

کاربرد دورسنجی در آشکارسازی، شناخت و تحلیل ویژگی‌های زمین‌ساختی خطواره‌های مرتبط با دگرسانی در منطقه بجنستان، خاور ایران

ریحانه احمدی روحانی^۱، محمدحسن کریم‌پور^۲، بهنام رحیمی^۲، آزاده ملک‌زاده شفاوردی^۲ و صادق افشار نجفی^۲

^۱دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۴دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۲۹

چکیده

محدوده مورد مطالعه در خاور شهر بجنستان، جنوب باختر استان خراسان رضوی قرار دارد. این محدوده در شمال بلوک لوت، بزرگ‌ترین بلوک ساختاری در خاور ایران جای گرفته است. این بخش خود تحت تأثیر فعالیت‌های گسل‌های ژرف امتدادلغز در مرز این بلوک قرار دارد. خطواره‌های موجود در منطقه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای اسپات، لندست و داده DEM آشکارسازی شد. مطالعات ساختاری در این ناحیه در دو مرحله انجام گرفت: نخست آشکارسازی، تهیه نقشه و تحلیل ساختاری گسل‌های اصلی منطقه صورت گرفت و در مرحله بعد به منظور انجام مطالعات تکمیلی، کل خطواره‌های موجود شامل درزه‌ها و گسل‌ها، آشکارسازی و تحلیل شدند. راستی‌آزمایی مطالعات یاد شده با پیمایش‌های صحرایی و داده‌های آماری صورت گرفت. مطالعات دورسنجی نشانگر اهمیت فیلترهای آشکارکننده چون فیلترهای استاندارد، روی داده‌های با ویژگی‌های استریوسکوپیک چون اسپات به عنوان یک ابزار کارآمد در مطالعات ساختاری به‌ویژه آشکارسازی خطواره‌هاست. مطالعات فرکتال و به‌کارگیری متغیرهای آماری شکستگی‌ها (برپایه نقشه شکستگی حاصل از داده‌های دورسنجی) در منطقه، ضمن مشخص کردن بعد فرکتال در منطقه، تکمیل‌کننده مطالعات دورسنجی در زمینه شناخت چگونگی تکامل ساختاری منطقه و معرفی مناطق با احتمال بیشتر کانی‌سازی هستند. مطالعات دورسنجی، صحرایی، تحلیل‌های آماری - ساختاری و فرکتالی روی سامانه‌های شکستگی موجود در منطقه نشانگر احتمالی ارتباط عناصر ساختاری موجود در منطقه با فعالیت یک سامانه گسلی امتدادلغز است که می‌تواند به عنوان شکستگی‌های رایدل در دیواره پهنه تخریب در نظر گرفته شوند. نتایج بالا نشان می‌دهند که بیشتر خطواره‌های موجود در منطقه شکستگی‌های کشتی منطبق بر جایگیری دایک‌ها و رخداد انواع پهنه‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی‌های موجود در منطقه است. تلفیق اطلاعات یاد شده می‌تواند نقش مهمی در شناسایی روند عناصر ساختاری مؤثر در ایجاد آلتراسیون و مشخص کردن نواحی مستعد کانی‌سازی داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: سنجش از دور، فیلترهای آشکارکننده خطواره‌ها، سامانه شکستگی برشی، پهنه ساختاری لوت، بجنستان.

E-mail: karimpur@um.ac.ir

نویسنده مسئول: محمدحسن کریم‌پور

۱- پیش‌نوشتار

به منظور آشکارسازی خطواره‌ها، ابتدا از داده‌های لندست ETM⁺ (با تفکیک مکانی ۱۵ متر)، مدل ارتفاع رقومی (DEM) با تفکیک مکانی ۱۰ متر و سپس داده اسپات-۵ استفاده شده است که قابلیت‌های برتری چون تفکیک مکانی ۲/۵ متر و دید استریو نسبت به داده لندست دارد. درستی نتایج به دست آمده با مطالعات صحرایی بررسی شده است.

تهیه نقشه خطواره‌ها بر پایه تفسیر دیداری از تصاویر RGB و استفاده از فیلترهای آشکارکننده خطواره‌ها که شرح آن در پیش رو خواهد آمد، انجام و فیلترهای جهت‌دار نیز به منظور آشکارسازی بهتر استفاده شده است. در مطالعات دورسنجی انجام شده سعی بر این بوده است تا مرز واحدهای زمین‌شناسی، آبراهه‌ها، گیاهان و خطواره‌های ایجاد شده توسط انسان چون جاده‌ها، زمین‌های کشاورزی و آثار کنده‌کاری‌های معدنی به منظور جلوگیری از خطا حذف شود. در این پژوهش از نرم‌افزارهای Arc GIS 10.3 و ER- Mapper 7.01، ENVI 4.7 برای پردازش اطلاعات استفاده شده است. مراحل کار در این پژوهش در نمودار شکل ۱ آورده شده است. آشکارسازی خطواره‌ها در منطقه بجنستان به دلیل آب‌وهوای خشک و پوشش گیاهی ناچیز به خوبی انجام پذیر بوده است.

۲- جایگاه زمین‌شناسی

محدوده مورد مطالعه در بخش شمالی پهنه لوت، بزرگ‌ترین و اصلی‌ترین بلوک در خردقاره خاور مرکز ایران جای گرفته است. خردقاره ایران مرکزی، در کمربند آلپ- هیمالیا، میان دو نوار کوهزایی شمالی و جنوبی و میان دو زمین‌درز پالئوتتیس

آشکارسازی خطواره‌ها و تهیه نقشه از آنها با استفاده از داده‌ها و روش‌های دورسنجی یک موفقیت مهم در مطالعات زمین‌شناسی به‌ویژه مطالعات زمین‌ساخت است (Shupe and Akhavi, 1989; Tibaldi and Ferrari, 1991; Kar, 1994; Kresic, 1995; Rolet et al., 1995; Rowen and Bowars, 1995; Philip, 1996; Solomon and Ghebreab, 2006; Masoud and Koike, 2006; Marghany and Hashim, 2010; Hashim et al., 2013).

از آنجایی که ساختارهای زمین‌شناسی همچون شکستگی‌ها (گسل‌ها و درزه‌ها)، پهنه‌های برشی و برگ‌وارگی در سطح زمین به‌صورت خطواره در تصاویر ماهواره‌ای و هوایی آشکار و نشان داده شده است (Solomon and Ghebreab, 2006)، برخی از پژوهشگران از روش‌های سنجش از دور به همراه مطالعات صحرایی در راستای استخراج عوارض ساختاری به‌ویژه خطواره‌ها به منظور شناخت منشأ زمین‌ساختی آنها استفاده کرده‌اند (غلام‌زاده، ۱۳۹۳؛ Drury et al., 1994; Arlegui and Soriano, 1998; Solomon and Ghebreab, 2006; Morelli and Piana, 2006). آشکارسازی خطواره‌ها به وسیله سنجش از دور در نواحی بیابانی و نیمه‌بیابانی که در آن سنگ بستر کاملاً نمایان است می‌تواند نتایج بهتری دربر داشته باشد (Koch and Mather, 1997; Eshghi Molan et al., 2014).

هدف اصلی این پژوهش آشکارسازی، شناخت و تفسیر خطواره‌ها و چگونگی تشکیل آنها با استفاده از مطالعات دورسنجی و صحرایی و مقایسه نتایج حاصل با یکدیگر در محدوده خاور بجنستان (به عنوان بخشی از زون ساختاری لوت) در خاور ایران است.

۳- بحث و بررسی

۳-۱. تهیه نقشه شکستگی‌ها با استفاده از داده‌های ماهواره

به منظور شناخت سازوکار عملکرد عناصر ساختاری و تعیین ارتباط احتمالی میان شکستگی‌ها با پهنه‌های دگرسانی در منطقه، نقشه شکستگی‌های محدوده مورد مطالعه با استفاده از پردازش داده‌های ماهواره ETM^+ ، مدل ارتفاع رقومی (DEM) و داده اسپات-۵ (SPOT-5) انجام گرفت. آشکارسازی خطواره‌ها در دو مرحله انجام شد: ابتدا خطواره‌های اصلی یعنی گسل‌ها و در مرحله دوم همه خطواره‌ها شامل گسل و درزه (joint) استخراج و تحلیل شدند. دلیل استفاده دو مرحله‌ای پردازش، شناخت و تحلیل بهتر سازوکار عملکرد خطواره‌ها در بخش‌های مختلف ناحیه است. در مرحله اول مطالعات (آشکارسازی خطواره‌های اصلی)، ابتدا از داده تلفیق شده چندباندی لندست ETM^+ با باند پانکروماتیک آن با تفکیک مکانی ۱۵ متر استفاده و سپس انواع فیلتر High-Pass روی تصویر ترکیبی آن اعمال شد. بهترین نتیجه حاصل اعمال فیلتر Sharpen 11.11 و فیلتر Directional به صورت N45E روی تصویر ۲۱۳ (RGB) به دست آمد (شکل ۳-الف). همچنین با توجه به ویژگی‌های داده‌های مدل ارتفاع رقومی (DEM) در بهره‌گیری از ضریب تغییرات ارتفاعی برای آشکارسازی خطواره‌ها، از این داده با تفکیک مکانی ده متر برای ساخت هیل شد (Hillshade) منطقه استفاده شد و با اعمال فیلتر Directional در جهات ۸ گانه بهترین نتیجه (N90E) مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳-ب).

از داده‌های ماهواره اسپات-۵ منطقه افزون بر آشکارسازی خطواره‌های اصلی، برای آشکارسازی خطواره‌های فرعی نیز استفاده شد. داده چند طیفی اسپات-۵ استفاده شده، دارای تفکیک مکانی ۲/۵ متر و ویژگی‌های SPOTCOV_IRC_N34E058-A و تاریخ دریافت ۲۰۰۷-۱۰-۱۶ است؛ این داده پیش از شروع پردازش، از دید هندسی و رادیومتری تصحیح شد. تصویر رنگی ۲/۵ متری به وسیله تلفیق دو تصویر جداگانه تهیه می‌شود. یک تصویر پانکروماتیک با تفکیک مکانی ۲/۵ متر، با تصویر سه باندی چند طیفی با تفکیک مکانی ۱۰ متر تلفیق می‌شود. با توجه به اینکه تصویر ۲/۵ متر خود به وسیله تلفیق دو تصویر ۵ متر حاصل می‌شود، یکی از ابزارهای HRG باید سه تصویر همزمان برای تولید تصویر رنگی ۲/۵ متر تهیه کند، بنابراین تصاویر به دست آمده شبیه یک تصویر رنگی با تفکیک مکانی ۲/۵ متر و دید هندسی پانکروماتیک هستند (spotimage.com). داده اسپات-۵ با توجه به داشتن همزمان دو ویژگی دید استریو و تفکیک مکانی بالا، حتی هنگامی که هیچ نوع فیلتری روی آن اعمال نشده است (شکل ۳-پ)؛ در مقایسه با داده‌های لندست و DEM منطقه (شکل‌های ۳-الف و ب)، برتری قابل توجهی در آشکارسازی عوارض ساختاری نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به کارایی این داده، از آن در هر دو مرحله آشکارسازی خطواره‌ها استفاده شد. مراحل کار روی داده اسپات-۵ به تفصیل آورده شده است:

آشکارسازی خطواره‌های اصلی (گسل‌ها) محدوده Main lineament mapping (faults):

در این مرحله، پس از تهیه تصویر رنگی به صورت ترکیب RGB از داده اسپات-۵ (شکل ۳-پ)، فیلترهای آشکارکننده‌ای چون High-Pass از نوع شارپن (sharpen)، و فیلترهای استاندارد (حد آستانه و سوبل همچنین فیلترهای جهت‌دار) به کار برده شد.

فیلترهای مکانی یا فراوانی مکانی به تغییرات عددی در میزان روشنایی در واحد فاصله برای هر بخش خاص از یک تصویر گفته می‌شود (Jensen, 2005). فیلترها به وسیله تولید یک دسته از وزن‌ها به پیکسل‌های متناظر نسبت به پیکسل‌های مجاور تولید می‌شوند. در پردازش تصاویر، عملکرد بسیاری از فیلترها روی تصویر، با انجام یک عملیات خاص به نام عملگر یا کانولوشن (Convolution) انجام می‌شود که این عملگر خود شامل یک ماتریس است که به این ماتریس هسته یا کرنال می‌گویند. کرنال‌ها معمولاً ماتریسی مربعی به صورت 3×3 هستند هر چند که گاه ماتریس‌های 2×2 ، 4×4 و 5×5 نیز استفاده می‌شوند. مقادیر ذخیره شده در کرنال‌ها به‌طور مستقیم در ارتباط با نتایج حاصل از کاربرد فیلتر مربوطه هستند و فیلترها تنها به وسیله ماتریس

در شمال و نوتیس در جنوب باختر جای دارد. زمین‌ساخت فعال در خردقاره ایران مرکزی نتیجه تقارب میان ورقه عربستان و اوراسیاست، شدت این تقارب در طول جغرافیایی ۶۰ درجه ۲۸ تا ۴۰ میلی‌متر در سال است (Jackson et al., 1995). مطالعه داده‌های GPS نرخ تقارب کمتری، حدود ۲۶ میلی‌متر در سال، نشان داده است (Sella et al., 2002). این تقارب در بخش خاوری ایران ۲۵ میلی‌متر در سال برآورد شده است (Vernant et al., 2004). پهنه لوت همچنین، یکی از چندین خردقاره‌ای است که به نظر می‌رسد از حاشیه شمالی گندوانا در طی بازشدگی نوتیس در زمان پرمین جدا شده و سپس در زمان بسته شدن پالتوتیس در تریاس پسین، به قاره اوراسیا پیوسته است (Golanka, 2004). بر پایه باور بسیاری از پژوهشگران، پهنه لوت به وسیله چهار گسل اصلی دربر گرفته شده است: گسل درونه در شمال، گسل (حوضه) جازموریان در جنوب با فاصله‌ای در حدود ۹۰۰ کیلومتر، گسل نایبند در باختر و گسل نهندان در خاور با فاصله‌ای حدود ۲۰۰ کیلومتر (Stocklin and Nabavi, 1973; Gansser, 1995; Karimpour et al., 2011).

