

(پژوهشی)

تخمین موقعیت گسل‌ها بر اساس پراکندگی درزه‌ها با استفاده از ضریب ثابت فیشر (K)

فهیمة دبیری^۱، علیرضا یاراحمدی بافقی^{۱*}

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: آبان ۱۴۰۰، پذیرش: اسفند ۱۴۰۰)

چکیده

در مدل‌سازی هندسی ناپیوستگی‌های توده سنگ، سعی بر این است که ساختارهای اصلی زمین‌شناسی همچون گسل‌ها، شناخته شده تا به تبع آن بتوان مناطق همگن آماری با ویژگی‌های تقریباً یکسان درزه‌داری را مشخص کرد. گسل‌ها و بعضی دیگر از ساختارهای اصلی زمین‌شناسی غالباً به صورت مرزهای طبیعی یک بلوک تکتونیکی عمل می‌کنند و بسته به مقیاس می‌توانند مناطقی با ویژگی‌های درزه‌داری مختلف را در کنار یکدیگر قرار دهند؛ بنابراین سیستم درزه‌ها به عنوان مجموعه‌های محدود به ساختارهای بزرگ تکتونیکی (گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها و ...)، بهترین شاخص تفکیک مناطق همگن است. پارامترهای هندسی متعددی از قبیل شیب، جهت شیب، فاصله‌داری و گسترش درزه‌ها برای تشخیص گسل‌ها مؤثرند. ضریب ثابت تابع توزیع فیشر (K) به عنوان ضریبی که شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها را نمایندگی می‌کند، نشان دهنده چگونگی توزیع و میزان پراکندگی درزه‌ها است و به عنوان پارامتر شاخص در خصوص رفتارشناسی هندسی ناپیوستگی‌ها محسوب می‌شود. بر اساس شواهد، جهت‌داری سیستم درزه‌ها در نزدیکی ساختارهای تکتونیکی به هم‌ریخته و با فاصله گرفتن از آنها منظم می‌شود. این موضوع به عنوان فرضیه این تحقیق در نظر گرفته شد و ضریب فیشر به عنوان اصلی‌ترین عامل تشخیص و تفکیک سیستم درزه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. به منظور صحت سنجی فرضیه مطرح شده، با استفاده از داده‌های هندسی ناپیوستگی‌ها، برداشت شده از چهار معدن سه چاهون، چغارت، فسفات اسفوردی و میدوک، توزیع ضریب K در این معدن‌ها به دست آمد و خطوط هم ضریب فیشر رسم شدند. بدین ترتیب مناطق با تمرکز بالای ضریب K در هر معدن به عنوان مرکز سیستم درزه‌ها تعیین شد. با مقایسه بلوک‌های تکتونیکی محصور شده بین گسل‌های هر معدن و انطباق نسبی آن با مناطق تفکیک شده به روش پیشنهادی، کارایی این روش جهت تشخیص سیستم درزه‌ها و تخمین موقعیت ساختارهای بزرگ تکتونیکی به خوبی امکان پذیر شد.

کلمات کلیدی

گسل، سیستم درزه، ساختارهای تکتونیکی، ضریب ثابت فیشر (K)، معدن‌های بافقی

*عهده‌دار مکاتبات: ayarahmadi@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

در مکانیک جامدات محیط ایده آل محیطی پیوسته، همگن و همسانگرد است؛ اما شواهد نشان می‌دهد که در محیط‌های سنگی این شرایط وجود نداشته و ناپیوستگی‌ها مهم‌ترین عامل در بی‌نظمی و عدم امکان دسترسی به شرایط ایده آل می‌باشند [۱]. ناپیوستگی‌ها عبارت‌اند از یک سطح جدایش در سنگ دست‌نخورده که در دو بعد توسعه بیشتری یافته و در مقایسه با ماده سنگ دارای مقاومت برشی و کششی کمتری می‌باشند [۲].

تکتونیک از عوامل اصلی ایجاد، توزیع و دسته‌بندی ناپیوستگی‌ها است [۳]. در نتیجه شناخت آن ضروری است؛ اما بعضی از مواقع در مناطق مورد مطالعه ژئومکانیکی، درزه نگاری مقدم بر مطالعات تکتونیکی انجام می‌شود. دلیل آن نیز عدم وجود رخنمون‌های لازم جهت شناسایی زمین‌ساخت منطقه و یا وجود ابهام‌هایی در جانمایی آنها است. به همین دلیل، مسئله موردنظر یافتن راه‌کاری جهت تخمین موقعیت ساختارهای بزرگ‌مقیاس به‌خصوص گسل‌ها و در درجه دوم ایجاد امکان تفکیک و یا تعیین مناطق هموزن آماری است. از این منظر، در تحقیقات پیشین، چند نکته جهت تشخیص چنین ساختارهایی مطرح شده است:

چگالی درزه‌داری معمولاً در مناطق نزدیک گسل افزایش می‌یابد [۴]. پراکندگی ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها همچون مقدار شیب و جهت شیب در برداشت‌های صورت گرفته، در نزدیکی گسل‌ها معمولاً شدید است [۵]. دگرسانی و هوازدگی در مناطق اطراف گسل بالا است [۶]. به‌منظور در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای مذکور، در این پژوهش از افزایش پراکندگی ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها (شیب و جهت شیب) و ارتباط آن با موقعیت ساختارهای بزرگ تکتونیکی به‌عنوان فرضیه استفاده شده است.

ضریب ثابت فیشر (K)، نشان‌دهنده پراکندگی تابع توزیع دومتغیره فیشر است. با افزایش ضریب K در تابع توزیع فیشر چولگی و واریانس تابع توزیع کم شده و به تابع توزیع نرمال نزدیک می‌شود. به‌طوری‌که هر چه مقدار K بیشتر باشد پراکندگی داده‌ها کمتر و هر چه مقدار K کمتر باشد پراکندگی داده‌ها بیشتر است [۷].

به‌طور منطقی در مناطق تکتونیزه و زون‌های گسلی (محل عبور گسل‌ها)، پراکندگی شیب و جهت شیب درزه‌ها بیشتر است. در نتیجه، ضریب ثابت فیشر (K)، در محل عبور گسل‌ها کم و در مناطق بین گسلی این مقدار افزایش می‌یابد [۷]. بر اساس این ویژگی می‌توان مناطقی که دارای تحرکات تکتونیکی بیشتری بودند را از مناطق آرام ساختاری جدا کرد. در نتیجه، ضریب ثابت فیشر به‌عنوان پارامتر تعیین‌کننده نظم ناپیوستگی‌ها معرفی می‌شود.

در این پژوهش، بر اساس درزه نگاری‌های صورت گرفته در مناطق مختلف و با توجه به این نظریه که نظم سیستم درزه‌ها در نزدیکی گسل‌ها به هم می‌ریزد و جهت‌داری دسته‌درزه‌ها توازی خود را از دست می‌دهند، روش جدید استفاده از ضریب ثابت فیشر جهت تعیین موقعیت تقریبی گسل‌ها و بلوک‌های همگن تکتونیکی پیشنهاد شد.

با برداشت داده‌های اولیه شامل شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها و ترسیم خطوط هم ارزش بر اساس پارامترهای ضریب تمرکز ناپیوستگی‌ها (R) و ضریب ثابت فیشر (K)، سیستم گسل‌های موجود در منطقه مورد مطالعه مشخص شد. با تغییرات ایجادشده در پارامترهای ذکرشده مناطق گسلش شده از مناطق دور از گسل تشخیص داده شد و در نهایت محل عبور گسل‌ها و موقعیت ساختارهای بزرگ تکتونیکی در مناطق مورد مطالعه تخمین زده شد.

