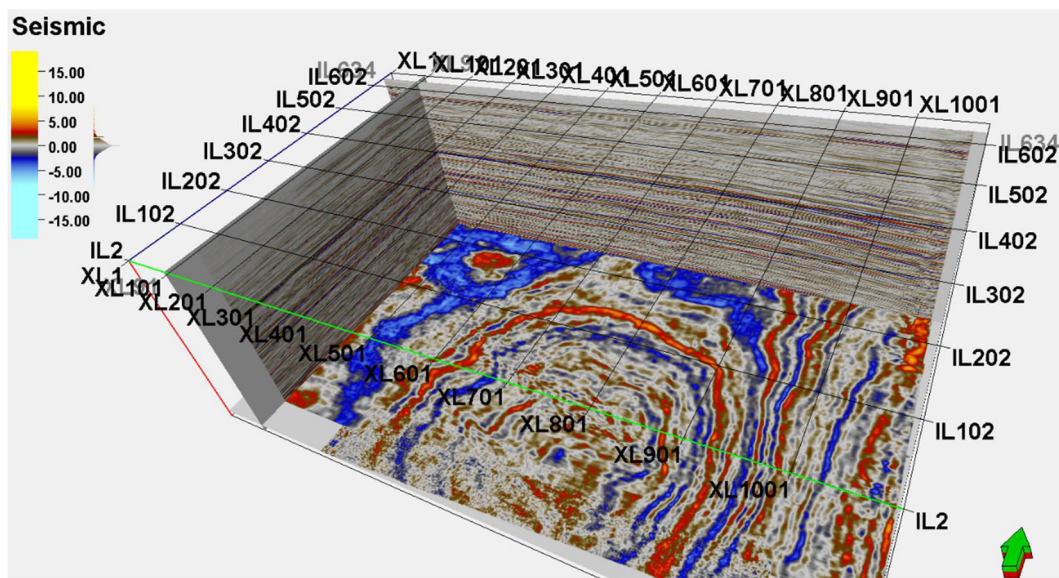
#### ۴-۲-۱- اطلاعات و داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه از داده‌های نمودارهای تصویری و پتروفیزیکی سه چاه 2s-50, 2s- kd1, 2s-57 استفاده شده است. در شکل (۲-۴) موقعیت چاه‌ها بر روی نقشه خطوط تراز زیرسطحی سازند عرب در میدان مورد مطالعه نشان داده شده است.

داده‌های لرزه‌ای این میدان به‌صورت سه‌بعدی و دارای کیفیت متوسط است که در مدل‌سازی مخزن مورد مطالعه و همچنین مطالعه ساختمانی از آن استفاده می‌شود. طبق شکل (۳-۴)، این مکعب لرزه‌ای دارای ۶۵۸ In Line و ۱۰۹۲ X Line با فاصله ۲۵ متر بین دو خط برداشت است.



شکل ۴-۲: نمایش موقعیت چاه‌ها بر روی نقشه خطوط تراز زیرسطحی میدان مورد مطالعه



شکل ۴-۳: نمایش In Line و X Line روی مکعب داده‌های لرزه‌ای میدان مورد مطالعه

### ۴-۳- تحلیل شکستگی‌ها

تجزیه و تحلیل شکستگی‌ها با کمک نمودار تصویرگر FMI یکی از اهداف اصلی این پژوهش

است. با توجه به قدرت تفکیک‌پذیری بالای تصویرگر FMI، درصد بالایی از شکستگی‌ها بر روی آن قابل تشخیص است که می‌توان شیب و آزیموت آن‌ها را به دست آورد. در این بخش به تحلیل داده‌های

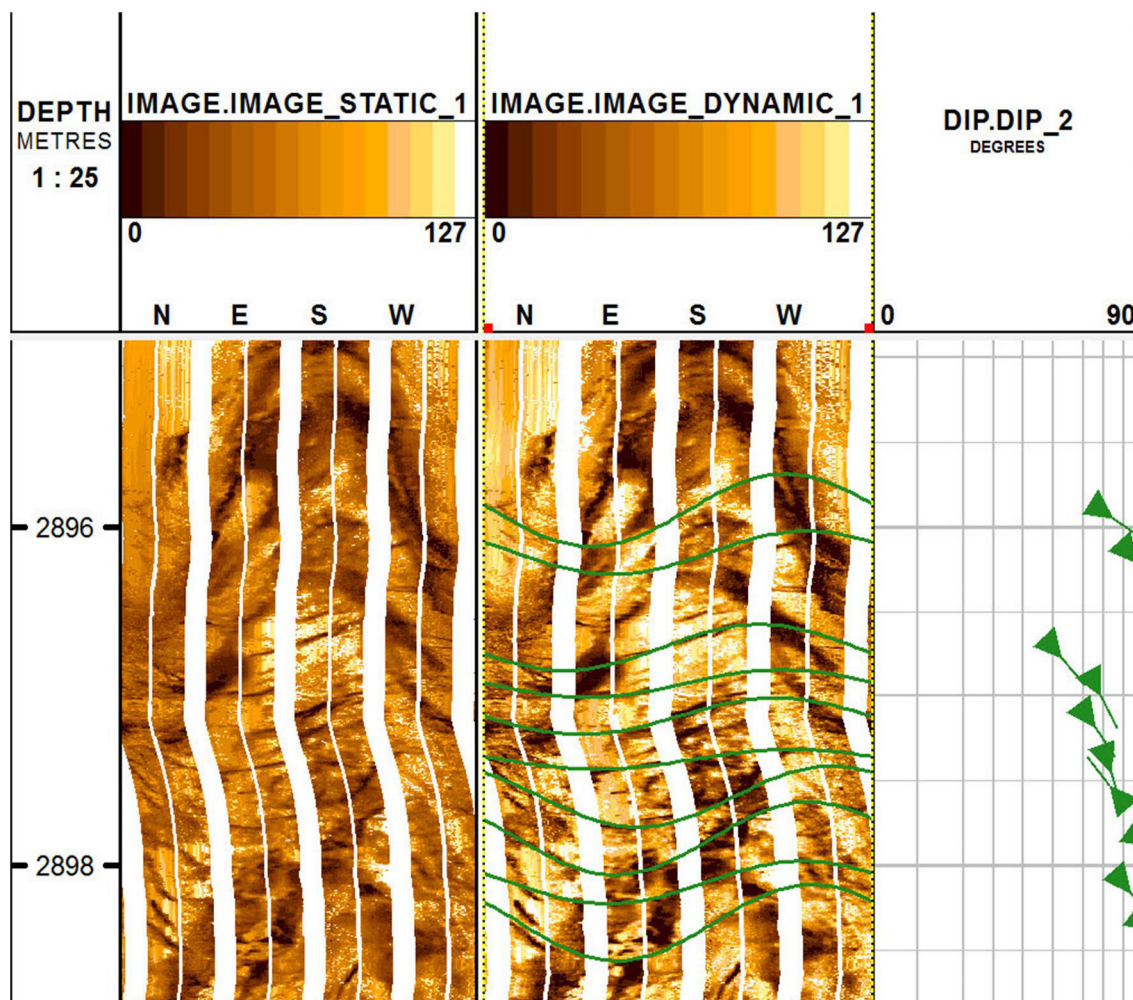
شکستگی‌های ثبت شده توسط نمودارهای تصویری پرداخته شده است.

### ۴-۳-۱- تعیین شکستگی‌های مخزن در چاه 2S-50

این چاه با حداکثر انحراف ۷۶ درجه به سمت شمال غربی در میدان مورد مطالعه حفر گردیده است. لاگ تصویرگر FMI در سال ۲۰۱۰ میلادی در این چاه رانده شد. با توجه به عمق نمودارگیری، محدوده مورد مطالعه در این تحقیق از عمق ۲۷۵۴ تا ۳۱۷۵ متری در نظر گرفته شده است. یکی از مهم‌ترین اهداف لاگ مذکور، پردازش و تفسیر مشخصات شکستگی‌های موجود در سنگ‌های کربناته است که می‌توان به مهم‌ترین آن‌ها به شرح ذیل اشاره نمود:

با توجه به لیتولوژی غالب (دولومیت) در چاه، شکستگی‌های باز و رسانا در اکثر فواصل نمودارگیری توسعه یافته‌اند. همان‌طور که در (شکل ۴-۴) دیده می‌شود، شکستگی‌های مشاهده شده در تصویر سمت چپ (خطوط سینوسی نازک تیره)، در تصویر سمت راست با انتخاب دستی آن‌ها به‌عنوان شکستگی باز به‌صورت منحنی سینوسی سبز رنگ، به همراه شیب و آزیموت جهت شیب آن‌ها مشخص گردیده است.





شکل ۴-۴: نمایش نمونه‌ای از شکستگی‌های باز در تصویر FMI در چاه 2S-50 به همراه شیب و آزیموت جهت شیب آن‌ها

درنهایت پس از مطالعه و بررسی دقیق لاگ تصویری موردنظر مجموعاً ۱۳۱ شکستگی باز در چاه مورد مطالعه تشخیص داده شد، که بیشترین تعداد شکستگی در اعماق ۲۸۸۲، ۲۸۹۷، ۲۹۴۶، ۲۹۶۲، ۳۰۷۸ و ۳۰۸۸ متری دیده می‌شود.

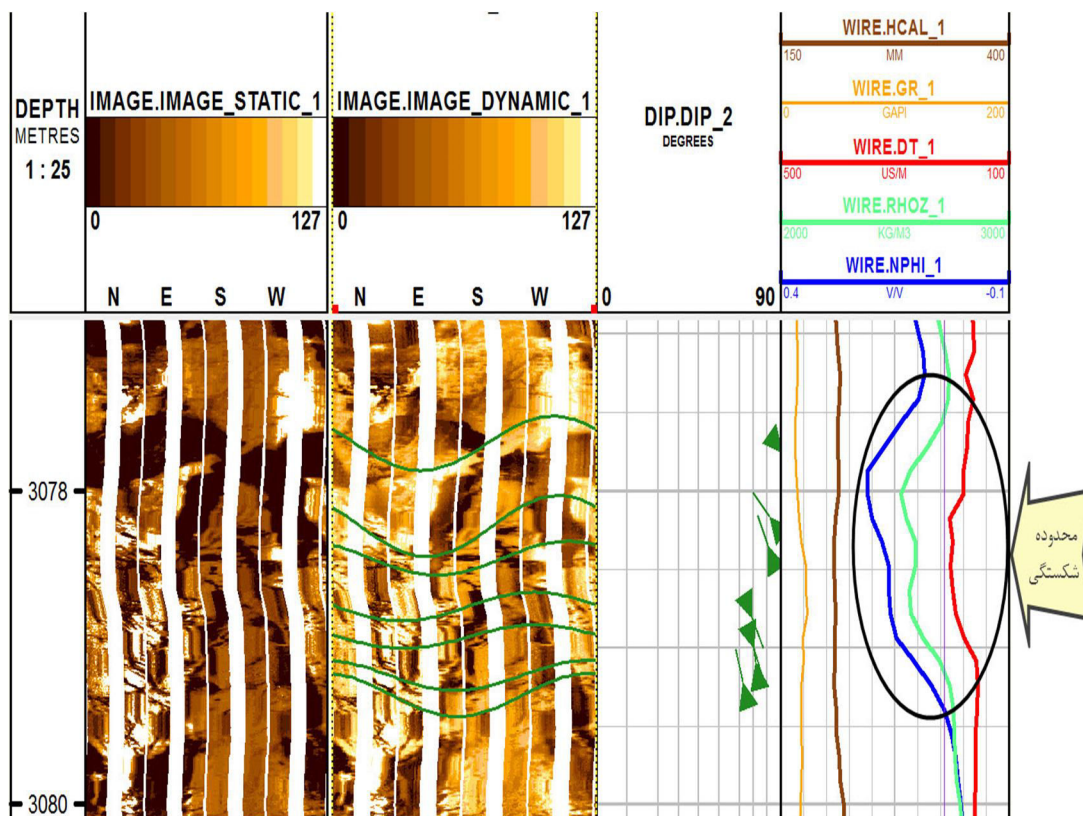
از آنجایی که ابزارهای نمودارگیری تخلخل (چگالی، نوترون و صوتی) ابزارهای توانمندی برای شناسایی شکستگی‌ها و همچنین ارزیابی تخلخل ثانویه کارآمد هستند، می‌توان با کمک آن‌ها به صحت شکستگی‌های تشخیص داده شده روی لاگ FMI پی برد (شکل ۴-۵). با توجه به اینکه شکستگی‌های تشخیص داده شده از نوع باز هستند، انتظار افزایش میزان سیال درون سازندی و افزایش سیال حفاری می‌رود، باید انتظار افزایش در مقدار نمودار نوترون را داشت. در اینجا نمودار

نوترون (NPHI) در محدوده شکستگی‌ها افزایش یافته است.

سرعت عبور ارتعاشات صوتی در زون‌های شکسته به دلیل کاهش چگالی و کاهش فشردگی سازند، کاهش پیدا می‌کند، مخصوصاً اگر شکستگی‌ها از نوع باز باشد. روشن است که در موقعیت زون‌های شکسته می‌بایست انتظار افزایش زمان رسیدن موج را داشت. در اینجا نمودار (DT) در مقابل محدوده شکستگی‌ها روند افزایشی از خود نشان می‌دهد (شکل ۴-۵).

چگالی لایه‌ها که در حال حفاری هستند به صورت پیوسته با استفاده از ابزار چگالی ثبت می‌شود. انتشار اشعه گاما از طریق یک منبع (که متصل به ابزار است) صورت می‌گیرد و هرگونه تغییر در ارتعاشات مربوط را ثبت می‌کند، که تغییرات بستگی به چگالی سنگ دارد. منحنی چگالی با تغییرات زیاد می‌تواند گواه وجود شکستگی باشد و به عنوان یکی از ابزارهای مفید در تشخیص شدت شکستگی‌ها به کار رود. در اینجا نمودار (RHOZ) در محدوده شکستگی‌ها روند کاهشی از خود نشان می‌دهد که این نشان‌دهنده کاهش چگالی و در نتیجه افزایش وجود شکستگی در محدوده است (شکل ۴-۵).

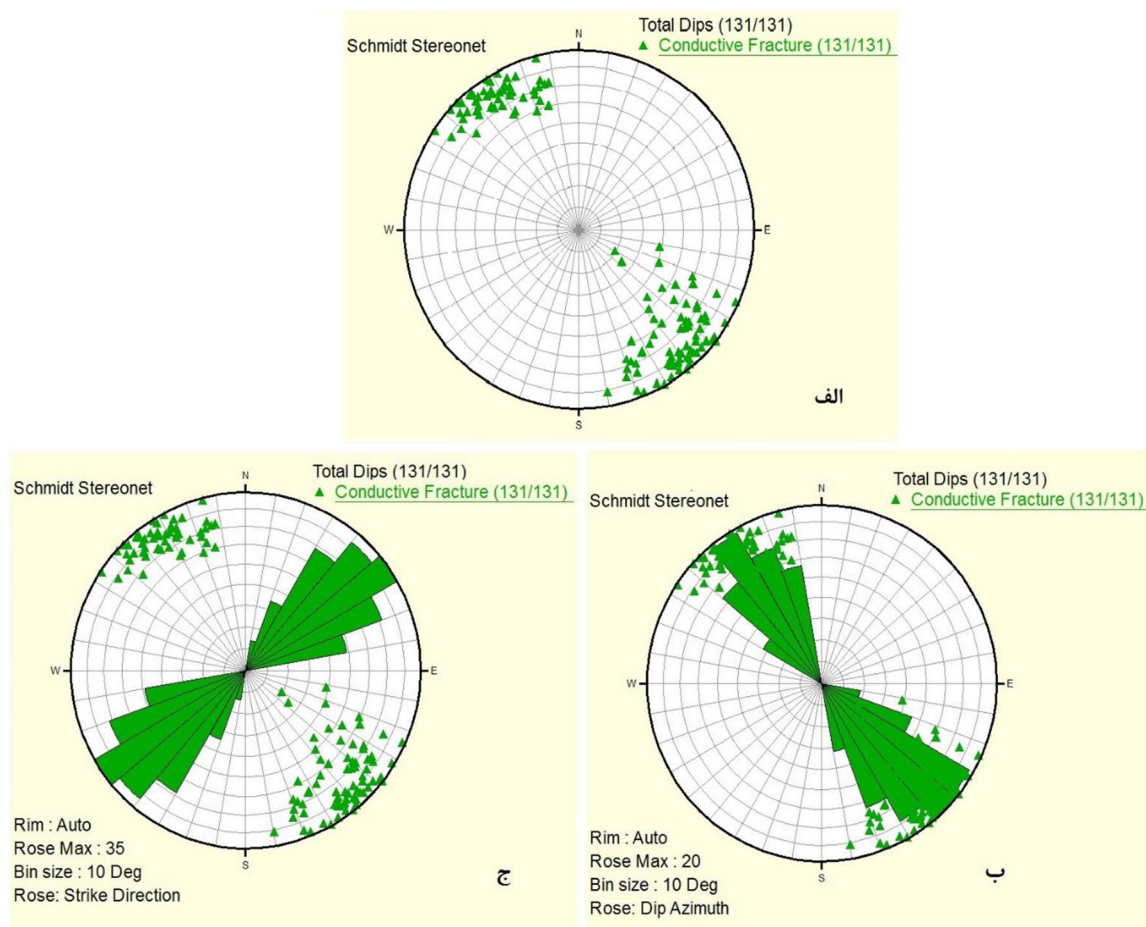




شکل ۴-۵: صحت تشخیص شکستگی‌های گرفته شده روی نمودار FMI، با کمک نمودارهای پتروفیزیکی (نوترون، صوتی و چگالی)

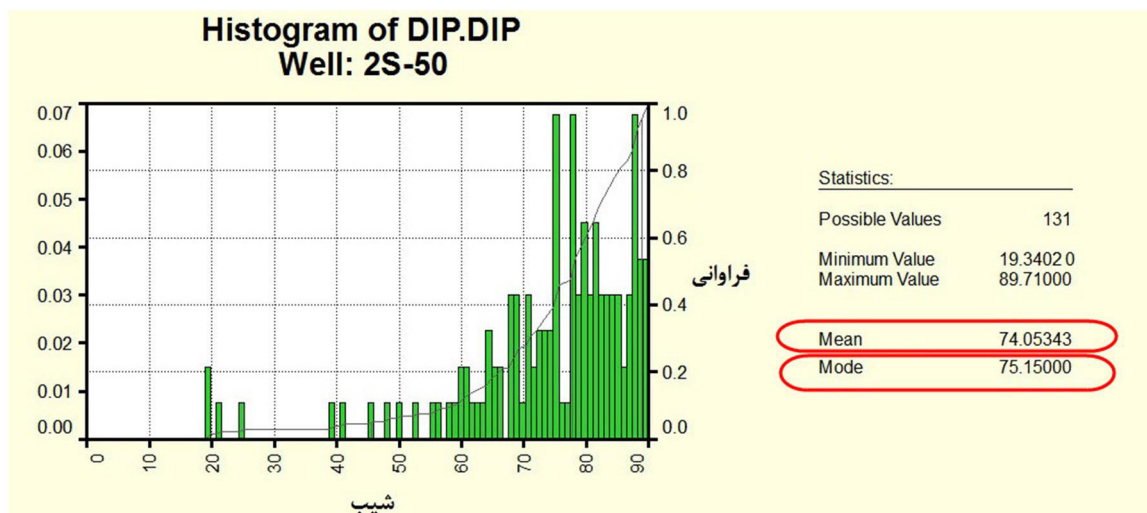
پس از تشخیص شکستگی‌ها، با توجه به اینکه تعداد شکستگی‌ها در هر ناحیه زیاد و دارای وضعیت‌های مختلف است و مطالعه انفرادی آن‌ها نتیجه‌ای نخواهد داشت، برای به دست آوردن بیشینه‌های آماری آن‌ها، این شکستگی‌ها در شبکه استریونت ترسیم شد. با توجه به نمایش شکستگی‌ها بر روی شبکه استریونت می‌توان شیب، جهت شیب و امتداد شکستگی‌ها را مطالعه و بررسی کرد (شکل ۴-۶).

بر اساس ۱۳۱ عدد شکستگی به دست آمده از نمودار FMI، در زون مورد مطالعه و با توجه به نمودارهای شیب، آزیموت و امتداد به دست آمده از این شکستگی‌ها عمده امتداد شکستگی‌ها شمال شرق - جنوب غرب است (شکل ۴-۶ ج)، از طرفی عمده جهت شیب به دست آمده در محدوده آزیموت ۱۱۰-۱۶۰ درجه و ۳۱۰-۳۵۰ درجه است (شکل ۴-۶ ب).



شکل ۴-۶: خصوصیات شکستگی‌های باز در چاه 2S-50. الف: تجمع غالب شکستگی‌ها با توجه به شیب و آزیموت آن‌ها ب: جهت شیب شکستگی‌ها ج: امتداد شکستگی‌ها

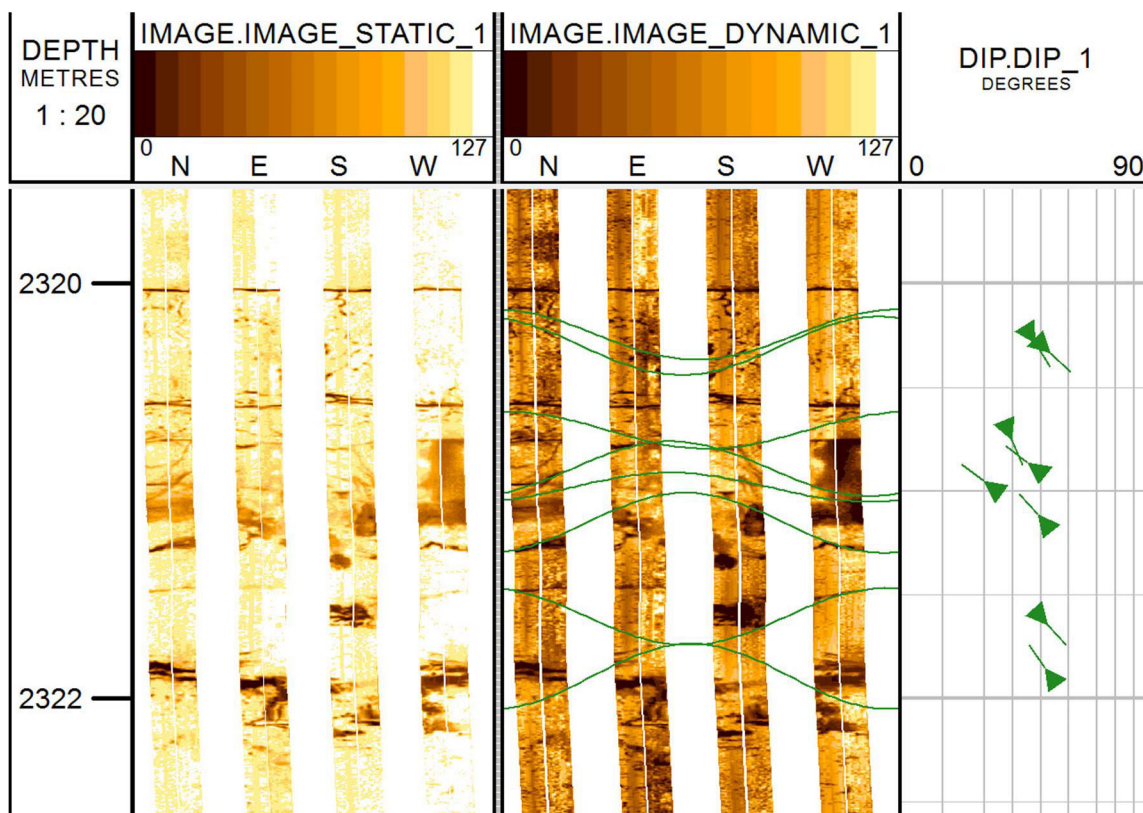
با توجه به نمودار هیستوگرام ترسیم شده میانگین شیب شکستگی‌های به دست آمده در چاه 2S-50، ۷۴ درجه است، و همچنین شیب ۷۵ درجه در این چاه بیشترین فراوانی را دارد. کمترین شیب به دست آمده ۱۹ درجه و بیشترین شیب ۸۹ درجه است (شکل ۴-۷).



شکل ۴-۷: نمودار هیستوگرام مربوط به کمینه و بیشینه، میانگین و بیشترین فراوانی مقدار شیب به- دست آمده در چاه 2S-50

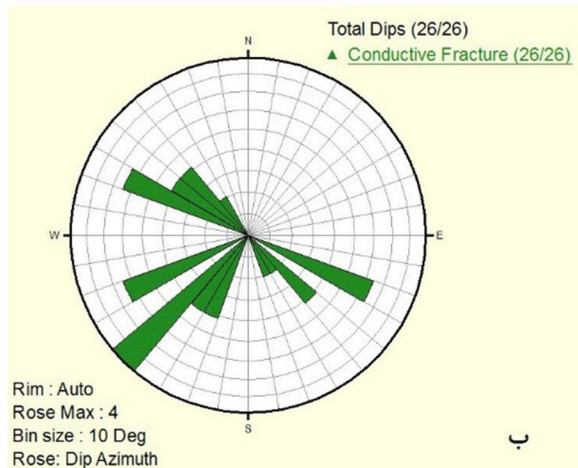
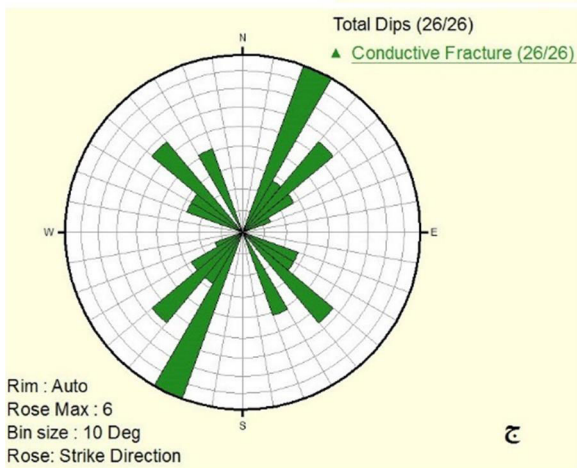
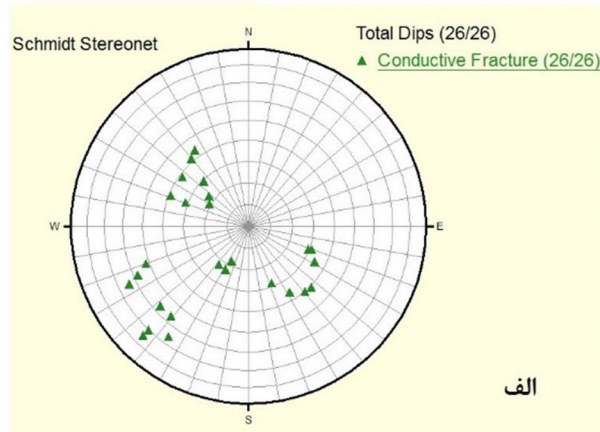
### ۴-۳-۲- تعیین شکستگی‌های مخزن در چاه 2skd-1

این چاه به صورت عمودی در میدان مورد مطالعه حفر گردیده است. لاگ FMI در سال ۲۰۰۲ میلادی در عمق ۲۲۵۰ تا ۲۵۵۰ متری یعنی در سراسر سازند عرب رانده شده است. یکی از اهداف این ابزار تعیین شکستگی‌های موثر در جابجایی مایعات مخزنی است. لیتولوژی به دست آمده از این چاه حکایت از افزایش سنگ آهک با میان لایه‌های انیدریت نسبت به دولومیت دارد. از این جهت پس از مطالعه و بررسی دقیق لاگ تصویری موردنظر مجموعاً ۲۶ شکستگی باز در چاه مورد مطالعه تشخیص داده شد، که بیشترین تعداد شکستگی در اعماق ۲۲۸۴، ۲۳۰۴، ۲۳۲۱ و ۲۳۴۶ متری دیده می‌شود. شکستگی‌های باز در چاه موردنظر در عمق ۲۳۲۱ متری با خطوط سینوسی سبز رنگ بر روی نمودار FMI در سازند مورد مطالعه شناسایی شد (شکل ۴-۸).