تاکنون مطالعات زیادی روی لرزه‌خیزی و ویژگی‌های ساختاری و زمین‌ساخت فعال این گسل‌ها و پهنه لوت انجام شده است (Berberian, 1982; Jackson et al., 1995; Berberian et al., 1999; Walker and Jackson, 2002 and 2004; Walker et al., 2003 and 2004; Walker and Khatib, 2006) همچنین فعالیت ماگمایی و جایگاه زمین‌ساخت دیرین پهنه لوت به وسیله برخی پژوهشگران مطالعه شده است (ارجمندزاده، ۱۳۹۰؛ 1981؛ Davoudzadeh et al., 1980; Soffel and Forster, 1980; Berberian and King, 1981; Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983; Tarkian et al., 1983; Jung et al., 1983; Karimpour et al., 2011).

برخی از پژوهشگران بر این باورند که تکامل زمین‌ساختی و ماگمایی در پهنه لوت حاصل یک سیستم کششی است (سامانی و اشتری، ۱۳۷۱؛ Jung et al., 1983; Tarkian et al., 1983). برخی دیگر از پژوهشگران به وجود یک سیستم فرورانش پوسته اقیانوسی در خاور بلوک باور دارند؛ آنها وجود کمپلکس‌های افیولیتی در خاور ایران میان بلوک لوت و بلوک هلمند را دلیلی بر وجود فرورانش می‌دانند (Saccani et al., 2010). افتخارنژاد (۱۳۵۹) بر این باورند که فعالیت ماگمایی در بخش شمالی بلوک لوت حاصل فرورانش سنگ‌کره اقیانوسی حوضه اقیانوسی خاور ایران به زیر بلوک لوت است. به تازگی برخی پژوهشگران مدل فرورانش دوسویه را برای چگونگی تکامل ماگمایی و زمین‌ساختی بلوک لوت مطرح کرده‌اند (ارجمندزاده، ۱۳۹۰؛ Doglioni et al., 2009).

حدود ۶۵ درصد از سنگ‌های رخنمون یافته در بلوک لوت نفوذی و آتشفشانی هستند؛ بنابراین پهنه لوت پتانسیل مهمی برای انواع کانی‌سازی مس پورفیری، مس-طلای همراه با اسپیکولاریت (IOCG)، سولفید توده‌ای نوع قبرس، مس رگه‌ای، قلع و تنگستن مرتبط با توده‌های احیایی سری ایلمنیت، کانی‌سازی‌های طلای اپی‌ترمال، رگه‌های سولفید توده‌ای، اسکارن‌ها دارد (Karimpour et al., 2011). همچنین ذخایر غیرفلزی چون بنتونیت و کائولن در این پهنه مورد شناسایی و پژوهش قرار گرفته‌اند (Karimpour et al., 2008; Malakzadeh-Shafaroudi et al., 2015).

سنگ‌های گرانیتوئیدی کراتاسه بالایی و الیگوسن (احمدی روحانی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Rosenberg, 1981) شامل سینوگرانیت، گرانیت، مونزوگرانیت و دیوریت بیشتر محدوده مورد مطالعه را دربر گرفته‌اند. سنگ‌های دگرگونی شامل اسلیت، فیلیت، ماسه‌سنگ دگرگونی و چرت در شمال منطقه رخنمون دارند. اسکارن‌ها در همبری با پهنه‌های گسلی و توده‌های نفوذی و مرمر در مجاورت توده‌های نفوذی دیده می‌شوند. سنگ‌های آتشفشانی انوسن با ترکیب آندزیت و آندزیت‌بازالت بیشتر در خاور و شمال محدوده دیده می‌شوند (شکل ۲). دایک‌های اسیدی و بازیک با روند NW-SE و NE-SW در بخش‌های مختلف منطقه بروزند دارند. رگه‌های تورمالین با ستبراهای متفاوت به ویژه در بخش جنوبی فراوان یافت می‌شوند. کانی‌سازی‌های مس، آهن، طلا و باریت هم‌روند با پهنه‌های دگرسانی در منطقه دیده می‌شوند.

پس از اعمال فیلترهای بالا، شکستگی‌های اصلی استخراج، جانمایی و به صورت رقمی در قالب Shape File توسط نرم‌افزار ArcMap روی داده اسپات ۵- رسم و برای انجام تحلیل‌های لازم در مراحل بعدی کار آماده شد (شکل ۴ - الف). به منظور تحلیل شکستگی‌های رسم شده، آزمایشات خطواره‌های اصلی به دست آمد و نمودار گل سرخی (Rose Diagram) آنها رسم شد (شکل ۴ - ب). بر پایه نمودار گل سرخی بالا، سوی بیشتر گسل‌های موجود در منطقه به صورت شمال باختر - جنوب خاور (NW-SE) با آزمایشات N110 است. در مطالعات یاد شده این دسته از خطواره‌ها کلاس A (Class-A) نامیده می‌شود. دسته‌ها و کلاس‌های دیگری نیز در این نمودار دیده می‌شوند؛ ولی فراوانی آنها در برابر خطواره‌های کلاس A قابل مقایسه نیست. با توجه به نمودار رسم شده (شکل‌های ۴ - الف و ب) آرایه شکستگی‌ها در منطقه یک سیستم برشی ساده را تداعی می‌کند. طرح نمادین از سازوکار سامانه برشی ساده در شکل ۳ - ج نشان داده شده است. شکستگی‌ها در این سامانه به‌طور تپیک در یک پهنه گسلی شکننده (Brittle) گسترش می‌یابند (Bartlett et al., 1981). برای مقدار زاویه اصطکاک داخلی میزان Φ ۳۰ درجه بوده (Jaeger et al., 2007) و بر این اساس δ دارای زاویه ۴۵ درجه نسبت به پهنه گسلی است که موازی با مؤلفه γ است؛ در این سیستم، R شکستگی‌های رابدل و R' رابدل‌های مزدوج (Conjugate) را مشخص می‌کنند.

۲-۳ - آشکارساز کل خطواره‌ها (گسل‌ها و درزه‌ها)

Total lineament (faults and joints) mapping: افزون بر استخراج خطواره‌های اصلی، به منظور انجام مطالعات دقیق‌تر، درزه‌های موجود در منطقه نیز استخراج، اندازه‌گیری و به صورت رقمی رسم شدند. بدین منظور تصاویر فیلتر شده حاصل از مطالعات انجام شده در بخش پیشین، به ویژه روش نمایش داده شده در شکل ۳ - ث مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از این روش، ۳۴۷۴ درزه استخراج و رسم شد (شکل ۴ - پ) و به منظور تحلیل این درزه‌ها آزمایشات آنها به دست آمد و نمودار گل سرخی برای همه خطواره‌ها رسم شد (شکل ۴ - ت).

همان‌گونه که در نمودار گل سرخی بالا (شکل ۴ - ت) دیده می‌شود، افزون بر سوی شمال باختر - جنوب خاور (NW-SE) یا کلاس A، امتداد اصلی دیگری نیز دیده می‌شود؛ این امتداد دارای آزمایشات N-40 و سوی شمال باختر - جنوب خاور است که در این مطالعات انجام شده نام کلاس B برای آن در نظر گرفته شده است. به منظور درک بهتر سازوکار عملکرد درزه‌ها و گسل‌ها در بخش‌های مختلف منطقه (و با توجه به تعداد بالای درزه‌ها)، کل منطقه به ۹ بخش مساوی تقسیم شد (شکل ۵ - الف)؛ سپس برای هر بخش، آزمایشات خطواره‌ها شامل گسل و درزه به دست آمد و نمودار گل سرخی هر بخش جداگانه رسم (شکل ۵ - ب) و تحلیل‌های لازم بر پایه این نمودار انجام شد. همان‌گونه که در شکل ۵ - ب دیده می‌شود، در همه بخش‌ها به جز بخش C، دو کلاس از خطواره‌ها (کلاس A و کلاس B) کاملاً از هم تفکیک شده است. در بخش‌های ۹ گانه بالا (به جز بخش C) خطواره‌ها با امتداد NW-SE (خطواره‌های کلاس A) فراوانی بیشتری دارند و سوی اصلی هستند. با توجه به شکل‌های ۵ - الف و ب، کلاس A و کلاس B سوهای اصلی را برای همه خطواره‌ها شامل درزه‌ها و گسل‌ها در این منطقه نشان می‌دهند.

۲-۳ - تحلیل فرکتال نقشه شکستگی‌های منطقه مورد مطالعه

تحلیل فرکتال در محدوده مورد مطالعه، به منظور تحلیل کمی ویژگی‌های مکانی شکستگی‌های موجود، تعیین بعد فرکتال، شناخت میزان نفوذپذیری، ارتباط میان شکستگی‌ها و همچنین نقش آنها در شکل‌گیری پهنه‌های دگرسانی در منطقه انجام شد.

واژه فرکتال مشتق شده از واژه لاتین Fracture به معنی سنگ شکسته و خرد شده است که اولین بار توسط Mandelbrot (1983) معرفی شد. این واژه برای توصیف سطح سنگ‌های شکسته شده و نامنظم به کار برده شده است (Hirata, 1989) (Mandelbrot (1983) و Brown and Scholz (1985) نشان دادند که هندسه سطح شکستگی سنگ‌ها، برای نمونه درزه‌ها و گسل‌ها فرکتال هستند. در واقع، فرکتال

کرنال خود مشخص می‌شوند (Weinhaus, 2014). به عنوان نمونه کرنال‌هایی آورده شده در زیر به ترتیب نشان‌دهنده و آشکارکننده لبه‌های عمودی (KV) و لبه‌های افقی (Kh) در یک تصویر هستند (Kim and Casper, 2013):

$$K_v = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Kv = کرنال برای آشکارسازی لبه‌های عمودی

$$K_h = \begin{vmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}$$

Kh = کرنال برای آشکارسازی لبه‌های افقی

اولین فیلتری که برای مشخص کردن خطواره‌های اصلی مورد استفاده قرار گرفت، یک فیلتر بالاگذر (High-Pass) بود. فیلترهای بالاگذر (High-Pass) مکانی هستند که برای واضح کردن (Sharpening) و صاف کردن (Smoothing) تصاویر، استفاده می‌شوند. این فیلترها اجازه می‌دهند ارزش‌های خاکستری با بسامد بالا (مناطق دارای ارتفاع) نسبت به بخش‌های پست‌تر برجسته‌تر شود و بنابراین تصاویر حاصل، جزئیات بیشتری از ساخت‌های خطی را قابل مشاهده بسازند (بابا احمدی، ۱۳۸۸؛ Jensen, 1996). در نرم‌افزار ER-Mapper در منوی فیلترهای بالاگذر (High-Pass) استفاده از فیلتر آشکارکننده لبه (Sharpen Edge) با ماتریس 11×11 و اعمال آن روی هر سه باند RGB داده اسپات-۵ تا حد زیاد می‌تواند موجب آشکارسازی خطواره‌ها شود (شکل ۳ - ت).

به منظور رده‌بندی یک تصویر، فیلترهای آستانه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. یک فیلتر آستانه (Threshold) این قابلیت را دارد که تصویری با همبری و مقادیر متوازن در آستانه مورد نظر تولید کند. آستانه‌گیری شامل محدود کردن مقادیر پیکسل نسبت به مقادیر باقیمانده در محدوده‌های خاص است. این کرنال‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند تا در حد بیشینه، پاسخگوی آشکارسازی و اجرای لبه‌ها به صورت افقی و هم عمودی در شبکه پیکسلی باشند. در این حالت یک کرنال برای دو سوی عمود بر هم استفاده می‌شود.

فیلتر سوبل (Sobel) یک فیلتر پایین‌گذر ۲ بعدی است که در یک تصویر تأکید به نواحی با بسامد بالا داشته و در واقع منطق بر لبه‌هاست. در سامانه تصویر رنگی RGB، استفاده همزمان از فیلترهای استاندارد شامل یک فیلتر آستانه ۳ در باند R و فیلتر سوبل-۲ در باندهای G و B داده RGB اسپات-۵ تا حد زیادی می‌تواند خطواره‌های اصلی و فرعی را مشخص کند. همچنین برای آشکارسازی بهتر خطواره‌ها فیلتر جهت‌دار (Directional) با زاویه ۴۵ درجه در سوی شمال خاور (NE) و عمود بر روند اصلی بیشتر خطواره‌های موجود در منطقه (NW-SE) انتخاب و به کار برده شد (شکل ۳ - ث).