۲- پیشنهاد تحقیق

آزمایش‌ها و مطالعات صحرائی انجام‌شده بر روی انواع مختلف توده سنگ و ناپیوستگی‌ها نشان می‌دهد که شکستگی‌ها اطلاعات نسبتاً مفیدی از گذشته زمین‌شناسی هر منطقه به ما ارائه داده و نشانگرهای خوبی برای جهت‌یابی تنش‌های اصلی و عوامل مؤثر در ایجاد گسل می‌باشند. محققین متعدد ارتباط بین ناپیوستگی‌ها و گسل‌ها را در پژوهش‌های خود به صورت‌های مختلف بیان کردند.

اولین تلاش برای شناخت گسل‌ها و ارتباط آن‌ها با ناپیوستگی‌ها به‌عنوان عامل تکتونیکی مؤثر، توسط نیکولاس استنو در سال ۱۶۶۹ در بحث مربوط به منشأ کوه‌ها صورت گرفت [۸]. نظریه پیشرفته گسلش در اوایل قرن بیستم توسط اندرسون مطرح شد. اندرسون پیشنهاد داد که گسل‌ها شکستگی‌هایی هستند که طبق معیار کلمب رخ می‌دهند [۹]. رابرتس (۱۹۶۶) در راستای همین

نظریه در تحقیق خود بر روی شش دسته‌درزه توانست همبستگی ساختاری بین آن‌ها برقرار کند. ایشان با مطالعه ۶۰۰۰ درزه و گسل، بیان کرد، رابطه نزدیکی بین جهت گسل‌های نرمال و امتداد لغز و درزه‌ها در منطقه وجود دارد. امتداد گسل‌ها، سیمای بزرگ‌مقیاس امتداد درزه‌ها است و جهت گسلش حداقل در بخشی توسط دسته‌درزه‌های پیشین تعیین می‌شود. علاوه بر درزه‌های موازی با گسل‌ها، خود گسل‌ها نیز درزه‌های مختص به خود ایجاد می‌کنند [۱۰]. براک و انگلدر (۱۹۷۷) با بررسی یک گسل روورانه تغییراتی که با نزدیک شدن به صفحه گسل مشاهده کردند شامل این موارد ذکر کردند: ۱) افزایش فراوانی ریزشکستگی‌ها و کاهش اندازه دانه؛ ۲) افزایش شدت درزه‌داری موازی و با زاویه کم با سطح گسل؛ ۳) افزایش درجه سخت شدگی که دلیل بالا بودن شاخص فراوانی شکستگی‌ها است. آنها همچنین بیان کردند، شکستگی‌های ماکرو رفتاری همانند ریز شکستگی‌ها داشته و با نزدیک شدن به گسل فراوانی آنها افزایش پیدا می‌کند. درزه‌ها ممکن است یک رابطه سینماتیک یا هندسی را با گسل‌ها نشان دهند به این معنا که در سیستم تنش یکسانی شکل گرفته‌اند. از طرف دیگر، درزه‌ها ممکن است جهت‌گیری‌های متفاوتی را داشته باشند و در سیستم‌های تنشی متفاوتی نسبت به گسل‌ها شکل گرفته باشند [۱۱]. پوهن (۱۹۸۱) شدت درزه‌ها را در نظر گرفته و پیشنهاد داد، نواحی که با افزایش فراوانی درزه‌داری همراه هستند نشانگر حضور گسل‌های با رخنمون ضعیف می‌باشند [۱۲]. بارلت، فریدمن و لوگان (۱۹۸۱) پدیده تشکیل ریزترک‌ها در نزدیکی گسل‌ها را بررسی کرده و بیان کردند، با نزدیک شدن به محل تماس لایه‌ها در گسل تراکم ریزترک‌ها افزایش می‌یابد. آنها نیز در بررسی ترک‌های بزرگ، رفتاری شبیه به ریزترک‌ها از آنها ثبت کردند که تراکم آنها مثل ریزترک‌ها با فاصله گرفتن از صفحات گسلی کاهش می‌یابد [۱۳]. هنکاک در سال ۱۹۸۵ عنوان کرد که گسل‌ها می‌توانند به صورت مرزهای طبیعی مناطقی با ویژگی‌های درزه‌داری مختلف را در کنار یکدیگر قرار دهند. در نتیجه، زمانی که درزه‌ها همراه یا بعد از گسلش اتفاق بیفتند، گسل‌ها می‌توانند به صورت محلی شرایط مکانیکی را تغییر داده و درزه‌داری را کنترل کنند [۱۴]. رانزلی (۱۹۹۲) نشان داد که شکل‌گیری درزه‌ها می‌تواند تحت تأثیر فشار حفره‌ای سیال، ویژگی‌های مکانیکی سنگ،

ضخامت لایه، تنش باقی‌مانده و مقادیر تنش-کرنش قرار بگیرند و اگر هرکدام از این فاکتورها در طول گسل تغییر کند الگوهای مختلفی از درزه‌ها شکل می‌گیرند [۱۵]. رچز و لاکتر (۱۹۹۴) آزمایش‌های دگرشکلی سنگ را انجام داده و دریافتند که گسل‌ها به صورت مناطقی با ریزترک‌های فراوان شکل گرفته و گسترش می‌یابند [۱۶]. اندرز و ویلچکو (۱۹۹۴) ریزشکستگی‌های داخل نمونه‌های گردآوری شده از نزدیکی یک گسل رانده و پنج گسل نرمال که حرکات آنها شناسایی شده بود را آنالیز کردند تا وابستگی تراکم ریزشکستگی‌ها و توزیع آنها روی لغزش گسل را بررسی کنند. همچنین تأثیر مسافت تا سطح گسل بر روی جهت‌گیری ریزشکستگی‌ها ثبت شد. ایشان به منظور کنترل پارامترهای مرتبط، گسل‌های کم‌عمق با لیتولوژی‌های مشابه را انتخاب کردند. نتایج اندازه‌گیری ۸۰۰۰ ریزشکستگی‌ها در نزدیکی سطح گسل اتفاق می‌افتد. ارتباط زاویه‌ای بین صفحه برش و ریزشکستگی‌ها عموماً بین 5° - 20° و تقریباً موازی یافت شده است و کمتر از زاویه مورد انتظار بین ماکزیمم تنش دور از میدان و سطح برش که 30° است، می‌باشد [۱۷]. پیکاک (۱۹۹۹) رابطه زمانی بین گسل‌ها و درزه‌ها را به سه دسته تقسیم کرده است: درزه‌هایی که قبل از گسل‌ها شکل گرفته‌اند، درزه‌هایی که هم‌زمان با گسل تشکیل شده‌اند و درزه‌هایی که بعد از تشکیل گسل شکل گرفته‌اند. درزه‌هایی که همراه با گسل‌ها شکل گرفته‌اند سیستم تنشی یکسانی را که موجب گسلش شده است را منعکس می‌کنند و تمایل به افزایش تناوب به سمت گسل دارند. در مقابل درزه‌های شکل گرفته در قبل یا بعد از گسل‌ها از این روند تبعیت نمی‌کنند. درزه‌هایی که بعد از گسل شکل می‌گیرند ممکن است بدون جابه‌جا شدن توسط گسل، آن گسل یا رگه‌های مرتبط با گسل را قطع کنند [۴]. در ادامه محققین دریافتند ویژگی‌های هندسی درزه‌ها نیز می‌تواند برای شناسایی روابط بین گسل و درزه‌ها استفاده شود، البته در شرایطی که توزیع درزه‌ها تحت تأثیر و همراه با گسل شکل گرفته باشند.