شکل ۴-۸: نمونه‌ای از شکستگی‌های باز شناسایی شده در چاه 2skd-1.

با نمایش شکستگی‌ها بر روی شبکه استریونت این امکان فراهم می‌شود که مشخصات هر شکستگی را در کنار دیگر شکستگی‌ها به صورت دسته‌ای مورد مطالعه قرار داد. بر اساس ۲۶ شکستگی به دست آمده از نمودار FMI، با توجه به نمودارهای شیب، جهت شیب و امتداد به دست آمده از این شکستگی‌ها عمده جهت شیب شکستگی‌ها شامل آزیموت ۱۱۰-۱۴۰ درجه، ۲۰۰-۲۵۰ درجه و ۳۰۰-۳۳۰ درجه است (شکل ۴-۹ ب). همچنین شکستگی‌های به دست آمده از این نمودار دارای امتداد شمال شرق - جنوب غرب و شمال غرب - جنوب شرق می‌باشند (شکل ۴-۹ ج).

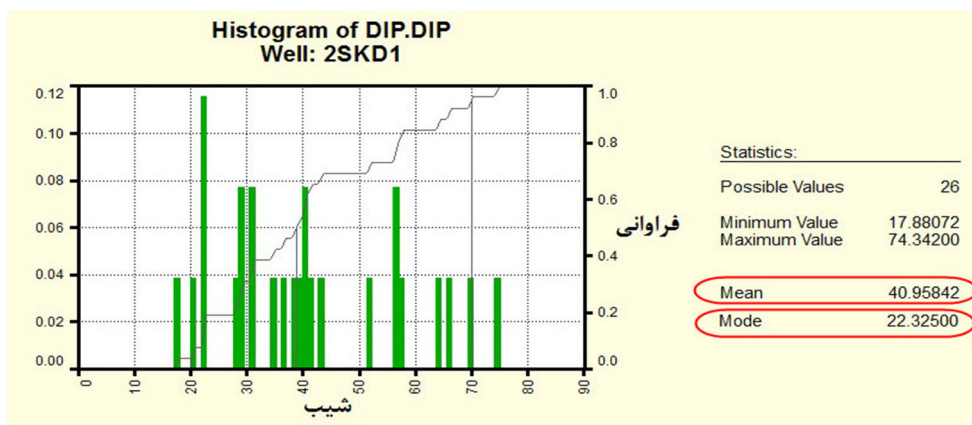


شکل ۴-۹: خصوصیات شکستگی‌های باز در چاه 2skd-1. الف: تجمع شکستگی‌ها با توجه به شیب و آزیموت آن‌ها ب: جهت شیب شکستگی‌ها ج: امتداد شکستگی‌ها

با توجه به نمودار هیستوگرام در چاه 2skd-1، میانگین شیب شکستگی‌های به دست آمده ۴۰

درجه است، و شیب ۲۲ درجه در این چاه بیشترین فراوانی را دارد (شکل ۴-۱۰).





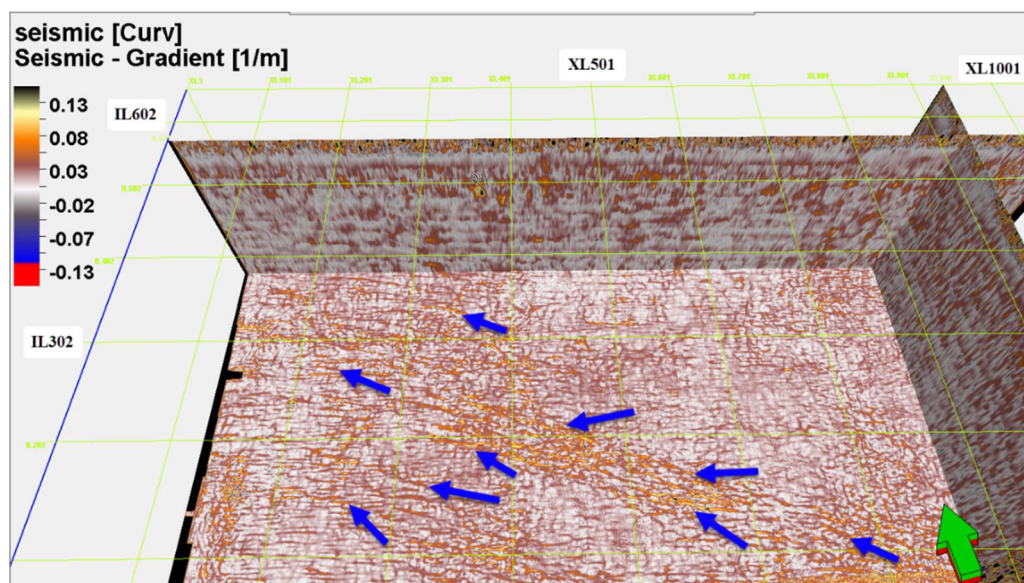
شکل ۴-۱۰: نمودار هیستوگرام مربوط به میزان فراوانی شکستگی‌های چاه 2skd-1.

#### ۴-۴ - شناسایی گسل‌ها

تفسیر گسل‌ها در اغلب موارد به علت کیفیت پایین داده‌های لرزه‌ای تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این امر باعث افزایش استفاده از روش‌های ردیابی‌های خودکار گسل‌ها مانند نشانگرهای لرزه‌ای می‌شود. افزایش کیفیت داده‌های لرزه‌ای بر مبنای حفظ دامنه و تضعیف نوفه عمل می‌کند و می‌تواند در تشخیص بهتر گسل‌ها مفید باشد.

پردازش نشانگرهای لرزه‌ای می‌تواند گسترش فضایی هر گسل را به خوبی نشان دهد، این مسئله اجازه می‌دهد تا بتوان با روش دستی انتخاب صحیحی از مناطق گسلی را بر روی مقاطع لرزه‌ای داشت. سپس با ارتباط خطوط تفسیری صرفاً بر روی این مقاطع زمانی می‌توان سطوح گسلی با کیفیتی را ایجاد کرد. در این بررسی، سطوح گسلی با استفاده از تکنیک‌های تفسیری مانند شناسایی امتداد و پیوستگی رخداده‌ها، شیب رخداده‌های بازتابی و سایر الگوهای لرزه‌ای در مقطع مورد تفسیر قرار گرفته‌اند. این عملیات، به صورت تکراری و بر روی مقاطع لرزه‌ای، نقشه‌های زمانی و نقشه‌های نشانگر لرزه‌ای انجام گرفت. انتخاب ویژگی‌های گسلی بر روی یک شبکه منظم (مقاطع لرزه‌ای) صورت گرفته و سطوح گسلی برای تمام افق‌های مورد نظر ارزیابی گردید. برای تفسیر گسل‌های میدان مورد مطالعه ابتدا بر اساس مطالعات پیشین [Mahdavi Basir et al, 2013; Ngeri et al, 2015]

نشانه‌های آشفتگی، واریانس، انحنا و الگوریتم ردیابی مورچه از داده‌های لرزه‌ای استخراج شده است. پارامتر انحنا به میزان تغییر شیب در یک ساختار چین‌خورده مربوط است. میزان انحنای ساختارهای زمین‌شناسی را می‌توان به‌سادگی بر روی برش‌های افقی داده‌های لرزه‌ای تعیین کرد [Abul Khair et al, 2012]. مقادیر بالای نشانگر انحنا تغییرات ناگهانی در شیب ساختاری را برجسته می‌کند که شاخصه رایج شکستگی‌ها و گسل‌ها هستند [Chopra and Marfurt, 2007]. هرچقدر میزان انحنا بیشتر باشد، گسل‌ها به‌صورت برجسته‌تری نشان داده می‌شوند [Robert, 2001]. در شکل (۴-۱۱)، استخراج نشانگر انحنا از مکعب لرزه‌ای میدان مورد مطالعه و در امتداد افق لرزه‌ای، ایده خوبی از حضور گسل‌ها و توسعه آن‌ها به ما نشان می‌دهد. پیکان‌ها در شکل (۴-۱۱)، اثر گسل‌ها بر روی افق لرزه‌ای را نشان می‌دهد. این نشانگر توانسته گسل‌های بزرگ‌مقیاس که دارای جهت یافتگی شمال غربی-جنوب شرقی هستند را آشکار سازد.



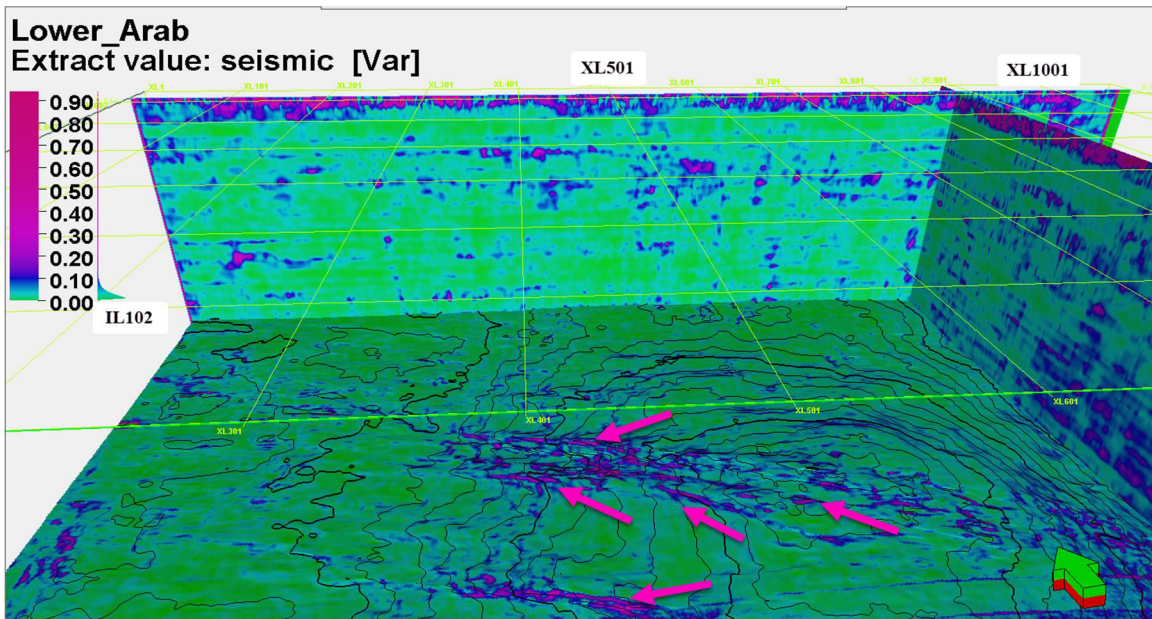
شکل ۴-۱۱: اثر گسل‌ها بر روی مقطع نشانگر انحنا، در این شکل گسل‌های بزرگ‌مقیاس و اصلی میدان با پیکان نشان داده شده‌اند. اکثر گسل‌ها دارای جهت یافتگی شمال غربی-جنوب شرقی هستند.

نشانگر واریانس یک ویژگی لرزه‌ای است که عدم پیوستگی در سیگنال را نشان می‌دهد. این عدم پیوستگی در سیگنال برای شناسایی گسل‌ها استفاده می‌شود. واریانس در سه بعد محاسبه می‌شود و

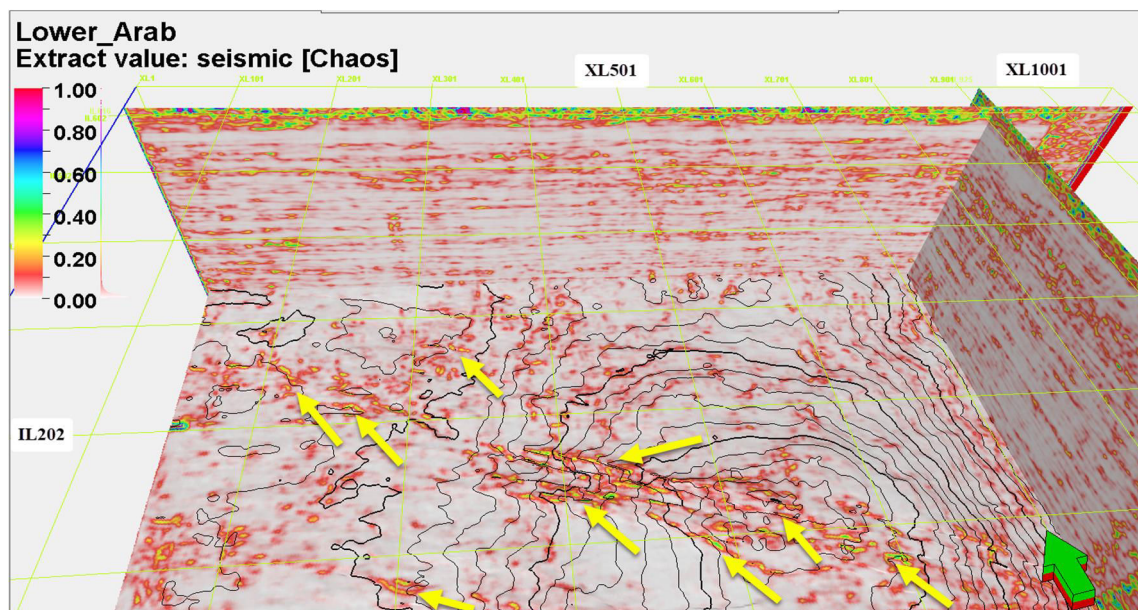
نشان‌دهنده تغییرپذیری از یک ردلرزه به ردلرزه دیگر در یک فاصله زمانی خاص است و بنابراین باعث ایجاد تغییرات جانبی قابل تفسیر در مکعب لرزه‌ای می‌شود [ Avezedo Guerra Raposo Pereira, 2009]. اعمال این نشانگر بر روی مکعب لرزه‌ای جزئیات ساختاری ظریف را حفظ می‌کند و تفسیر دقیق‌تری از گسل‌ها را فراهم می‌کند. در شکل (۴-۱۲)، خطوط مشخص شده، نشان‌دهنده ویژگی‌های ظاهری گسل بر روی نشانگر واریانس استخراج شده از مکعب لرزه‌ای است. در این تصویر می‌توان مرزهای کلی را روی نقشه نشانگری مشاهده کرد. با به‌کارگیری این نشانگر بر روی سطح سازند عرب تحتانی، اثر گسل‌ها به‌خوبی نمایان شده و مکان‌هایی که دارای بیشترین گسل خوردگی بود با پیکان بر روی سطح مشخص شده‌اند.

در نشانگر آشفستگی از عدم قطعیت ساختاری و یا تنوع شیب لرزه‌ای به‌دست می‌آید. این نشانگر میزان آشفستگی و کیفیت بی‌نظمی را از روی آنالیز آماری پاسخ‌های لرزه‌ای اندازه‌گیری می‌کند. در شکل (۴-۱۳) پیکان‌های زرد رنگ نشان‌دهنده محل گسل‌ها بر روی سطح سازند عرب تحتانی است که توسط نشانگر آشفستگی نمایان شده‌اند. با توجه به شکل‌های (۴-۱۱، ۴-۱۲ و ۴-۱۳) بر روی مکعب-های نشانگرهای واریانس و آشفستگی نسبت به مکعب نشانگر انحناء، اثر گسل‌های کمتری دیده می‌شود ولی این اثر گسل‌ها دارای وضوح بالاتری هستند.





شکل ۴-۱۲: نمایش اثر گسل‌ها بر روی افق عرب پایینی توسط نشانگر سطحی واریانس. پیکان‌ها نشان‌دهنده محل گسل‌ها می‌باشند، بیشترین تمرکز گسل‌ها در مرکز و جنوب میدان مورد مطالعه است.



شکل ۴-۱۳: اثر گسل‌ها بر روی افق عرب پایینی توسط نشانگر سطحی آشفتگی. محل گسل‌ها با پیکان‌ها نشان داده شده است.

الگوریتم ردیابی مورچه بر اساس الگوی رفتاری مورچه در پیدا کردن مسیر در کلونی بهینه‌سازی شده است. ردیابی مورچه بر اساس پارامترهای مختلف به ترسیم وقایع و عدم قطعیت در داده‌های

لرزه‌ای می‌پردازد [Mahdavi Basir et al, 2013]. الگوریتم ردیابی مورچه دارای پارامترهای مهمی مانند مرز اولیه مورچه<sup>۱</sup>، انحراف مورچه‌ای<sup>۲</sup> و اندازه گام مورچه‌ای<sup>۳</sup> است. پارامتر مرز اولیه مورچه کنترل کننده تعداد حجم واکسل است که مورچه درون آن به جستجو می‌پردازد. پارامتر انحراف مورچه، حداکثر انحراف مجاز هر عامل را از مسیر اصلی کنترل می‌کند و به مورچه اجازه می‌دهد تا عدد بزرگ‌تری را جستجو کند. پارامتر اندازه گام مورچه تعیین می‌کند که تا چه حد مورچه برای افزایش جستجوی خود پیشرفت کند، افزایش این مقدار به مورچه اجازه می‌دهد تا بیشتر جستجو کند و ارتباطات بیشتری را پیدا کند. ردیابی مورچه با پارامترهای فوق شروع به جستجو می‌کند. هنگامی که ردیابی مورچه نتواند لبه‌ها را در یک شعاع تعریف شده دنبال کند، می‌تواند از طریق سه پارامتر دیگر پیشرفت بیشتری داشته باشد. این پارامترها عبارت‌اند از: گام غیرمجاز، مجاز است<sup>۴</sup>؛ گام-های لازم مجاز<sup>۵</sup> و معیارهای متوقف کردن<sup>۶</sup>. در پارامتر گام‌های غیرمجاز، مجاز است؛ مورچه اجازه دارد هنگامی که یک لبه شناسایی نشده باشد فراتر از مکان قبلی خود به جستجو بپردازد. در پارامتر گام-های مجاز مورد نیاز، با استفاده از پارامتر گام غیرمجاز با تعدیل تعدادی از گام‌های معتبر بعد از یک گام غیرمجاز کار می‌کند. پارامتر معیار توقف در ترکیب با مراحل غیرمجاز عمل می‌کند و برای پایان دادن به ردیابی مورچه پس از انجام اقدامات غیرمجاز است. در این مطالعه پارامترهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند و بهترین پارامترها انتخاب شدند. این پارامترها در جدول (۴-۱) ارائه شده است.

پارامترهای بهینه‌شده به مفسر اجازه می‌دهد تا ویژگی‌های ظریف و پیچیده از جمله گسل‌های کوچک‌مقیاس را در داده‌های لرزه‌ای بهتر توصیف کند. ویژگی‌های غیر ساختاری مانند کانال‌ها کمتر احتمال دارد که توسط الگوریتم ردیابی مورچه تشخیص داده شوند. زیرا این ویژگی‌ها معمولاً دارای بافت‌های هرج‌ومرج درونی هستند [Jansen, 2005]. در شکل (۴-۱۴) مشاهده می‌شود که الگوریتم

---

<sup>1</sup> Initial ant boundary

<sup>2</sup> Ant-track deviation

<sup>3</sup> Ant-step size

<sup>4</sup> Illegal steps allowed

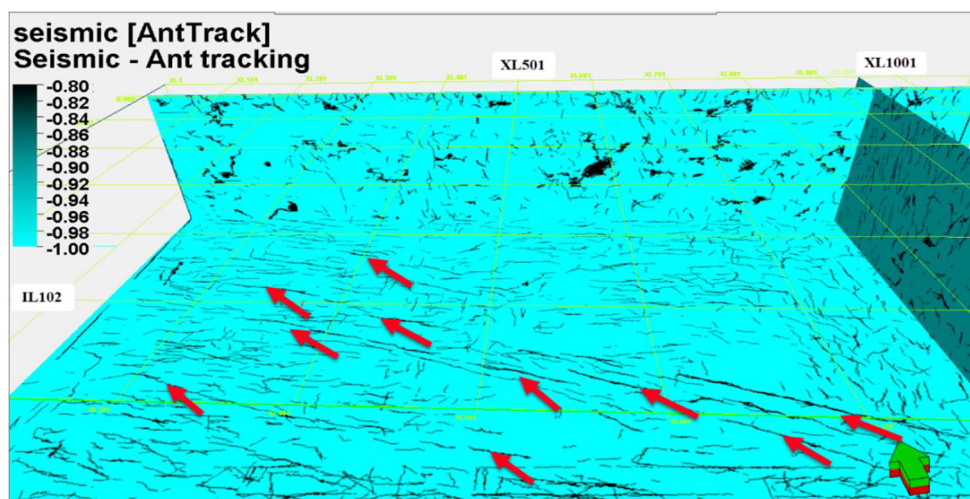
<sup>5</sup> Legal steps allowed

<sup>6</sup> Stop criteria

ردیابی مورچه توانسته لبه‌های گسل‌ها را به صورت چشم‌گیری برجسته نماید. با توجه به این شکل گسل‌های کوچک‌مقیاس که توسط دیگر نشانگرها قابل تشخیص نبوده‌اند با کمک الگوریتم ردیابی مورچه شناسایی شدند و به وضوح قابل مشاهده هستند.

جدول ۴-۱: پارامترهای مختلف الگوریتم ردیابی مورچه، استفاده شده در این مطالعه.

parameter	Initial ant boundary	Ant-track deviation	Ant-steps size	Illegal steps allowed	Legal steps allowed	Stop criteria
Min	1	0	2	0	0	0
max	30	3	10	3	3	50
Passive Ants	7	2	3	1	3	5
Aggressive Ants	5	2	3	2	2	10



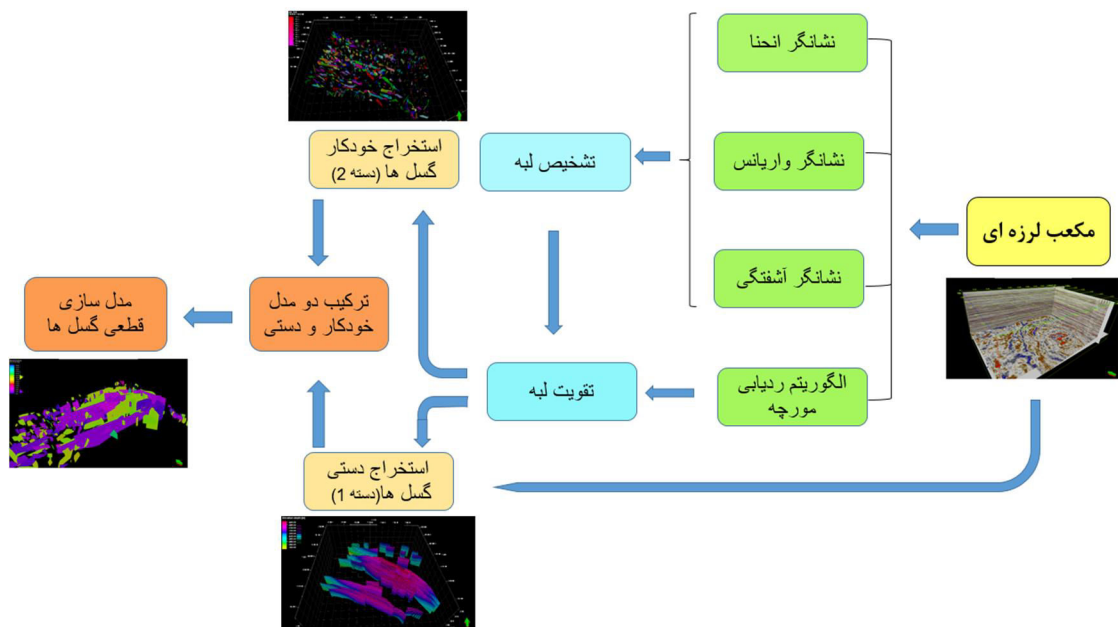
شکل ۴-۱۴: الگوریتم ردیابی مورچه بر روی مکعب لرزه‌ای، پیکان‌ها نشان‌دهنده گسل‌های استخراج شده از این الگوریتم است. این الگوریتم توانسته است به خوبی علاوه بر گسل‌های بزرگ‌مقیاس، گسل‌های کوچک‌مقیاس را که نشانگرهای دیگر قادر به نمایش آن نبودند را نشان دهد.

#### ۴-۴-۱- تفسیر گسل‌ها

تفسیرهای ساختاری بر اساس داده‌های سه‌بعدی لرزه‌ای با کمک الگوریتم ردیابی مورچه (الگوریتمی که باعث تسهیل کردن ناپیوستگی‌های لرزه‌ای می‌شود)، ویژگی‌های لرزه‌ای، نشانگرهای واریانس، آشفستگی و انحنا به‌طور مشترک برای درک بهتر ویژگی‌های گسل‌های پیچیده استفاده می‌-

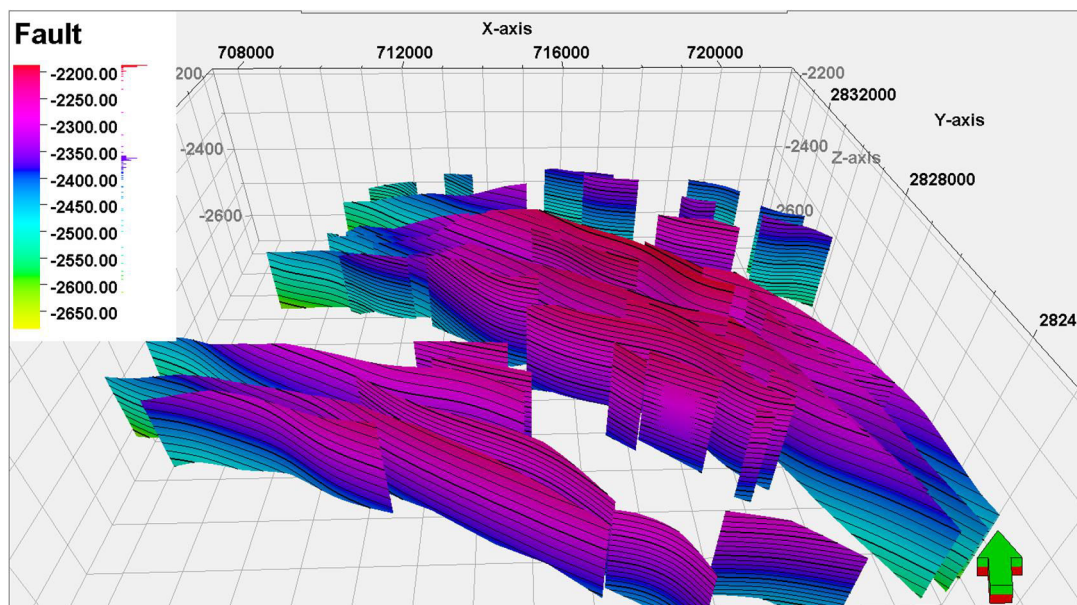
شود [Baytok et al, 2013].

با توجه به روش کار تفسیر گسل‌ها که در شکل (۴-۱۵) بیان شده، تفسیر گسل‌ها به دو روش دستی و خودکار انجام شده است. در روش اول، محل گسل‌ها که در واقع مکان هندسی قطع‌شدگی امتداد لایه‌ها است، به صورت چشمی بر روی داده‌های لرزه‌ای توسط مفسر مشخص می‌شود. شکل (۴-۱۶) گسل‌هایی که با روش دستی از مکعب لرزه‌ای استخراج شده است را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تعداد ۳۸ گسل با این روش شناسایی و استخراج شده است.