- ماتریس عددی برای کرنال آستانه ۳- به صورت 3×3 استفاده شده در باند R به صورت زیر است:

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 3 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

- ماتریس عددی برای کرنال سوبل-۲ به صورت 3×3 به کار برده شده برای باندهای G و B:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 1 & -1 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \\ 3 & -1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \\ 3 & -1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 2 & 0 & 2 \\ 3 & -1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 3 & -1 & 1 \end{vmatrix}$$

- ماتریس عددی برای کرنال فیلتر جهت‌دار با زاویه ۴۵ درجه (NW) به صورت 3×3 به کار برده شده برای هر سه باند:

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \\ 3 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 3 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 3 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

Gonzato et al., 1998; Ram and Roy, 2005; Fagereng, 2011; Liu et al., 2015)، بود یا نبود مدل فرکتال در شبکه شکستگی‌های منطقه خاور بجنستان مورد ارزیابی قرار گرفت. در مطالعه انجام شده در خاور بجنستان به منظور دقت بیشتر و به کمترین میزان رساندن خطاهای محاسباتی در رسم کنتورهای مشتق شده از بعد فرکتال، کل ناحیه با مساحت ۱۱۰ کیلومتر مربع (10×11)، به ۴۲ مربع مساوی تقسیم‌بندی شد به طوری که هر سلول مساحتی به صورت 1700×1700 متر مربع را شامل شد. برای محاسبه بعد فرکتال، مقادیر شکستگی مربوط به هر سلول مربعی به نرم‌افزار فراکت آنالیز (Fractanalysis) وارد شد. بر پایه نتایج به دست آمده، بیشترین مقدار بعد فرکتال در ناحیه مورد مطالعه، ۱/۵۷ و پایین‌ترین مقدار آن ۱/۰۸ به دست آمده است. میانگین بعد فرکتال برای کل منطقه ۱/۳۵ به دست آمد. جزئیات مطالعات فرکتالی منطقه توسط افشارنجفی و همکاران (۱۳۹۴) بررسی شده است. به منظور تفسیر نتایج، مقایسه و درک بهتر چگونگی توزیع مقادیر به دست آمده بعد فرکتال، نقشه کنتوری (Countour map) حاصل از توزیع فرکتال رسم شد (شکل ۶- الف) این نقشه می‌تواند افزون بر نمایش توزیع بعد فرکتال، برای مقایسه چگونگی توزیع شکستگی‌ها با چگونگی گسترش پهنه‌های دگرسانی و تشکیل کانی‌سازی در منطقه نیز مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۳. تحلیل خطواره‌ها با استفاده از متغیرهای آماری شامل محاسبه شدت، چگالی و تقاطع شکستگی‌ها

از جمله متغیرهای کاربردی که در محاسبات آماری به منظور تحلیل خطواره‌ها استفاده می‌شود، می‌توان به متغیرهای شدت یا تراکم (Intensity) و چگالی یا تجمع (Density) اشاره کرد که توسط پژوهشگران مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (غلام‌زاده، ۱۳۹۳؛ Greenbaum, 1985؛ Xypolias and Koukouvelas, 2004). همچنین محاسبه نقاط تلاقی شکستگی‌ها (In-tersection)، همراه با دو متغیر یادشده، متغیر کاربردی دیگریست که افزون بر میحث تحلیل شکستگی‌ها، در بحث اکتشاف ذخایر معدنی نیز کاربرد ویژه دارند. همه این متغیرها در واحد سطح (مساحت واحد) تعریف می‌شوند. شدت یا تراکم (I) بیانگر مجموع طول شکستگی‌ها در واحد سطح، تجمع (p) برابر با تعداد شکستگی‌ها در واحد سطح و نقاط تلاقی نشان‌دهنده تعداد نقاط تلاقی شکستگی‌ها در واحد سطح است. به منظور انجام محاسبات بالا، تعریف واحد سطح امری ضروری است؛ به عبارت دیگر کل محدوده مورد مطالعه باید شبکه‌بندی شود؛ در رسم یک شبکه مناسب، گسترش منطقه و مقدار پخش شدگی مکانی شکستگی‌ها باید در نظر گرفته شود. گسترده بودن محدوده، ابعاد بزرگ‌تر شکستگی‌ها و تجمع بالای آنها در یک یا چند ناحیه، انتخاب ابعاد کوچک‌تر را برای سلول‌های شبکه ایجاب می‌کند. با توجه به وضعیت تراکم شکستگی‌ها در منطقه، برای به دست آوردن متغیرهای یاد شده از شبکه رسم شده برای مطالعات فرکتال استفاده شد؛ سپس متغیرهای تراکم، تجمع و نقاط تلاقی برای هر سلول به صورت جداگانه به دست آمد. به منظور نمایش بهتر تغییرات مکانی تراکم، تجمع و نقاط تلاقی خطواره‌ها، مقادیر هر یک از متغیرها به صورت نقشه منحنی‌های تراز تهیه شد. شکل‌های ۶- ب، پ و ت به ترتیب نقشه منحنی‌های میزان مربوط به تراکم، تجمع و نقاط تلاقی شکستگی‌ها را برای محدوده خاور بجنستان نشان می‌دهند. در نقشه شدت یا تراکم طول خطواره (شکل ۶- ب)، بالاترین تمرکز طول در جنوب خاور و شمال باختر منطقه به ترتیب دیده می‌شود. همچنین بخش کوچکی در شمال باختر منطبق با محدوده روستای تلخابوند (شکل ۲) دارای تمرکز شکستگی‌ها با طول بیشتر است. در نقشه چگالی یا تجمع، محاسبه فراوانی خطواره‌ها در واحد سطح (Greenbaum, 1985) به صورت نقشه هم‌تراز تمرکز خطواره‌ها نشان داده شده است (شکل ۶- پ). این تحلیل با شمارش تعداد خطواره‌های موجود در سطح مشخص شده انجام می‌گیرد؛ در محاسبه میزان تجمع اگر اندازه سلول‌های شبکه افزایش یابد، فراوانی مناطق تراکم بالا هم افزایش می‌یابد. با توجه به این نقشه، بخش جنوب خاوری منطقه، بیشترین تراکم خطواره‌ها را دارد. این منطقه از دید تطابق، همخوانی فراوانی با میزان شدت خطواره‌ها (شکل ۶- ب) نشان می‌دهد.

یک واژه کلی برای معرفی خودتشابهی است و به عنوان زیرشاخه‌ای از تحلیل مختلط برای رفع ضعف‌های هندسه اقلیدسی در بیان و مدل‌سازی از پدیده‌های طبیعی، بسط و گسترش یافته است. بعد فرکتالی، متغیری برای بررسی میزان پیچیدگی میان داده‌هاست و برخلاف بعد اقلیدسی که یک عدد طبیعی است، می‌تواند به صورت یک عدد حقیقی باشد. هدف هندسه فرکتالی، به دست آوردن و یافتن بعد فرکتالی برای مطالعه بهتر و پیش‌بینی رفتار آینده مجموعه‌ای از داده‌هاست (غلام‌زاده، ۱۳۹۳). به طور کلی شکل هندسی یک فرکتال دارای سه ویژگی مهم است: ۱) دارای ساختاری خودمشابه باشد؛ برای نمونه بخش‌هایی از تصویر همانند بخش‌های بزرگ‌تری از تصویر باشد؛ مانند گل کلم به این ویژگی Self-Similarity گفته می‌شود؛ ۲) به صورت تکراری قابل تولید باشد؛ یعنی با تکرار بتوان آن شی را بازتولید کرد. این ویژگی Iterative Formation نامیده می‌شود؛ ۳) بعد آن شی، اعشاری (Fractional Dimension) باشد (غلام‌زاده، ۱۳۹۳). در ضمن باید به این نکته دقت داشت که هر خود تشابهی (Self-similarity) الزاماً یک فرکتال نیست؛ برای نمونه می‌توان به خط راست (دارای بعد یک) یا صفحه شطرنجی (دارای بعد ۲) اشاره کرد که ویژگی‌های آنان با هندسه اقلیدسی کاملاً قابل توجیه است.

در دهه‌های اخیر، مفهوم فرکتال به طور گسترده‌ای در بسیاری از مطالعات، برای نمونه تحلیل‌های ویژگی‌های کمی مکانی و تقسیم‌بندی شکستگی‌ها به کار برده شده است (La Pointe, 1988; Hirata, 1989; Davy et al., 1990; Gillespie et al., 1993; Velde et al., 1990 and 1991; Walsh and Watterson, 1993; Zhang and Sanderson, 1998; Odling et al., 1999; Volland and Kruhl, 2004; Seung-Ik et al., 2010). به طور سنتی، مطالعه و توصیف شبکه شکستگی‌ها به طور بنیادین بر شناخت و مشخص کردن ویژگی‌های دسته‌های شکستگی بر پایه عامل‌هایی چون سو، طول، فاصله، میزان پرشدگی توسط مواد و دیگر موارد مشابه متمرکز بوده است (Rives et al., 1992; Bons, 2001; Kim et al., 2001; Kim and Park, 2006; Seung-Ik et al., 2010). شکستگی‌ها می‌توانند به عنوان کلیدی شاخص در مطالعات تکوینی زمین‌ساخت ناحیه‌ای در نظر گرفته شوند؛ اما خود می‌توانند یک فاکتور کنترلی برای شناخت تغییر شکل در توده سنگی و میزان نفوذپذیری هم باشند (La Pointe, 1988; Odling, 1992 and 1997; Odling et al., 1999; Berkowitz, 2002; Kim and Park, 2006; Baghbanan and Jing, 2007; Seung-Ik et al., 2010). همچنین در تئوری نفوذ پذیری (Percolation theory) بعد فرکتال به منظور مشخص کردن میزان ارتباط میان شکستگی‌ها استفاده شده است (Feder, 1988; Barton, 1995; Seung-Ik et al., 2010).

همچنین پژوهشگران در سال‌های اخیر با انجام تحلیل بر روی الگوهای شکستگی گسل‌ها و به ویژه گسل‌های فعال و جوان دریافته‌اند که این سامانه‌ها از الگوی فرکتالی با خود مشابهی آماری پیروی می‌کنند (King, 1983; Aviles and Scholz, 1987; Hirata, 1989; Barton, 1995; Poulimmenos, 2000; Badagli, 2002) و بسیاری از آنها از مدل فرکتال برای بررسی ارتباط میان متغیرهای خاص الگوهای گسلی مانند طول گسل‌ها، میزان جابه‌جایی، مقدار بازشدگی، فاصله میان گسل‌ها و چگونگی توزیع آنها در مقیاس‌های مختلف استفاده کرده‌اند (Korvin, 1992; Turcotte, 1992; Ghosh and deamen, 1993). برای نشان دادن اینکه مجموعه‌ای از داده‌ها دارای الگوی فرکتالی است، می‌توان یک بعد فرکتالی برای آن یافت تا مطالعه و پیش‌بینی رفتار مجموعه داده در آینده آسان‌تر باشد (غلام‌زاده، ۱۳۹۳).

در این بخش، برپایه نتایج مطالعات انجام گرفته و نقشه شکستگی‌های تهیه شده بر پایه داده‌های دورسنجی در مراحل پیشین و با به کارگیری روش شمارش مربعات (Box counting) که متداول‌ترین روش در تحلیل فرکتالی گسل‌هاست و توسط بسیاری از پژوهشگران به کار گرفته شده است (Mandelbrot, 1983; Hirata, 1989; Turcotte, 1992; Idziak and Teper, 1996; Cello, 1997;

به سوی شمال خاور دارند. طول اثر گسل ها متغیر است و از ۵ تا ۳۰۰ متر با فراوانی متفاوت دیده می شوند. دایک های فلسبیک و دیابازی در گرانیتویدهای منطقه نفوذ کرده اند. این دایک ها افزون بر صحرا، در تصاویر ماهواره ای نیز قابل ردیابی هستند (شکل ۷- پ و ت). بیشتر دایک های منطقه در امتداد شکستگی های اصلی جایگزین شده اند. جوان تر بودن دایک های دیابازی با توجه به اینکه در برخی موارد دایک های فلسبیک را قطع کرده اند (شکل ۷- ت) دیده می شود. دایک های NW-SE فلسبیک و دیابازی هستند؛ اما دایک های NE-SW تنها ترکیب دیابازی دارند.

به طور کلی گسل های منطقه مورد مطالعه همان گونه که در مطالعات دورسنجی نیز مشخص شد شامل دو دسته با روند شمال باختری- جنوب خاوری و شمال خاوری- جنوب باختری هستند. دسته با روند شمال باختری- جنوب خاوری، روند چیره منطقه و به موازات دایک ها و رگه های دیابازی و فلسبیک منطقه هستند. این توازی نشان دهنده این است که این گسل ها در ابتدا به فرم درزه های کششی بوده اند؛ اما القای حرکت سبب تبدیل آنها به گسل شده است. تشکیل شکستگی های با زاویه ۱۵ تا ۲۰ درجه ساعت گرد از این دسته گسل ها نشان دهنده چرخش میدان تنش در ناحیه است. دسته دوم گسل های منطقه دارای روند شمال خاوری- جنوب باختری هستند و تنها برخی دایک های دیابازی در این راستا دیده می شوند. نمودارهای گل سرخی رسم شده حاصل از داده های صحرایی در شکل ۸ چگونگی توزیع گسل ها و شکستگی ها (شکل ۸- الف) و دایک های موجود در منطقه (شکل ۸- ب) و امکان مقایسه میان این دو عارضه ساختاری را نشان می دهد. همان گونه که در شکل ۸- الف دیده می شود، دو دسته دایک در منطقه وجود دارند که امتداد چیره آنها NW-SE و به موازات گسل های اصلی هستند؛ دایک های با امتداد NW-SE ترکیب دیابازی و فلسبیک و بیشتر آنها شیب زیاد دارند و میانگین شیب آنها ۸۵ درجه است. دسته دیگر دایک ها امتداد NE-SW دارند. این دایک ها از دید فراوانی بسیار کمتر از دسته پیش هستند و تنها ترکیب دیابازی دارند.