۲-۱- تابع توزیع فیشر

این توزیع در سال ۱۹۵۳ توسط فیشر پیشنهاد شد [۱۸]. این روش، رایج‌ترین و مناسب‌ترین روش برای مدل

با توجه به شکل عمومی تابع توزیع فیشر روش‌های تحلیلی و عددی متعددی برای تعیین مقدار k ضریب ثابت فیشر وجود دارد؛ اما ساده‌ترین و پرکاربردترین روش، روش مردیا است. روش کار به این صورت است که بر اساس عملیات برداشت انجام‌شده در منطقه و با در نظر گرفتن جهت‌داری درزه‌ها، مؤلفه‌های بردار نرمال N درزه برداشت‌شده مربوط به یک دسته‌درزه را با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آوریم [۱۹].

$$\begin{aligned} x &= \sin(dip) \sin(dipdir) \\ y &= \sin(dip) \cos(dipdir) \\ z &= \cos(dip) \end{aligned} \quad (2)$$

با جمع جبری مؤلفه‌های بردار نرمال درزه‌ها، بردار نرمال میانگین دسته‌درزه به دست می‌آید. اندازه این بردار را R در نظر می‌گیریم. با در دست داشتن مقدار R ، مردیا برای محاسبه مقدار K رابطه (۳) را ارائه نمود [۱۹]:

$$\begin{aligned} k &= \frac{3R}{1+0.7R^2} & R < 0.65 \\ k &= \frac{1}{1-R} & R \geq 0.65 \end{aligned} \quad (3)$$

۳- نحوه جانمایی گسل‌ها با استفاده از ضریب ثابت فیشر

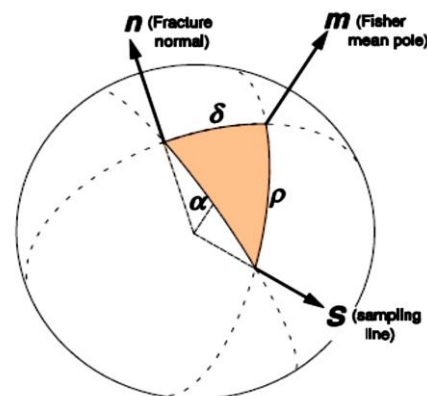
همان‌گونه که بیان شد، ناپیوستگی‌ها در محیط‌های تکتونیکی، ساختاری رایج و گسترده هستند [۱۳] که ممکن است یک رابطه سینماتیک یا هندسی نسبت به گسل‌ها نشان دهند، اگر در سیستم تنشی یکسانی نسبت به آن‌ها شکل گرفته باشند. از طرف دیگر، درزه‌ها ممکن است به دلیل تفاوت در سیستم‌های تنشی، جهت‌گیری‌های متفاوتی نسبت به گسل داشته باشند [۲۰]؛ بنابراین، در بعضی مناطق، استفاده از پارامتر امتداد ناپیوستگی‌ها به‌تنهایی به‌منظور شناسایی موقعیت گسل‌ها، ناکارآمد است.

طبق یک برآورد منطقی مشخص می‌شود، همواره، در محل عبور گسل‌ها، پراکندگی شیب و جهت شیب درزه‌های حاصل از گسل‌ها بیشتر است؛ بنابراین، با توجه به این نظریه که نظم سیستم درزه‌ها در نزدیکی گسل‌ها به هم می‌ریزد و شیب و جهت شیب دسته‌درزه‌ها توازی خود را از دست می‌دهند، روش جدید استفاده از ضریب K فیشر جهت تعیین موقعیت تقریبی گسل‌ها و بلوک‌های تکتونیکی انتخاب می‌شود.

کردن بردار نرمال ناپیوستگی‌ها در فضا است. این تابع، توزیع زاویه‌ای جهت‌داری را بر اساس سه پارامتر δ ، φ و k که به ترتیب نشانگر میانگین شیب، جهت شیب و ضریب فیشر می‌باشند، توصیف می‌کند. تابع چگالی احتمال این توزیع به‌صورت رابطه (۱) است:

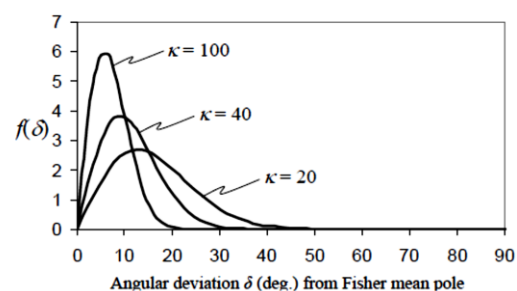
$$f(\delta) = \frac{k \sin \delta e^{k \cos \delta}}{e^k - e^{-k}} \quad 0 \leq \delta \leq \pi \quad (1)$$

در این رابطه δ مقدار انحراف زاویه‌ای از مقدار میانگین قطب فیشر بوده (شکل ۱) و k ضریب ثابت فیشر است که عددی مثبت بوده و درجه پراکندگی توزیع را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که زاویه δ برای کل درزه‌ها یکسان در نظر گرفته نمی‌شود.



شکل ۱: نمایش انحراف زاویه‌ای بردار نرمال ناپیوستگی‌ها از مقدار میانگین فیشر (δ) [۱۸].

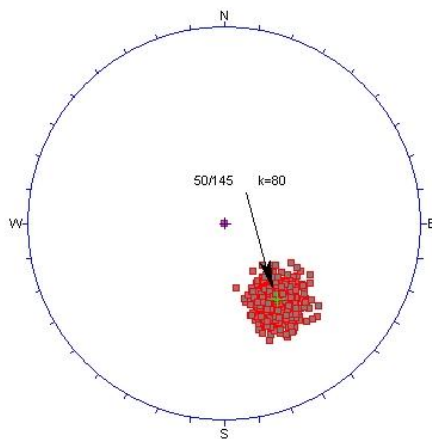
شکل ۲ تأثیر مقادیر مختلف ضریب ثابت فیشر (k) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، ضریب ثابت فیشر مقدار پراکندگی توزیع را نشان می‌دهد به‌طوری‌که هر چه مقدار k بزرگ‌تر باشد تجمع داده‌ها بیشتر و پراکندگی داده‌ها کمتر خواهد بود. این ضریب عددی مابین ۰ تا ۷۰۰ بوده اما در علم مکانیک سنگ و تحلیل جهت‌داری دسته‌درزه‌ها معمولاً مابین ۲۰ تا ۳۰۰ است [۷].



شکل ۲: تابع چگالی احتمال توزیع فیشر با مقادیر ۴۰، ۱۰۰، ۲۰۰ [۷].

(۳) و رندم (۰ و ۱) به صورت یک رندم تصادفی یکنواخت مابین ۰ و ۱ است. برای تعیین مقدار شیب و جهت شیب با استفاده از رابطه (۴) زاویه δ اطراف مقدار میانگین چرخیده می‌شود، این کار با ایجاد رندم مابین ۰ و ۳۶۰ امکان‌پذیر است.

برنامه RandmFisher نوشته شده در محیط نرم‌افزاری متمتیکا امکان شبیه‌سازی تعداد مشخصی درزه بر اساس توزیع فیشر را مهیا می‌کند [۱۹]. شکل ۳ نمونه‌ای از این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در این شکل ملاحظه می‌شود که هرچه مقدار k ضریب ثابت فیشر بیشتر می‌شود تراکم قطب‌ها نیز بیشتر خواهد شد [۱۹].