شکل ۴-۱۵: مراحل انجام تفسیر و استخراج گسل‌ها از مکعب لرزه‌ای میدان مورد مطالعه.

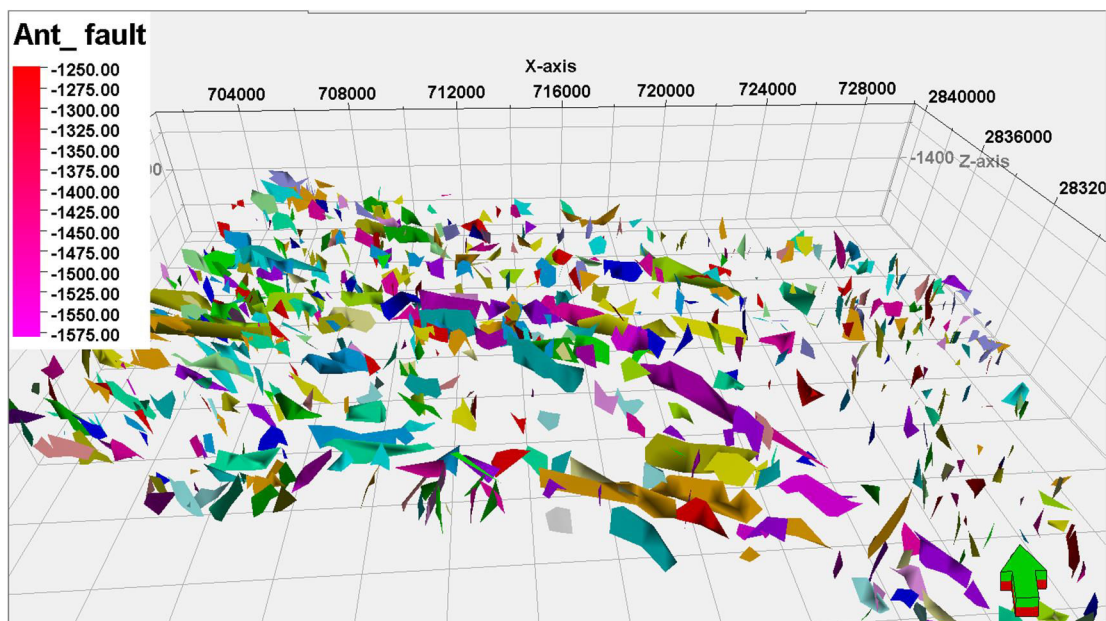




شکل ۴-۱۶: گسل‌های استخراج شده از مکعب لرزه‌ای، با روش دستی.

در روش دوم، گسل‌ها با کمک الگوریتم ردیابی مورچه شناسایی می‌گردند. گسل‌ها را می‌توان به صورت خودکار از طریق فرآیند استخراج خودکار گسل تفسیر کرد. در روش استخراج خودکار گسل با بهره‌گیری از ابزارهای تعاملی می‌توان به نمایش، پردازش و تصحیح مجموعه<sup>۱</sup> گسل‌ها پرداخت. مجموعه گسل‌ها را می‌توان از یک حجم لبه تولید کرد. در شکل (۴-۱۷) مجموعه گسلی که با روش خودکار از الگوریتم ردیابی مورچه استخراج شده است مشاهده می‌شود. هنگامی که یک تکه گسل ایجاد می‌شود، می‌توان آن را بر اساس ویژگی‌های مختلف فیلتر کرد. این کار به مفسر یک دید خوبی از سیستم گسل‌های موجود در میدان می‌دهد.

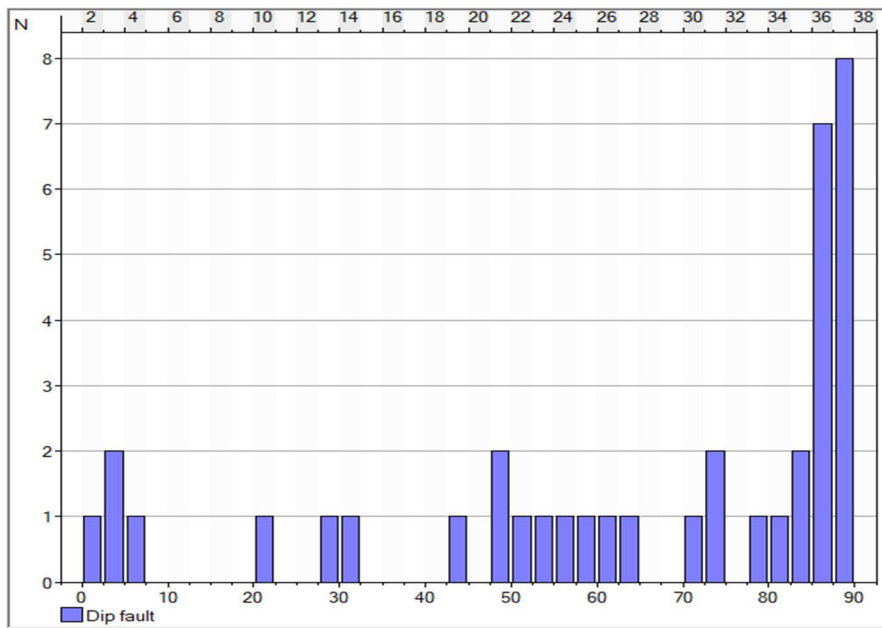
<sup>1</sup> Patch



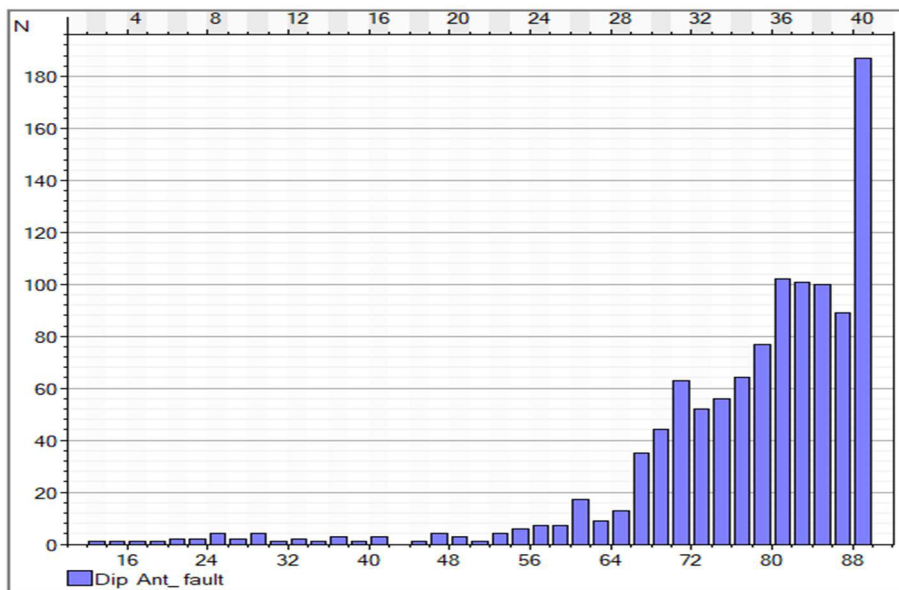
شکل ۴-۱۷: مجموعه گسلی استخراج شده از مکعب الگوریتم ردیابی مورچه، با روش خودکار.

با استفاده از جهت یافتگی و انشعابات سطوح گسلی، می توان آن‌ها را در نمودار هیستوگرام مورد مطالعه و ارزیابی قرار داد. در اینجا اطلاعات گسل‌های تفسیر شده‌ای که با روش دستی به دست آمد، در کنار اطلاعات تکه‌های گسلی که با روش خودکار به دست آمد، مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند. با توجه به شکل‌های (۴-۱۸ و ۴-۱۹) در هر دو روش بیشترین شیب گسل‌ها بین ۸۰ تا ۹۰ درجه است. در شکل (۴-۲۰) مشاهده می‌شود که آزمون جهت شیب گسل‌های استخراج شده با روش دستی در بازه آزمون ۰-۶۰ درجه و ۱۸۰-۲۵۰ درجه دارای بیشترین فراوانی هستند و طبق شکل (۴-۲۱) آزمون جهت شیب مجموعه گسلی استخراج شده با روش خودکار در بازه ۰-۴۰ درجه و ۱۹۰-۲۲۰ درجه دارای بیشترین فراوانی هستند. شکل‌های (۴-۲۲ و ۴-۲۳) مساحت گسل‌های استخراج شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، گسل‌هایی که با روش دستی استخراج شده‌اند دارای مساحت بیشتری هستند، اما گسل‌هایی که با روش خودکار استخراج شده‌اند دارای مساحت خیلی کمتری هستند. این تفاوت در مساحت، میزان توانایی در استخراج گسل‌های کوچک مقیاس با روش دستی و خودکار را نشان می‌دهد، به این صورت که روش خودکار توانایی

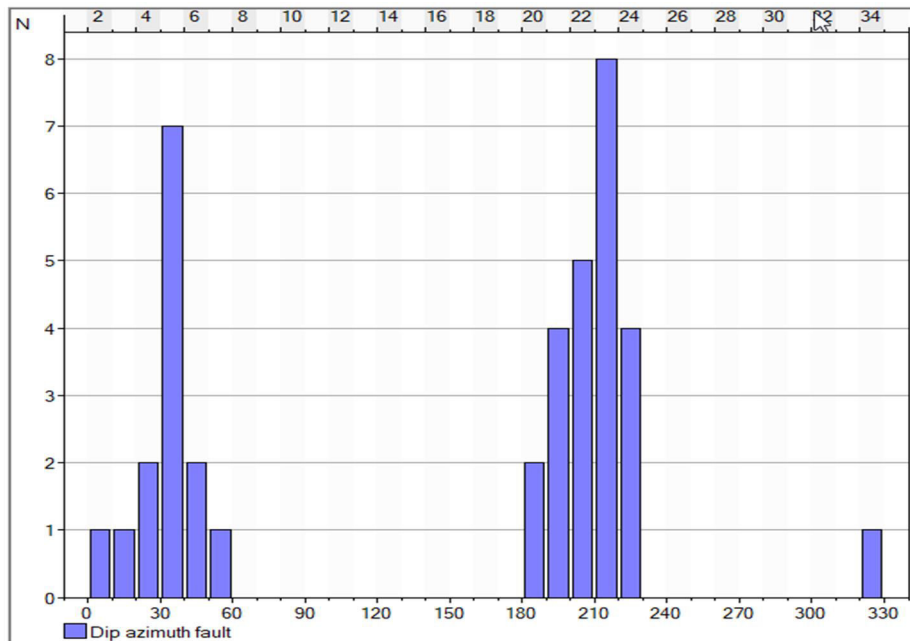
بالتری در استخراج گسل‌های کوچک مقیاس دارد.



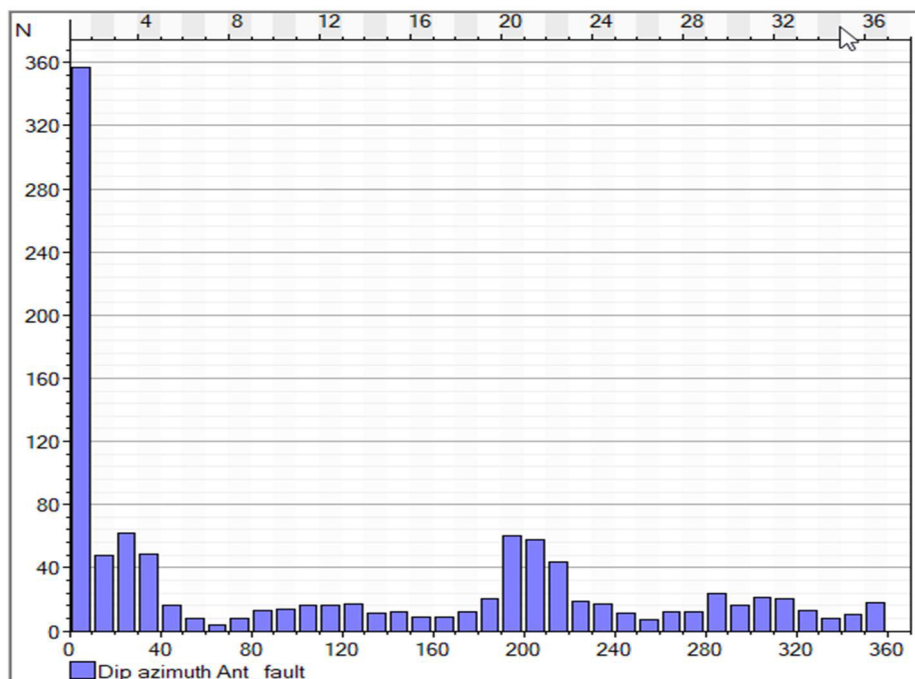
شکل ۴-۱۸: مقدار شیب گسل‌های استخراج شده با روش دستی.



شکل ۴-۱۹: شیب مجموعه گسلی استخراج شده با روش خودکار.

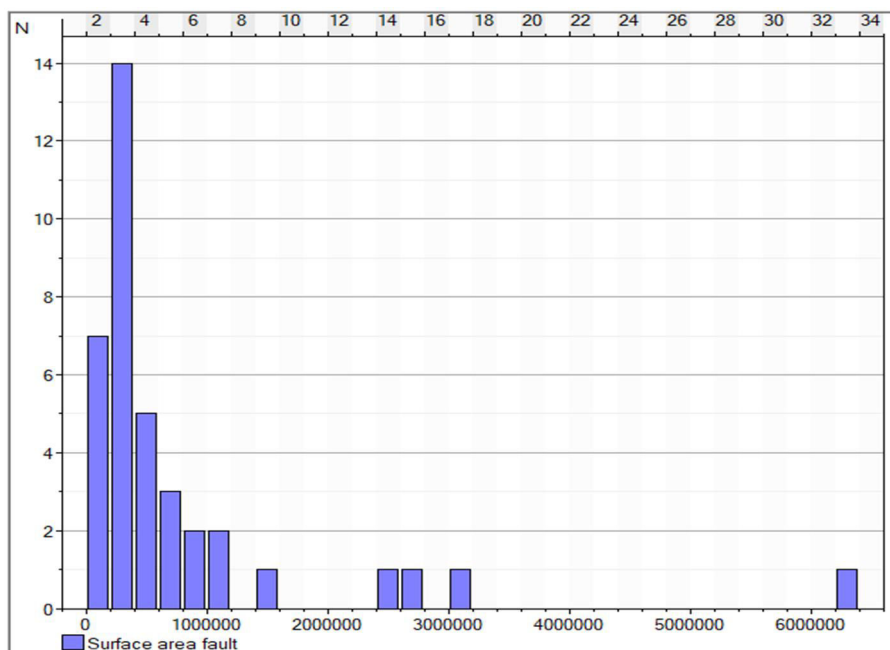


شکل ۴-۲۰: آزمون جهت شیب گسل‌های استخراج شده با روش دستی.

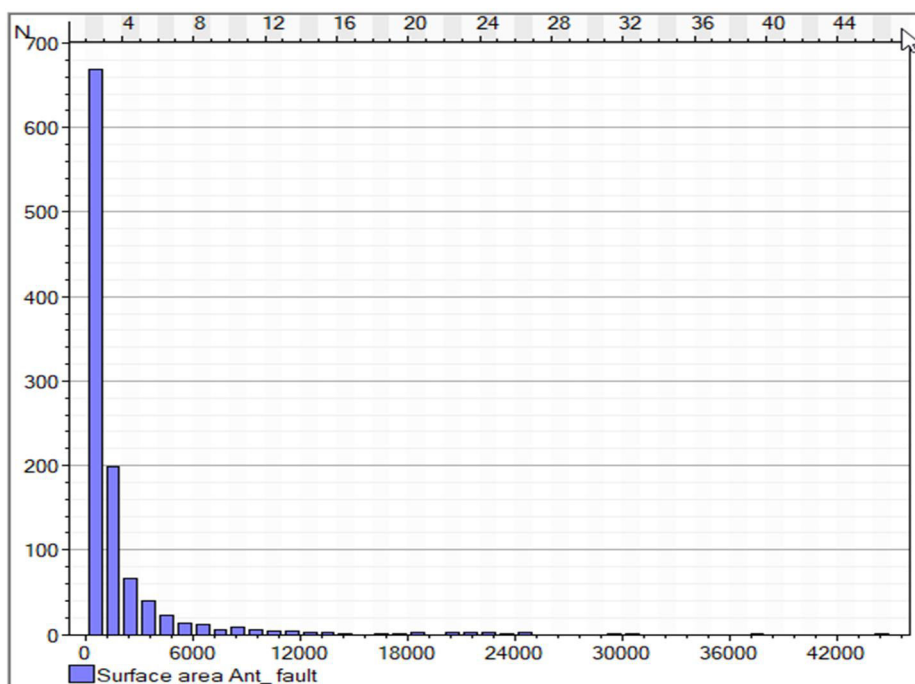


شکل ۴-۲۱: آزمون جهت شیب مجموعه گسلی استخراج شده با روش خودکار.





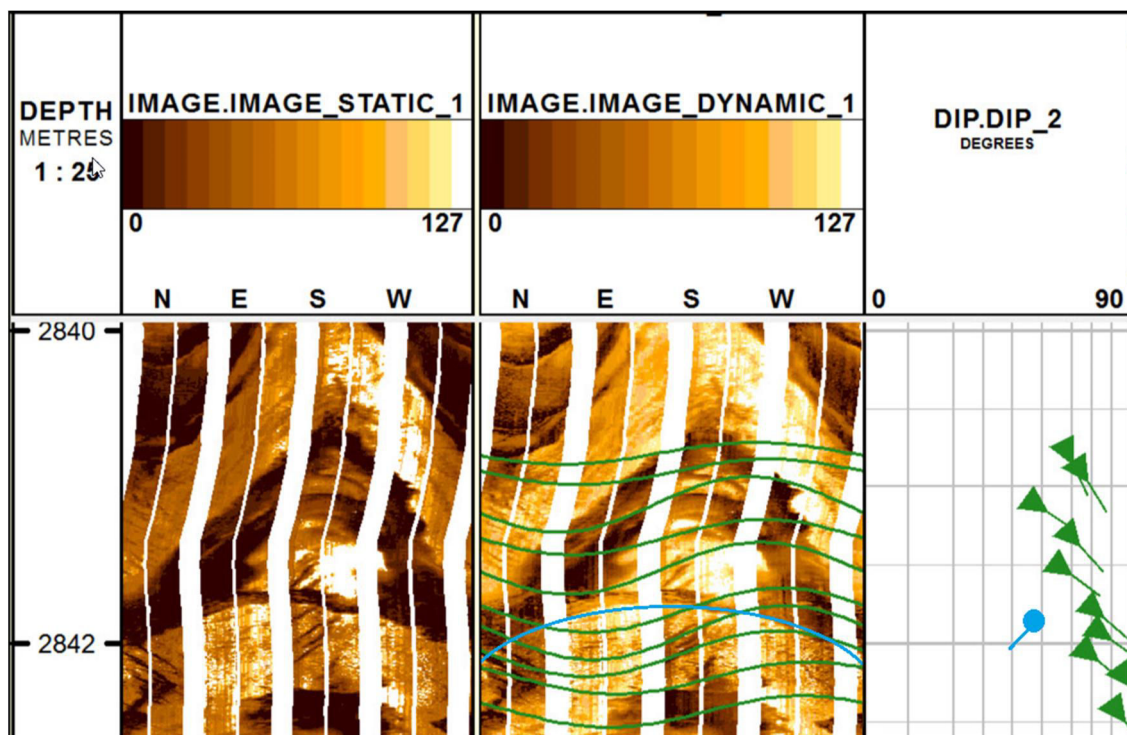
شکل ۲۲-۴: مساحت گسل‌های استخراج شده با روش دستی.



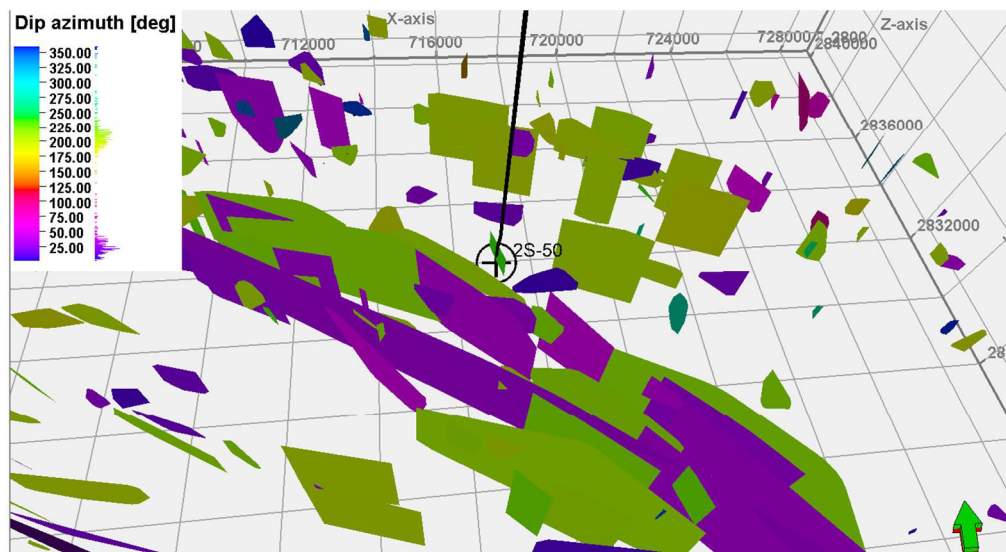
شکل ۲۳-۴: مساحت مجموعه گسلی استخراج شده با روش خودکار.

#### ۴-۴-۲- اعتبار سنجی تفسیر گسل‌ها

برای اعتبارسنجی گسل‌های تعیین شده از اطلاعات مغزه و نمودارهای تصویری می‌توان استفاده کرد. در این مطالعه با توجه به داده‌های موجود، برای اعتبار سنجی گسل‌ها از نمودار تصویری چاه 2S-50 استفاده شد. با توجه به شکل (۴-۲۴)، گسلی با شیب ۴۶ درجه و جهت شیب با آزمون ۲۲۵ درجه در عمق ۲۸۴۲ متری چاه وجود دارد. در شکل (۴-۲۵)، دیده می‌شود که گسل موردنظر به‌خوبی شناسایی و تفسیر شده است. این تطابق بیان‌کننده اعتبار بالای تفسیر گسل‌ها است.



شکل ۴-۲۴: نمودار تصویری چاه 2S-50، منحنی آبی رنگ نشان‌دهنده گسل موجود در دیواره چاه است. این گسل دارای مقدار شیب ۴۶ درجه و جهت شیب با آزمون ۲۲۵ درجه است.



شکل ۴-۲۵: در این شکل گسل‌های تفسیر شده مشاهده می‌شود که یکی از این گسل‌ها در محل چاه 2S-50 برخورد داشته و به خوبی قابل شناسایی است.

#### ۴-۳-۴- مدل سازی قطعی گسل‌ها

با توجه به مطالعات زمین‌شناسی صورت گرفته در محدوده میدان مورد مطالعه، مشخص گردید که گسل‌ها به‌عنوان یکی از دلایل عمده و مهم ایجاد شکستگی (شکستگی‌های مرتبط با گسل) 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 بزرگ‌مقیاس و شکستگی‌های وابسته به گسل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [Ferrill et al, 2011].

در ساخت شبکه‌ی شکستگی از همه‌ی شکستگی‌ها و گسل‌های موجود در مخزن استفاده می‌شود. از این رو می‌توان از دو مدل قطعی<sup>۱</sup> و احتمالی<sup>۲</sup> استفاده کرد، که هرکدام از این مدل‌ها را می‌توان به‌عنوان دسته شکستگی دسته‌بندی کرد. برای مدل شکستگی قطعی به‌طور معمول می‌توان فقط گسل‌هایی که مانند گذرگاهی برای سیال عمل می‌کنند، استفاده کرد. مجموعه گسل‌های شناسایی شده با استفاده از فرایند استخراج گسل‌ها به‌صورت خودکار و گسل‌های شناسایی شده به-

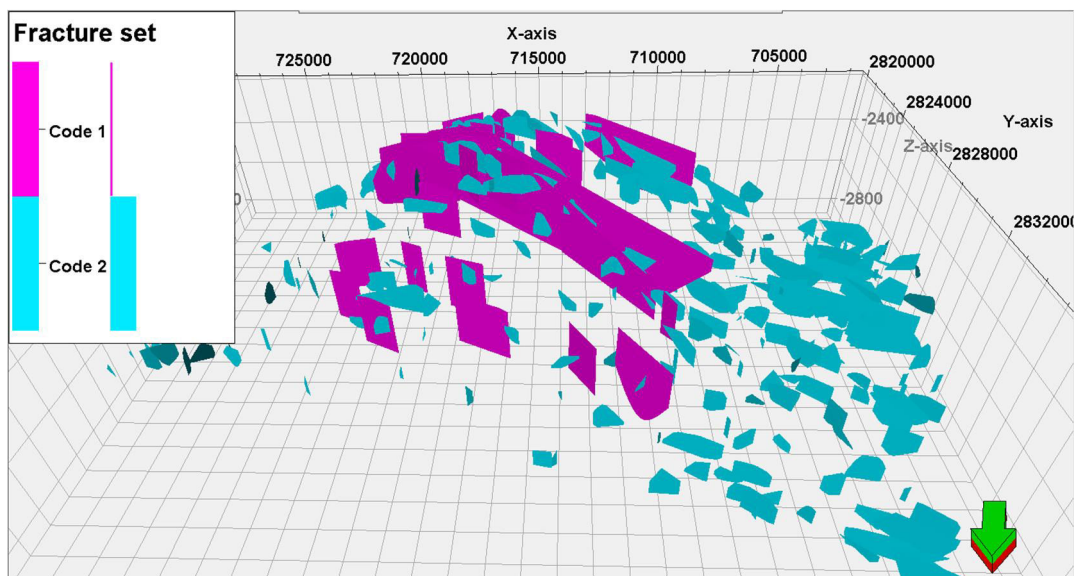
<sup>1</sup> Deterministic

<sup>2</sup> Stochastic

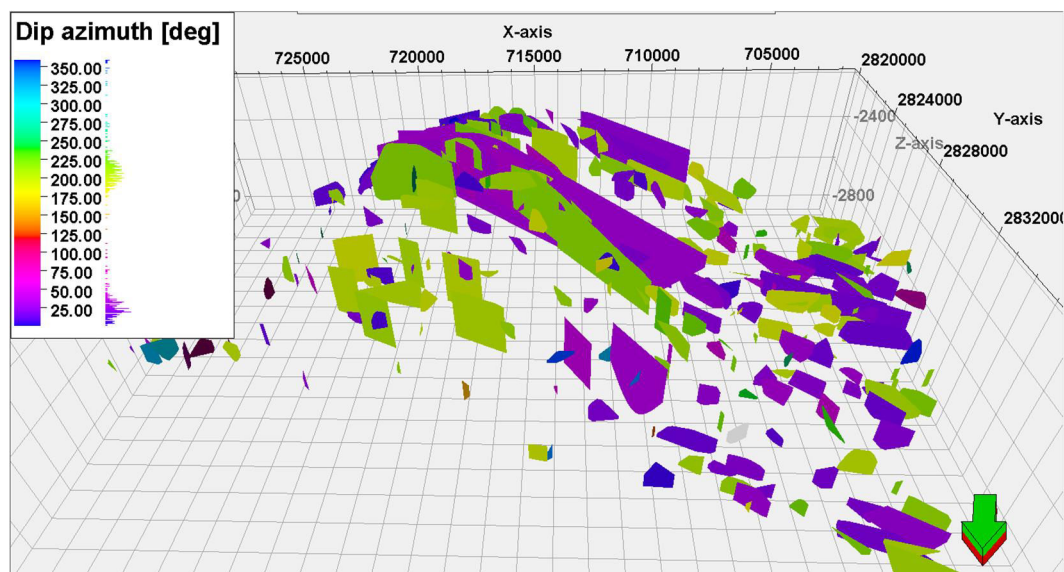
صورت دستی به‌عنوان ورودی برای ساخت مدل قطعی شکستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش قطعی شکل ساده‌ای خواهد داشت که با محاسبه‌ی بهترین سطح متناسب بر اساس داده‌های ورودی ساخته می‌شود. داده‌های ورودی که کاملاً سطحی هستند و دارای کمترین انحنا هستند برای ساخت مدل بسیار مناسب عمل می‌کنند. از این رو گسل‌ها بهترین داده برای ساخت این مدل می‌باشند.