نتایج حاصل از برداشت های صحرایی نیز تأییدکننده این موضوع است که دسته شکستگی های NW-SE از دید فراوانی روند اصلی منطقه هستند و به صورت نیمه موازی با گسل های اصلی ظاهر شده اند. هر دو دسته شکستگی اصلی معرفی شده در منطقه، ابتدا به صورت درزه های کششی تشکیل شده و پس از آن با ادامه تنش به صورت گسل درآمده اند. شواهد نشان دهنده این رخدادها، وجود دایک ها (شکل ۸- ب) و رگه های موازی با شکستگی ها و گسل های منطقه، وجود ساختارهای درختی در پهنه های تخریب پایانه ای و همچنین وجود عدسی هایی در پهنه های تخریب اتصالی هستند. همچنین فعالیت دوباره گسل ها از وجود خش لغزش های گسلی با سوی حرکت متفاوت به ویژه در سطوح گسل های شمال باختری- جنوب خاوری به خوبی دریافت می شود (افشارنجفی و همکاران، ۱۳۹۴). شواهد صحرایی موجود در منطقه تا حدودی بیانگر چگونگی تشکیل شکستگی های منطقه هستند. شواهد کینماتیکی موجود، روابط سنی یاد شده را نشان می دهند: (۱) شکستگی های NW-SE جوان تر از دایک ها و رگه های هم روند خود هستند، چون درون دایک ها و رگه ها شکل گرفته اند. (۲) شکستگی های NE-SW نیز جوان تر از دایک های اخیر هستند؛ چون درون آنها نیز تشکیل و حتی سبب جابه جایی آنها به صورت چپرو نیز شده اند.

با توجه به شواهد صحرایی، برای همه روندهای گسلی، دو مؤلفه حرکتی امتداد لغز راسترو و امتدادی چپرو تعیین شد. با توجه به شکل ۳- ج، دو گسل راسترو موجود در جنوب و شمال توده گرانیتی خاور بجزستان به عنوان عامل برش (Y) رفتار می کند و سپس القای حرکت روی این گسل ها در نتیجه چرخش تنش های زمین ساختی، سبب ایجاد شکستگی های دسته A با زاویه ۱۰ تا ۱۵ درجه ای ساعت گرد و با مؤلفه امتدادی راسترو قابل مقایسه با شکستگی های نوع R از این سامانه می شود و تشکیل گسل های چپرو با روند شمال خاوری- جنوب باختری (دسته B) را می توان به عنوان R⁺ در نتیجه ادامه دگرریختی پیشرونده و القای حرکت روی شکستگی های نوع R دانست.

هدف از استفاده نقشه تراکم تقاطع خطواره ها، برآورد مناطقی از جهت گیری گوناگون خطواره هاست. اگر خطواره ها در یک منطقه یکدیگر را قطع نکنند، نقشه حاصل شده، یک نقشه ساده بدون کانتور تراکمی خواهد بود و این نشانگر این موضوع است که خطواره های منطقه اگر از دید طول کوتاه نباشند، تقریباً موازی تا نیمه موازی هستند. محاسبه تقاطع شکستگی ها همچنین به شناخت احتمال وجود یا قابلیت ایجاد مسیرهای عبوری سیال ها کمک می کند. نتیجه تحلیل تقاطع شکستگی ها به صورت نقشه منحنی های هم تراز در شکل ۶- ت آورده شده است. این شکل افزون بر همخوانی کلی با نقشه های هم تراز تراکم و تجمع (شکل های ۶- ب و پ)، با نقشه توزیع بعد فرکتال (شکل ۶- الف) نیز تطابق خوبی نشان می دهد.

۳-۴. پردازش داده ها با هدف آشکارسازی دگرسانی ها

به منظور تعیین انواع دگرسانی های موجود در منطقه، پردازش داده های ماهواره در خاور بجزستان انجام شده است (احمدی روحانی و همکاران، ۱۳۹۳). با پردازش داده های سنجنده استر (ASTER) و روش تحلیل طیفی نوع نقشه بردار زاویه طیفی (SAM) بسیاری از دگرسانی های موجود در منطقه از جمله دگرسانی های اپیدوتی- کلریتی با گستردگی بالا و دگرسانی های همایتی، سرسیتی، کائولینیتی و سیلیسی در بخش های مختلف محدوده آشکار شدند (شکل ۶- ث).

همچنین با استفاده از ایندکس های آشکارکننده کانی های دگرسانی، با توجه به وجود اسکارن و سنگ های کربناته در منطقه، وجود کانی های کربناته و دگرسانی های دارای کربنات با استفاده از ایندکس سنگ های کربناته (CI) و ایندکس کلسیت (CLI) (Pour and Hashim, 2012) روی داده استر مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به همانندی نتایج حاصل از پردازش دو ایندکس یاد شده، نتیجه حاصل از پردازش ایندکس کلسیت (شکل ۶- ج) نشانگر روند چیره واحدها و دگرسانی های کربناته از جمله واحدهای اسکارنی به صورت NW-SE همانند دیگر انواع دگرسانی های موجود در منطقه (شکل ۶- ث) است.

$$\text{Calcite Index (CLI)} = \frac{\left| \frac{\text{BAND6}}{\text{BAND8}} \right|}{\left| \frac{\text{BAND9}}{\text{BAND8}} \right|} \quad (1)$$

$$\text{Carbonate Index (CI)} = \frac{\text{BAND13}}{\text{BAND14}} \quad (2)$$

به منظور درستی سنجی پردازش های انجام شده با داده استر برای تفکیک پهنه های دگرسانی در محدوده مورد مطالعه به ویژه روش SAM، چک صحرایی از جمله روی پیکسل هایی با امتیاز بالا (پیکسل های تیره تر در روش SAM) انجام شد. در انتخاب این نواحی، نوع ترکیب سنگی و دگرسانی و ارتباط آنها با معدنکاری های کهن نیز مورد نظر بوده است. دگرسانی های همایتی در محدوده آهن تلخابوند، پروپیلینیک در محدوده علی آباد و آرژیلیک و سرسیستیک در محدوده مس کلاته گوک نشانگر درستی خوب پردازش ها است. مقایسه و بررسی نتایج حاصل از مطالعات فرکتال، متغیرهای آماری شکستگی ها و آشکارسازی انواع دگرسانی در منطقه (شکل ۶)، می تواند راهنمایی مناسب برای شناخت و مکان یابی توزیع کانی سازی در منطقه باشد.

۳-۵. مطالعات صحرایی

به منظور تأیید نتایج به دست آمده از پردازش های دورسنجی و بررسی وضعیت ساختارها و مطالعه پراکنش شکستگی ها به بررسی و برداشت داده های صحرایی در منطقه پرداخته شد. بیشتر اطلاعات برداشت شده شامل اطلاعات مربوط به امتداد، شیب، سوی شیب درزه ها، دایک ها، گسل ها و همچنین متغیرهای جنبشی روی سطوح شامل خش های گسلی، مقدار زاویه ریک و سوی ریک آنها و توجه به وضعیت گسل ها و دیگر ساختارهای موجود بوده است. در این ناحیه همه واحدهای سنگی به ویژه گرانیتوید بجزستان دچار شکستگی های فراوان بر اثر تنش های وارد شده به منطقه شده اند (شکل های ۷- الف و ب) و شکستگی های اصلی در این محدوده در مطالعات صحرایی بیشتر آزیموتی میان ۱۰۰ تا ۱۳۰ درجه و شیب میانگین ۸۵ درجه

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در مقایسه با داده‌های لندست ETM⁺ و مدل ارتفاع رقومی (DEM)، داده‌های اسپات ۵- با دو ویژگی آشکار و ارزشمند خود شامل تفکیک مکانی قابل توجه (۲/۵ متر) و دید استریویویک، ابزاری پایه، کاربردی و ارزشمند در زمینه استخراج خطوطاره‌ها هستند. داده‌های اسپات می‌توانند در زمینه آشکارسازی، تشخیص بیشتر خطوطاره‌ها و در نتیجه تحلیل ساختاری مرتبط با خطوطاره‌ها به ویژه در نواحی مانند خاور بجزستان که در آن توده‌های گرانیتویدی و دیگر واحدهای زمین‌شناسی به خوبی بروز یافته‌اند و پوشش گیاهی کمینه است، کمک شایانی کند. استفاده از فیلترهای آشکارسازی مکانی (Spatial filters) مانند فیلترهای High-Pass (فیلتر ۱۱*۱۱) و فیلترهای استاندارد (مانند Sobel و Threshold) در نرم‌افزار Er-Mapper روی داده اسپات-۵ این امکان را فراهم می‌سازد تا بتوان خطوطاره‌های اصلی (گسل‌ها) و فرعی (درزه‌ها) موجود در منطقه را به خوبی آشکارسازی و تحلیل کرد. در مطالعات انجام شده به وسیله پردازش داده‌ها در طی دو مرحله، دو دسته شکستگی اصلی در منطقه شناسایی شدند که بررسی‌ها و شواهد صحرایی نیز وجود این دو دسته را کاملاً تأیید می‌کند. دسته A دارای امتداد NW-SE و دسته B دارای امتداد NE-SW هستند. بررسی‌ها و شواهد صحرایی شامل پایانه‌ها، نوع تقاطع، روابط بریدگی و قطع شدگی دسته‌های مختلف نشان می‌دهد که گسل‌ها و درزه‌های موازی با آنها، دسته اصلی و اولیه در منطقه هستند که دسته شکستگی‌های A و B در اثر القای حرکت روی این گسل‌ها تشکیل شده‌اند.

نقشه شکستگی حاصل از مطالعات دورسنجی و صحرایی افزون بر کاربرد در تحلیل‌های زمین‌ساختی، نقش مهمی در شناخت نقش شکستگی‌های موجود در انتقال جریان سیال‌ها، ایجاد دگرسانی‌ها و در نتیجه کنترل کانی‌سازی توسط محلول‌های گرمایی دارند. به منظور بررسی و تحلیل ویژگی‌های شکستگی‌ها از جمله نفوذپذیری و ارتباط میان آنها و شناخت نقش آنها در تشکیل پهنه‌های کانی‌سازی در منطقه، تحلیل فرکتال بر پایه نقشه شکستگی‌های حاصل از پردازش داده‌ها به روش شمارش مربعات انجام گرفت. (Hirata, 1989) پیشنهاد کرد که حد بالای بعد فرکتال در هندسه شکستگی سنگ‌ها در حدود ۱/۶ است. در واقع این مقدار بالاترین حد بعد فرکتال در یک شبکه گسلی توسعه یافته (Mature) است. با توجه به میزان محاسبه شده بعد فرکتال در محدوده مورد مطالعه (میان ۱/۰۸ تا ۱/۵۷) و تعیین میزان متوسط آن (۱/۳۵)، با استفاده از الگوریتم شمارش مربعات (Box counting)، می‌توان نتیجه گرفت که شبکه گسلی در منطقه بجزستان هندسه فرکتال دارد.

همچنین افزایش در بعد فرکتال، یک شاخص برای نشان دادن گسترش بیشتر شاخه‌های گسلی، چگالی بالای شبکه گسلی و همچنین افزایش تغییر شکل در ناحیه است (Hirata, 1989). مقادیر بعد فرکتال در دو محدوده باختر (شمال باختر) و جنوب خاور محدوده مورد مطالعه افزایش می‌یابد. تجمع بعد فرکتال در این دو منطقه نشانگر تکامل و تغییرات ساختاری بیشتر و گسترش شاخه‌های گسلی در این مناطق است؛ بنابراین شبکه شکستگی در این مناطق گسترش یافته و بالغ است.