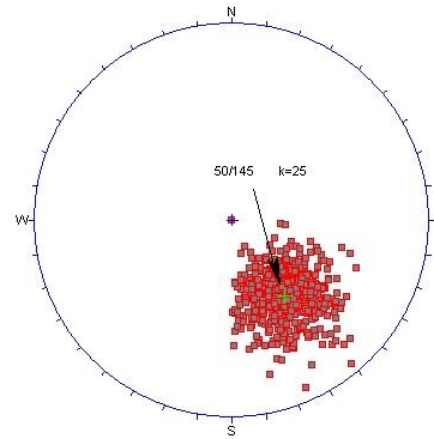


همان‌گونه که در تئوری تابع توزیع فیشر بیان شد، هر چه مقدار K بیشتر باشد پراکندگی داده‌ها کمتر و هر چه مقدار K کمتر باشد پراکندگی داده‌ها بیشتر است [۷]. در نتیجه، به دلیل کاهش مقدار K فیشر در محل عبور گسل‌ها برای تعیین موقعیت تقریبی گسل‌ها می‌توان از ضریب ثابت فیشر (K) استفاده کرد.

به منظور شبیه‌سازی جهت‌داری یک دسته درزه بر اساس تابع توزیع فیشر می‌توان از رابطه (۴) استفاده کرد (Young, 1990):

$$\delta = \cos^{-1} \left[\frac{\ln(1 - \text{Random}(0,1))}{k} + 1 \right] \quad (4)$$

در این رابطه δ اختلاف زاویه‌ای مابین بردار نرمال معرف درزه و بردار نرمال میانگین دسته درزه است (شکل



شکل ۳: شبیه‌سازی تعداد ۵۰۰ درزه با استفاده از برنامه RandomFisher با ضریب ثابت متفاوت [۱۹].

گسل‌ها پیشنهاد شد. با مقایسه بلوک‌های تکتونیکی محصور شده بین گسل‌های هر معدن و انطباق نسبی آن با مناطق تفکیک شده به روش پیشنهادی، کارایی این روش جهت تشخیص سیستم درزه‌ها و تخمین موقعیت ساختارهای بزرگ تکتونیکی مشخص شد.

۴-۱- معدن فسفات اسفوردی

پژوهش اول مربوط به معدن فسفات اسفوردی است. شکل ۴ گسل‌ها و خطوط برداشت انجام شده در معدن فسفات اسفوردی را نشان می‌دهد. عملیات برداشت درزه‌ها در طول خط برداشت‌هایی به موازات جبهه کار انجام شده است. داده‌های مورد نیاز از جبهه کار در ترازهای ارتفاعی مختلف، در ترانشه‌ها برداشت شد و پارامترهای هندسی درزه‌ها شامل جهت شیب، شیب، فاصله‌داری و گسترش اندازه‌گیری شد.

در نهایت با رسم نقشه‌های هم ضریب فیشر به عنوان پارامتر تعیین کننده نظم ناپیوستگی‌ها می‌توان موقعیت تقریبی گسل‌ها را مشخص کرد.

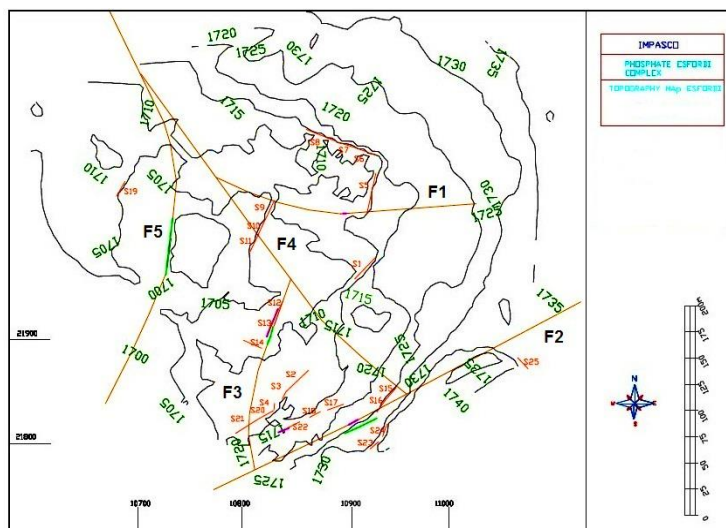
۴- موارد مطالعاتی

به منظور صحت سنجی فرضیه مطرح شده، از داده‌های هندسی ناپیوستگی‌ها، برداشت شده از چهار معدن فسفات اسفوردی، سه چاهون و چغارت و میدوک استفاده شد. ابتدا عملیات برداشت درزه و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به جهت‌داری درزه‌ها (شیب و جهت شیب) در جبهه کار معدن‌های ذکر شده انجام گرفت. سپس بر اساس تئوری فیشر، توزیع ضریب K در این معدن‌ها به دست آمده و خطوط هم ضریب فیشر رسم شد. بدین ترتیب مناطق با تمرکز بالای ضریب K در هر معدن به عنوان محل عبور

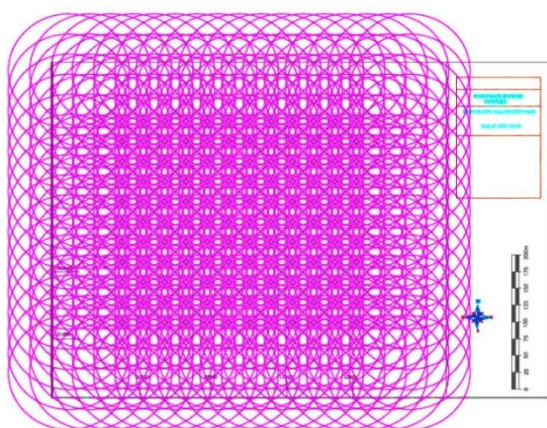
بر اساس عامل تکتونیک یعنی همان گسل‌های موجود در منطقه انجام شده است. بدین‌صورت که ابتدا گسل‌ها یا مرزهای احتمالی منطقه تشخیص داده‌شده و با نقشه‌برداری جانمایی شدند.

در این تحقیق برداشت درزه‌ها در طول ۲۶ خط برداشت و در ترازهای ارتفاعی مختلف انجام شده است. تعداد ۷۴۹ درزه برداشت‌شده که محل خطوط برداشت بارنگ قرمز در شکل ۴ مشخص است.

برای تعیین مناطق هموزن آماری به روش توزیع درزه‌ها (ضریب ثابت فیشر)، ابتدا جداسازی مناطق همگن



شکل ۴: گسل‌های احتمالی شناخته‌شده در منطقه معدن فسفات اسفوردی.