همان‌طور که در شکل (۴-۲۶) مشاهده می‌شود مدل قطعی گسل‌ها دارای دو دسته گسل است. دسته اول شامل گسل‌هایی است که با روش دستی (*Code 1*) و دسته دوم شامل گسل‌هایی است که با روش خودکار (*Code 2*) استخراج شده‌اند. شکل (۴-۲۷) نشان‌دهنده آزمون جهت شیب هر یک از گسل‌های موجود در مدل قطعی گسل‌ها است، که جهت شیب بیشتر گسل‌ها در محدوده آزمون ۰-۴۵ درجه و ۱۸۰-۲۲۵ درجه است. با توجه به شکل (۴-۲۸) مشاهده می‌شود که شیب گسل‌های موجود در این مدل اکثراً بین ۸۰-۹۰ درجه است. یکی از مزایای مهم این مدل‌سازی تعیین پارامتر طول گسل‌ها است که در اینجا با توجه به شکل (۴-۲۹) مشاهده می‌شود که طول گسل‌ها بین ۵۰۰-۱۳۰۰ متر است، محل گسل‌هایی که دارای طول بیشتری هستند در مرکز میدان، گسل‌های کوچک‌تر در کناره‌های میدان قرار گرفته‌اند.

در نهایت به کمک استراتژی بیان شده می‌توان گسل‌ها را به‌عنوان یک دسته گسل به شبکه شکستگی گسسته معرفی کرد و درک بهتری از گسل‌ها و خصوصیات آن‌ها در منطقه مورد مطالعه داشت.

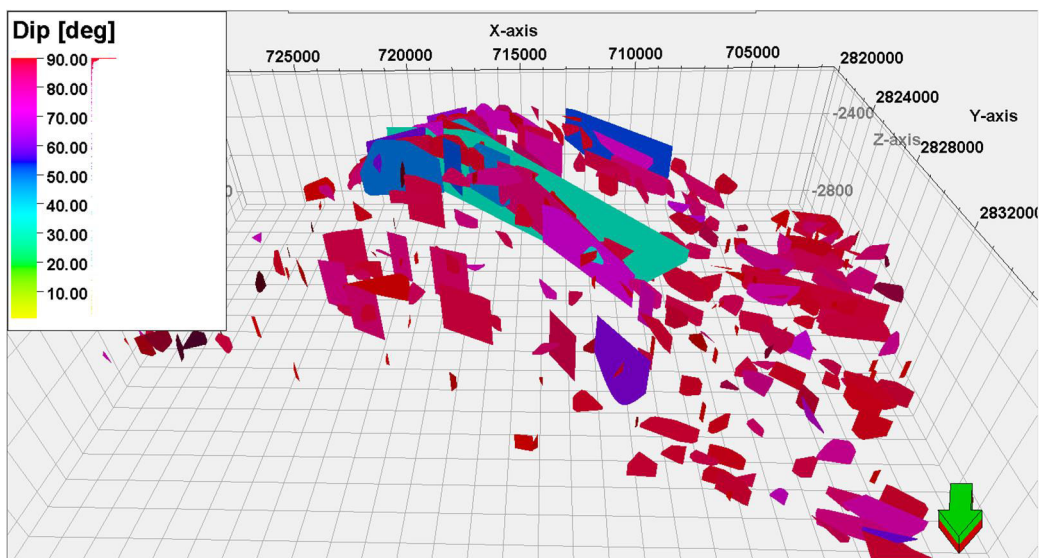


شکل ۴-۲۶: مدل قطعی گسل‌ها شامل گسل‌های استخراج شده به روش دستی (Code 1) و خودکار (Code 2).

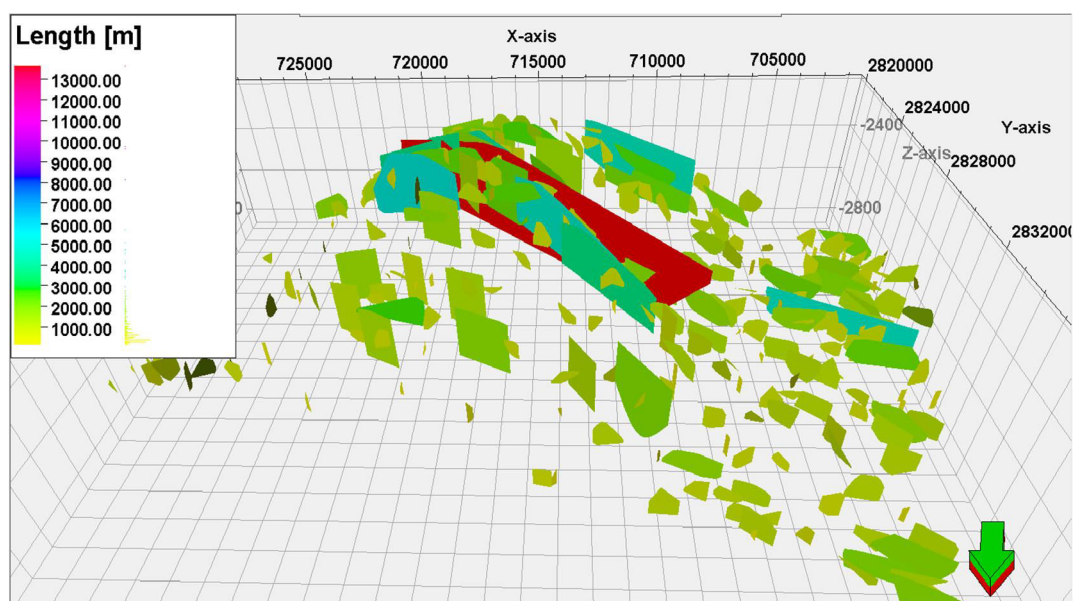


شکل ۴-۲۷: آزیموت جهت شیب هر یک از گسل‌های موجود در مدل قطعی گسل‌ها نشان می‌دهد اکثر گسل‌ها دارای روند شمال غربی-جنوب شرقی هستند.





شکل ۴-۲۸: نمایش شیب هر یک از گسل‌های موجود در مدل قطعی گسل‌ها نشان می‌دهد که اکثر گسل‌ها دارای شیب بالای ۸۰ درجه هستند.



شکل ۴-۲۹: نمایش طول هر یک از گسل‌های موجود در مدل قطعی گسل‌ها. بیشترین طول مربوط به گسل‌های مرکز میدان است.

#### ۴-۵- ساخت مدل‌های DFN و IFM

به‌طور کلی مدل‌سازی شکستگی‌ها در دو مرحله انجام می‌شود. ابتدا مدل استاتیک مخزن و سپس

شبکه هدایت پذیر یا هادی تولید می‌شود. مدل استاتیک مخزن، بهترین امکان را برای لحاظ کردن تمامی داده‌های در دسترس فراهم می‌کنند. مدل‌سازی ساختمانی یک مخزن، مدل متداولی برای افق‌های زمین‌شناسی و گسل‌ها است که چهارچوب هندسی شبکه سه‌بعدی را شکل می‌دهد و مرز مدل‌های رخساره‌ای و پتروفیزیکی که معرف خواص سنگ هستند را ایجاد می‌کند. همچنین مبنای محاسبات حجم سنجی، طراحی چاه و شبکه شبیه‌سازی سیال مخزن را شکل می‌دهد. سپس شبکه هدایت‌پذیر یا هادی از طریق تعیین فراوانی شکستگی‌های دارای قابلیت هدایت (شکستگی‌های متصل به هم) ساخته می‌شود.

بنابراین ابتدا مدل ساختمانی مخزن بر اساس داده‌های لرزه‌نگاری سه‌بعدی، تهیه شده و سپس به آنالیز و بررسی اطلاعات حاصل از نمودار تصویری پرداخته می‌شود. با درشت‌نمایی اطلاعات شکستگی حاصل از نمودار تصویری و استفاده از روش‌های متداول زمین‌آماري مانند کریجینگ و شبیه‌سازی گوسی متوالی، مدل اولیه‌ای از توزیع شدت شکستگی در مخزن به دست می‌آید. مهم‌ترین مسئله در مدل‌سازی، امکان تلفیق داده‌ها از منابع مختلف و استفاده از نتایج هر یک از آن‌ها برای یک مدل‌سازی مطلوب است. در ادامه نشانگرهای لرزه‌ای مربوط به شکستگی‌ها و گسل‌هایی که از داده‌های لرزه‌ای استخراج شده‌اند به‌عنوان محرک‌های شکستگی وارد مدل شدت شکستگی می‌شوند. این ویژگی‌های لرزه‌ای با استفاده از روش کوکریجینگ هم مختصات به‌عنوان ورودی ثانویه برای درون‌یابی شکستگی استفاده می‌شوند. در ادامه با کمک شبکه عصبی بهترین نقشه شدت شکستگی به‌عنوان ورودی برای مدل‌سازی IFM و DFN استفاده خواهد شد.

#### ۴-۵-۱- نمودار شدت شکستگی

شدت شکستگی یا تراکم شکستگی به‌عنوان، تعداد شکستگی‌ها در واحد طول در یک فاصله از عمق مشخص شده، تعریف می‌شود. افزایش غیرعادی شکستگی‌ها در مخزن نتیجه عوامل مختلفی مانند تغییرات سنگ‌شناسی، گسلش، فرایندهای دیاژنزی و غیره است. تراکم شکستگی در لایه‌های

نازک بیشتر از لایه‌های ضخیم است و در سنگ‌های شکننده بیشتر از سنگ‌های انعطاف‌پذیر است، البته شکنندگی خود تحت تأثیر دما و فشار نیز قرار می‌گیرد. پس یک لایه نازک دولومیت تراکم شکستگی بیشتری نسبت به یک لایه ضخیم سنگ آهک دارد.

با توجه به اینکه شکستگی‌های حاصل از نمودارهای تصویری به صورت داده‌های نقطه‌ای (داده‌های گسسته شکستگی) هستند برای ساخت مدل نیاز است که به داده‌های پیوسته تبدیل شوند. این کار با تبدیل داده‌های گسسته شکستگی به نمودار شدت شکستگی انجام می‌شود. این نمودار شامل داده‌های پیوسته‌ای است که نمایش دهنده تغییرات شدت شکستگی در اعماق مختلف است. بنابراین برای تفسیر و درک صحیح‌تری از شکستگی‌ها در اعماق مورد بررسی، آن‌ها را توسط این نمودار به صورت پیوسته مطالعه می‌کنیم. شکل (۴-۳۰)، نمودار شدت شکستگی را در چاه‌های 2S-50 و 2skd-1 نشان می‌دهد که پیک نمودار نشان‌دهنده حداکثر میزان شدت شکستگی در آن عمق است.

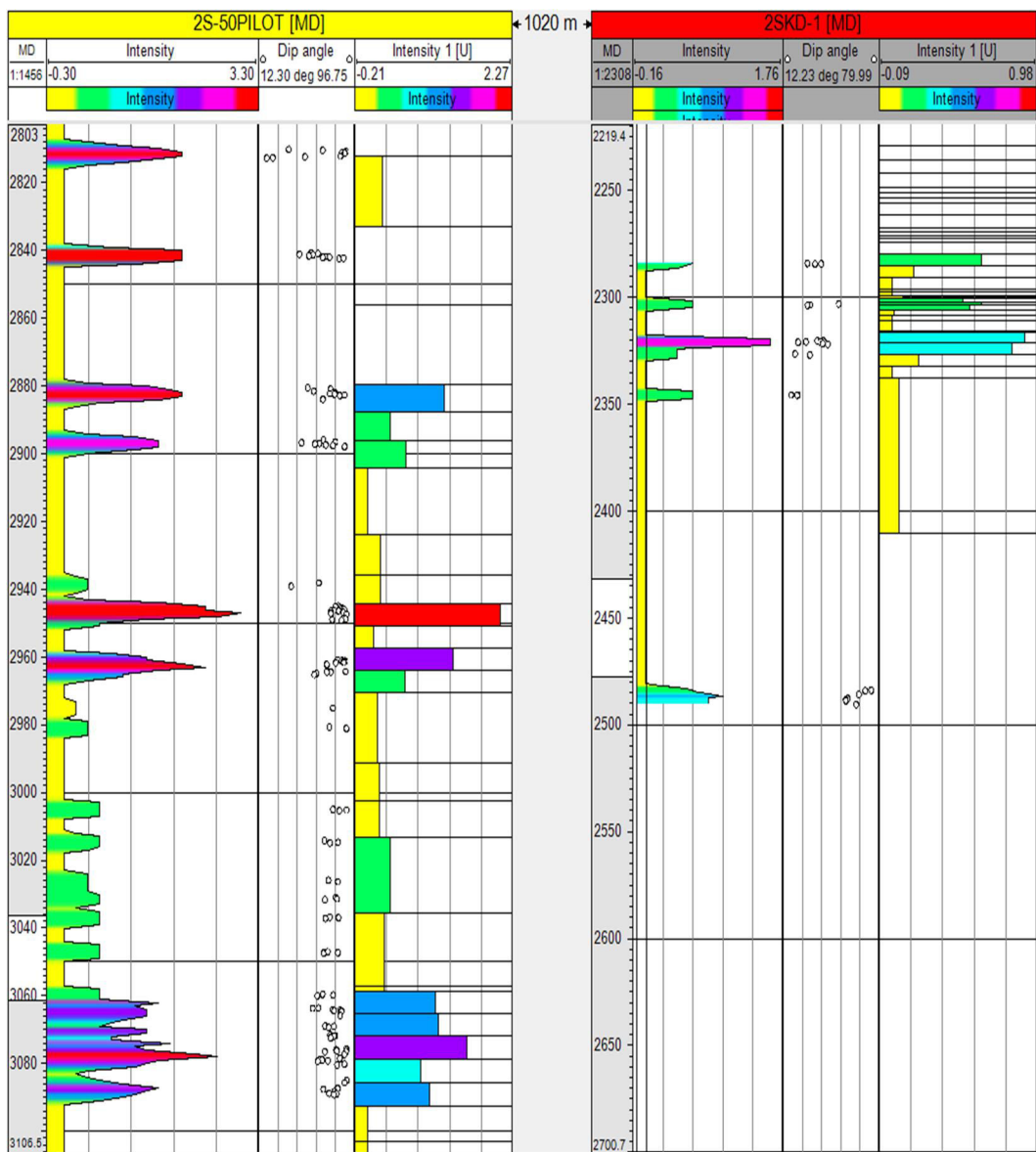
#### ۴-۵-۲- بزرگ‌مقیاس کردن نمودار شدت شکستگی

در این مرحله به بزرگ‌مقیاس کردن نمودار شدت شکستگی ساخته شده در مرحله قبل پرداخته می‌شود. روش‌های متنوعی برای بزرگ‌مقیاس کردن مقادیر شدت شکستگی وجود دارد. برخی از این روش‌ها تک‌مقیاسی و برخی دیگر چندمقیاسی است. در روش‌های چندمقیاسی، ابعاد سلول‌ها یکسان نبوده و در اعماق و مناطقی که تغییرپذیری شدت شکستگی بیشتر است، ابعاد سلول‌ها کوچک‌تر می‌شود. معمولاً نمودارها به ازای هر چند سانتی‌متر، یک مقدار عددی دارند ولی ضخامت سلول‌های شبکه چندین متر است، لذا ابتدا باید در محل چاه، مقیاس نمودارها را بزرگ کرد؛ یعنی میانگین مقادیر نمودارها در محدود ضخامت سلولی که با آن در تماس است را به دست آورده و یک مقدار به آن پارامتر در آن سلول اختصاص داد. این عدد میانگین را به چندین روش می‌توان محاسبه کرد. میانگین ریاضی، میانگین هندسی، میانگین هارمونیک و میانگین RMS و البته می‌توان مقادیر حداقل، حداکثر، میانه و یا یک عدد تصادفی را نیز قرار داد. هدف از این کار، نسبت دادن مقادیر

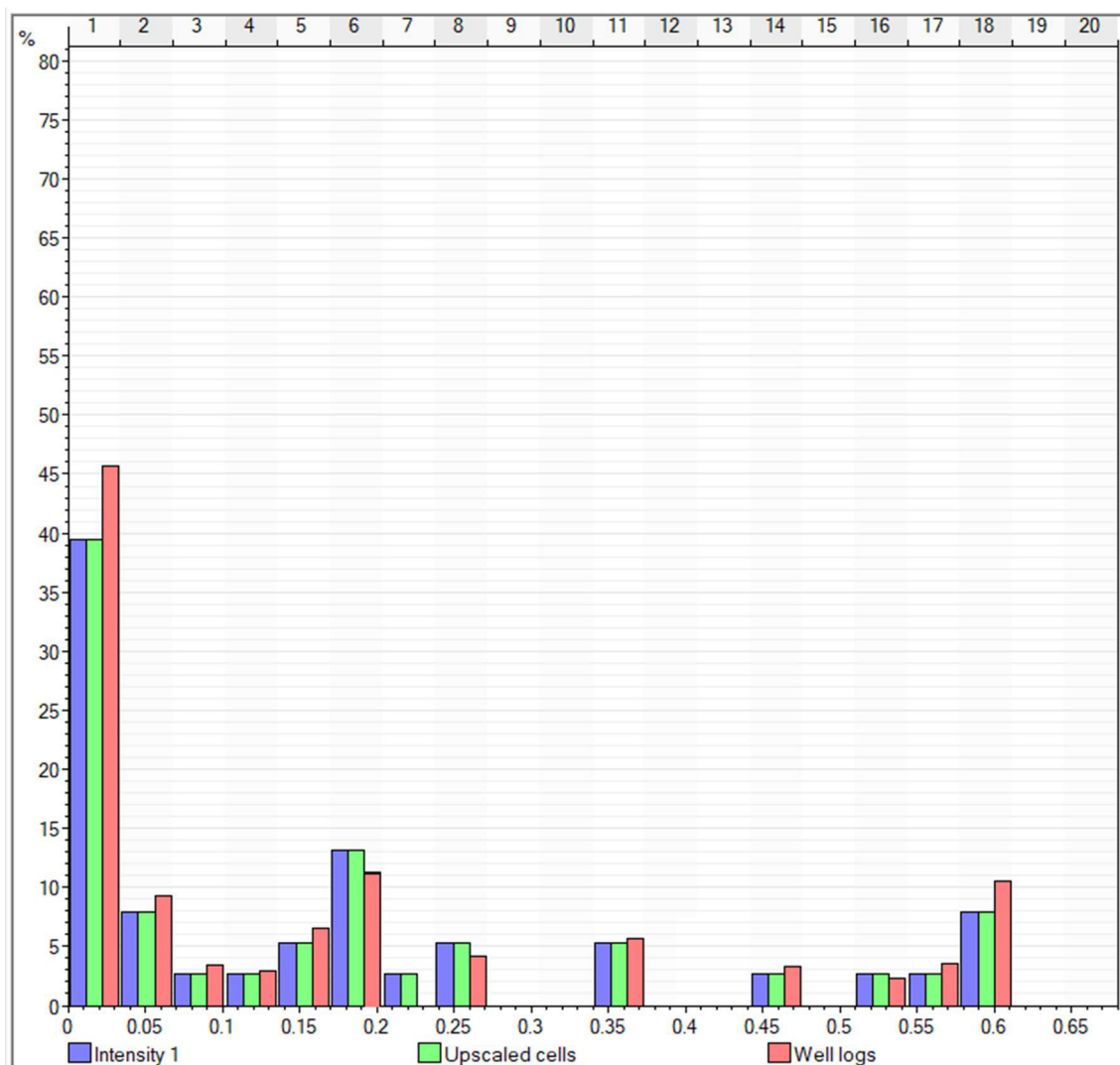


مشخص شدت شکستگی به سلول‌هایی از شبکه بوده که در مسیر چاه قرار دارند.

برای انتخاب سلول‌های شبکه موردنظر از سه روش سلول همسایه، درون سلولی و روش ساده می‌توان استفاده کرد. در روش سلول همسایه، شدت شکستگی در تمام سلول‌های شبکه‌ای که چاه از آن‌ها عبور کرده و متعلق به یک لایه هستند، میانگین‌گیری شده و مقدار میانگین به تمام سلول‌های آن لایه، نسبت داده می‌شود. در روش درون سلولی، شدت شکستگی برای سلول‌هایی قابل محاسبه است که چاه از دو ضلع مخالف سلول، به‌عنوان مثال بالا و پایین آن، عبور کرده باشد. در روش ساده، به همه سلول‌های شبکه مسیر چاه آن‌ها را قطع کرده است، مقادیر شدت شکستگی نسبت داده می‌شود. در این مطالعه با توجه به جهت‌دار بودن چاه 2S-50 روش سلول همسایه استفاده شد تا مقادیر دقیق‌تری به سلول‌های شبکه نسبت داده شود. در شکل (۴-۳۱) نمودارهای شدت شکستگی به همراه نمودار بزرگ‌نمایی شده آن‌ها قابل مشاهده است. برای اعتبار سنجی روش بزرگ‌مقیاس سازی از نمودارهای ستونی استفاده شد. در این نمودار شدت شکستگی قبل و بعد از بزرگ‌مقیاس نمودن، نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۴-۳۱) مشاهده می‌شود، اختلاف کم در میزان فراوانی بیان‌کننده اعتبار کافی روش بزرگ‌مقیاس مورد استفاده است.



شکل ۳-۴: نمایش نمودارهای شدت شکستگی به همراه بزرگ‌نمایی این نمودارها در چاه‌های 2s-50 و 2skd-1



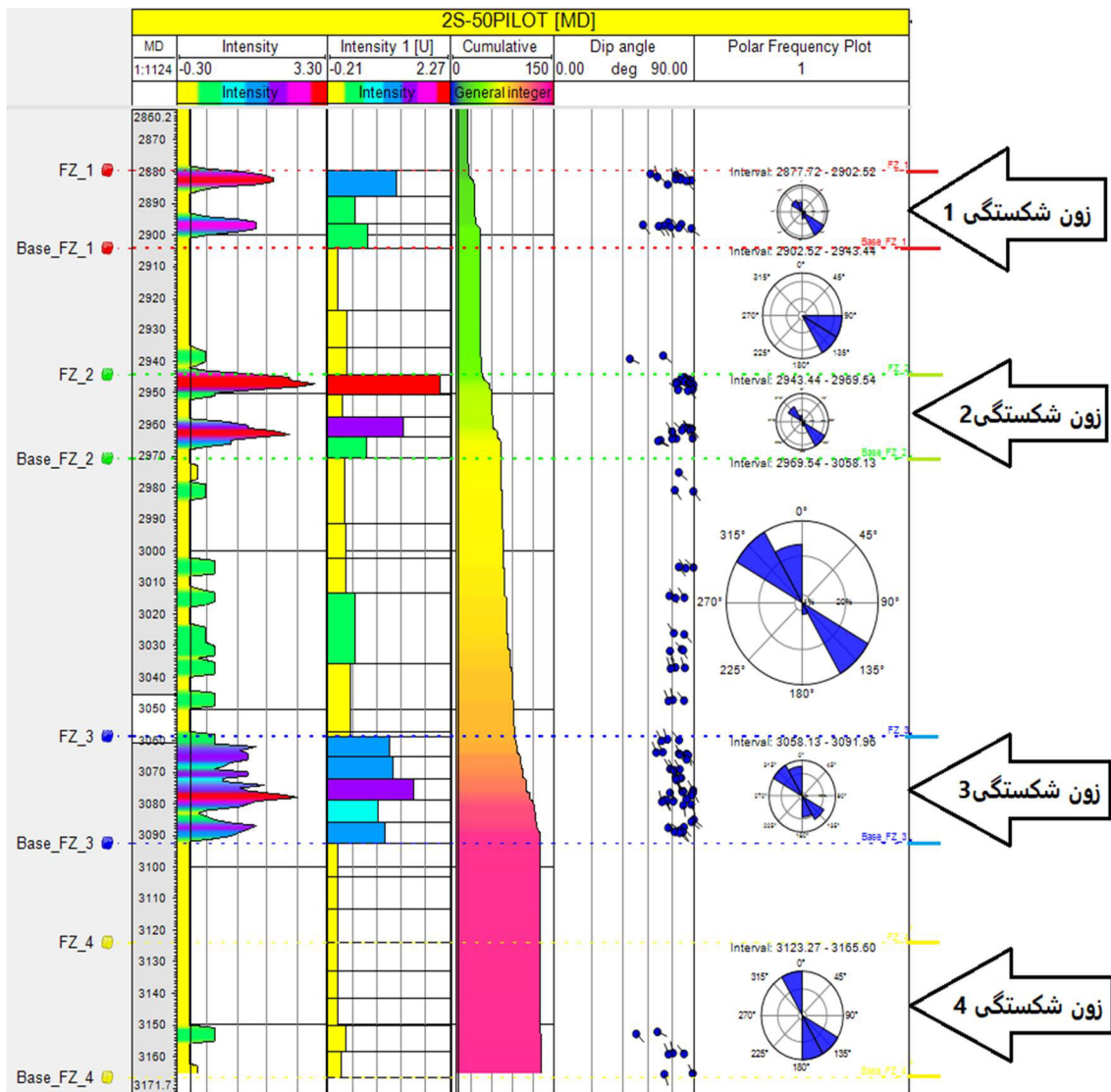
شکل ۴-۳۱: مقایسه نمودارهای ستونی شدت شکستگی، قبل و بعد از بزرگ‌مقیاس کردن. این اختلاف کم در میزان فراوانی، نشان‌دهنده صحت بزرگ‌مقیاس سازی است.