در تئوری نفوذپذیری (Feder, 1988; Barton, 1995) ارتباطی مستقیم میان بعد فرکتال و شبکه شکستگی‌ها در نظر گرفته شده است. این مفهوم که گسل‌ها و شکستگی‌ها قابلیت گسترده‌ای در تولید فضاها و مسیرهای سیالات گرمایی در پوسته دارند کاملاً شناخته شده و غیر قابل انکار است (Knipe, 1993; Sibson, 1994). تحلیل‌های آماری چون تراکم، تجمع و تحلیل تقاطع شکستگی‌ها، افزون بر تحلیل‌های ساختاری، اطلاعات کاربردی مفیدی در زمینه محاسبه ارتباطات میان شکستگی‌ها به ویژه تعیین مقدار نفوذپذیری سیال‌ها،

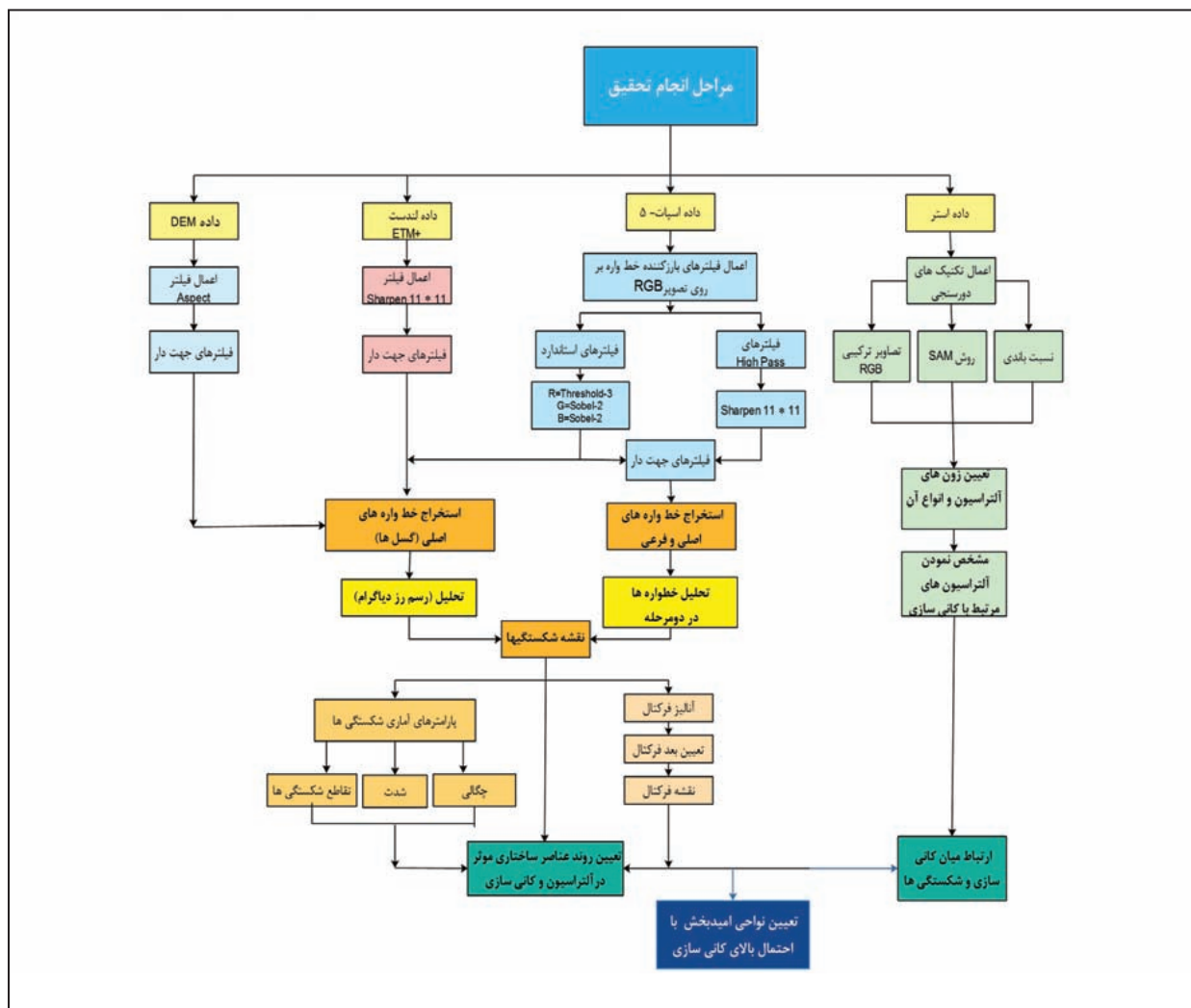
تشکیل دگرسانی و احتمال کانی‌سازی در آنها مشخص می‌کند. این اطلاعات کمک می‌کند تا افزون بر شناخت سامانه ساختاری اصلی منطقه، چگونگی ارتباط میان مسیرهای عبور سیال‌ها شناخته شود (Elfouly, 2000). نتیجه تحلیل تقاطع شکستگی‌ها به صورت نقشه منحنی‌های هم‌تراز در شکل ۶- ت افزون بر همخوانی کلی با نقشه‌های هم‌تراز تراکم (شکل ۶- ب) و تجمع (شکل ۶- پ)، با نقشه توزیع بعد فراکتال (شکل ۶- الف) نیز تطابق خوبی نشان می‌دهد و نشانگر چگونگی ارتباط میان مسیرهای عبور سیال‌ها و تمرکز آنها در دو ناحیه جنوب خاور محدوده با راستای شمال باختر- جنوب خاور و شمال باختر محدوده منطبق بر بخش شمالی توده اصلی گرانیتویدی بجزستان است. مقایسه تصویری نقشه‌های تراکم (شکل ۶- ب)، تجمع (شکل ۶- پ) و نقاط تلاقی خطوطاره‌ها (شکل ۶- ت) نشان می‌دهد که هر سه نقشه از بسیاری جهات تطابق و همخوانی بالایی دارند. برای نمونه نقشه تراکم، افزون بر نمایش بیشترین مقدار در دو ناحیه، همه بخش‌های دارای بیشترین نقاط تلاقی را نیز تحت پوشش قرار داده است. به عبارت دیگر در مناطقی که تراکم طول خطوطاره‌ها بیشتر است؛ امکان تلاقی خطوطاره‌ها با یکدیگر نیز بیشتر است. تطابق محدوده اکتشافی اسکارن آهن کلاته اوبی و مس کلاته کوک در جنوب خاور منطقه و بی‌هنجاری مس علی‌آباد در شمال توده گرانیتویدی (شکل ۲) با محدوده‌های با بیشترین میزان شدت و چگالی به‌روشنی بیان‌کننده ارتباط میان شکستگی‌ها با کانی‌سازی‌های موجود در منطقه است.

آشکارسازی دگرسانی‌های محدوده پردازش داده‌های استر (ASTER) منطقه با استفاده از روش‌های ترکیب باندی، نسبت باندی و تحلیل طیفی به روش SAM انجام شد. نتایج نشانگر وجود دگرسانی‌های پروپلیتیک با روند اصلی NW-SE و همچنین دگرسانی‌های آرژیلیک و فلیک در بخش خاوری و جنوب خاور محدوده منطبق بر محدوده کانی‌سازی‌های مهم در منطقه است (شکل ۶- ث) همچنین با توجه به فراوانی کانی‌سازی نوع اسکارن در منطقه و همراهی کانی کلسیت در دگرسانی پروپلیتیک، از ایندکس آشکارسازی کربنات برای مشخص کردن کانی‌های کربناته استفاده شد. در پردازش انجام شده مناطق گسترده‌ای با روند NW-SE و بخش‌هایی در جنوب خاور محدوده با میزان کربنات بالا مشخص شدند (شکل ۶- ج). نتایج پردازش‌های آشکارسازی دگرسانی، نشانگر انطباق آنها با روند شکستگی‌های اصلی منطقه و نتایج حاصل از تحلیل فرکتال و متغیرهای آماری در منطقه است.

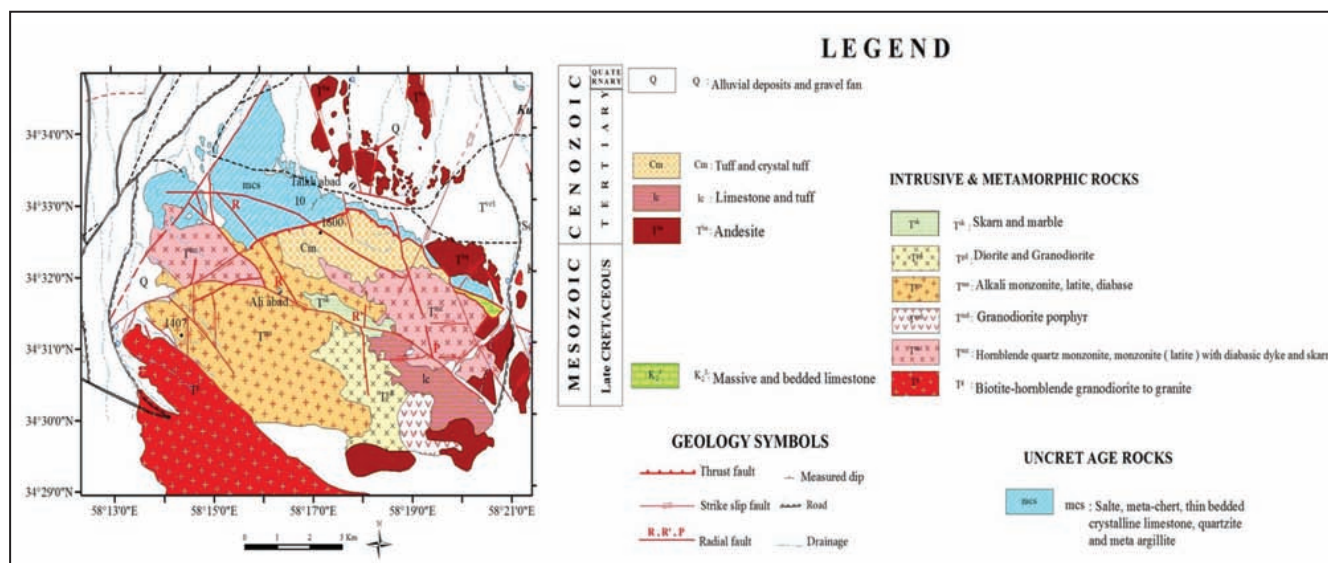
تلفیق اطلاعات حاصل از نتایج بیان شده (نقشه شکستگی‌ها) و تحلیل زمین‌ساختی آنها، آشکارسازی و شناخت انواع دگرسانی‌ها، تحلیل و اندازه‌گیری بعد فرکتال و محاسبات متغیرهایی چون: تراکم، تجمع و تلاقی خطوطاره‌ها، نشانگر احتمال بالای کانی‌سازی در طول شکستگی‌های با روند NW-SE است. حضور دو محدوده معدنی شناخته شده چون مس کلاته کوک و آهن کلاته اوبی و چندین بی‌هنجاری معدنی (اندیس مس علی‌آباد) در این روند تأییدکننده پردازش‌ها و نتایج حاصل و راهنمایی مفید برای شناسایی مکان‌های مستعد کانه‌زایی در مراحل اکتشاف تفصیلی در منطقه است.

سپاسگزاری

این مقاله در ارتباط با طرح پژوهشی به شماره ۱۸۳۰۰/۳ مورخ ۱۳۹۰/۴/۱۲ دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. نویسندگان مقاله از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به ویژه آقای دکتر جعفر طاهری مدیر کل اداره زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی شمال شرق کشور که در تهیه داده‌های لازم و انجام مراحل مختلف این پژوهش همکاری داشته‌اند؛ سپاسگزاری می‌کنند.

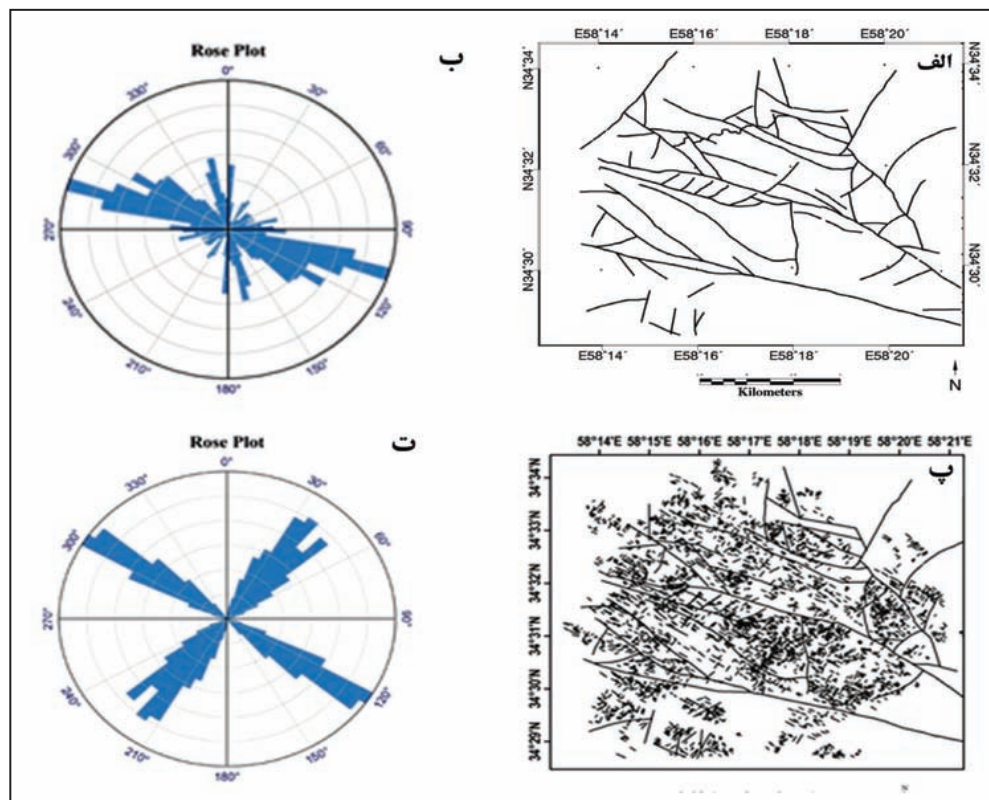
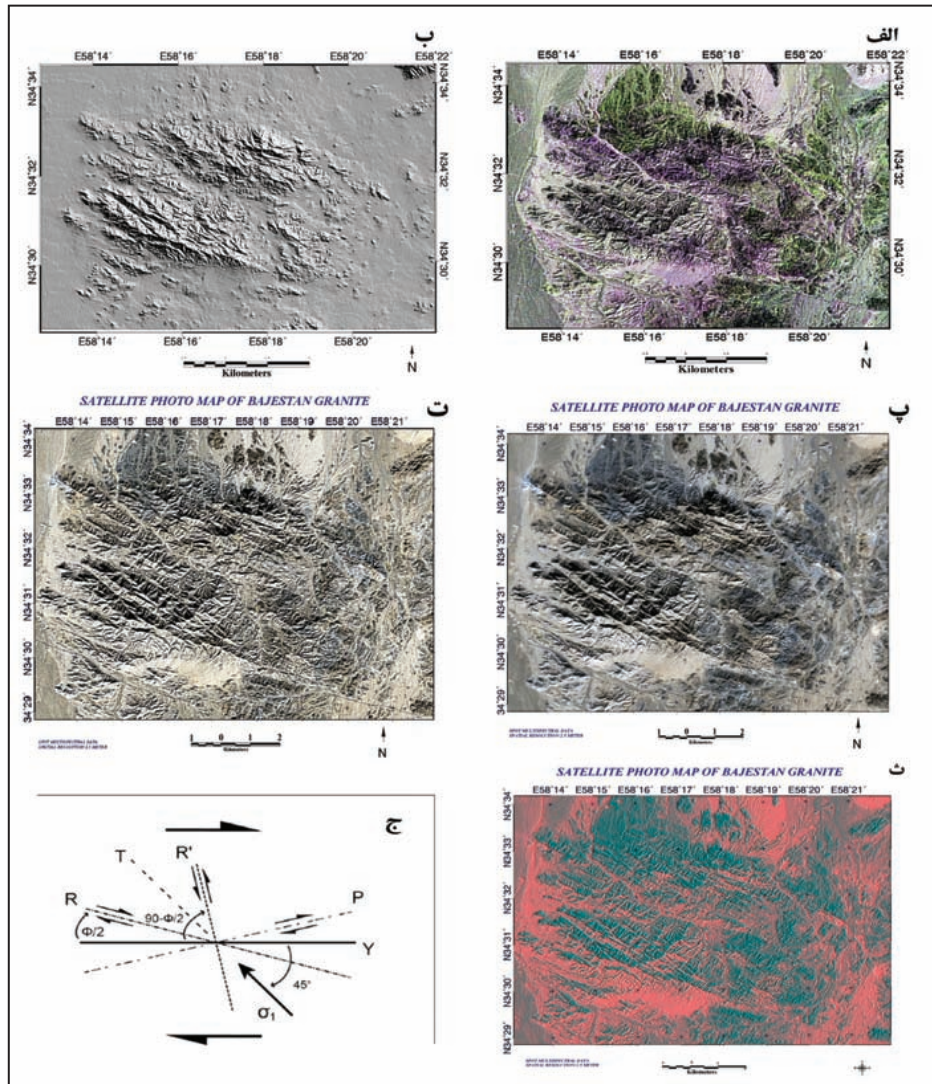