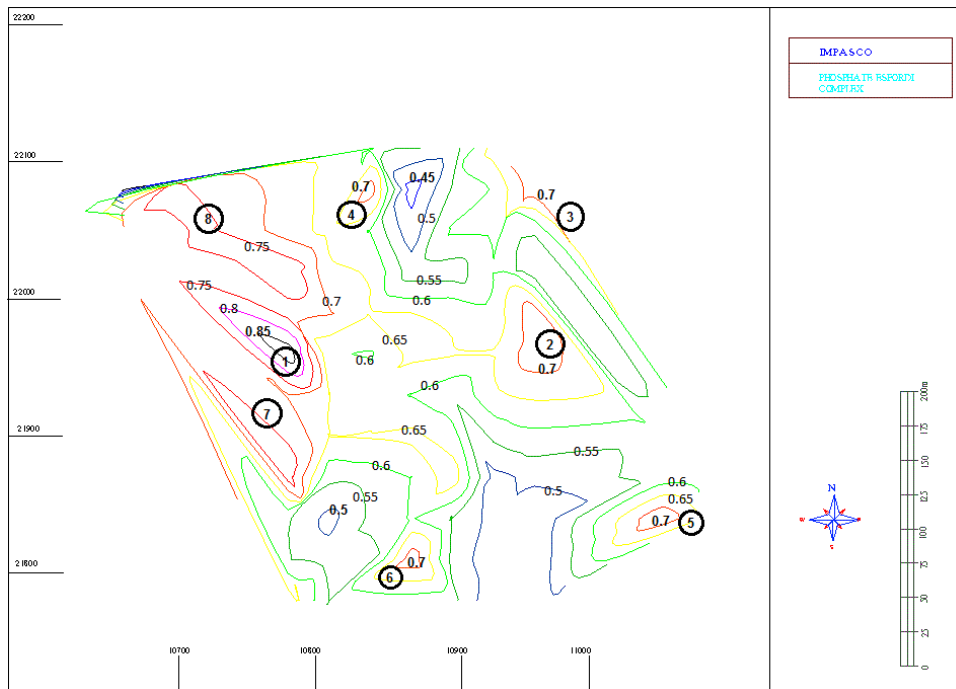
شکل ۵: دایره‌های شناور جهت اندازه‌گیری ضرایب ثابت فیشر.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این منطقه، ۸ ناحیه وجود دارد که دارای مقدار R بالایی هستند یا به‌عبارت‌دیگر سیستم درزه متمرکز وجود دارد. در یک بررسی ساده می‌توان نتیجه گرفت که ناحیه‌ی ۷ و ۸ به دلیل کمبود داده‌ها در آن منطقه و درونیابی خطی ایجاد شده است و به نظر با ناحیه ۱ نزدیکی داشته و یک ناحیه را تشکیل می‌دهند. در شکل ۷ گسل‌های برداشت‌شده به شکل ۶ اضافه‌شده است. گسل‌های منطقه به‌طور نسبی نواحی و

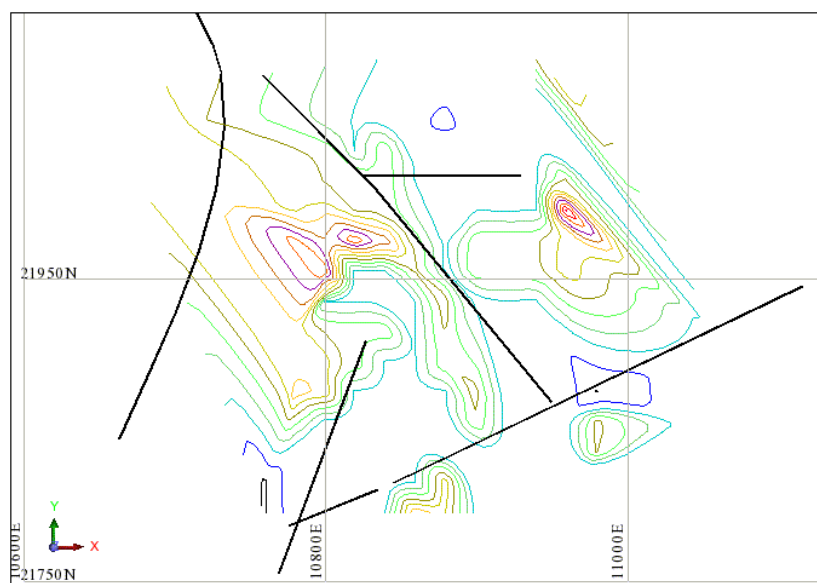
سپس برای کنترل محل برخورد گسل‌ها بر اساس فرضیه‌ی مطرح‌شده، عمل می‌نماییم. البته در این تحقیق بجای K فیشر از R یعنی ضریب تمرکز سیستم درزه استفاده شد؛ زیرا پیوستگی آن نسبت به ضریب K فیشر بیشتر بوده و نتایج بهتری را نیز در پی داشت. با توجه به اینکه داده‌های برداشت‌شده به‌طور نامنظم در محدوده معدن پراکنده است. به‌منظور یکسان یا منظم‌سازی داده‌ها، ابتدا منطقه به دایره‌های به قطر ۸۵ متر و با فاصله‌ی ۳۰ متر تقسیم شده است (شکل ۵). سپس به جهت محاسبه R ، از درزه‌هایی که در هر دایره قرار دارند میانگین‌گیری شده و در مرکز همان دایره قرار گرفت. در نهایت، خطوط هم ضریب تمرکز سیستم درزه R رسم و بر اساس رنگ دسته‌بندی شده است (شکل ۶).

به صورت نقطه‌چین نشان داده شده‌اند نیز وجود دارد. لازم به ذکر است، این روش در مرزها می‌تواند به دلیل کم شدن نقاط نمونه‌برداری دارای خطای نسبی بیشتری نسبت به داخل منطقه برداشت باشد.

سیستم درزه‌های تشخیص داده شده را تأیید می‌کنند به طوری که هرچه مقادیر R بزرگ‌تر و به یک نزدیک شوند از گسل‌ها فاصله می‌گیرند و هرچه مقادیر به صفر نزدیک شوند مناطق تکتونیزه و محل برخورد گسل‌ها را نمایندگی می‌کنند؛ بنابراین بر این اساس احتمال وجود گسل‌هایی که



شکل ۶: خطوط تراز مقدار R معدن فسفات اسفوردی.



شکل ۷: خطوط تراز مقدار R و محل گسل‌های احتمالی معدن فسفات اسفوردی.

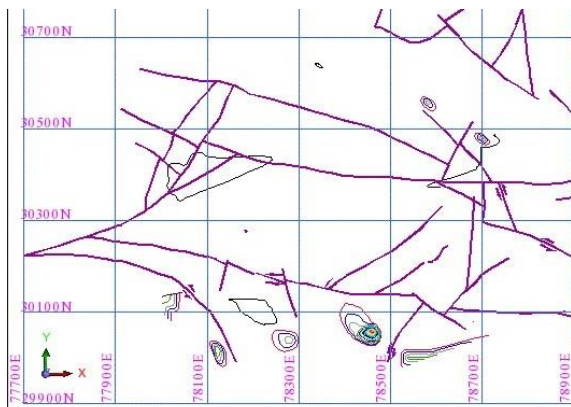
مشاهده می‌شود از این تحلیل ساختاری چند نتیجه می‌توان گرفت:

گسل‌های اصلی محل تمرکز ضرایب فیشر که منطقه منظم درزه‌داری است را قطع نمی‌کنند.

گسل‌هایی که طرفین خطوط هم‌تراز قرار می‌گیرند نشان از حرکت‌های بزرگ‌تری نسبت به دیگر گسل‌های منطقه دارند که تمرکز ضرایب فیشر را اطراف خود ندارند (البته در مناطقی که درزه نگاری صورت گرفته و دوایر شناور فوق‌الذکر نیز پوشش داده شده است).

در مناطقی دو مجموعه خطوط هم‌تراز از هم جدا وجود دارند به احتمال زیاد گسل بین آنها دیده نشده است.