#### ۴-۵-۳- تعیین زون‌های شکستگی

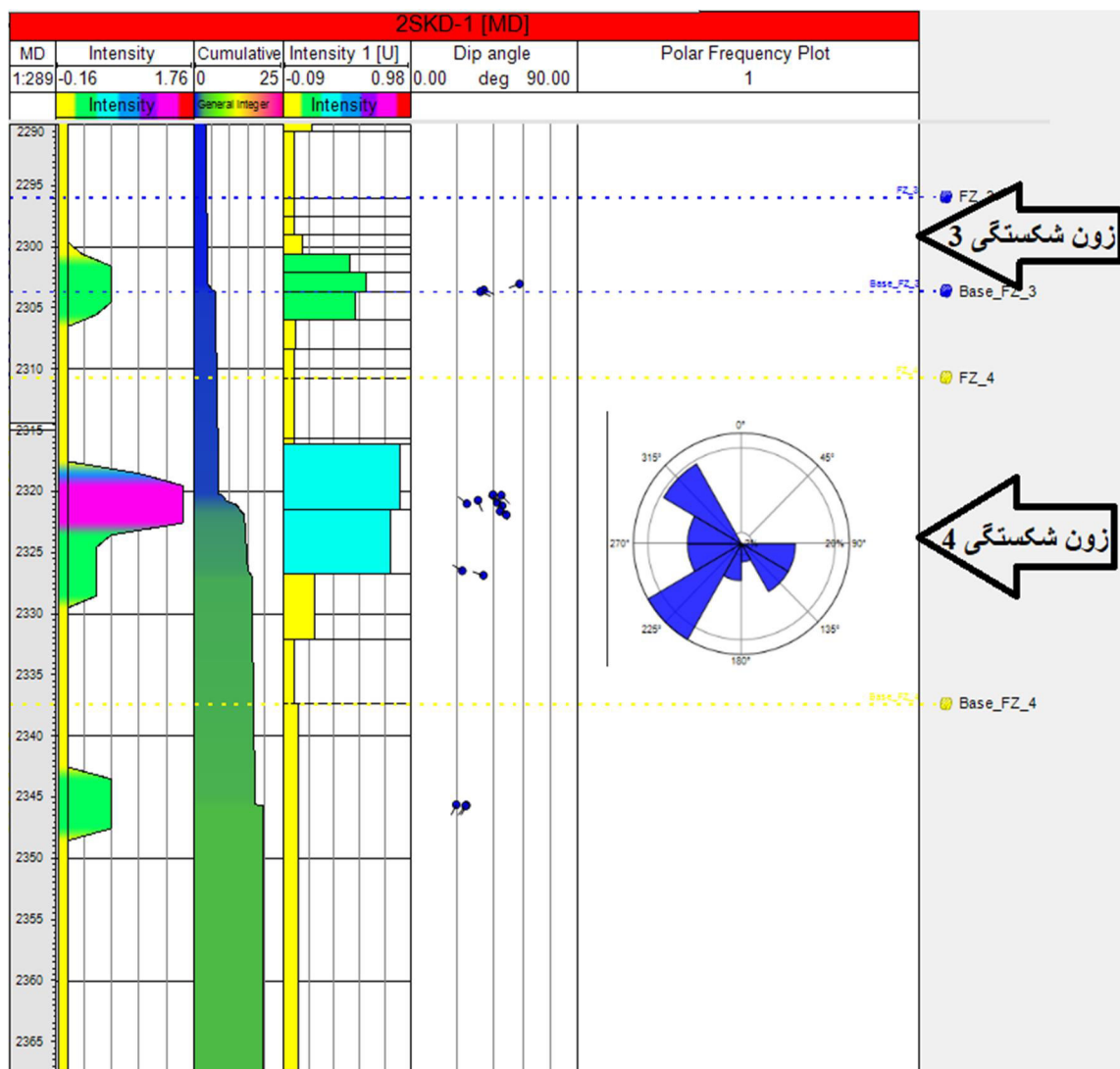
از روی داده‌های شکستگی‌های موجود، نمودار شدت شکستگی ساخته شد. سپس، نمودار تجمعی تولید شد، در واقع این نمودار از انباشته شدگی نمودار شدت شکستگی حاصل می‌شود. با توجه به تغییرات در سطح شیب نمودار تجمعی می‌توان زون بندی را انجام داد، به این صورت که بالا و پایین حداکثر تغییرات سطح شیب را مشخص نموده و آن به‌عنوان یک زون تعیین می‌شود، در واقع با تغییر سطح شیب نمودار تجمعی و میزان شدت شکستگی در آن محدوده، زون بندی صورت می‌گیرد. این

زون بندی کمک می‌کند هر منطقه را به صورت جداگانه از لحاظ پارامترهای آماری مورد تحلیل و بررسی قرار داده و می‌توان با توجه به میزان شدت خواص در هر زون، آن زون را به‌عنوان زون هدف معرفی کرده و مدل‌سازی‌های مختلف، از جمله مدل‌سازی شبکه شکستگی را در آن زون انجام داد. در این مطالعه با توجه به تغییرات شیب نمودار تجمعی و میزان شدت شکستگی در عمق‌های مختلف، محدوده مطالعاتی به چهار زون تقسیم‌بندی شد. همان‌طور که در شکل (۴-۳۲) مشاهده می‌شود می‌توان خواص شکستگی‌ها مانند شدت شکستگی، شیب، آزیموت شیب را در هر زون مورد ارزیابی قرار داد. در زون شکستگی ۱، مشاهده می‌شود که با تغییر شیب ناگهانی لاگ تجمعی در یک بازه عمقی کم (۲۴ متر) شدت شکستگی در بالا و پایین این زون بسیار زیاد است. در زون شکستگی ۲، آزیموت شیب شکستگی‌ها شمال غربی - جنوب شرقی است که بر روی استریونت شکل (۴-۳۲) به‌خوبی قابل ملاحظه است. زون شکستگی ۲، دارای ضخامت ۲۵ متر است که در بالای این زون بیشترین مقدار شدت شکستگی دیده می‌شود. جهت شیب شکستگی‌های این زون نیز شمال غربی - جنوب شرقی است. زون شکستگی ۳، با ضخامت ۳۵ متر در وسط آن بیشترین شدت شکستگی دیده می‌شود که این شکستگی‌ها دارای جهت شیب شمال غربی جنوب شرقی هستند.

با توجه به شکل (۴-۳۳)، فقط زون شکستگی ۳ و ۴ در چاه 2skd-1 قابل مشاهده است. زون شکستگی ۳ دارای ضخامت ۸ متری می‌باشد که بیشترین شدت شکستگی در پایین این زون قرار دارد. زون شکستگی ۴ با ضخامت ۲۸ متری، در چاه 2skd-1 دارای شکستگی‌های با جهت شیب متفاوت نسبت به دیگر زون‌ها است، که علت این امر می‌تواند در متفاوت بودن عامل شکل‌گیری شکستگی‌ها و یا حتی زمان ایجاد شکستگی‌ها باشد. در این زون علاوه بر جهت شیب شکستگی شمال غربی - جنوب شرقی، جهت شیب شکستگی جنوب غربی نیز به فراوانی دیده می‌شود.



شکل ۴-۳۲: تعیین زون‌های شکستگی با توجه به نمودار تجمعی و نمودار شدت شکستگی در چاه 2s50-pilot. در این شکل شیب و جهت شیب شکستگی‌های مربوط به هر زون به خوبی مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۲۳: تعیین زون‌های شکستگی با توجه به نمودار تجمعی و نمودار شدت شکستگی در چاه 2skd-1. در این شکل شیب و جهت شیب شکستگی‌های مربوط به زون شکستگی ۴ به خوبی مشاهده می‌شود.

#### ۴-۵-۴- ساخت مدل پتروفیزیکی

منظور از مدل‌سازی پتروفیزیکی این است که پارامترهای پتروفیزیکی برداشت شده در محل چاه‌ها، در تمام سلول‌های شبکه سه‌بعدی توزیع شوند تا بتوان محاسبات حجمی را روی آن‌ها انجام داد. در واقع پس از ساخت نمودار شدت شکستگی و بزرگنمایی این نمودار، از طریق مدل‌سازی پتروفیزیکی به تهیه نقشه چگالی شکستگی پرداخته می‌شود. استراتژی معمول در تخمین شدت

شکستگی در محدوده مخزن، استفاده از روش‌های زمین‌آماری است. در این قسمت نمودارهای شدت شکستگی با استفاده از یکی از الگوریتم‌های آماری موجود، در چهار زون شکستگی ساخته شده، توزیع می‌شوند.

روش‌های احتمالی جواب‌های رندوم تولید می‌کنند که با هر بار اجرا کردن مدل با پارامترهای یکسان ولی نقطه شروع<sup>۱</sup> (در اینجا منظور سلول‌های شبکه است) متفاوت، آنچه ساخته می‌شود با دیگری متفاوت است و هر نتیجه یک تشخیص<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. هرچه یک مدل به تعداد بیشتری ساخته شود، می‌توان آن‌ها را باهم مقایسه کرد و محتمل‌ترین مدل را که به تعداد بیشتر تولید شده است به‌عنوان بهترین مدل انتخاب نمود. ضمن آن‌که عدم قطعیت‌ها نیز شناسایی می‌شوند و مشخص خواهد شد که در کدام قسمت‌های مدل و به چه میزان احتمال خطا هست. این‌گونه روش‌ها جایی کاربرد دارند که داده‌های موجود نسبتاً کافی باشند.

مهم‌ترین روش‌های احتمالی که در مدل‌سازی پتروفیزیکی بکار می‌رود روش شبیه‌سازی گوسی ترتیبی<sup>۳</sup> (SGS) و روش شبیه‌سازی عملکرد تصادفی گوسی<sup>۴</sup> (GRFS) است. الگوریتم SGS اشاره به روشی در آنالیز نمونه‌ها دارد که داده‌های قابل قبول را به‌صورت مرحله به مرحله مشخص کرده و توزیع می‌کند. مثلاً اگر تعدادی سلول در محل چاه اعداد نمونه‌های شکستگی موجود باشد برای این-که در بقیه سلول‌ها مقادیر جدیدی قرار داده شود ابتدا باید از یک سلول شروع کرد. در هر سلول گستره‌ای از اعداد قرار داده می‌شود. اما این الگوریتم با مقایسه داده‌های واقعی و منحنی میزان احتمال حضور داده در آن نقطه، بخشی از داده‌ها را غیر قابل قبول تشخیص داده و بقیه را که احتمال بالاتر دارند تأیید می‌کند و سپس به‌صورت تصادفی به سلول‌های بعدی می‌رود که در آنجا با توجه به مقدار تعیین شده برای سلول قبلی و داده‌های موجود، عدد جدیدی در نظر می‌گیرد و تا انتها پیش

---

<sup>1</sup> Seed

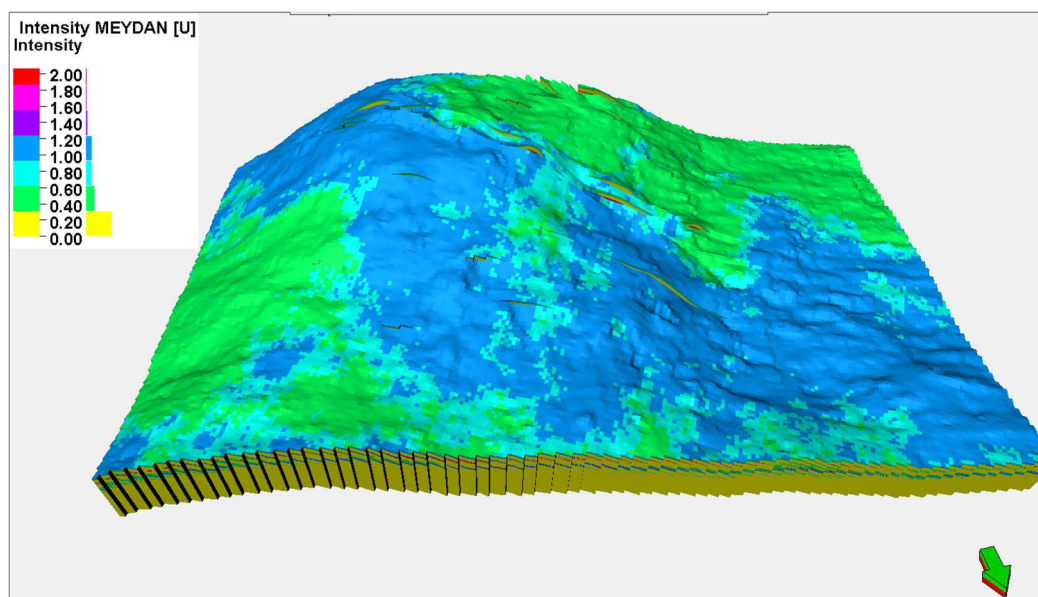
<sup>2</sup> Realization

<sup>3</sup> Sequential Gaussian Simulation (SGS)

<sup>4</sup> Gaussian Random Function Simulation (GRFS)

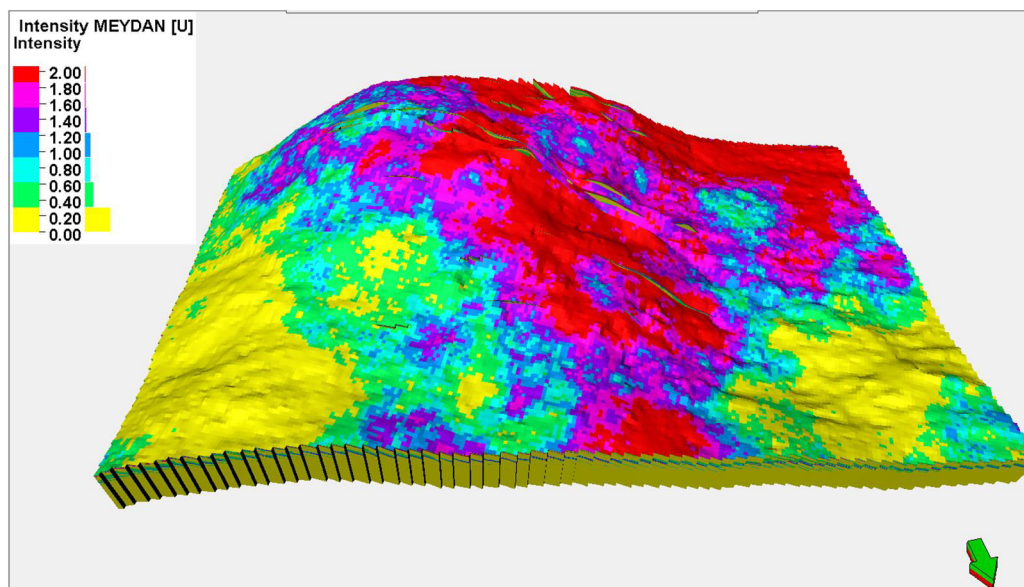
می‌رود. این چرخه قبول یا رد بخشی از جواب‌های محتمل را روش ترتیبی می‌گویند. تنها تفاوت بین الگوریتم GRFS و SGS در این است که این روش به صورت ترتیبی نیست و جواب‌ها را به طور موازی و هم‌زمان محاسبه می‌کند و لذا سریع‌تر از روش SGS است.

در این مطالعه با استفاده از الگوریتم GRFS در مدل‌سازی پتروفیزیکی، پارامتر شدت شکستگی در چهار زون شکستگی توزیع شد. با توجه به شکل (۴-۳۴) حداکثر توزیع شدت شکستگی در زون ۱ دارای امتداد شمال غربی - جنوبی شرقی است. همان‌طور که در شکل (۴-۳۵) مشاهده می‌شود، در زون ۲ بیشترین توزیع شدت شکستگی در مرکز میدان و جنوب میدان دیده می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۴-۳۶) قابل مشاهده است در زون ۳ حداکثر توزیع شدت شکستگی دارای روند شمال غربی - جنوبی شرقی است و علاوه بر آن در شمال میدان شدت شکستگی بیشتر از جنوب میدان است. در شکل (۴-۳۷) مشاهده می‌شود که، بیشترین شدت شکستگی در زون ۴ در جنوب میدان قرار دارد.

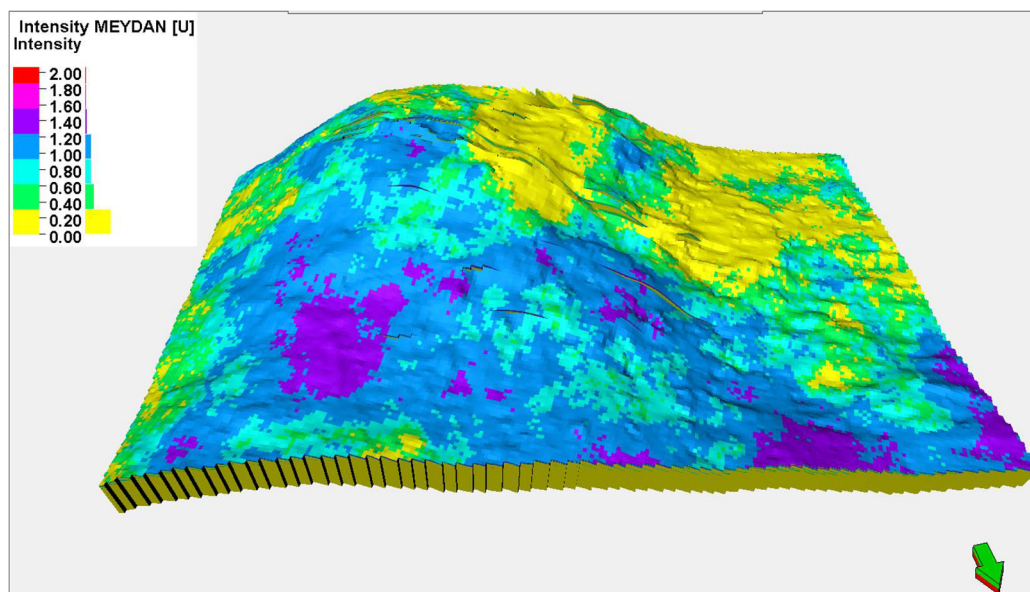


شکل ۴-۳۴: مدل توزیع شدت شکستگی در زون ۱.

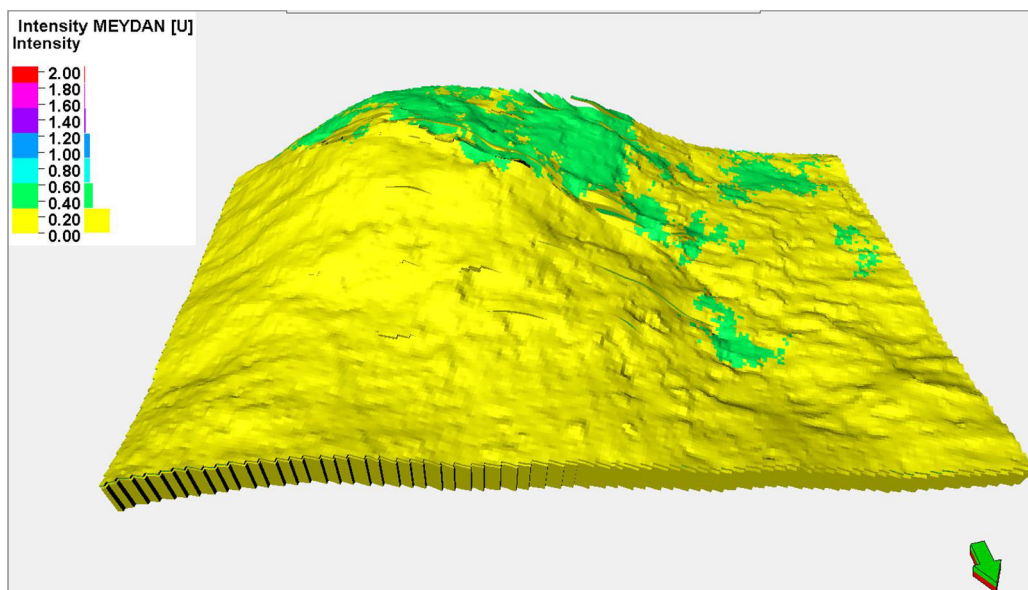




شکل ۴-۳۵: مدل توزیع شدت شکستگی در زون ۲.



شکل ۴-۳۶: مدل توزیع شدت شکستگی در زون ۳.



شکل ۴-۳۷: مدل توزیع شدت شکستگی در زون ۴.

#### ۴-۵-۵- بهبود مدل شدت شکستگی

روند شدت شکستگی‌های ایجاد شده در مدل شدت شکستگی، از داده‌های لاگ‌های تصویری تبعیت می‌کند و صحت این روند تنها به منطقه عمودی نزدیک چاه محدود می‌شود، در واقع داده چاه اجازه یک تخمین درست از نرخ تغییرات افقی را نمی‌دهد، به طوری که تنها با داده‌های چاه می‌توان نرخ تغییرات عمودی را در نظر گرفت. بنابراین آنچه از اطراف چاه به طور جانبی رخ می‌دهد بسیار ناشناخته است. از این رو با محدودیت داده‌های چاه، توزیع شدت شکستگی و مدل شکستگی تولید شده از قطعیت خوبی برخوردار نیستند.

برای بهبود مدل شدت شکستگی می‌توان از روندهای شکستگی که در کل شبکه وجود دارند به عنوان ویژگی‌های ثانویه در مدل شدت شکستگی بهره برد. برای این منظور در میدان می‌توان از ویژگی‌های ثانویه مختلفی استفاده کرد. یکی از این ویژگی‌های ثانویه مرتبط با داده‌های لرزه‌ای است.

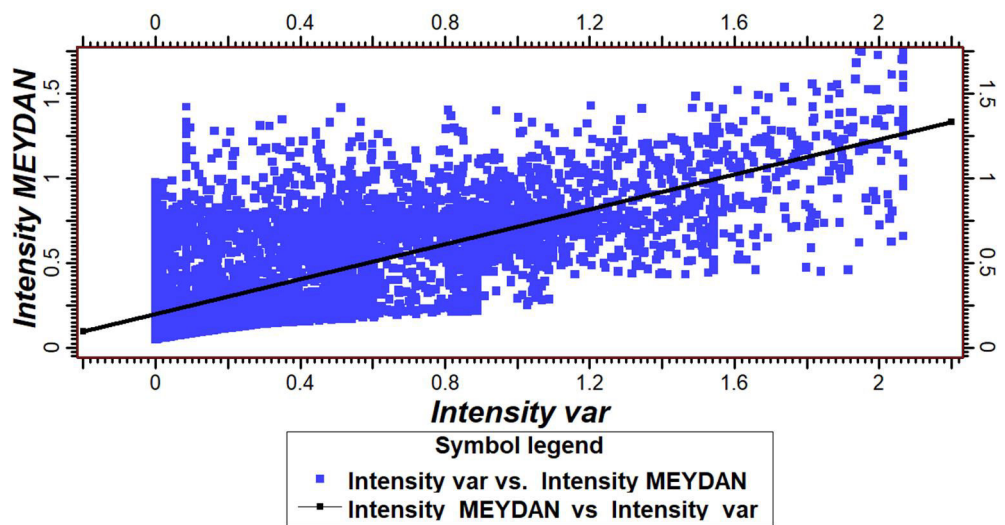
در این مطالعه برای غلبه بر محدودیت‌های بیان شده و استفاده از ویژگی‌های ثانویه از روش

کارآمدی به نام، کوکریجینگ<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. واقعیت این است که اگر بتوان از متغیرهای بیشتری که باهم مرتبط هستند به عنوان ورودی جهت تخمین یک متغیر استفاده کرد، دقت تخمین افزایش خواهد یافت. مبنای روش کوکریجینگ بر اساس دو متغیر شدن پارامترها است. منظور از دو متغیر شدن پارامترها این است که اگر قبلاً جفت نقاط در یک مجموعه بودند، حالا یک نقطه از داده‌های مورد بحث با یک نقطه از سطح دیگر در همان مجموعه مقایسه شده و اگر ضریب همبستگی آن‌ها بالا باشد، اعمال آن باعث می‌شود روند تغییرات داده‌های شکستگی از روند مقادیر گرید سطح دیگر پیروی کند. در این روش معمولاً از متغیر ثانویه‌ای که دارای شبکه برداشت منظمی است و در عین حال همبستگی بالایی با متغیر اولیه دارد، استفاده می‌شود. این روش را زمانی می‌توان استفاده کرد که داده‌های ثانویه مانند داده‌های لرزه‌ای در تمام نقاط شبکه وجود داشته باشند.

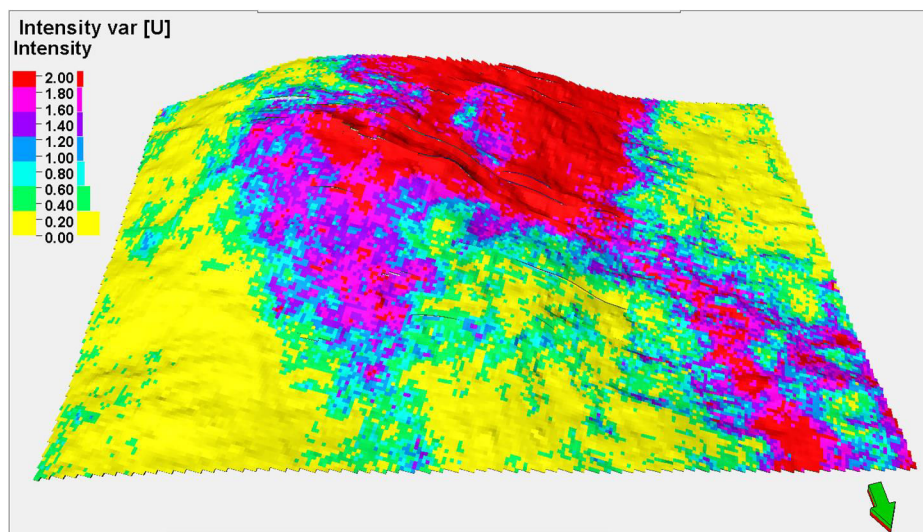
در ادامه نشانگرهای استخراج شده از داده‌های لرزه‌ای مانند آشفتگی، واریانس، انحنا و الگوریتم ردیابی مورچه، توسط روش کوکریجینگ به عنوان ورودی ثانویه انتخاب شده و در تهیه‌ی مدل توزیع شدت شکستگی در چهار زون دخالت داده شدند. با توجه به شکل (۴-۳۸) ضریب همبستگی شدت نشانگر واریانس به عنوان ورودی ثانویه با شدت شکستگی میدان ۰/۷۳ به دست آمد. در شکل (۴-۳۹)، توزیع شدت شکستگی در زون ۲ با اعمال نشانگر واریانس را نشان می‌دهد. در این شکل بیشترین توزیع شکستگی در بخش انحنای مخزن دیده می‌شود و توزیع شدت شکستگی دارای روند شمال غربی - جنوب شرقی است.

---

<sup>1</sup> Cokriging



شکل ۴-۳۸: ضریب همبستگی ۰/۷۳ بین شدت نشانگر واریانس به عنوان ورودی ثانویه و توزیع شدت شکستگی میدان.



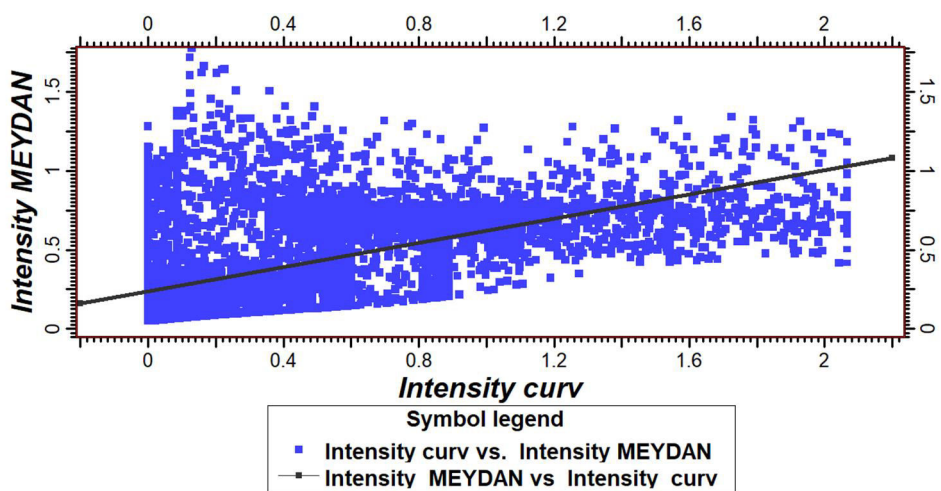
شکل ۴-۳۹: توزیع شدت شکستگی به دست آمده در زون ۲ توسط روش کوکریجینگ با اعمال نشانگر واریانس.