شکل ۱- نمودار نشان‌دهنده مراحل کار در این پژوهش.

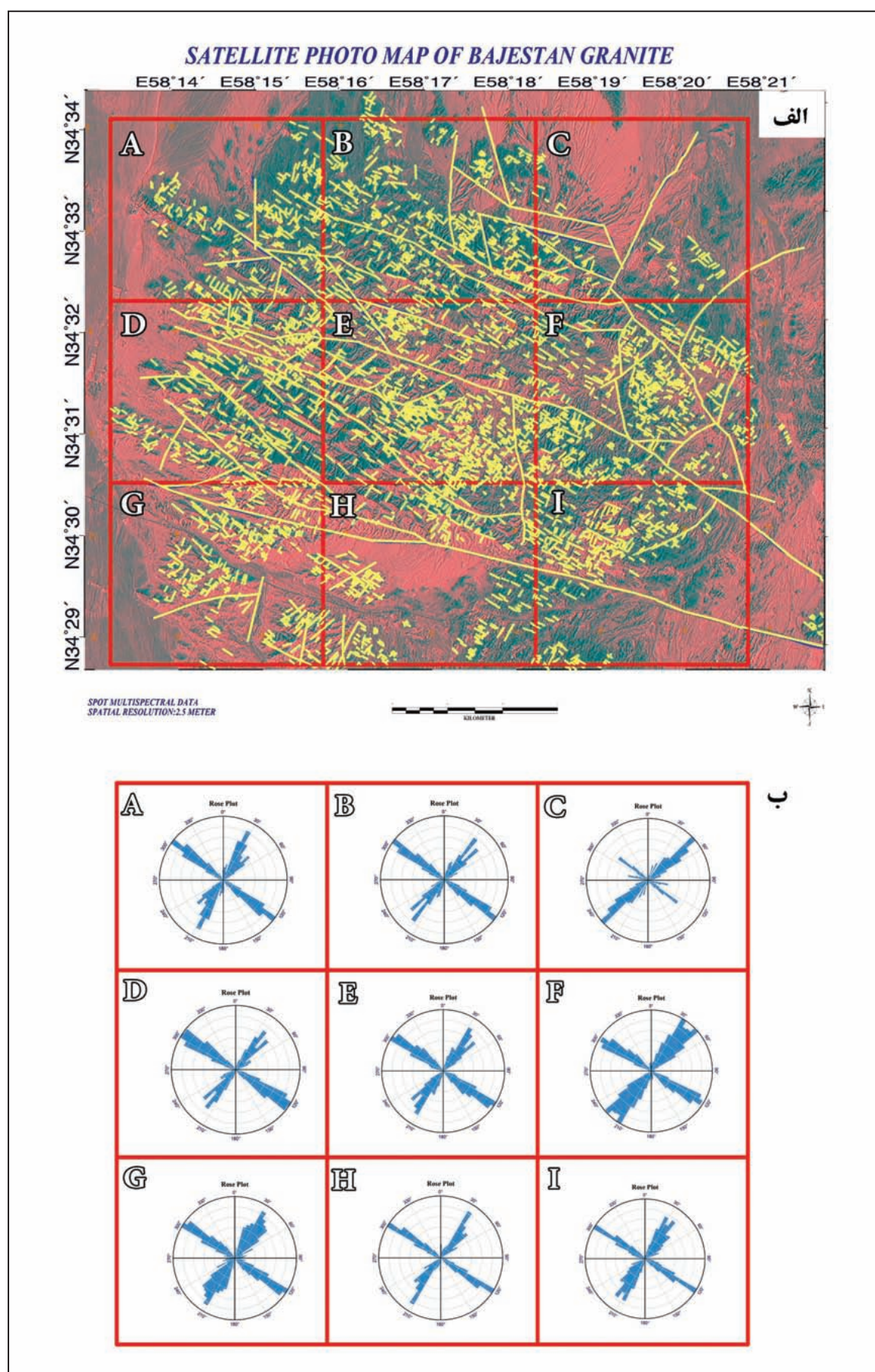


شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ساده شده از محدوده مورد مطالعه، حاصل تغییر و پیوستن دو نقشه زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ بجستان (عاشوری و همکاران، ۱۳۸۶) و فردوس (پورلطیفی، ۱۳۸۱).

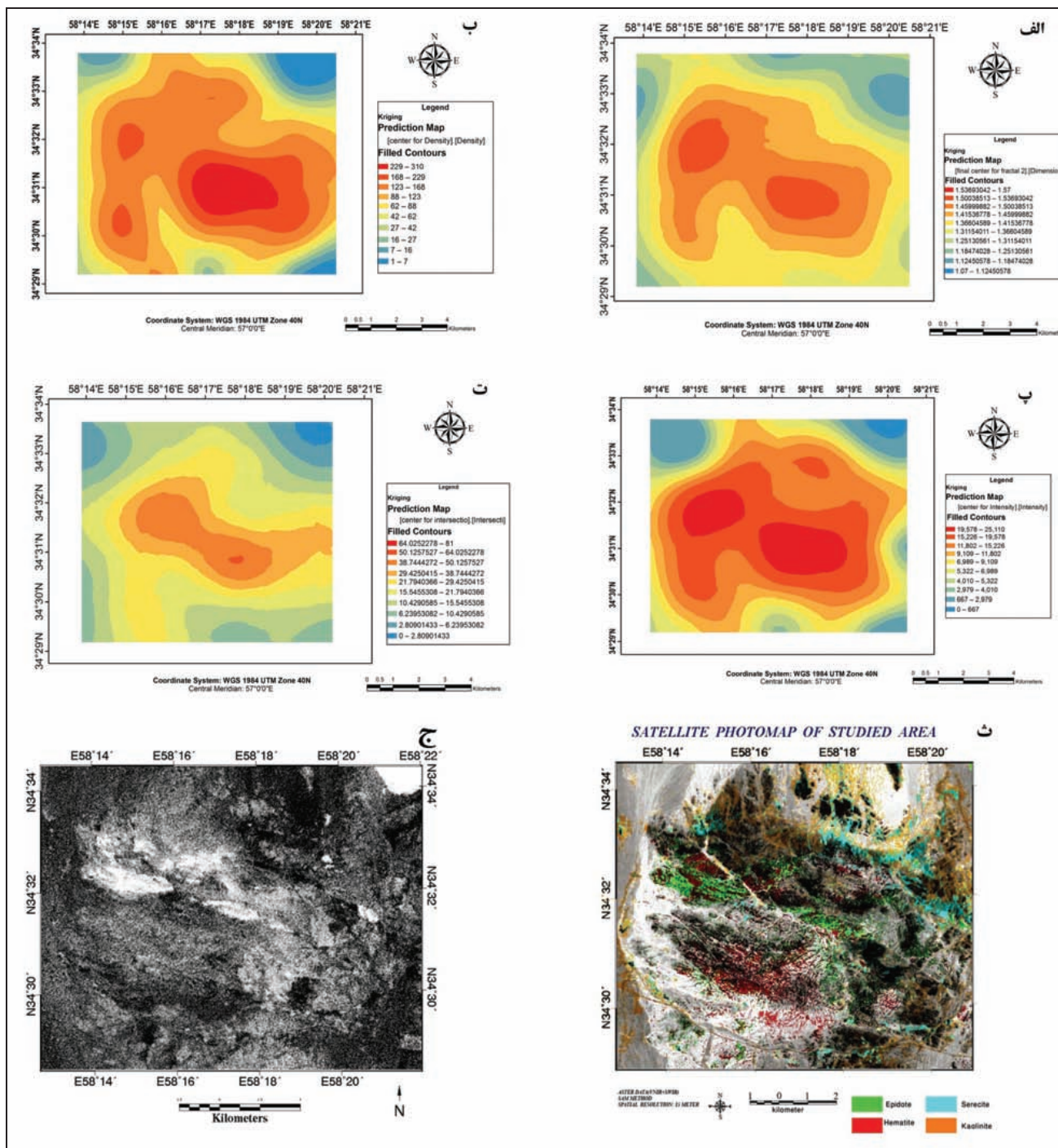
شکل ۳- الف) تصویر حاصل از اعمال فیلتر High-Pass روی داده لندست+ETM؛ ب) تصویر Hill shade حاصل از DEM محدودده مورد مطالعه با اعمال فیلتر Directional به صورت N90E؛ پ) تصویر RGB از داده اسپات-۵ محدودده مورد مطالعه پیش از اعمال فیلتر؛ ت) اعمال فیلتر Sharpen 11.11 روی تصویر اسپات-۵؛ ث) به کارگیری همزمان فیلترهای آستانه ۳ و سوبل ۲ برای آشکارسازی خطوطاره‌ها در محدوده مورد مطالعه روی داده اسپات-۵؛ ج) طرح نمادین از سازوکار سامانه برشی ساده.



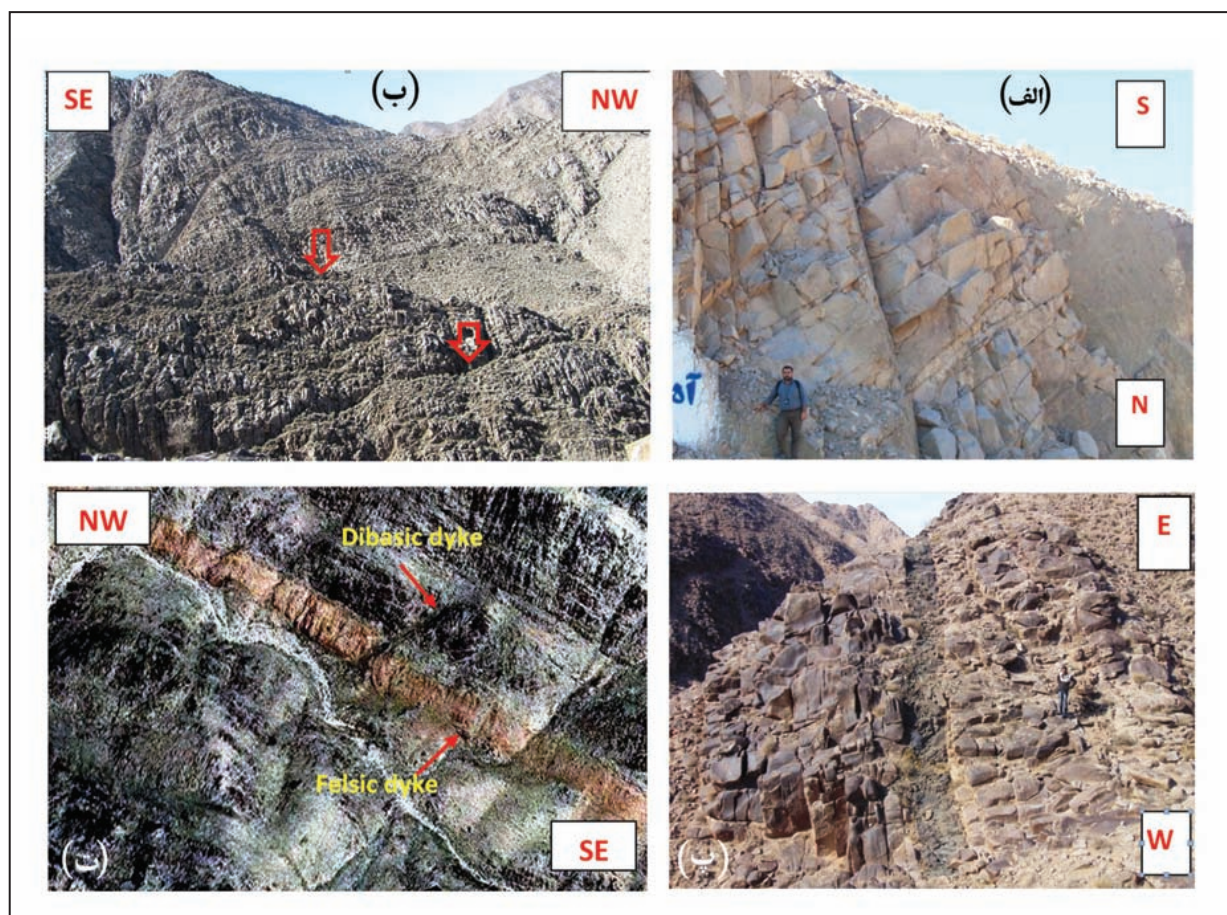
شکل ۴- الف) نقشه خطوطاره‌های اصلی (گسل‌ها) منطقه با استفاده از داده لندست، DEM و داده اسپات-۵؛ ب) نمودار گل سرخی (Rose Diagram) برای خطوطاره‌های اصلی منطقه؛ پ) نقشه گل سرخی برای همه خطوطاره‌های موجود در منطقه، استخراج شده از پردازش داده‌های اسپات-۵.