با مقایسه خطوط هم‌تراز بر اساس ضریب فیشر (K) و گسل‌های منطقه سه چاهون در شکل ۹ می‌توان به ارتباط مقادیر K و به هم‌ریختگی سیستم درزه و عبور خط گسل پی برد. به عبارت دیگر، می‌توان نتیجه گرفت که هرچه مقدار K کاهش پیدا کند پراکندگی شیب و جهت شیب درزه‌ها بیشتر شده و چنین مناطقی می‌تواند نشان‌دهنده محل برخورد دو گسل باشند.



شکل ۹: خطوط هم‌تراز ضریب فیشر (K) معدن سه چاهون و موقعیت گسل‌ها.

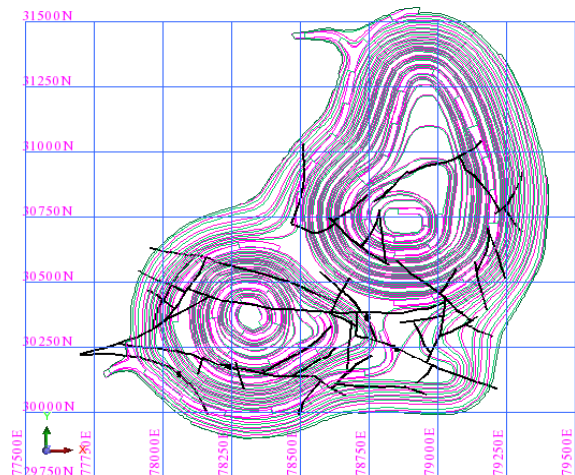
۴-۳- معدن چغارت

در مطالعه موردی سوم، معدن چغارت مورد بررسی قرار گرفت. طبق مطالعات زمین‌شناسی، تکتونیک اولیه و بر اساس گسل‌های اصلی منطقه، توده سنگ معدن چغارت به چهار بلوک تکتونیکی تقسیم شده است. لازم به ذکر است که بلوک چهارم خود به دلیل وجود اختلاف بین بعضی از مشخصات به بلوک‌های ۴-۱ و ۴-۲ تقسیم می‌شود. در شکل ۱۰ موقعیت این بلوک‌ها نشان داده شده است. این تقسیم‌بندی بدون در نظر گرفتن دیگر ساختارهای

در مطالعات زمین‌آماري معمولاً با افزایش مناطق همگن تعداد نمونه‌ها در هر منطقه کاهش یافته و خطاها افزایش می‌یابد از طرفی یکسان در نظر گرفتن منطقه مورد مطالعه باعث ایجاد خطای ناشی از افزایش واریانس می‌شود به همین دلیل بهینه‌سازی در این مورد لازم است.

۴-۲- معدن سه چاهون

در مطالعه موردی دوم، معدن سه چاهون مورد بررسی قرار گرفت. طبق مطالعات زمین‌شناسی، تکتونیک اولیه و گسل‌های اصلی منطقه، توده سنگ معدن سه چاهون به چند بلوک تکتونیکی تقسیم شده است. در شکل ۸ موقعیت این بلوک‌ها نشان داده شده است. این تقسیم‌بندی بدون در نظر گرفتن دیگر ساختارهای زمین‌شناسی است. در حالی که احتمال دارد با تحلیل ساختارهای زمین‌شناسی توده سنگ مورد نظر، تعداد این تقسیمات (بلوک‌ها) بیشتر یا حتی در مواردی که رفتار و مشخصات این ساختارها به هم نزدیک باشد بعضی از این بلوک‌ها باهم ادغام شده و یک بلوک را ایجاد کنند (شکل ۸).

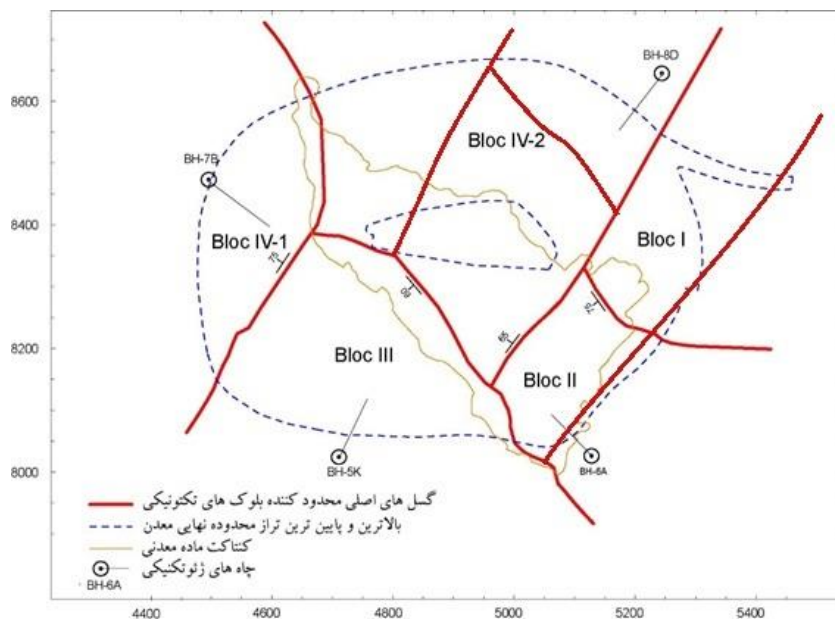


شکل ۸: محدوده و گسل‌های اصلی معدن سه چاهون ۱۱.

در ادامه تحلیل آماری به هر ناپیوستگی برداشت شده موقعیت مکانی اختصاص یافت و بر اساس دواير شناور با قطر ۳۰ متر ناپیوستگی‌ها به گروه‌های کوچک‌تر تقسیم شدند و ضرایب ثابت فیشر (تابع توزیع لانگراژ-فیشر) که نشان‌دهنده پراکندگی و یا تمرکز شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها به‌طور هم‌زمان در هر دایره است محاسبه و در مرکز آن قرار گرفت. سپس خطوط هم‌تراز این ضرایب ترسیم شد که در شکل ۹ مشاهده می‌شود. چنانچه

مشخصات این ساختارها به هم نزدیک باشد بعضی از این بلوک‌ها باهم ادغام شده و یک بلوک را ایجاد کنند.

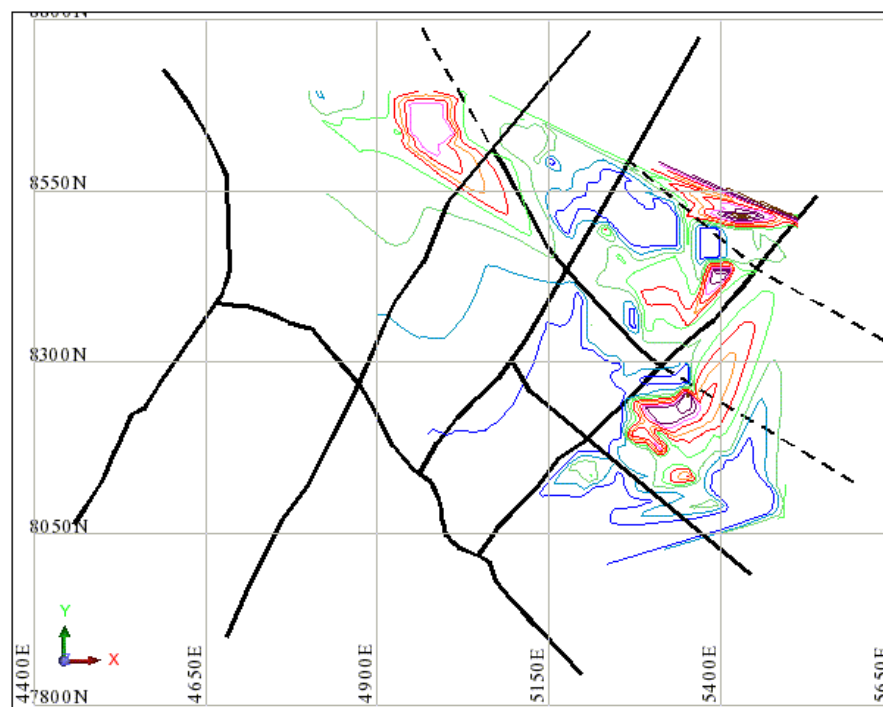
زمین‌شناسی است. درحالی‌که احتمال دارد با تحلیل ساختارهای زمین‌شناسی توده سنگ موردنظر، تعداد این تقسیمات (بلوک‌ها) بیشتر یا حتی در مواردی که رفتار و



شکل ۱۰: بلوک‌بندی تکتونیکی محدوده معدن چغارت.