شکل (۴-۴۰)، ضریب همبستگی بین توزیع شدت شکستگی میدان و شدت الگوریتم انحنای

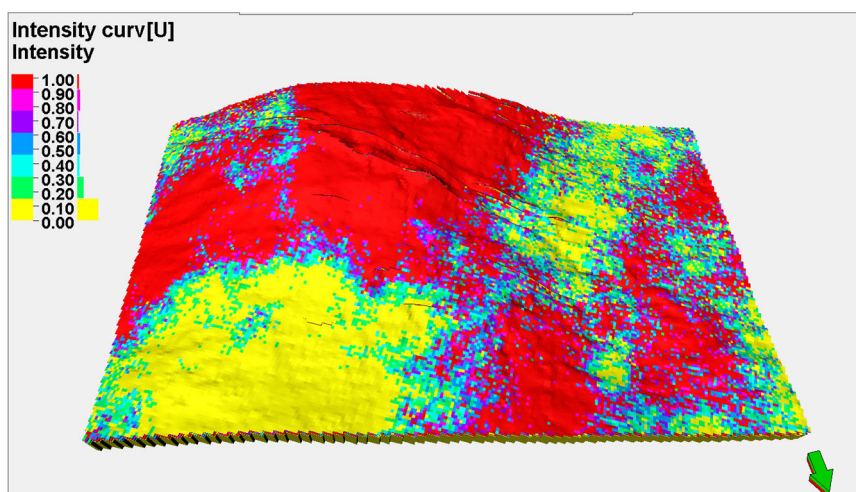
به عنوان ورودی ثانویه را نشان می دهد، این ضریب همبستگی ۰/۶۱ به دست آمد. در شکل (۴-۴۱)،

توزیع شدت شکستگی با اعمال نشانگر انحنای در زون ۲ نشان داده شده است.



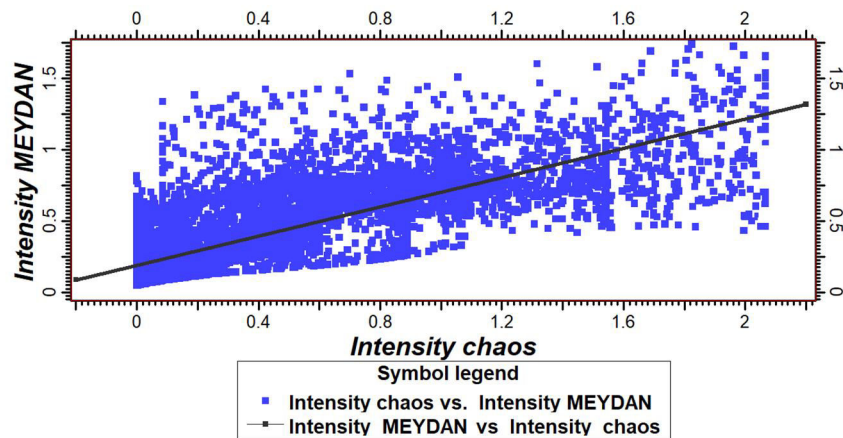


شکل ۴-۴۰: ضریب همبستگی ۰/۶۱ بین شدت نشانگر انحنای به عنوان ورودی ثانویه و توزیع شدت شکستگی میدان.

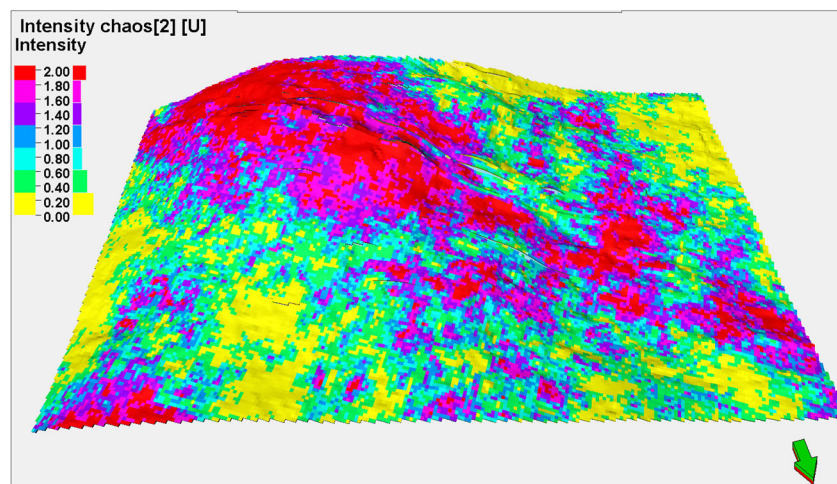


شکل ۴-۴۱: توزیع شدت شکستگی به دست آمده در زون ۲ توسط روش کوکریجینگ با اعمال نشانگر انحنای.

شکل (۴-۴۲)، ضریب همبستگی بین شدت نشانگر آشفتگی به عنوان ورودی ثانویه و توزیع شدت شکستگی میدان را نشان می‌دهد، که ضریب همبستگی بین آن‌ها ۰/۷۹ به دست آمد. شکل (۴-۴۳)، نشان‌دهنده توزیع شدت شکستگی با اعمال نشانگر آشفتگی در زون ۲ است.

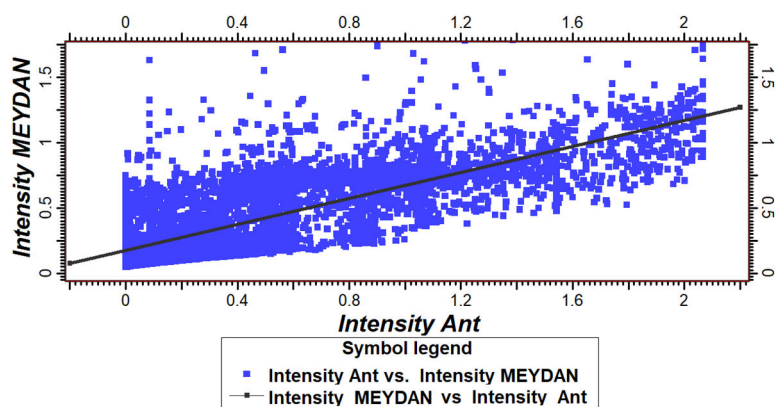


شکل ۴-۴۲: ضریب همبستگی  $0.79$  بین شدت نشانگر آشفته‌گی به‌عنوان ورودی ثانویه و توزیع شدت شکستگی میدان.

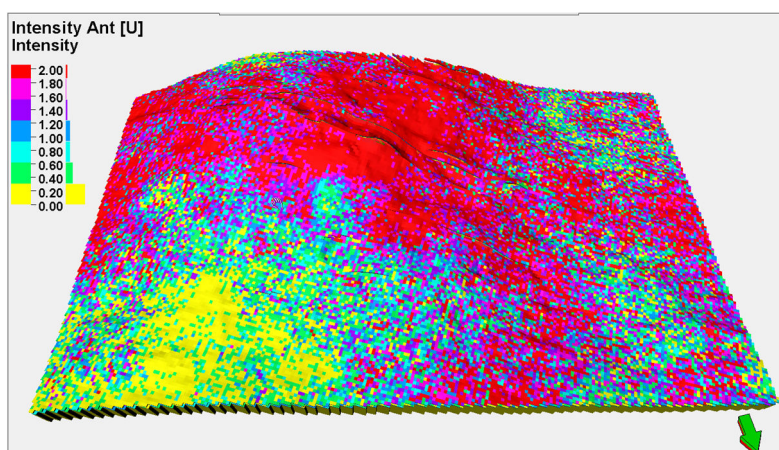


شکل ۴-۴۳: توزیع شدت شکستگی به‌دست آمده در زون ۲ توسط روش کوکریجینگ با اعمال نشانگر آشفته‌گی.

با توجه به شکل (۴-۴۴)، ضریب همبستگی میان شدت الگوریتم ردیابی مورچه به‌عنوان ورودی ثانویه و توزیع شدت شکستگی میدان  $0.81$  به‌دست آمد. شکل (۴-۴۵)، توزیع شدت شکستگی به‌دست آمده توسط روش کوکریجینگ با اعمال الگوریتم ردیابی مورچه را در زون ۲ نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴: ضریب همبستگی ۰/۸۱ بین شدت الگوریتم ردیابی مورچه به عنوان ورودی ثانویه و توزیع شدت شکستگی میدان.



شکل ۴-۵: توزیع شدت شکستگی به دست آمده در زون ۲ توسط روش کوکریجینگ با اعمال الگوریتم ردیابی مورچه.

#### ۴-۵-۶- ساخت مدل شدت شکستگی با استفاده از شبکه عصبی

شبکه عصبی رابطه بین چند پارامتر شناخته شده و یک پارامتر ناشناخته را بررسی می‌کند. در شبکه عصبی، مقادیر متغیرهای خروجی بر اساس داده‌های ورودی تعیین می‌شود. این ورودی‌ها ممکن است مقادیر نمودارهای پتروفیزیکی، نشانگرهای لرزه‌ای، محرک‌های شکستگی و یا خواص مخزن باشد. با استفاده از شبکه عصبی می‌توان انواع شدت شکستگی‌های به دست آمده از داده‌های

ثانویه را به عنوان ورودی باهم ادغام کرد و به یک شدت شکستگی مطلوب به عنوان خروجی دست یافت.

در این مطالعه در شبکه عصبی از ۴ مدل شدت شکستگی بهبودیافته به عنوان داده های ورودی برای آموزش و ساخت شبکه استفاده گردید. در واقع این مدل از شدت شکستگی حاوی اطلاعات و روندهایی است که از پارامترهای دیگر (نشانه های لرزه ای و نمودارهای تصویری) در مدل به دست آمده است. هر ورودی در یک وزن ضرب شده و باهم جمع می شوند. سپس نتیجه حاصل در یک تابع غیر خطی قرار داده می شود تا خروجی حاصل شود. برای مدل سازی از روش نظارت شده استفاده شد. از داده های شدت شکستگی ۷۰٪ برای آموزش و ۳۰٪ آن برای اعتبار سنجی به کار گرفته شد. برای آموزش مدل از ۴۰۰ مرتبه تکرار استفاده شد تا مدل به خوبی آموزش دیده شود. همچنین حد خطا برای متوقف کردن الگوریتم ۵٪ در نظر گرفته شد.

در جدول (۲-۴) نتیجه شبکه عصبی آورده شده است. در این جدول ضریب همبستگی میان هر یک از محرک های شکستگی با یکدیگر و رابطه محرک های شکستگی با خروجی شبکه عصبی (intensity NN) قابل مشاهده است. ضریب همبستگی بین خروجی شبکه عصبی و محرک های شکستگی ۰/۹۳ است که این بیان کننده یک رابطه خیلی خوب بین محرک های شکستگی و شدت شکستگی حاصل از شبکه عصبی است. در نهایت برای ساخت مدل شبکه گسسته شکستگی از شدت شکستگی حاصل از شبکه عصبی استفاده خواهد شد. این مدل شدت شکستگی برآوردی از انواع روندهای شکستگی است.

جدول ۲-۴: رابطه همبستگی بین محرک های شکستگی و شدت شکستگی حاصل از شبکه عصبی

	Intensity var	Intensity curv	Intensity chaos	Intensity Ant	Intensity NN
Intensity var	1.0000	0.6176	0.6574	0.6262	0.7783
Intensity curv	0.6176	1.0000	0.6491	0.5979	0.8187
Intensity chaos	0.6574	0.6491	1.0000	0.6780	0.6941
Intensity Ant	0.6262	0.5979	0.6780	1.0000	0.7049
Total	0.7269	0.7107	0.7684	0.7317	0.9347



#### ۴-۵-۷- ساخت مدل شبکه گسسته شکستگی

در این بخش به پارامترهای مورد نیاز جهت مدل سازی DFN پرداخته می شود. چهار پارامتر اصلی توزیع شکستگی<sup>۱</sup>، هندسه شکستگی<sup>۲</sup>، جهت شکستگی<sup>۳</sup> و دهانه بازشدگی شکستگی<sup>۴</sup> برای ساخت مدل شبکه گسسته شکستگی مورد بررسی قرار می گیرد.

#### ۴-۵-۷-۱- توزیع شکستگی

توزیع شکستگی در یک شبکه سه بعدی ایجاد می شود. این توزیع را می توان در یک زون، یک ویژگی ناحیه ای و یا کل شبکه سه بعدی تعریف کرد. موقعیت مکانی شکستگی ها با فرآیند آماری پواسون که کاربرد گسترده ای در مدل سازی شبکه گسسته شکستگی ها دارد، تعیین می شود. شدت شکستگی (مقدار شکستگی در واحد حجم) به عنوان تعداد شکستگی، طول شکستگی و یا مجموع سطوح شکستگی به حجم سنگ بیان می شود. از آنجایی که نتایج حاصل از مدل شدت شکستگی برابر است با مساحت شکستگی به حجم سنگ، به عنوان ورودی مورد استفاده قرار می گیرد. در این مطالعه از شدت شکستگی حاصل از شبکه عصبی به عنوان ورودی استفاده می شود و توزیع شکستگی در ۴ زون شکستگی مخزن اعمال می شود.

#### ۴-۵-۷-۲- هندسه شکستگی

به طور مفهومی شکل شکستگی ها بیضوی هستند، اما به دلیل درک بهتر و ساده شدن محاسبات، هندسه شکستگی ها به شکل چند گوشه ساده می شوند. این هندسه چند گوشه دارای یک نرخ کشیدگی است. که این نرخ کشیدگی برابر طول افقی شکستگی به طول عمودی آن است. با اعمال حداکثر و حداقل محدودیت های اندازه گیری شکستگی در حین تعیین طول شکستگی، می توان تمام شکستگی هایی را که از ویژگی های شدت شکستگی مدل می شوند به صورت مستقل کنترل کرد. این

<sup>1</sup> Fracture Distribution

<sup>2</sup> Fracture Geometry

<sup>3</sup> Fracture Orientation

<sup>4</sup> Fracture Aperture

ویژگی باعث می‌شود بتوان شکستگی‌های کوچک که احتمالاً کمتر به‌عنوان کانال‌های نفوذپذیری مهم هستند را وارد مدل شبکه گسسته شکستگی نکرد. یک گزینه دیگر که توسط روش IFM تسهیل شده است اعمال یک حد آستانه روی طول شکستگی و مدل کردن تمام شکستگی‌های کوچک‌تر از نظر آماری است.

از آنجایی که طول شکستگی‌ها را نمی‌توان مستقیماً از نمودارهای تصویری و ابزار درون‌چاهی به‌دست آورد. در نتیجه با توجه به اینکه داده‌های مربوط به طول شکستگی‌ها در دسترس نیست، از روش قانون توانی<sup>۱</sup> برای توزیع طول شکستگی‌ها استفاده می‌شود. قانون توانی یک نسبت چندجمله‌ای با مقیاس نامتغیر است. توزیع قانون توانی برای توصیف توزیع طول شکستگی که می‌تواند رفتار مقیاس مستقل (فرکتال) را نشان دهد، مفید است.

#### ۴-۵-۷-۳- جهت‌گیری شکستگی

از آنجایی که جهت‌گیری شکستگی‌ها نقش اساسی در تراوایی جریان سیال مخزن دارد یکی از پارامترهای مهم در مدل‌سازی شکستگی‌ها محسوب می‌شود. در این مطالعه از نتایج نمودارهای تصویری برای تفسیر شیب جهت شیب و امتداد شکستگی‌ها استفاده گردیده است. به‌منظور اعمال جهت‌گیری شکستگی‌ها با توجه به داده‌های شیب و آزمون جهت شیب می‌توان از سه روش فیشر<sup>۲</sup>، کنت<sup>۳</sup> و بینگهام<sup>۴</sup> بهره برد که روش فیشر برای توزیع جهت شکستگی‌ها استفاده گردید. روش فیشر یک قانون توزیع طبیعی (گوسی) را تعریف می‌کند و توزیع زاویه‌ها را توسط سه پارامتر میانگین شیب، میانگین آزمون جهت شیب و مقدار تمرکز بیان می‌کند. میانگین شیب و میانگین آزمون جهت شیب از روی استریونت تعیین می‌شود. مقدار تمرکز بیانگر پراکندگی داده‌ها در اطراف میانگین شیب است. به‌طوری که هرچه مقدار تمرکز بیشتر باشد، قطب‌های شکستگی تمرکز بیشتری را در

---

<sup>1</sup> Power Law

<sup>2</sup> Fisher

<sup>3</sup> Kent

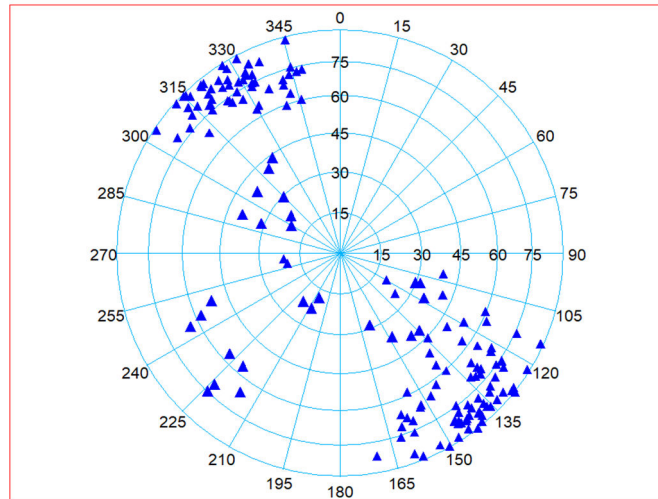
<sup>4</sup> Bingham

اطراف میانگین شیب نشان می‌دهد. مقدار تمرکز از صفر تا صد است (جایی که مقدار صفر است، پراکندگی گسترده می‌شود، و مقدار صد یک توزیع متمرکز می‌دهد). با بررسی مقدار داده‌های شیب و آزمون جهت شیب، مقدار تمرکز ۹۰، پراکندگی مناسبی در اطراف مقدار میانگین شیب را ارائه داد. توزیع این سه پارامتر در چهار زون شکستگی بررسی شد. با توجه به جدول (۳-۴) در هر زون میزان شیب، مقدار آزمون جهت شیب و مقدار تمرکز تعیین شد.

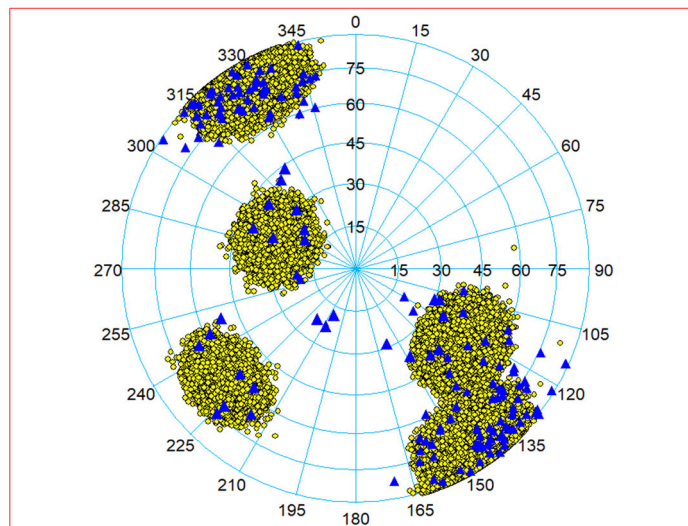
جدول ۳-۴: پارامترهای جهت‌گیری شکستگی‌های میدان مورد مطالعه

شماره زون	دسته شکستگی	مقدار شیب	مقدار آزمون جهت شیب	مقدار تمرکز
۱	۱	۴۷	۱۲۵	۸۵
۲	۲	۷۸	۱۴۵	۹۰
۳	۳	۸۰	۳۳۰	۸۵
۴	۴	۴۰	۲۲۵	۹۰
۴	۵	۳۰	۲۹۰	۸۰

در شکل‌های (۴-۴ و ۴۶-۴) می‌توان با توجه به دسته‌بندی شکستگی‌ها، هم‌خوانی جهت‌گیری مدل شکستگی که تولید می‌شود را با ورودی‌های تحلیلی-آماری، بررسی نمود. در شکل (۴-۴۷) مثلث‌های آبی رنگ نشان‌دهنده داده‌های شکستگی حاصل از چاه نمودارهای تصویری هستند و دایره‌های زرد رنگ تمرکز جهت‌گیری‌ها در مدل شکستگی می‌باشند. در این شکل مشاهده می‌شود که توزیع و تمرکز جهت‌گیری شکستگی‌ها در مدل‌سازی شبکه شکستگی به خوبی انجام شده است.



شکل ۴-۴۶: داده‌های شکستگی‌ها، حاصل از نمودارهای تصویری بر روی استریونوت.



شکل ۴-۴۷: توزیع و تمرکز جهت‌گیری شکستگی‌ها در مدل‌سازی گسسته شکستگی

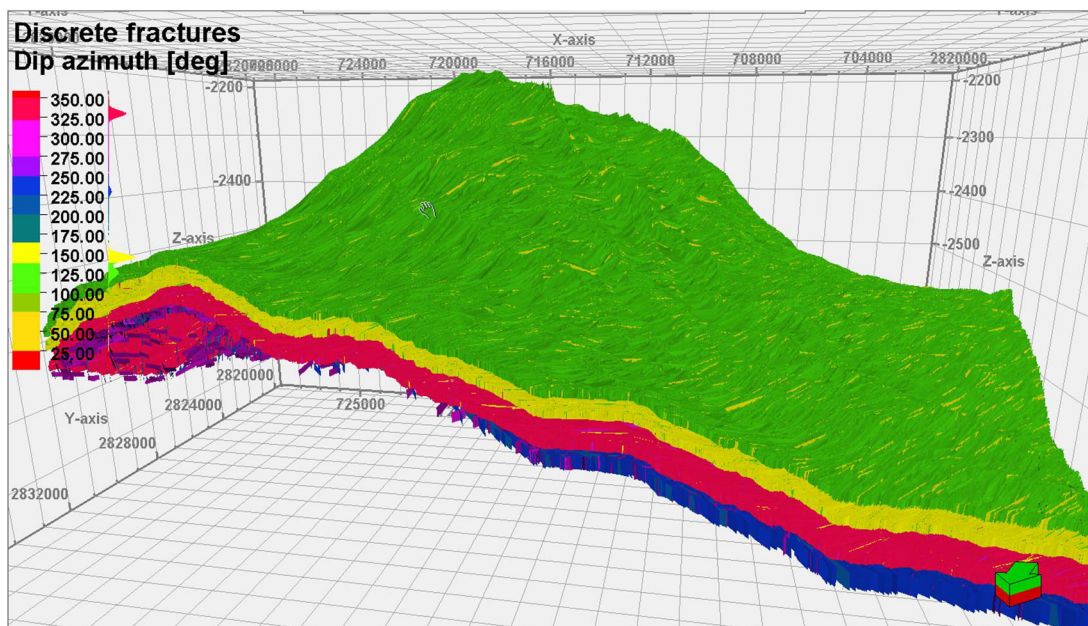
#### ۴-۵-۷-۴- بازشدگی شکستگی

بازشدگی شکستگی به فاصله عمودی میان دو سطح در عرض شکستگی گفته می‌شود. میزان بازشدگی شکستگی در تمام نقاط سطح شکستگی ثابت نیست و ممکن است در طول صفحه شکستگی به علت پارامترهای مختلفی مثل زبری سطح، پرتشدگی توسط مواد رسوبی و آزاد شدن تنش‌های درگیر، تغییر کند. در اینجا با کمک چاه نمودارهای تصویری اندازه حداقل دهانه شکستگی

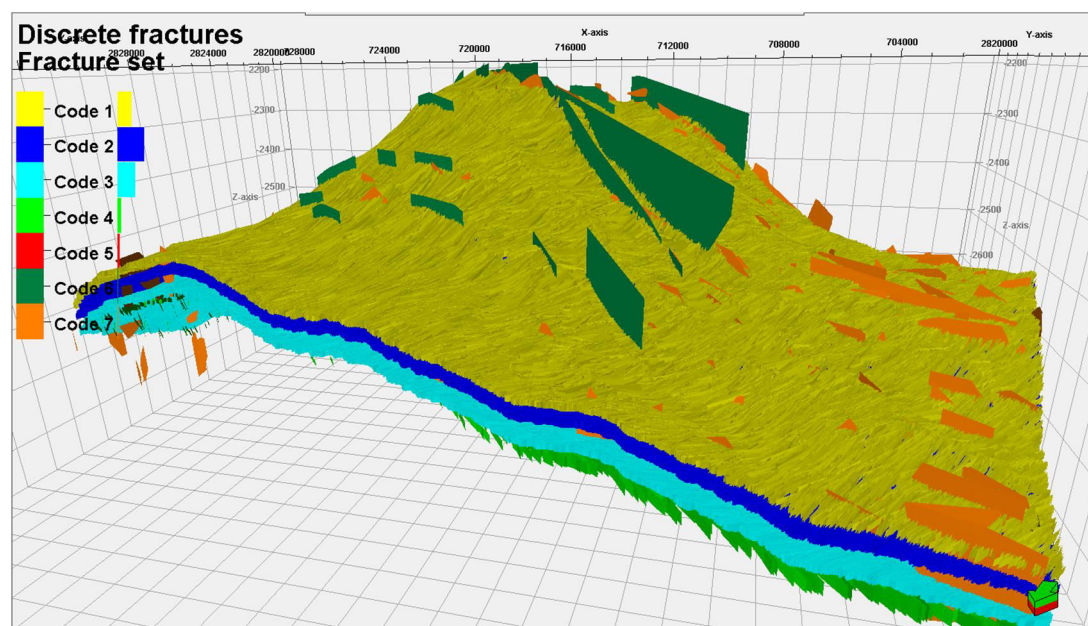
۰/۰۱ میلی‌متر و حداکثر ۰/۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد و میانگین اندازه دهانه شکستگی ۰/۰۶ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

پس از آماده شدن ورودی‌های مختلف، به ساخت مدل پرداخته شد. مدل‌سازی شبکه گسسته شکستگی با کمک شدت شکستگی بهبود یافته توسط محرک‌های شکستگی و شبکه عصبی، در ۴ زون شکستگی ساخته شد. همچنین هندسه شکستگی از طریق قانون توانی به شکل چند وجهی انتخاب شد و جهت‌گیری شکستگی‌ها از طریق پارامترهای متد فیشر به‌خوبی در مدل توزیع شد و مدل شبکه گسسته شکستگی با ۵ دسته شکستگی ساخته شد. در آخر دهانه شکستگی‌ها با توجه به گزارشات حاصل از چاه نمودارهای تصویری، در مدل اعمال شد. در شکل (۴-۴۸)، مدل شبکه گسسته شکستگی نشان داده شده است.

در ادامه گسل‌هایی که به روش دستی و روش خودکار به‌صورت قطعی مدل‌سازی شده بودند، به‌عنوان ۲ دسته گسل وارد مدل شبکه گسسته شکستگی می‌شود. شکل (۴-۴۹) مدل شبکه گسسته شکستگی ساخته شده را نشان می‌دهد که دارای ۵ دسته شکستگی و ۲ دسته گسل است. دسته ۶ (Code 6) گسل‌هایی هستند که با روش دستی، و دسته ۷ (Code 7) گسل‌هایی هستند که با روش خودکار استخراج شدند.