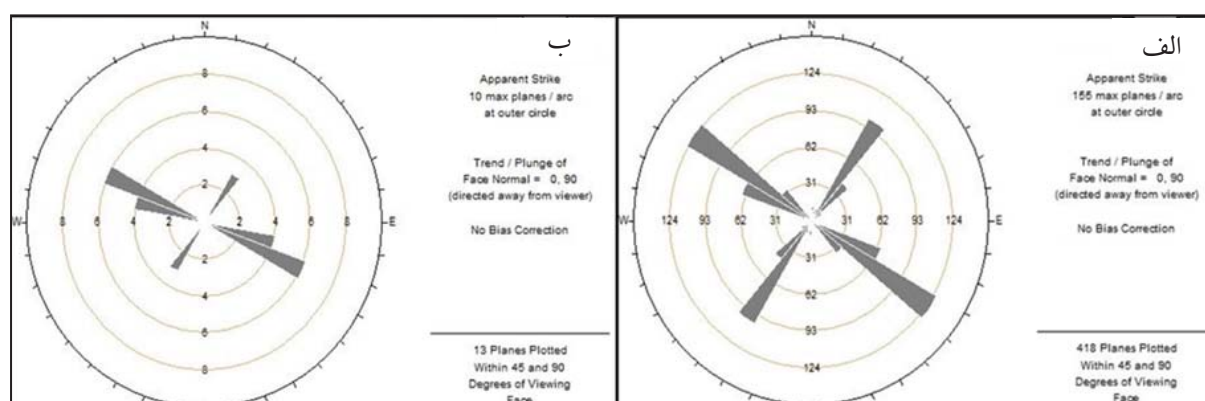
شکل ۵- الف) تقسیم محدوده مورد مطالعه به ۹ بخش مساوی برای انجام مطالعات دقیق روی همه خط‌واره‌ها در بخش‌های مختلف منطقه؛ ب) محاسبه آزمون و رسم نمودار گل سرخی برای هر بخش.



شکل ۶- بررسی روند توزیع بعد فرکتال، متغیرهای آماری و دگرسانی‌های موجود در منطقه با استفاده از پردازش داده‌های ماهواره در منطقه خاور بجنستان. الف) نقشه خطوط هم تراز مشتق شده از توزیع بعد فرکتال؛ ب) نقشه منحنی‌های هم تراز میزان تراکم (I) شکستگی‌های ساختاری منطقه مورد مطالعه، در این نقشه مجموع طول شکستگی‌ها در واحد سطح به دست آمده است؛ پ) نقشه منحنی‌های هم تراز میزان تجمع یا چگالی (p) شکستگی‌های ساختاری منطقه، این نمودار بر پایه تعداد شکستگی‌ها در واحد سطح رسم شده است؛ ت) نقشه منحنی‌های هم تراز تعداد نقاط تلاقی شکستگی‌های ساختاری در واحد سطح؛ این چهار نقشه بر پایه خطواره‌های استخراج شده از داده اسپات رسم شده است؛ ث) پردازش داده‌های استر به روش SAM برای آشکارسازی کانی‌های آیدوت-کلریت (پروپلیتیک)، سرسیت (فیلیک)، کانولینیت (آرژیلیک) و هماتیت (احمدی روحانی و همکاران، ۱۳۹۳)؛ ج) ایندکس آشکارسازی واحدهای دارای دگرسانی کربناته (با استفاده از ایندکس کلسیت) بر روی داده استر که نشانگر روند چیره NW-SE است.



شکل ۷- الف) انواع مختلف گسل‌ها و شکستگی‌ها (نشانه‌های سرخ) در محدوده مورد مطالعه؛ ب) شکستگی‌های ایجاد شده در سنگ‌های گرانیتوئیدی در جنوب محدوده مورد مطالعه؛ پ) دایک دیابازی برنزرد یافته همسو با سوی اصلی شکستگی‌ها NW-SE در مطالعات صحرایی. ت) تصویر ماهواره‌ای از یک دایک سبتر فلسیکی در سنگ‌های گرانیتوئیدی که به صورت همسو با سوی اصلی گسل‌ها NW-SE برنزرد یافته و به وسیله یک دایک دیابازی با سوی NE-SW قطع شده و بیانگر کهن‌تر بودن دایک‌های اسیدی در منطقه است؛



شکل ۸- نمودار گل سرخی حاصل از داده‌های صحرایی. الف) گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه؛ ب) نمودار دایک‌های موجود.

کتابنگاری

- احمدی روحانی، ر.، کریم‌پور، م. ح.، رحیمی، ب. و ملک‌زاده شفاوردی، آ.، ۱۳۹۳- بارزسازی پهنه‌های دگرسانی و ساختارهای خطی در محدوده خاور بجنستان با استفاده از پردازش داده‌های SPOT ASTER، و Landsat ETM+ داده‌های ژئوفیزیک: فصلنامه علوم زمین، سال بیست و چهارم، شماره ۹۴، زمستان ۹۳، صص. ۲۵۳ تا ۲۶۲.
- ارجمندزاده، ر.، ۱۳۹۰- مطالعات کانی‌سازی، ژئوشیمی، سن‌سنجی و تعیین جایگاه تکنوماگمایی توده‌های نفوذی در اندیس معدنی دهسلم و چاه شلغمی، بلوک لوت، شرق ایران، پایان‌نامه دکتر، دانشگاه فردوسی مشهد، ص. ۲۱۵.
- افتخارنژاد، ج.، ۱۳۵۹- تفکیک بخش‌های مختلف ایران از نظر وضع ساختمانی در ارتباط با حوضه‌های رسوبی: نشریه انجمن نفت، شماره ۸۲، صص. ۱۹ تا ۲۸.
- افشار نجفی، ص.، رحیمی، ب.، قائمی، ف. و احمدی روحانی، ر.، ۱۳۹۴- الگوهای آماری و فرکتالی آرایه شکستگی‌ها در توده گرانیتی شرق بجنستان بر پایه تکنیک‌های دورسنجی: پژوهش‌های دانش زمین، سال ششم، شماره ۴۲، زمستان ۱۳۹۴، صص. ۱ تا ۱۵.
- بابااحمدی، ع.، ۱۳۸۸- کاربردهای سنجش از دور (RS) در زمین‌شناسی، نشر آوای قلم، ۱۷۶.
- پورلطیفی، ع.، ۱۳۸۱- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ فردوس: انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- سامانی، ب. و اشتری، ش.، ۱۳۷۱- تکوین زمین‌شناسی ناحیه سیستان و بلوچستان: فصلنامه علوم زمین، شماره ۴، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- عاشوری، ع.، کریم‌پور، م. ح. و سعادت، س.، ۱۳۸۶- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ بجنستان: انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- غلام‌زاده، م.، ۱۳۹۳- تحلیل ساختاری و فرکتالی سیستم‌های شکستگی سنگ‌های آهکی ژوراسیک منطقه اخلمد، شمال غرب بینالود، با استفاده از داده‌های سنجش از دور و مطالعات صحرایی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۵۶ ص.

References

- Arlegui, L.E. and Soriano, M. A., 1998- Characterizing lineaments from satellite images and field studies in the central Ebro basin (NE Spain): *International Journal of Remote Sensing* 19: 3169–3185.
- Aviles, C. A. and Scholz, C. H., 1987- Fractal analysis applied to characteristic segments of the San Andreas fault: *Journal of geophys. Res* 92(B1): 331- 344.
- Babadagli, T., 2002- Scaling method to determine the fractal nature of 2-D fracture networks: *Journal of Math. Geol* 34: 647-670.
- Baghbanan, A. and Jing, L., 2007- Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44: 704–719.
- Bartlett, W. L., Friedman, M. and Logan, J. M., 1981- Experimental folding and faulting of rocks under pressure. *Tectonophysics* 79: 255-277.
- Barton, C. C., 1995- Fractal analysis of scaling and spatial clustering of fractures. In: Barton, C.C. and La Ponte, P.R. (ed.), *Fractals in the Earth Sciences*, Plenum Press, New York and London, p. 141–178.
- Berberian, M. and King G. C. P., 1981- Towards paleogeography and tectonic evolution of Iran: *Canadian Journal of Earth Science* 18: 210-265.
- Berberian, M., 1982- Aftershock tectonics of the 1978 Tabas-e-Golshan (Iran) earthquake sequence: a documented active 'thin-and-thick-skinned tectonic' case *Geophys: Journal R. astr. Soc* 68: 499–530.
- Berberian, M., Jackson, J. A., Qorashi, M., Khatib, M. M., Priestley, K., Talebian, M. and Ghafory-Ashtiany, M., 1999- The 1997 may 10 Zirkuh (Qa'emat) earthquake (Mw 7.1): faulting along the Sistan suture zone of eastern Iran: *Geophys. J.Int* 136: 671-694.
- Berkowitz, B., 2002- Characterizing flow and transport in fractured geological media. A review advances in *Water Resources* 25: 861–884.
- Bons, P. D., 2001- The formation of large quartz veins by rapid ascent of fluids in mobile hydrofractures: *Tectonophysics* 336: 1–17.
- Brown, S. R. and Scholz, C. H., 1985- Broad bandwidth study of the topography of natural surfaces: *d. Geophys. Res* 90: 12575-12582.
- Camp, V. and Griffis, R., 1982- Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran: *Lithos* 15: 221–239.
- Cello, G., 1997- Fractal analysis of a Quaternary fault array in the central Apennines, Italy: *Journal of Structural Geology* 19: 945-953.
- Davoudzadeh, M., Soffel, H. and Schmidt, K., 1981- On the rotation of the central-east-Iran microplate: *Neues Jahrbuch Geologie und Palaeontologie, Abhandlungen, Monatshefte* 3: 180-192.
- Davy, PH., Sornette, A. and Sornette, D., 1990- Some consequences of a proposed fractal nature of continental faulting: *Nature* 348: 56–58.
- Doglionni, C., Tonarini, S. and Innocenti, F., 2009- Mantle wedge asymmetries and geochemical signatures along W- and E-NE directed subduction zones: *Lithos* 113: 179–189.
- Drury, S. A., Kelley, S. P., Berhe, S. M., Collier, R. E. and Abraham, M., 1994- Structures related to Red Sea evolution in northern Eritrea: *Tectonics* 13:1371–1380.
- Elfouly, A., 2000- Major Structure Patterns Identification and Hydrothermal Delineation using Density of Lineament Intersections. ASPRS 2000, The Image and Geospatial Information Society, Washington, DC, USA.
- Eshghi Molan, Y., Refahi, D. and Hosseinmardi Tarashti, A., 2014- Mineral mapping in the Mahabad area, eastern Iran, using the HyMap remote sensing data: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 27: 117-127.
- Fagereng, A., 2011- Fractal vein distributions within a fault-fracture mesh in an exhumed accretionary mélange, Chrystalls Beach Complex, New Zealand: *Journal of Structural Geology* 33: 918-927.
- Feder, J., 1988- *Fractals*. Plenum Press, New York, 283 pp.
- Gansser, A., 1995- New aspects of the geology in central Iran: 4th World Petroleum Cong. Proc: Rome, Sec, I/A/5, Paper2, p. 279-300.
- Ghosh, A. and Daemen, J. K., 1993- Fractal characteristics of rock discontinuities: *Eng. Geol* 34: 1-9.
- Gillespie, P. A., Howard, C. B., Walsh, J. J. and Watterson, J., 1993- Measurement and characterization of spatial distributions of fractures: *Tectonophysics* 226: 131-141.