نتیجه گرفت که هرچه مقدار K کاهش پیدا کند نشان‌دهنده محل برخورد دو گسل است. با توجه به این شکل احتمال وجود گسل‌هایی که به صورت خط‌چین نشان داده شده‌اند نیز وجود دارد (شکل ۱۱).

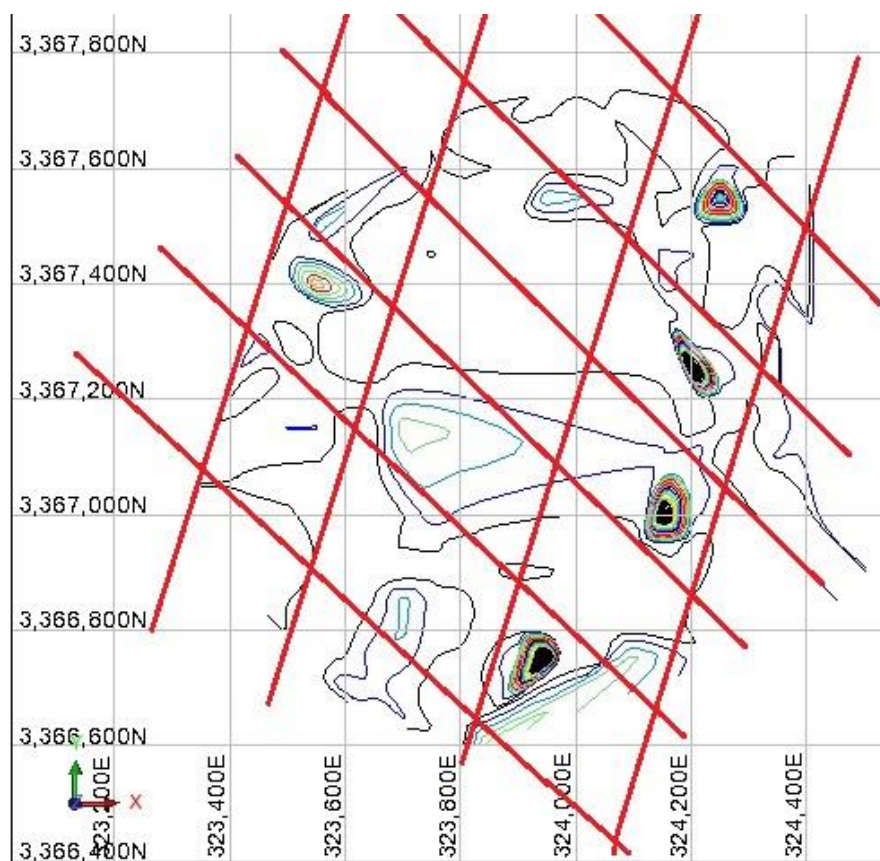
با مقایسه خطوط هم‌ارزش بر اساس ضریب فیشر (K) و گسل‌های منطقه چغارت در شکل ۱۱ می‌توان به ارتباط مقدار K و وجود سیستم درزه و عبور خط گسل پی برد که گسل‌های این نواحی را تأیید می‌کنند. اکنون می‌توان



شکل ۱۱: خطوط هم‌ارزش ضریب فیشر K و گسل‌های اصلی معدن چغارت.

۴-۳- معدن میدوک

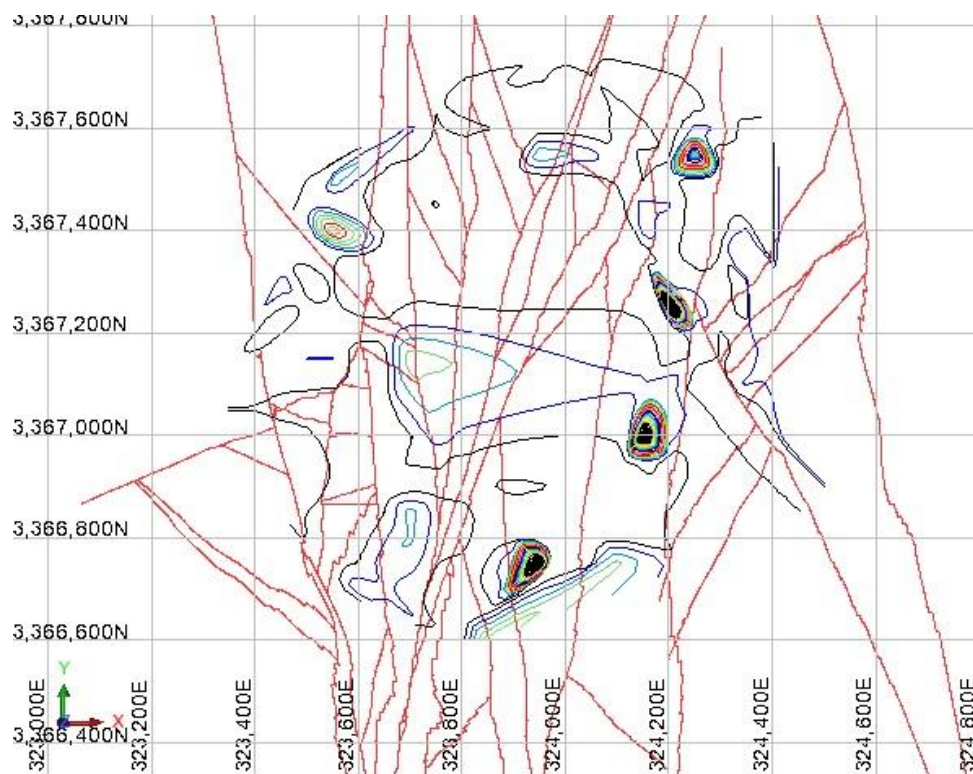
در مطالعه موردی چهارم، معدن مس میدوک مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس درزه نگاری‌های صورت گرفته در منطقه معدن و با توجه به نظریه‌ای که در موارد مطالعاتی فوق به اثبات رسید این که نظم سیستم درزه‌ها در نزدیکی گسل‌ها به هم می‌ریزد و شیب و جهت شیب دسته‌درزه‌ها توازی خود را از دست می‌دهند، در یک مطالعه تحلیل پایداری دیواره‌های این معدن، نویسندگان جهت یافتن بلوک‌های تکتونیکی روش پیشنهادی را



شکل ۱۲: خطوط هم تمرکز ضریب فیشر K و گسل‌های پیشنهادی برای معدن مس میدوک.