شکل ۴-۴۸: مدل سه بعدی شبکه گسسته شکستگی ساخته شده در ۴ زون شکستگی مخزن مورد مطالعه



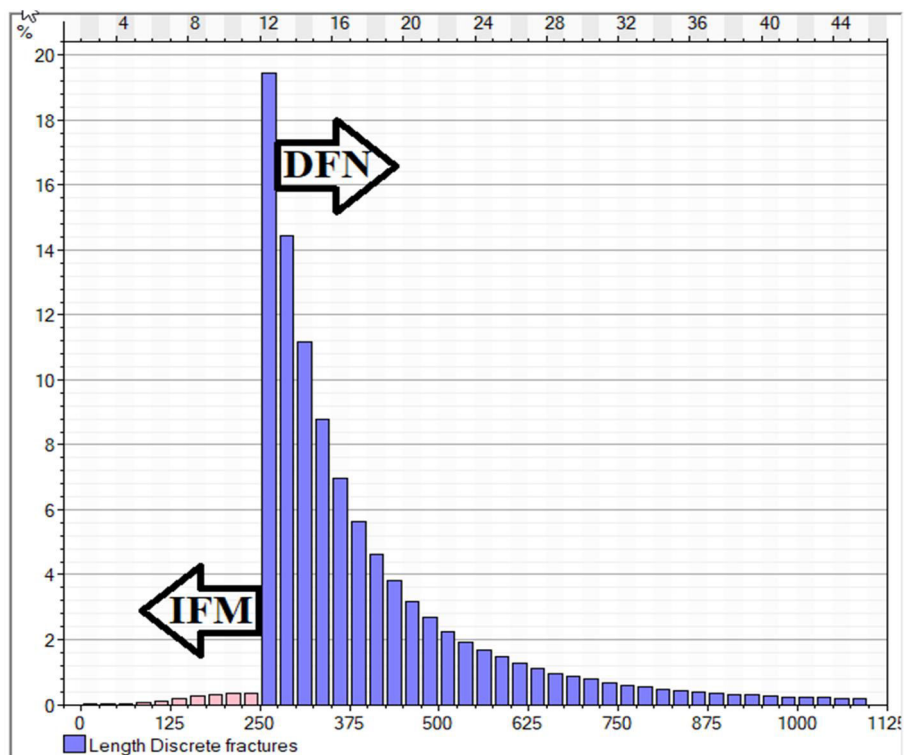
شکل ۴-۴۹: مدل سه بعدی شبکه گسسته شکستگی به همراه دسته شکستگی ها و گسل ها.

#### ۴-۵-۸- ساخت مدل شکستگی ضمنی

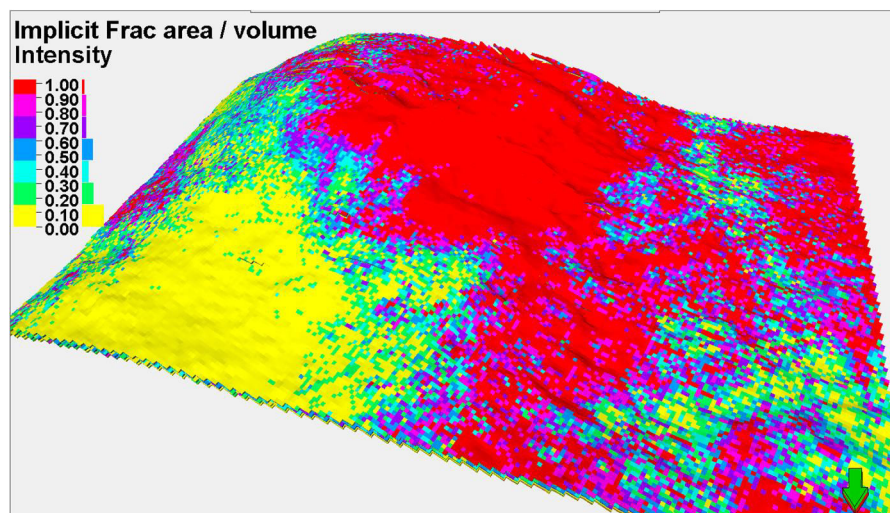
از آنجایی که شکستگی‌های کوچک مقیاس در انتقال سیال به خوبی شکستگی‌های بزرگ مقیاس عمل نمی‌کنند پس بجای اینکه آن‌ها به صورت صریح مدل شوند با استفاده از روش آماری به مدل‌سازی ضمنی آن‌ها پرداخته شد. برای ساخت مدل شکستگی ضمنی باید یک حد آستانه برای طول شکستگی‌ها تعیین شود. در واقع شکستگی‌هایی با طول صفر تا حد آستانه به صورت ضمنی مدل می‌شوند. در این جا با توجه به اندازه سلول‌های شبکه و مقدار فراوانی شکستگی‌ها در بازه طولی، این حد آستانه ۲۵۰ فوت انتخاب شد. شکل (۴-۵۰) نشان‌دهنده فراوانی طول شکستگی‌ها است، که با قرار دادن حد آستانه ۲۵۰ فوت مرز بین مدل DFN و IFM مشخص شد.

سایز سلول‌های ساخته شده در این مطالعه ۱۰۰ متر قرار داده شده است، از این رو شکستگی‌های کوچک نمی‌توانند رابطه‌ای بین سلول‌ها برقرار کنند. در واقع شکستگی‌های کوچک بیشتر نفوذپذیری ماتریکس را افزایش می‌دهند و به خواص سلول‌ها کمک می‌کنند. در شکل (۴-۵۱) مدل شکستگی ضمنی مشاهده می‌شود، که این مدل ویژگی‌های شکستگی‌ها را در تک تک سلول‌های شبکه به صورت ضمنی نشان می‌دهد. با استفاده از مدل شکستگی ضمنی عناصر شبکه شکستگی متشکل از متغیرهای تصادفی که تراکم هندسه، جهت‌گیری و ویژگی‌های شکستگی را توصیف می‌کنند، به نمایش گذاشته شد.





شکل ۴-۵: توزیع طول شکستگی‌ها و تعیین حد آستانه ۲۵۰ فوت برای مشخص کردن مرز بین مدل‌سازی IFM و DFN.



شکل ۴-۵: مدل شکستگی ضمنی ساخته شده توسط شکستگی‌های کوچک مقیاس.

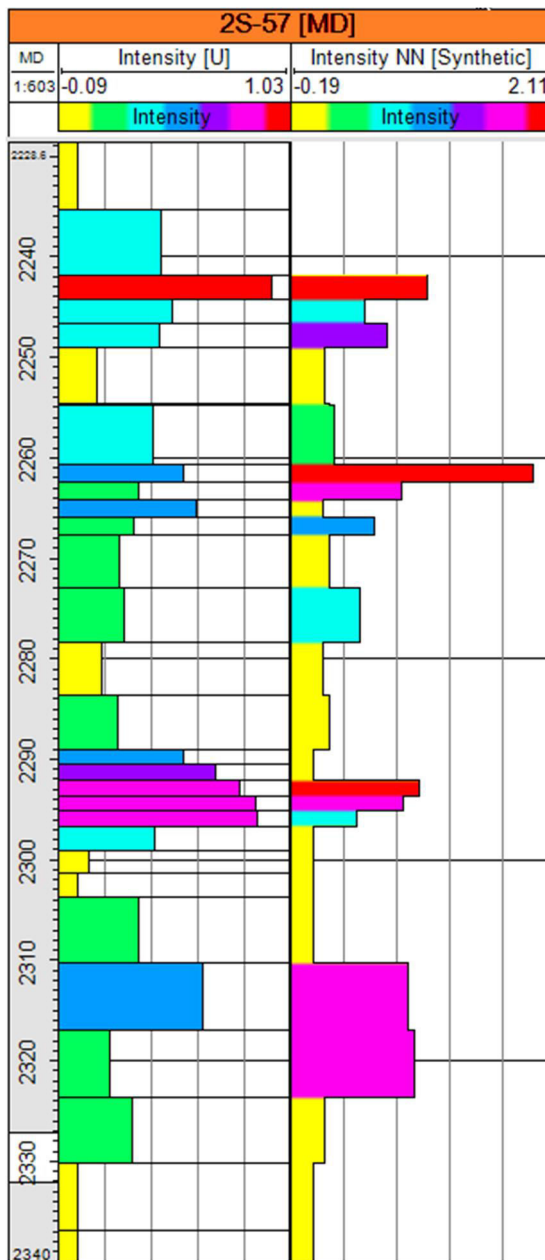
#### ۴-۵-۹- اعتبار سنجی مدل گسسته شکستگی

در این مطالعه بارها به اعتبار سنجی تفسیرها و بهبود بخشیدن مدل‌سازی پرداخته شد و با این

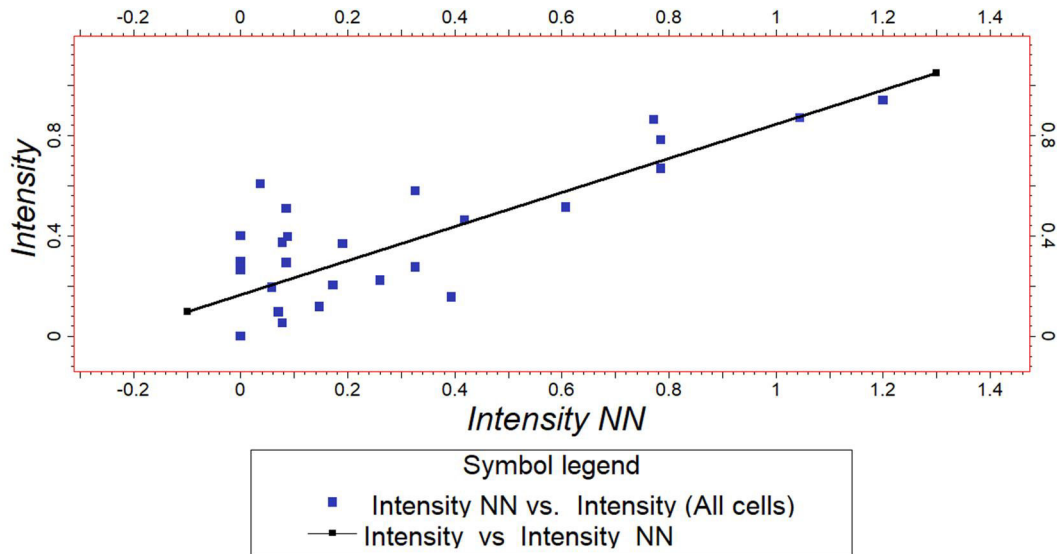


کار مدل‌ها با کمترین خطای ممکن ساخته شدند. اما با توجه به اینکه فرآیند مدل‌سازی شکستگی‌ها به دلیل ماهیت پیچیده آن همواره با خطاها و عدم قطعیت همراه است، لذا لازم است که سازگاری مدل شکستگی‌ها با اطلاعات دینامیکی بررسی شود. از آنجایی که در این مطالعه داده‌های تولید در اختیار نیستند، برای سنجش میزان صحت مدل‌سازی شکستگی، از اطلاعات چاه 2S-57 که دارای چاه نمودار تصویری است، استفاده می‌شود.

در شکل (۴-۵۲)، نمودار شدت شکستگی حاصل از مدل‌سازی شبکه شکستگی (intensity NN) در چاه 2S-57، در مقایسه با نمودار شدت شکستگی واقعی چاه (intensity [U]) که حاصل از چاه-نمودار تصویری آن است، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شدت شکستگی‌های حاصل از مدل‌سازی شکستگی‌ها در تعیین درصد بیشتری از زون‌های شکسته موفق بوده است. با توجه به شکل (۴-۵۳) تطابق بین این دو پارامتر انجام شد و ضریب همبستگی بین شدت شکستگی حاصل از مدل‌سازی شکستگی با شدت شکستگی حاصل از نمودار تصویری ۰/۸۳ به دست آمد.



شکل ۴-۵۲: نمایش نمودار شدت شکستگی حاصل از مدل شبکه شکستگی (intensity NN) در چاه 2S-57 در مقابل نمودار شدت شکستگی حاصل از چاه نمودار تصویری (intensity [U]) در همان چاه.



شکل ۴-۵۳: ضریب همبستگی  $0.83$  بین شدت شکستگی حاصل از نمودار تصویری (intensity) در چاه 2S-57 با شدت شکستگی حاصل از مدل شبکه شکستگی (intensity NN) در همان چاه.

#### ۴-۶- مدل سازی هیبریدی

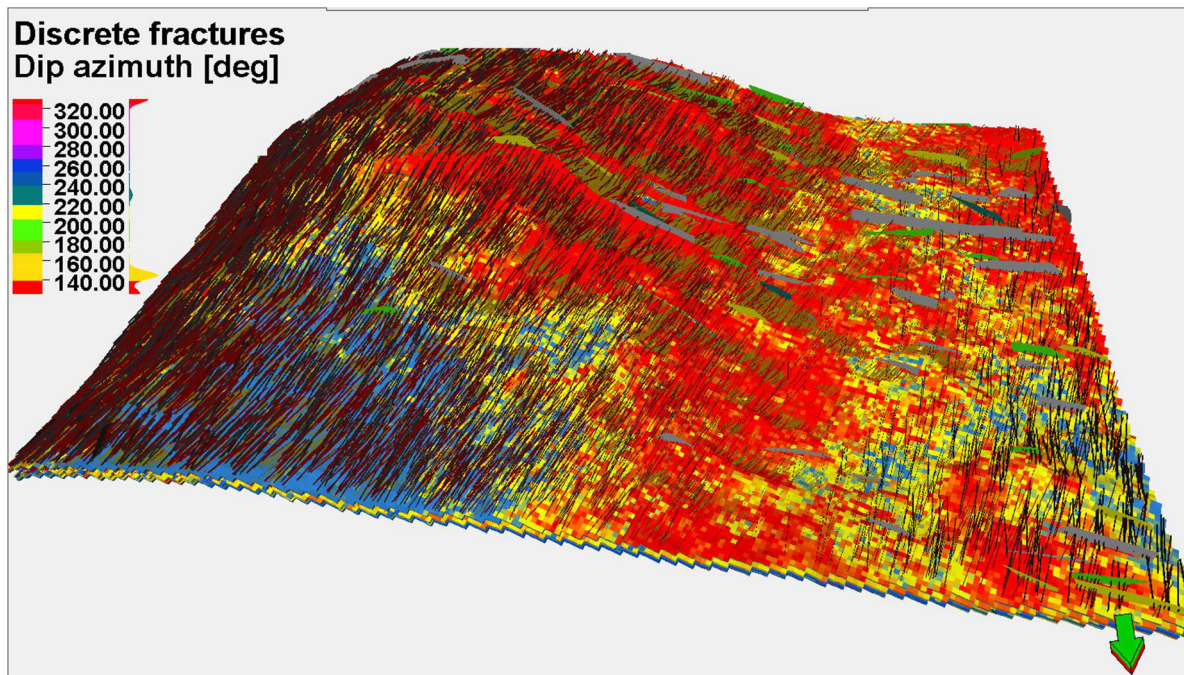
یک مدل شبکه شکستگی زمانی برای اهداف عملی در مدل های مخزن دینامیک مفید واقع می-شوند که بتوان آن ها را به ویژگی های سلول های شبکه بزرگ نمایی کرد. این گونه می توان از آن ها برای شبیه سازی مخزن استفاده کرد. برای محاسبه شبیه سازی جریان تخلخل - تراوایی دوگانه نیاز به یک سری خواص شکستگی مناسب برای هر سلول شبکه است. از این رو نیاز به یک مرحله بزرگ نمایی برای تبدیل داده های مدل شکستگی به خواص سلول ها برای شبیه سازی جریان است.

تراوایی سیستم شکستگی یک تابعی از پارامترهای شکستگی (طول، دهانه، شدت) است و حساسیت زیادی نسبت به مقیاس دارد. با توجه به اندازه سلول شبکه شبیه سازی یک شکستگی با طول شکستگی (L)، ممکن است به اتصال درون سلول کمک کند که این به طول شکستگی بستگی دارد.

خواص سلولی مورد نیاز برای یک مدل شبیه سازی جریان دو قطبی (تخلخل دوگانه - تراوایی دو

گانه)، شامل تخلخل شکستگی  $\phi_f$ ، تراوایی شکستگی  $K_f$  و فاکتور سیگما  $\sigma$  است [Gilman, 2003].

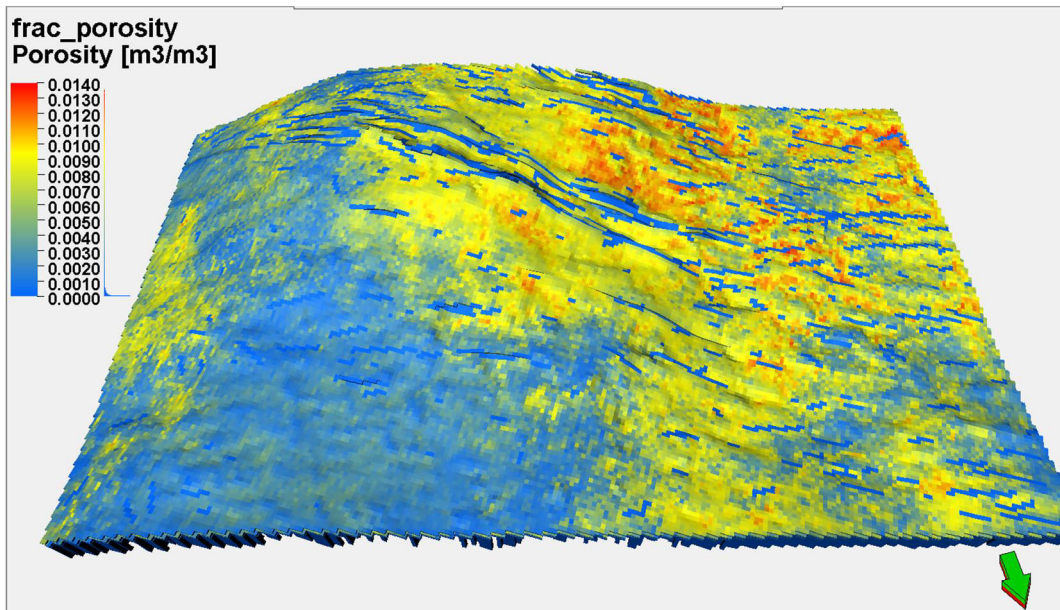
از آنجایی که روش مبتنی بر جریان فقط برای شبکه گسسته شکستگی استفاده می‌شود و دارای سرعت بسیار آهسته‌ای است، در این مطالعه برای بزرگ‌مقیاس کردن خواص در سلول‌های شبکه از روش Oda استفاده می‌شود. با توجه به شکل (۴-۵۴)، در این مرحله مدل شبکه شکستگی ساخته شده که شامل مدل DFN و IFM است به‌عنوان ورودی مدل هیبریدی انتخاب می‌شود.



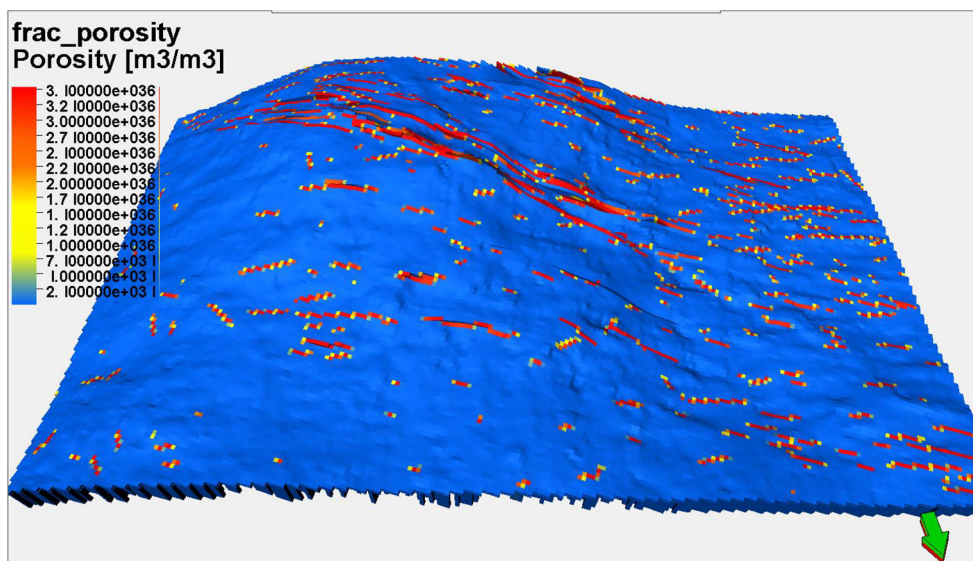
شکل ۴-۵۴: ورودی‌های لازم جهت ساخت مدل هیبریدی، ادغام دو مدل DFN و IFM توسط مدل‌سازی هیبریدی.

خروجی پردازش بزرگ‌مقیاس کردن شامل تخلخل، نفوذپذیری و محاسبات سیگما به‌صورت مستقل است. مقدار تراوایی نیز اگر یک یا چندین شکستگی در سلول وجود داشته باشد به همان روش محاسبه می‌شود. تخلخل در این مدل به دو صورت تخلخل ماتریکس و تخلخل شکستگی محاسبه می‌شود. با توجه به شکل (۴-۵۵)، میزان تخلخل ماتریکس حاصل از مدل هیبریدی در زون ۲ به نمایش گذاشته شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که میزان تخلخل ماتریکس در ناحیه

گسلی و محدوده شمال شرقی به کمترین مقدار می‌رسد و در ناحیه کناری انحنای مخزن به سمت جنوب غربی میدان تخلخل ماتریکس رو به افزایش است. در شکل (۴-۵۶)، تخلخل شکستگی در زون ۲ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که میزان تخلخل شکستگی در ناحیه گسل خوردگی دارای بیشترین مقدار است که این خود بیان‌کننده دقت بالای مدل‌سازی هیبریدی انجام‌شده است.



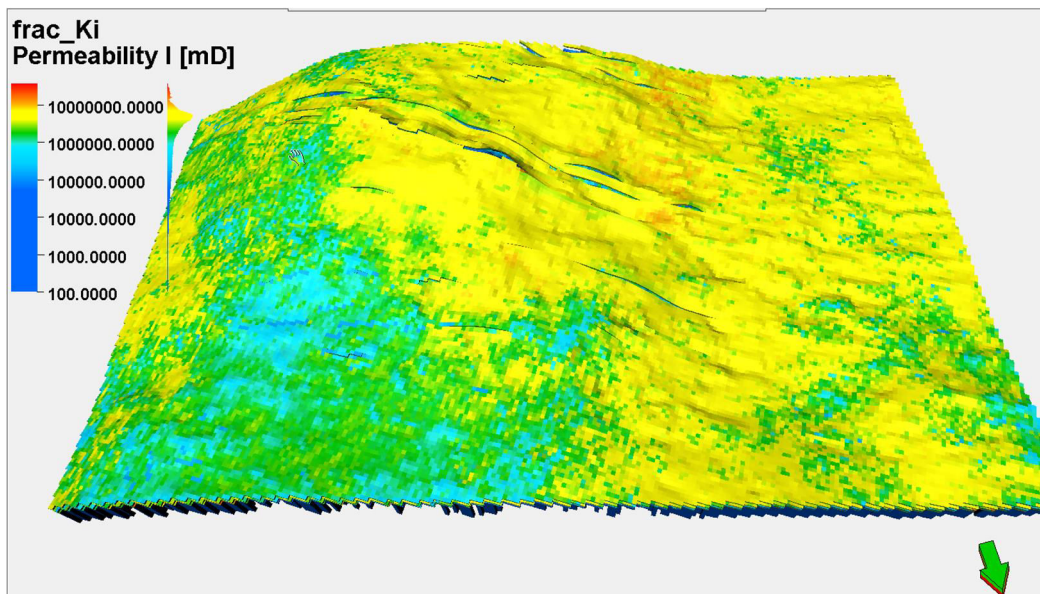
شکل ۴-۵۵: تخلخل ماتریکس حاصل از مدل‌سازی هیبریدی، کمترین مقدار تخلخل ماتریکس در قسمت گسل خوردگی مشاهده می‌شود.



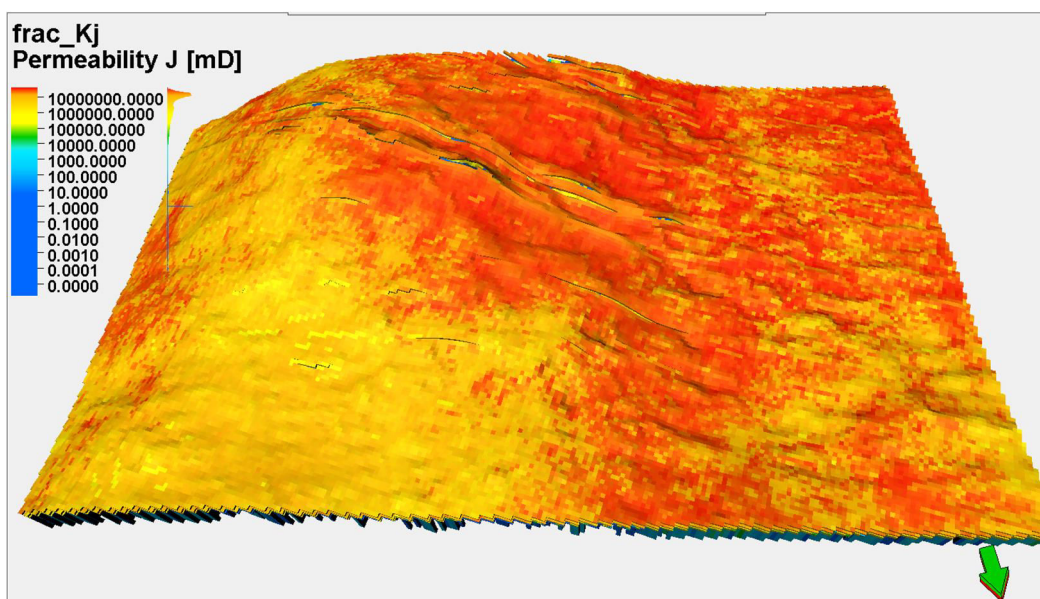
شکل ۴-۵۶: تخلخل شکستگی حاصل از مدل سازی هیبریدی، همان طور که مشاهده می شود بیشترین مقدار تخلخل شکستگی مربوط به ناحیه گسل خورده میدان است.

تراوایی یک شکستگی به صورت منفرد، تراوایی فضای شکستگی است و این نباید با تراوایی شکستگی در سلول که بزرگنمایی شده اشتباه گرفته شود. تراوایی مؤثر بر اساس تمام شکستگی ها در آن سلول است. به طور مثال تراوایی یک شکستگی می تواند چندین هزار داری باشد؛ اما اگر تنها دو یا سه شکستگی در سلول وجود داشته باشد، تراوایی آن سلول به چند میلی داری می رسد. تراوایی در طول هر یک از جهت های مختصات  $i, j, k$  سلول محاسبه می شود. در شکل های (۴-۵۷، ۴-۵۸، ۴-۵۹)، میزان تراوایی شکستگی حاصل از مدل هیبریدی در زون شماره ۲ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، میزان تراوایی شکستگی به ترتیب در  $K_i$  و  $K_j$  و  $K_k$  افزایش پیدا می کند. بیشترین تراوایی در انحنای مخزن و در جهت غربی دیده می شود.