- Golonka, J., 2004- Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic: *Tectonophysics* 38: 235–273.
- Gonzato, G., Mulargia, F. and Marzocchi, W., 1998- Practical application of fractal analysis: problems and solutions: *Geophys. J. Int.*, V.132.
- Greenbaum, D., 1985- Review of remote sensing applications to groundwater exploration in basement and regolith: *Brit Geol. Surv. Rep. OD* 85/8, 36pp.
- Hashim, M., Ahmad, S., Md Johari, M. A. and Beiravand Pour, A., 2013- Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) imagery: *Advances in Space Research* 51: 874–890.
- Hirata, T., 1989- Fractal dimension of fault systems in Japan: fractal structure in rock fracture geometry at various scales: *Pure and Applied Geophysics* 131: 157–169.
- Idziak, A. and Teper, L., 1996- Fractal Dimension of Fault Network in the Upper Silesian Coal Basin (Poland): *Preliminary Studies. J. of Pu. Appl. Geophys.*, V.147, No.2.
- Jackson, J., Haines, J. and Holt, W., 1995- The accommodation of Arabia-Eurasia Plate convergence in Iran: *Journal of Geophysical Research* 100: 205-215.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W. and Zimmerman, R. W., 2007- *Fundamentals of Rock Mechanics*: Blackwell publishing, p. 1-475.
- Jensen, J. R., 1996, *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, Prentice Hall, 316 pp.
- Jensen, J. R., 2005- *Introductory Digital Image processing (3rd edition)*, Prentice Hall.526 pp.
- Jung, D., Keller, J., Khorasani, R., Marcks, C., Baumann, A. and Horn, P., 1983- Petrology of the Tertiary magmatic activity the northern Lut area, East of Iran: *Geological Survey of Iran, Geodynamic Project (Geotraverse) in Iran* 51: 285–336.
- Kar, A., 1994- Lineament control on channel behavior during the 1990 flood in the south- eastern Thar Desert: *International Journal of Remote Sensing* 15: 2521-2530.
- Karimpour, M. H., Malekzadeh-Shafaroudi, A., Stern, C. R. and Hidarian, M. R., 2008- Using ETM+ and airborne geophysics data to locating porphyry copper and epithermal gold deposits in Eastern Iran: *Journal of Applied Science* 8: 4004–4016.
- Karimpour, M. H., Stern, C. R., Farmer, L., Saadat, S. and Malekzadeh-Shafaroudi, A., 2011- Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran: *Journal Geope* 1: 19-36.
- Kim, S. and Casper, R., 2013- Applications of convolution in image processing with MATLAB: *University of Washington*, p. 1-20.
- Kim, Y. S. and Park, J. Y., 2006- Cenozoic deformation history of the area around Yangnam–Yangbuk, SE Korea and its tectonic significance: *Journal of Asian Earth Sciences* 26: 1–20.
- Kim, Y. S., Andrews, J. R. and Sanderson, D. J., 2001- S Reactivated strike-slip faults: examples from north Cornwall, UK: *Tectonophysics* 340: 173–194.
- King, G., 1983- The accommodation of large strains in the upper lithosphere of the earth and other solids by self-similar fault system: The geometrical origin of the b-value: *Journal of Pure Appl. Geophys* 121:761-815.
- Knipe, R. J., 1993- The influence of fault zone processes and diagenesis on fluid flow, in Horbury, A.D., and Robinson, A.G., eds., *Diagenesis and Basin Development: American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology* 36: 135–151.
- Koch, M. and Mather, P. M., 1997- Lineament mapping for groundwater resource assessment: a comparison of digital Synthetic Aperture (SAR) imagery and stereoscopic Large Format Camera (LFC) photographs in the Red Sea Hills, Sudan: *International Journal of Remote Sensing* 18: 1465–1482.
- Korvin, G., 1992- *Fractal models in the earth sciences*, Amsterdam, Elsevier, 408 pp.
- Kresic, N., 1995- Remote sensing of tectonic fabric controlling groundwater flow in Dinaric Karst: *Remote Sensing of Environment* 53: 85-90.
- La Pointe, P. R., 1988- A method to characterize fracture density and connectivity through fractal geometry: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts* 25: 421-429.
- Liu, R., Jiang, Y., Li, B. and Wang, X., 2015- A fractal model for characterizing fluid flow in fractured rock masses based on randomly distributed rock fracture networks: *Computers and Geotechnics* 65: 45-55.
- Malekzadeh-Shafaroudi, A., Karimpour, M. H. and Stern, C. R., 2015- The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran: *Geology, alteration and mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies: Ore Geology Review* 65: 522-544.
- Mandelbrot, B. B., 1983- *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman, New York.
- Marghany, M. and Hashim, M., 2010- Lineament mapping using multispectral remote sensing satellite data: *International Journal of the Physical Sciences* 5 (10):1501-1507.
- Masoud, A. and Koike, K., 2006- Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt: *Journal Afric. Earth Sci* 45: 467–477.
- Morelli, M. and Piana, F., 2006- Comparison between remote sensed lineaments and geological structures in intensively cultivated hills, Monferatto and Langhe domains, NW Italy: *International Journal of Remote Sensing* 27 (20): 4471-4493.
- Odling, N. E., 1992- Network properties of a two-dimensional natural fracture pattern: *Pure and Applied Geophysics* 138: 95–114.
- Odling, N. E., 1997- Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western Norway: *Journal of Structural Geology* 19: 1257–1271.
- Odling, N. E., Gillespie, P., Bourguine, B., Castaing, C., Chilés, J. P., Christensen, N. P., Fillion, E., Genter, A., Olsen, C., Thrane, L., Trice, R., Aarseth, E., Walsh, J. J. and Watterson, J., 1999- Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractured hydrocarbon reservoirs: *Petroleum Geoscience* 5: 373-384.
- Philip, G., 1996- Landsat Thematic Mapper data analysis for Quaternary tectonics in parts of the Doon Valley, NW Himalaya, India: *International Journal of Remote Sensing* 17: 143-153.

- Poulimenos, G., 2000- Scaling properties of normal fault populations in the Western Corinth Networks, Greece: Implication for fault growth in large strain setting: *Journal of struct. Geol* 22: 307-322.
- Pour, A. B. and Hashim, M., 2012- The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits: *Ore Geol Rev* 44: 1-9.
- Ram, A. and Roy, P. N. S., 2005- Fractal dimensions of blocks using a box-counting technique for the 2001 Bhuj earthquake, Gujarat, India 162: 531-548.
- Rives, T., Razack, M., Petit, J. P. and Rawnsley, K. D., 1992- Joint spacing: analogue and numerical simulations: *Journal of Structural Geology* 14: 925-937.
- Rolet, J., Ye'sou, H. and Besnus, Y., 1995- Satellite image analysis of circular anomalies and fracturing networks in the Armorican Massif, France: *Mapping Science and Remote Sensing* 32: 21-43.
- Rosenberg, F., 1981- Geochemische and petrologische unterssungen und magmatiten der intrusion Bejestan ostiran diplomarbeit: Min. Petr.Humburg.
- Rowen, L. C. and Bowers, T. L., 1995- Analysis of linear features mapped in Landsat Thematic Mapper and Side-Looking Airborne Radar images of the Reno 1o by 2o Quadrangle, Nevada and California, Implications for mineral resource studies: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 61: 749-759.
- Saccani, E., Delavari, M., Beccaluva, L. and Amini, S. A., 2010- Petrological and geochemical constraints on the origin of the Nehbandan ophiolitic complex (eastern Iran): implication for the evolution of the Sistan Ocean: *Lithos* 117: 209-228.
- Sella, G. F., Dixon, T. H. and Mao, A., 2002- A model for recent plate velocities from space geodesy: *Journal Geophys. Res.*, 107, 10.129/2000JB000033.
- Seung-Ik, P., Young-Seog, K., Chung-Ryul, R. and Sanderson, D. J., 2010- Fractal analysis of the evolution of a fracture network in a granite outcrop, SE Korea: *Geosciences Journal* 14(2): 201-215.
- Shupe, S. M. and Akhavi, M. S., 1989- Integration of remotely sensed and GIS data for mineral exploration: Halifax Pluton area, Nova Scotia, Canada: *Geocarto International*, 4-3, p. 49-54.
- Sibson, R. H., 1994- Crustal stress, faulting, and fluid flow, in Parnell, J., ed., *Geofluids: Origin, Migration, and Evolution of Fluids in Sedimentary Basins: Geological Society of London Special Publication* 78: 69-84.
- Soffel, H. and Forster, H., 1980- Apparent pollar wander path of central Iran and its Geotectonic interpretation: *Journal Geomag. Geoelectr* 32, Suppl. III, p. 117-135, Tokyo.
- Solomon, S. and Ghebreab, G., 2006- Lineament characterization and their tectonic significance using Landsat TM data and field studies in the central highlands of Eritrea: *Journal of African Earth Sciences* 46: 371-378.
- Stocklin, J. and Nabavi, M. H., 1973- Tectonic map of Iran. Geological Survey of Iran.
- Tarkian, M., Lotfi, M. and Baumann, A., 1983- Tectonic, magmatism and the formation of mineral deposits in the central Lut, east Iran: Geological Survey of Iran, geodynamic project (geotraverse) in Iran 51: 357-383.
- Tibaldi, A. and Ferrari, L., 1991- Multisource remotely sensed data, field checks and seismicity for the definition of active tectonics in Ecuadorian Andes: *International Journal of Remote Sensing* 12: 2343-2358.
- Tirrul, R., Bell, I. R., Griffis, R. J. and Camp, V. E., 1983- The Sistan suture zone of Eastern Iran: *Geological Society of America Bulletin* 94: 134-156.
- Turcotte, D. L., 1992- *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, 221pp.
- Velde, B., Dubois, J., Moore, D. and Touchard, G., 1991- Fractal patterns of fractures in granites: *Earth and Planetary Science Letters* 104: 25-35.
- Velde, B., Dubois, J., Touchard, G. and Badri, A., 1990- Fractal analysis of fractures in rocks: the Cantor's Dust method: *Tectonophysics* 179: 345-352.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiany, M., Bayer, R., Tavakoli, F. and Chéry, J., 2004- Contemporary crustal deformation and plate kinematics in the Middle East Constrained by GPS measurements in Iran and Northern Oman: *Geophysical Journal International* 157: 381-398.
- Volland, S. and Kruhl, J. H., 2004- Anisotropy quantification: the application of fractal geometry methods on tectonic fracture patterns of a Hercynian fault zone in NW-Sardinia: *Journal of Structural Geology* 26: 1489-1500.
- Walker, R. and Jackson, J., 2002- Offset and evolution of the Gowk fault, S.E. Iran: a major intra continental strike-slip system: *Journal Struct. Geol* 24: 1677-1698.
- Walker, R. and Jackson, J., 2004- Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran: *Tectonics*, V. 23, TC5010.
- Walker, R. and Khatib, M. M., 2006- Active faulting in the Birjand region of in eastern Iran: *Tectonics* 25: 1-17.
- Walker, R., Jackson, J. and Baker, C., 2003- Surface expression of thrust faulting in eastern Iran: Source parameters and surface deformation of the 1978 Tabas and 1968 Ferdows earthquake sequences: *Journal Geophys* 152: 749 - 765.
- Walker, R., Jackson, J. and Baker, C., 2004- Active faulting and seismicity of the Dasht-e-Bayaz region, eastern Iran: *Geophysical Journal International* 157: 265-282.
- Walsh, J. J. and Watterson, J., 1993- Fractal analysis of fracture patterns using the standard box-counting technique: valid and invalid methodologies: *Journal of Structural Geology* 15: 1509- 1512.
- Weinhaus, F., 2014- Digital Image Filtering, electronic version, p. 1-39.
- Xypolias, P. and Koukouvelas, I., 2004- Fault trace parameters as a tool for analyzing remotely sensed fault arrays: an example from the eastern Gulf of Corinth. *INT. J. REMOTE SENSING* (in press).
- Zhang, X. and Sanderson, D. J., 1998- Numerical study of critical behaviour of deformation and permeability of fractured rock masses: *Marine and Petroleum Geology* 15: 535-548.

Application of remote sensing to enhance, recognize and analysis of the structural characteristics of alteration-related lineations in the Bajestan area, East of Iran

R. Ahmadi Rouhani¹, M. H. Karimpour^{2*}, B. Rahimi², A. Malakzadeh Shafaroudi³ and S. Najafi Afshar⁴

¹Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

²Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

⁴M.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 2016 May 02

Accepted: 2016 September 19

Abstract

The studied area is located at the east of Bajestan city and south west of Khorasan Razavi province. This region is at the north of the Lut Block, the largest structural block in east of Iran. Structure of this area is affected by activity of deep strike-slip faults in the boundary of the blocks. Lineaments are mapped by the means of SPOT-5 and Landsat satellite data and DEM data. Structural studies were carried out in two stages: at first, main faults were indicated, mapped and analyzed and then for more detail research, total lineaments (faults and joints) were mapped and analyzed. Verification studies were conducted with field surveys. Remote sensing studies indicate importance of applying enhancement filters like standard kernels on stereoscopic data like SPOT as an efficient tool for structural studies, especially for lineament extracting. Fractal studies and using fractures statistical parameters (based on fracture map obtained by remote sensing data) in the area in addition to determining fractal dimension, were used as complementary methods for recognition structural evolution and specifying the most probability of mineralization occurrence. Fractal, structural- statistical analyzes, field and remote sensing studies on fracture systems in the area indicate that structural elements in the studied area, most probably are related to the main strike-slip faults activities and can be considered as Riedel shear fractures in its wall of damage zone. Also the results indicate that most of the lineaments in this area are extensional fractures corresponding to both dykes emplacement and alteration zones associated with mineralization. Combining the mentioned information can play important role in identifying structural evolution processes and specifying areas with more mineralization potential.

Keywords: Remote sensing, lineaments enhancement filters, shear fracture system, Lut structural Block, Bajestan.

For Persian Version see pages 169 to 182

*Corresponding author: M. H. Karimpour; E-mail: Karimpur@um.ac.ir