با این تفاوت که در گسل‌های واقعی تسلسل گسلش رعایت شده و قطع‌شدگی‌هایی در ساختارهای شمال غرب جنوب غربی به وجود آمده است. در هر صورت باز در شرایط واقعی نیز خطوط هم تمرکز ضریب ثابت فیشر توسط گسل‌های برداشت‌شده قطع نشده‌اند (شکل ۱۳).

بر این اساس معدن به چهار بلوک تکتونیکی بر اساس خطوط متقاطع وسط در شکل ۱۲ تقسیم و مطالعات صورت گرفت. در ادامه با فعالیت مشاور جدید معدن گسل‌های منطقه برداشت شد و مشخص شد گسل‌های پیشنهادی، روند ساختارهای موجود را تأیید می‌کنند. البته



شکل ۱۳: خطوط هم ارزش ضریب فیشر K و گسل‌های اصلی معدن میدوک.

۵- نتیجه‌گیری

این معدن‌ها به دست آمد و خطوط هم ضریب فیشر رسم شد. بدین ترتیب مناطق با تمرکز بالای ضریب K در هر معدن به‌عنوان مرکز سیستم درزه‌ها تعیین شد. با مقایسه بلوک‌های تکتونیکی محصورشده بین گسل‌های هر معدن و انطباق نسبی آن با مناطق تفکیک‌شده به روش پیشنهادی، کارایی این روش جهت تشخیص سیستم درزه‌ها و تخمین موقعیت ساختارهای بزرگ تکتونیکی به‌خوبی امکان‌پذیر شد.

یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق هم‌خواهی این مناطق با بلوک‌های تکتونیکی محصورشده در گسل‌های منطقه معدن‌های مورد مطالعه است که کارایی این روش را جهت تشخیص این بلوک‌ها حتی بدون شناخت نسبت به گسل‌های فعال منطقه امکان‌پذیر می‌سازد.

در انتها دو نکته قابل‌ذکر است که در برخی مواقع، کمبود درزه نگاری و عدم پوشش کامل سطوح به دلیل پلکانی بودن استخراج معدن‌ها باعث شد تا بعضاً فرضیه مورد بررسی صدق نکند و دوم اینکه با توجه به تعدد فاکتورهای مؤثر در جداسازی مناطق همگن ساختاری، این روش نیازمند بررسی بیشتر و تجربه در دیگر معدن‌ها و مناطق مورد مطالعه ژئومکانیکی است.

ضریب ثابت فیشر (K) به‌عنوان فاکتوری مؤثر در به نمایش گذاشتن رفتار ناپیوستگی‌ها عمل می‌کند، ضریب ثابت تابع توزیع فیشر (K) به‌عنوان ضریبی که شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها را نمایندگی می‌کند، نشان دهنده چگونگی توزیع و میزان پراکندگی درزه‌ها است و به‌عنوان پارامتر شاخص در خصوص رفتارشناسی هندسی ناپیوستگی‌ها محسوب می‌شود. بر اساس شواهد، جهت‌داری سیستم درزه‌ها در نزدیکی ساختارهای تکتونیکی به‌هم‌ریخته و با فاصله گرفتن از آنها منظم می‌شود. به‌گونه‌ای که با افزایش آن بر تجمع داده‌ها افزوده شده و بالعکس، افزایش تجمع داده نشان‌دهنده افزایش بردار نرمال میانگین دسته‌درزه (R) است که بیانگر وجود یک سیستم درزه است. درواقع نتایج حاصل از مقادیر ضریب ثابت فیشر نمایانگر تغییراتی است که در نزدیکی گسل‌های اصلی در این پارامتر ایجاد می‌شود. درنتیجه در این تحقیق، ضریب فیشر به‌عنوان اصلی‌ترین عامل تشخیص و تفکیک سیستم درزه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور صحت سنجی فرضیه مطرح‌شده، با استفاده از داده‌های هندسی ناپیوستگی‌ها، برداشت‌شده از چهار معدن سه چاهون، چغارت، فسفات اسفوردی و میدوک، توزیع ضریب K در

مراجع

- [11] Brock, W. G. & Engelder, T. 1977. Deformation associated with the movement of the Muddy Mountain overthrust in the Burlington window, southeastern Nevada. *Bull. Geol. Soc. Am.* 88, 1667-1677.
- [12] Pohn, H. A. 1981. Joint spacing as a method of locating faults. *Geology* 9, 258-261.
- [13] Bartlett, W. L., Friedman, M. & Logan, J. M. 1981. Experimental folding and faulting of rocks under confining pressure: Part IX: wrench faults in limestone layers. *Tectonophysics* 79, 255-277.
- [14] Hancock, P. L. 1985. Brittle microtectonics: principles and practice. *J. Struct. Geol.* 7, 437-457.
- [15] Rawnsley, K.D., Peacock, D.C.P., Rives, T., Petit, J.P., 1998. Jointing in the Mesozoic sediments around the Bristol Channel Basin. *Journal of Structural Geology* 20, 1641-1661.
- [16] Reches, Z., Lockner, D.A., 1994. Nucleation and growth of faults in brittle rocks. *Journal of Geophysical Research* 99, 18159-18174.
- [17] Anders, M. H. & Wiltschko, D. V. 1994. Microfracturing, paleostress and the growth of faults.
- [18] Fisher, R.A., 1953. Dispersions on a sphere. *Proc. R. Soc. London, Ser. A* 217, 295-305.
- [19] Mardia, K.V., Nyirongo, V.B., Walder, A.N., Xu, C., Dowd, P.A., Fowell, R.J., Kent, J.T., 2007. "Markov Chain Monte Carlo implementation of rock fracture modeling". *Mathematical Geology*, 39, p. 355-381.
- [20] A. R. Yar ahmadi bafghi, H. Karampour rad, Investigation of Spatial Correlation of Discontinuities Geometrical Parameters (Case Study: Tectonic Block No. I in Choghart Iron Ore Mine), 2nd Mining Engineering Conference, 2008, p. 605-611.
- [1] Jing L, Stephansson O. 2007. Fundamentals of discrete element methods for rock engineering: theory and applications. Amsterdam: Elsevier Science, Developments in Geotechnical Engineering.
- [2] Anders, M. H., Laubach, S. E., & Scholz, C. H. Microfractures. A review .2014. *Journal of Structural Geology*, 69, 377-394.
- [3] Jorge M.F. Carvalho. 2018. Jointing patterns and tectonic evolution of the Maciço Calcário Estremenho, Lusitanian Basin, Portugal. *Journal of Structural Geology* 110 155-171.
- [4] Peacock, D.C.P. 2001. The temporal relationship between joints and faults. *Journal of Structural Geology* 23, 329-341.
- [5] Jan M. Vermilye and Christopher H. Scholz. 1998. The process zone: A microstructural view of fault growth. *Journal of Geophysical Research*, v. 103, n. B6, pp 12,223-12,237.
- [6] Marieke Rempe et al. 2018. The Relationship Between Microfracture Damage and the Physical Properties of Fault-Related Rocks: The Gole Larghe Fault Zone, Italian Southern Alps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*.
- [7] Young D.S. 1990. Joint Modelling for Rock Mechanics, In Rossmannith H.P.(ed) , *Mechanics of Jointed and Faulted Rock* , Proc.int.conf., Vienna ,Balkema ,Rotterdam , pp. : 543-550.
- [8] Steno, N. 1669. De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus. Florence, Italy.
- [9] Anderson EM, 1905. The dynamics of faulting. *Transactions of the Edinburgh Geological Society* 8: 340-387.
- [10] Roberts J. C. 1966. A study of the relation between jointing and structural evolution.