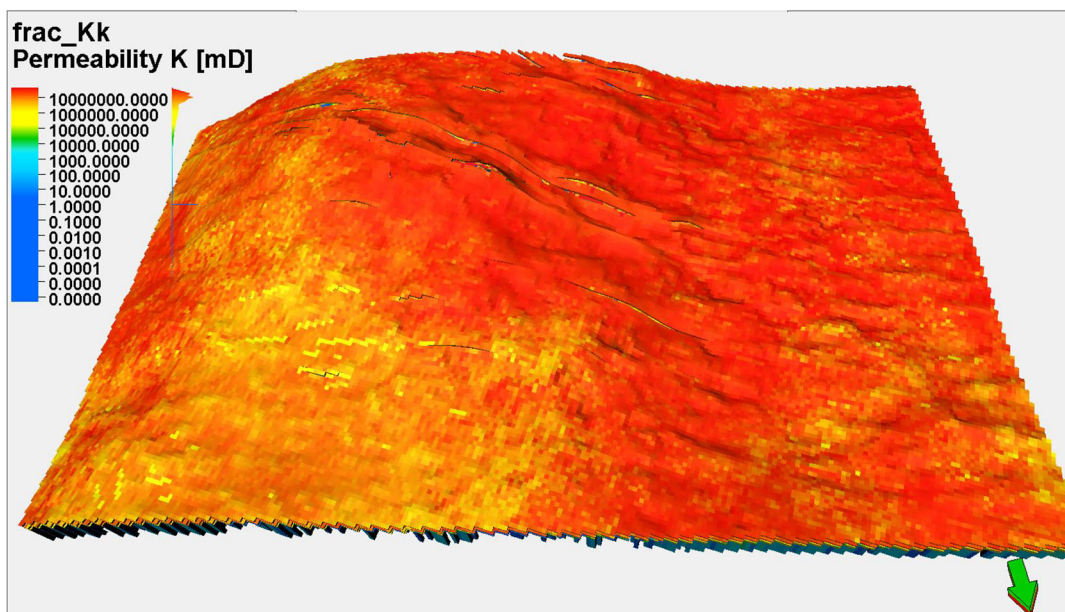




شکل ۴-۵۷: میزان تراوایی شکستگی در جهت  $i$  سلول‌ها در شبکه مدل‌سازی هیبریدی



شکل ۴-۵۸: میزان تراوایی شکستگی در جهت  $j$  سلول‌ها در شبکه مدل‌سازی هیبریدی



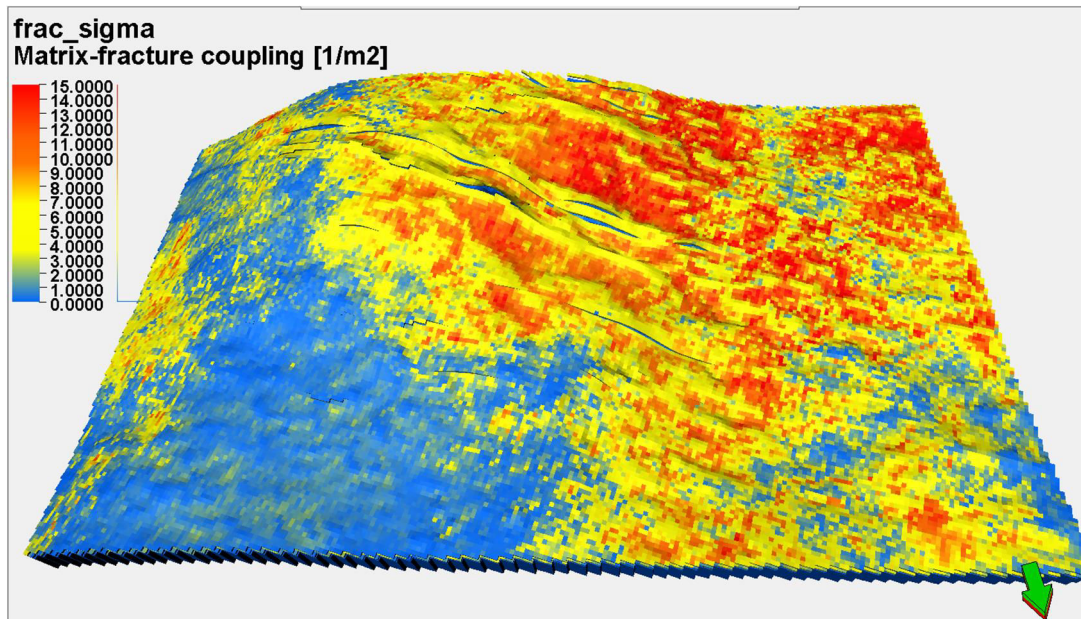
شکل ۴-۵۹: میزان تراوایی شکستگی در جهت k سلول‌ها در شبکه مدل‌سازی هیبریدی

فاکتور سیگما (فاکتور شکل)، این پارامتر برای اتصال بین ماتریکس و شبکه شکستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. فاکتور سیگما تابعی از فاصله شکستگی و یا شدت شکستگی است. این فاکتور چگونگی اتصال جریان بین ماتریکس و شکستگی‌های یک مدل تخلخل - تراوایی دوگانه را در یک محیط متخلخل توضیح می‌دهد [Van Hell and boerringter, 2006].

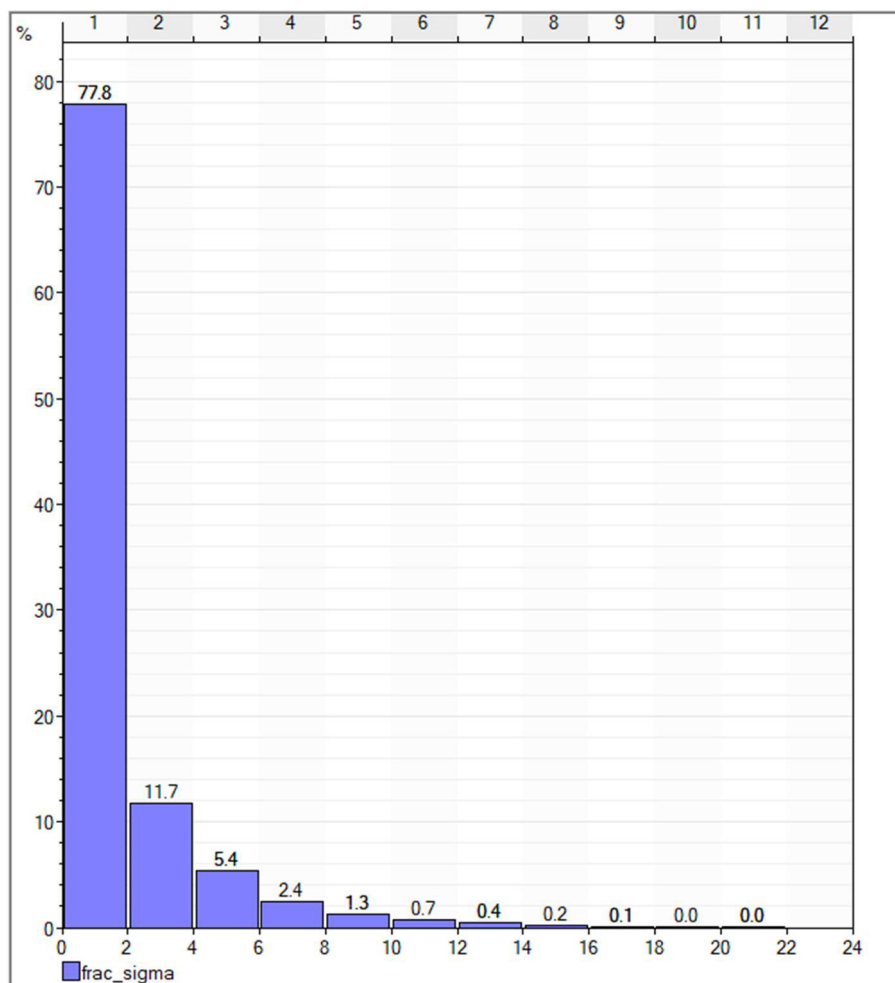
سیگمای برابر با صفر اساساً به معنای عدم ارتباط بین ماتریکس و شکستگی است. اگر سلول‌ها خیلی نازک باشند و یا فاصله شکستگی کم باشد فاکتور سیگما مقادیر بالایی را نشان می‌دهد. فاکتور سیگما در مواردی که سلول‌ها بزرگ‌تر از فاصله شکستگی هستند بهترین جواب را می‌دهد، زیرا محاسبات به صورت سلول به سلول انجام می‌شوند. در شکل (۴-۶۰)، فاکتور سیگمای حاصل از مدل‌سازی هیبریدی را نشان می‌دهد. در این شکل ارتباط بین ماتریکس و شکستگی‌های موجود، مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده می‌شود که این ارتباط در انحنای مخزن و به سمت غرب میدان دارای بیشترین میزان است. در قسمت شمال شرقی میدان فاکتور سیگما به کمترین حد خود می‌رسد و این نشان‌دهنده عدم ارتباط بین ماتریکس و شکستگی‌ها در این قسمت میدان است. شکل (۴-۶۱)،



نمودار هیستوگرامی فاکتور سیگما را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار فاکتور سیگما بین صفر تا دو بیشترین فراوانی را از خود نشان می‌دهد. که این موضوع نشان‌دهنده ارتباط کم بین ماتریکس و شکستگی در بیشتر نقاط مخزن است، ولی در نواحی مرکزی به سمت غرب ارتباط خیلی خوبی بین ماتریکس و شکستگی برقرار است.



شکل ۴-۶: فاکتور سیگمای حاصل از مدل‌سازی هیبریدی، این فاکتور نشان‌دهنده میزان ارتباط ماتریکس و شکستگی در مخزن است. این پارامتر در بخش انحنای مخزن به سمت غرب دارای بیشترین مقدار و در سمت شمال شرقی دارای کمترین مقدار است.



شکل ۴-۶: نمودار هیستوگرام فراوانی فاکتور سیگما در میدان مورد مطالعه

## فصل پنجم

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۵-۱- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از این مطالعه به شرح زیر است:

- با مطالعه و بررسی دقیق چاه نمودارهای تصویری در چاه 2s-50 تعداد ۱۳۱ شکستگی باز و در چاه 2s-kd1 تعداد ۲۶ شکستگی باز تفسیر شد. صحت تشخیص شکستگی‌های گرفته شده روی نمودار FMI، با کمک نمودارهای پتروفیزیکی (نوترون، صوتی و چگالی) مورد تأیید قرار گرفت.
- ارزیابی نشانگرهای لرزه‌ای در این تحقیق نشان داد که نشانگرهای انحناء، آشفستگی و واریانس در تشخیص گسل‌های بزرگ مقیاس کارآمد هستند. از طرفی تغییر در پارامترهای مختلف الگوریتم ردیابی مورچه و انتخاب بهترین مقدار، باعث برجسته شدن گسل‌های مخزن شد، با کمک الگوریتم ردیابی مورچه علاوه بر گسل‌های بزرگ مقیاس، گسل‌های کوچک مقیاس نیز به وضوح قابل مشاهده هستند.
- با توجه به مدل قطعی ساخته شده، گسل‌های موجود در میدان مورد مطالعه دارای روند شمال غربی-جنوب شرقی هستند؛ که این روند در جهت عمود بر تنش افقی بیشیه قرار دارد.
- در این مطالعه با توجه به تغییرات شیب نمودار تجمعی و میزان شدت شکستگی در عمق‌های مختلف، محدوده مطالعاتی به چهار زون تقسیم بندی شد. که زون ۲ دارای بیشترین شدت شکستگی است.
- با استفاده از شبکه عصبی انواع شدت شکستگی‌های به دست آمده از داده‌های ثانویه به عنوان ورودی باهم ادغام شد و به یک شدت شکستگی مطلوب به عنوان خروجی دست یافتیم. ضریب همبستگی بین خروجی شبکه عصبی و محرک‌های شکستگی ۰/۹۳ به دست آمد که این بیان کننده یک رابطه خیلی خوب بین محرک‌های شکستگی و شدت

شکستگی حاصل از شبکه عصبی است.

- برای سنجش میزان صحت مدل‌سازی شکستگی، از اطلاعات چاه 2S-57 که دارای نمودار تصویری است، استفاده شد. که ضریب همبستگی بین شدت شکستگی حاصل از مدل‌سازی شکستگی با شدت شکستگی حاصل از نمودار تصویری ۰/۸۳ به دست آمد.
- تخلخل و تراوایی شکستگی و فاکتور سیگما به‌عنوان خروجی‌های حاصل از مدل هیبریدی در میدان بررسی شدند. تخلخل شکستگی در ناحیه گسل خوردگی دارای بیشترین مقدار است و بیشترین تراوایی در انحنای مخزن و در جهت غربی دیده می‌شود. همچنین فاکتور سیگما در انحنای مخزن و به سمت غرب میدان دارای بیشترین میزان است. در قسمت شمال شرقی میدان، فاکتور سیگما به کمترین حد خود می‌رسد و این نشان‌دهنده عدم ارتباط بین ماتریکس و شکستگی‌ها در این قسمت میدان است.

## ۵-۲- پیشنهادها

- پیشنهاد می‌گردد جهت بهبود بیشتر مدل شدت شکستگی، روش به‌کار گرفته شده در این مطالعه با سایر روش‌هایی که باعث بهبود مدل شدت شکستگی می‌شوند، تلفیق گردد.
- با استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی به‌عنوان ورودی ثانویه، روندهای شکستگی در میدان مجدد بررسی شود.
- با توجه به این‌که در این مطالعه برای مدل‌سازی شکستگی‌ها فقط از نمودارهای تصویری دو چاه استفاده شده است، جهت بهبود بیشتر مدل از نمودارهای تصویری چاه‌های بیشتری استفاده شود.

## منابع فارسی

تدینی م، (۱۳۹۲) "مدل‌سازی انواع شکستگی‌ها در سازند ایلام با استفاده از نگارهای تصویری و داده‌های آزمایش چاه در یکی از مخازن هیدروکربنی جنوب ایران" **ماهنامه علمی-ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز**، شماره ۱۱۰، اسفندماه.

رضایی م ر، (۱۳۹۲) "زمین‌شناسی نفت" چاپ هفتم، انتشارات علوی، تهران.

عقلی ق، سلیمانی ب، چرچی ع. و زحمتکش ا، (۱۳۹۵)، "تعیین روشی نوین برای شناسایی زون‌های

شکسته بر روی نمودارهای پتروفیزیکی و تطابق آن با نمودارهای تصویرگر"، **مجله پژوهش نفت**، شماره ۸۶، دوره ۱.

قاسم العسکری م. ک، (۱۳۹۰) "چاه‌نگاری پیشرفته" چاپ اول، انتشارات ستایش، تهران.

مسیحی م، (۱۳۹۴) "اصول مهندسی مخازن شکافدار" چاپ اول، انتشارات ستایش، تهران.

ملایوسفی ا، باغبانان ع. و فتحیان پور ن، (۱۳۹۰)، "تعیین پارامترهای مدل‌سازی عددی شبکه درزه‌های مجزا با استفاده از داده‌های لاگ تصویری FMI"، **نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن**، شماره ۱۱، دوره ۶، ص ۷۱-۷۷.

وارسته ع، سیاه کوهی ح، خامه‌چی ا. و نوروزی س، (۱۳۹۱)، "کاربرد نشانگرهای لرزه‌ای

همدوسی در توصیف گسل‌ها و شکستگی‌های مخزن"، **مجله پژوهش نفت**، ۶۹، ۶۴-۷۲.

Aadnoy B. and Looyeh R., (2011), "Petroleum Rock Mechanics, Drilling operations and Well Design", GULF Publishing Company, Houston, Texas, United States.

Aarre V., Astratti D., Al Dayyani T. N. A., Mahmoud S. L., Clark A. B. S., Stellas M. J. and Stringer J. W., (2012), "Seismic Detection of Subtle Faults and Fractures", Oilfield Review Summer 24, no. 2, Abu Dhabi, UAE.

Abul Khair H., Cooke D., Backé G., King R., Hand M., Tingay M. and Holford S., (2012), "Subsurface mapping of natural fracture networks; A major challenge to be solved. Case study from the shale intervals in the copper basin, south Australia", **SGP**, TR 194.

Abul Khair H., Cooke D., King R., Hand M. and Tingay M., (2011), "Preliminary workflow for subsurface fracture mapping using 3D seismic surveys: A case study from the Cooper Basin, South Australia" Conference Paper in Transactions - Geothermal Resources Council.

Adler P. M. and Thovert J. F., (1999), "Fractures and fracture Networks", **Kluwer Academic Publishers**, London, pp163-218.

Agada S., Chen F., Geigerl S., Toigulova G., Agar S., Shekhar R. and Benson G., (2014), "numerical simulation of fluid-flow processes in a 3d high-resolution carbonate reservoir analogue." **Petroleum Geoscience**, Vol. 20, pp. 125–142.

Alizadeh M., Movahed Z., Junin R., Mohsin R. and Alizadeh M., (2015), "Finding the Drilling Induced Fractures and Borehole Breakouts Directions Using Image Logs. Applied Mechanics." **Journal of Advanced Research**, in Vol. 10, No. 1, Pages 9-30.

Amour F., Mutti M. and Christ N., (2012), "Capturing and modelling metrescale spatial facies heterogeneity in a Jurassic ramp setting (Central High Atlas, Morocco)." **Sedimentology**, 59, 1158–1189

Avseth P., Mukerji T. and Mavko G., (2010), "Quantitative Seismic Interpretation: Applying Rock Physics Tools to Reduce Interpretation Risk", Cambridge University Press, ISBN 0-521-15135-X.

Azevedo Guerra Raposo Pereira, L., (2009), “Seismic Attributes in Hydrocarbon Reservoirs Characterization”, University Aveiro, pp 165.

Bear J., Tsang c. f. and de Marsily G., (1993), “**Flow and contaminant transport in fracture rock**” Academic Press, Inc, San Diego.

Bartton T., Viet Canh D., Van Que N., Duc N. V., Gillespie P., Hunt D., Li B., Marcinew R., Ray S., Montaron B., Nelson R., Schoderbek D. and Sonneland L., (2006), “ The Nature of Naturally Fractured reservoirs”, Oil field Review, **schlumbergers flagship technology journal**, vol. 18, pp. 4-23.

Backé G., Abul Khair H., King R. and Holford S., (2011), “Fracture mapping and modelling in shale-gas target in the Cooper basin, South Australia”, **APPEA**.

Baytok S. and Pranter M. J., (2013), “Fault and fracture distribution within a tight-gas sandstone reservoir: Mesaverde Group, Mamm creek Field”, Piceance Basin, Colorado, USA, **Petroleum Geoscience**, 19, 203-222.

Brown A., (2001), “Understanding Seismic Attributes”, **Geophysics**, 66, 47-49.

Burchette T., (2012), “Carbonate rocks and petroleum reservoirs: A geological perspective from industry, Advances in Carbonate Exploration and Reservoir Analysis.” Geological Society, London, Special Publications, 370, 17–37.

Chopra S. and Marfurt K. J., (2005), “Seismic attributes A historical perspective”, **Geophysics**, 70 (5), 3-28.

Chopra S. and Marfurt K. J., (2007), “Volumetric curvature attributes add value to 3D seismic data interpretation”, Proceedings, **SEG** Annual meeting 2007, San Antonio 26, 856-867.

Darling T., (2005), “**Well Logging and Formation Evaluation**”, Elsevier Science.

Dershowitz B., Lapoint P., Eiben T. and Wei L., (2000), “Integration of Discrete Fracture Network Methods with Conventional Simulator Approaches”, **SPE**.

Fang J., Zhou F. and Tang Z., (2017), “Discrete Fracture Network Modelling in a Naturally Fractured Carbonate Reservoir in the Jingbei Oilfield, China”, **Journal Energies**, 10, 183.



Gilman J. R., (2003), "Practical Aspects of simulation of fractured reservoirs, Presented at International forum on Reservoir simulation", Germany.

Glowka D. A., Schafer, Leoppke 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.

Gong B., (2007), PHD. Thesis, "Effects model of fractured systems", Energy resources engineering. Depart. Stanford University.

Hale D., (2013), "Methods to compute fault images, extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images", **Geophysics**, 78, 33-43.

Hunt L., Reynolds S., Broen T. and Hadley S., (2010), "Quantitative estimate of fracture density variations in the Nordegg with azimuthal AVO and curvature: A case study", *The Leading Edge*, 1122-1137.

Ishibashi T. and Watanabe N., (2012), "Impact of 3D channeling flow on well productivity in the Yufutsu oil/gas field", the 18th formation evaluation symposium of japan.

Jambayev A. S., PHD Thesis in petroleum engineering, "Discrete fracture network modeling for a Carbonate Reservoir", Colorado School of Mines, pp102.

Jansen K., (2005), "Seismic investigation of wrench faulting and fracturing at Rulison field Master's" Thesis, Colorado School of Mines, Golden, CO, USA.

Kazemi H. and Gilman J. R., (1993), "Multiphase Flow in fractured Petroleum Reservoirs". **Academic Press**, New York, USA.

Khoshbakht F., Azizzadeh M., Memarian H., Nourozi G. H. and Moallemi S. A., (2012), "Comparison of electrical image log with core in a fractured carbonate reservoirs" **Journal of petroleum Science and engineering**, Vol 86-87, pp. 289-296.

Lefranc M., Farag S., Souche L. and Dubois A., (2012), "Fractured Basement Reservoir Characterization for Fracture Distribution, Porosity and Permeability Prediction" AAPG International Conference and Exhibition, Singapore, pp.16-19.

Mahdavi Basir H., Javaherian A. and Tavakoli M., (2013), "Multi-attribute ant-

tracking and neural network for fault detection: a case study of an Iranian oilfield”, **Journal of Geophysics and Engineering**. 10, 10pp.

Marfurt K., (2007), “Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization”, vol.1 EAGE, pp45-71

Negri A. P., Tamunobereton-ari I. and Amakiri A. R. C., (2015), “Ant-Tracker Attributes: An Effective Approach To Enhancing Fault identification And Interpretation”, **IOSR Journal**, 5, 67-73.

Nelson R. A., (2001), “**Geologic analysis of naturally fractured reservoirs**” Second edition, Gulf Professional Publishing, Boston, USA.

Odoh B. I., Ilechukwa J. N. and Okoli N. I., (2014), “The Use of Seismic Attributes to Enhance Fault Interpretation of OT Field, Niger Delta”, **International Journal of Geosciences**, 5, 826-834.

Reiss H. L., (1980), “**The Reservoir Engineering Aspects of fractured Formations**”, Technip, Paris.

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.

Roberts A., (2001), “Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons”, **EAGE First Break**, 19, 85-100.

Sahimi M., (1995), “Flow and transport in porous media and fractured rock”, **VCH publication**. pp 103-157.

Saidi A. M., (1996), “twenty Years of gas Injection History into well Fracture Haftkel Field (Iran)”. Paper SPE presented at the International Petroleum Conference & Exhibition of Mexico held in Villahermosa.

Sampson A., (2012), PhD. Thesis, “A Seismic Attribute Study To Assess well Productivity In The Ninilchik Field, Cook Inlet basin, Alaska”, Louisiana State University, The Department of Geology and Geophysics.

Singhal B. B. S. and Gupta R. P., (2010), “**Applied Hydrogeology of Fractured Rocks**” Second Edition, Springer Nature Switzerland.

Soleimani B., Amiri Kh., Samani B. and Shaban L., (2016), "Lithology effects on the fractures parameters using image log and petrophysical data", **Russian Journal of Earth Sciences**, Vol. 16 ES5005.

Souche L., Astratti D., Aarre V., Clerc N., Clark A., Al Dayyani T. N. A. and Mahmoud S. L., (2012), "A dual representation of multiscale fracture network modelling: application to a giant UAE carbonate field", **EAGE**, First Break, 30.

Talbot C. and Jackson M., (1990), "Salt Diapirs of the Great Kavir, Central Iran, Geological Society of America", pp. 177.

Tamagava T., Matsuura T., (2002), "Construction of fracture network model using static and dynamic data", **SPE** 77741.

Tiab D. and Donaldson E. C., (2004), "**Petrophysics**", Second edition, Gulf professional publishing, United States of America, 488-551.

Tran N. H., (2004), PHD Thesis in petroleum engineering, "Characterization and Modeling Fracture Reservoir", School of Petroleum Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia.

Twiss R. J. and Moore E.M., (2007), "Structural geology, W.H. freeman and company, New York", 532pp.

Yao X., Chen W. and Hu G., (2014), "A fault surface extraction and reconstruction method based on 3D seismic image", **SEG** Denver Annual Meeting, page 1545.

Yenugu M. and Marfurt K. J., (2011), "Relation between seismic curvatures and fractures identified from image logs - application to the Mississippian reservoirs of Oklahoma, USA" **SEG**.

Yenugu M., Ray A. K. and Biswal S., (2010), "Application of curvature attributes in reducing the drilling - A case history, Proceedings", **SEG** Annual Meeting.

Van Dijk J. P., (1998), "Analysis and modelling of fractured reservoirs", **SPE**, paper 50570, Europe; European petroleum Conference, Vol. 1, 31-34.

Van Golf T. D., (1982), "**Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering**", Vol. 12, Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam, the Netherland.

Van Heel A. P. G. and Boerrigter P. M., (2006) “Shape Factor in Fractured Reservoir Simulation”, **SPE**.

Vermily J. M. and Scholz C. H., (1995), “Relationship between vein length and aperture”, **Jurnal of Structural Geology**, 17, 3. 423-434.

Vincent H. and Caumon G., (2009), “Stochastic Propagation of Discrete Fracture Network”, **International Petroleum Technology Conference**, pp. 14-53.

Wikel K., (2011), “Geomechanics: Bridging the Gap from Geophysics to Engineering in Unconventional Reservoirs”, **CSEG Recorder**, vol. 36, No. 05.

## Abstract

Fracture modeling is essential as a part of the simulation and description in the broken natural reservoirs for multiple applications of the reservoirs. A fracture network model should include all the elements and properties of fractures that play an important role in a field. Due to the effects of field faults on fractures and their properties, it is a challenging topic to establish a meaningful relationship between all these properties. There are different kinds of methods for determining the characteristics of the natural fractured reservoirs and fluid flow simulation, which are divided into three groups of continuous models, discrete models, and hybrid models.

Producing hybrid modeling is done by statistical information derived from measured data in a field. In this study, hybrid modeling was performed using Image logs and other petrophysic logs of three wells and data related to the seismic cube of the studied field. The fracture zones with different fracture intensities were identified by the Image log's data. The distribution of the fracture intensity in the field is associated with uncertainties. For this purpose, secondary data which are fracture drivers can be used. In this study, seismic attributes were used as secondary data to improve the fracture intensity distribution using the GRFS algorithm in petrophysical modeling. By using neural network, different types of improved fractures were integrated as inputs and a good fracture intensity was obtained as output. Correlation coefficient between neural network output and fracture drivers was 0.93, which indicates a very good relation between fracture drivers and fracture intensity from neural network. Seismic attributes were used to determine, interpret and model the field faults. Based on validation, fault interpretation and modeling are highly accurate. Then by Fracture and fault classification into 4 fracture zones, the discrete fracture model was created. In the next step, the implicit fracture model was created by specifying the threshold of 250 ft for the length of the fractures. In the end, the hybrid model was obtained by upscaling the fracture network models (DFN and IFM) using a statistical method (oda). The outputs of the hybrid model are the fracture porosity  $\phi_f$ , the fracture permeability  $K_f$ , and the sigma factor  $\sigma$ , which can be used to simulate the reservoirs. The fracture porosity is highest in the fault zone and the highest permeability is observed in the curve of the reservoir and in the western direction. Also, the Sigma factor is the highest in the curve of the reservoir and to the west of the field. In the northeastern field, the sigma factor

reaches its lowest level, indicating that there is no relation between the matrix and fractures in this part of the field.

Keywords: Hybrid modelling, Implicit Fracture Model, Discrete Fracture Network, Seismic attributes, FMI



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics**

**Engineering**

**MSc Thesis in Petroleum Engineering Exploration**

Hybrid modeling of faults and fractures using seismic attributes  
and FMI log in one of the oil fields of the Persian Gulf

By: **Iman Samadi**

Supervisors:

**Dr. Mehrdad Soleimani Monfared**

**Dr. Masoumeh Kordi**

Advisors:

**Amir Ahmadi**

**September 2018**