

مطالعه الگوهای آماری سیستم‌های شکستگی منطقه اخلمد، شمال غرب بینالود بر روی نقشه رسم شده با استفاده از روش دورسنجی

مریم غلامزاده¹، بهنام رحیمی²، فرزین قائمی^{3*}، ریحانه احمدی روحانی⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد

2- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد

3- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد

4- کارشناس سازمان زمین‌شناسی، شمال خاوری

پذیرش مقاله: 1394/8/28

تأیید نهایی مقاله: 1395/3/18

چکیده

نقشه شکستگی‌های ساختاری منطقه اخلمد با توجه به ویژگی‌های مورفولوژیک و ساختاری مناسب، به کمک تکنیک‌های دورسنجی و پردازش داده‌های ماهواره‌ای ترسیم شد. در این مقاله ابتدا شکستگی‌ها از نظر روند به 6 دسته تفکیک شدند. بیشترین تعداد و تنوع گسلی در شرق منطقه قرارداشت. از مقایسه مقادیر طول شکستگی‌ها، مشخص شد که تعداد گسل‌های هر دسته با افزایش طول به صورت نمایی کاهش می‌یابد. در بررسی پارامتر فاصله نیز نتایج مشابهی گرفته شد و مشخص شد که تعداد گسل‌ها با افزایش فاصله‌بندی به طور نمایی کاهش می‌یابد. سپس نقشه‌های منحنی میزان برای 3 پارامتر تراکم، تجمع و نقاط تلاقی شکستگی‌ها ترسیم گردید و مشخص شد که هر دو فاکتور تراکم و تجمع در بخش‌های شرقی، مرکزی و شمالی و فاکتور تراکم تلاقی شکستگی‌ها در بخش شرقی منطقه بیشترین مقدار خود را نشان می‌دهد. نتایج فوق نشان از معتبر بودن تشخیص شکستگی‌ها براساس تکنیک‌های دورسنجی دارند.

واژگان کلیدی: تراکم طول، تلاقی و فاصله‌بندی شکستگی‌ها.

مقدمه

اصطلاح شکستگی برگرفته از واژه لاتین Fractus به معنی شکستن، اصطلاحی عمومی در زمین‌شناسی است؛ که به سطوح ناپیوستگی در مواد و سنگ‌هایی که دچار دگرشکلی شده و در امتداد آنها چسبندگی مواد از بین رفته است، اطلاق می‌گردد (توییس و مورس، 2001). از آنجا که شکستگی‌ها در تنوعی از مقیاس‌ها، از طول کمتر از یک میلی‌متر (ترک‌ها و کلیواژها) تا حد چند صد کیلومتری (گسل‌های بزرگ مقیاس) رخ می‌دهند و بیانگر راستا و نوع تنش بوجود آورنده خود و نیز ویژگی‌های تنش در مواد دربرگیرنده شکستگی نیز هستند، یکی از مهم‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی محسوب می‌شوند، از این جهت یافتن مدل ریاضی و هندسی آنها برای کمی کردن نحوه شکل‌گیری این ساختارها ضروری به نظر می‌رسد. هندسه و توزیع پارامترهای شکستگی در بسیاری از شاخه‌های علوم زمین، به دلیل اهمیت آنها مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در زمینه منابع هیدرولیکی و هیدروکربنی (ادلینگ و همکاران، 1999؛ پیکاک و مان، 2005) که ارتباط بین شکستگی‌ها برای تعیین مقدار تخلخل و حرکت مواد سیال هدف اصلی است. و در زمین‌شناسی مهندسی برای تعیین RQD، هندسه توده سنگ و خواص آن به بررسی الگو و توزیع و هندسه شکستگی‌ها (سیگال و پولارد، 1983) می‌پردازند، بعلاوه در برآورد خطر لرزه‌ای و مطالعه مناطق لرزه‌خیز از الگوی شکستگی‌ها استفاده می‌شود. مدل‌سازی ریاضی یکی از روش‌های مطالعه شکستگی‌ها در مطالعات زمین‌شناسی است. بدین معنی که در مدل ریاضی و آماری پارامترهای موجود در جامعه آماری شکستگی‌ها (همانند پارامترهای طول، فاصله بین شکستگی‌ها، تراکم آنها و ...)، محاسبه و تحلیل

می‌شود. فرآیند محاسبه مدل ریاضی یک پارامتر شامل محاسبه فراوانی پارامتر، نمایش داده‌ها روی نمودار، تعیین منحنی‌های بهینه و معادلات آنهاست که این مدل‌ها دارای تعریف و مبنای ریاضی هستند و از دو دیدگاه بررسی می‌گردند:

- یافتن مدل ریاضی مناسب برای پارامترهای مدنظر

- انطباق و مقایسه پارامترها با همدیگر و یافتن مدل ریاضی حاصل از آنها (بور، 2001)

که البته بیشتر کارهای انجام شده محدود به مرحله اول بوده، زیرا برداشت پارامترهای مختلف اولاً دارای کمبود بوده و دوماً انطباق مدل‌های مختلف با یکدیگر نیازمند مطالعات دقیق‌تر در زمینه تئوری، آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های دقیق تکنیکی است، لذا تحقیق حاضر نیز صرفاً به این مرحله پرداخته است. امروزه برای انجام مطالعات یاد شده، تنها به یافته‌ها و برداشت‌های صحرائی اکتفا نشده و برای ترسیم نقشه پایه پراکندگی شکستگی‌ها از تکنیک‌های مختلفی جهت بارزسازی آنها به کمک پردازش داده‌های ماهواره-ای استفاده می‌شود. بدین منظور در این پژوهش داده‌های ماهواره‌ای Landsat ETM+، Aster و SPOT5 مورد استفاده قرار گرفتند. در علم آمار، تحلیل‌ها از طریق بررسی تغییرات یک متغیر با متغیری دیگر صورت می‌گیرد و در اصطلاح تنها در یک بعد به بررسی تغییرات پرداخته می‌شود (جان فروند، 1387) درحالی‌که در زمین آمار (آمار) که در علوم زمین‌شناسی کاربرد دارد) بعد دوم و سوم تحلیل‌های آماری نیز وارد این عرصه می‌شوند و سپس به تغییرات همراه با موقعیت آن می‌پردازد، چنین تحلیلی را تحلیل مکانی می‌خوانند، به عبارت دیگر مطالعات زمین‌آمار تغییرات یک متغیر را در مکان‌های مختلف مورد بررسی قرار داده و به متغیر مورد

رابطه 1)

نظر در هر موقعیت مقدار خاصی را نسبت می‌دهد

$$\frac{\sum N}{D_N}$$
 و اولیور، (2007). در حقیقت الگوی

رابطه 2)

مکانی، تغییرات متغیر را در دو بعد مورد بررسی
 قرار داده و آن را به صورت نقشه دوبعدی مکانی

$$\frac{\sum L}{A}$$
 نمایش می‌دهد. مزیت این روش این است که
 نقشه حاصله را می‌توان از جنبه‌های متفاوتی
 تحلیل کرد و تغییرات را همگام با انواع دیگر
 پارامترها مقایسه نمود.

که در این رابطه‌ها N تعداد شکستگی و L مجموع
 طول‌های موجود در مساحت A است.

از آنجا که طول شکستگی نشان‌دهنده مقدار تنش
 و مدت زمان اعمال تنش به توده سنگ است،
 بنابراین به طور کلی با افزایش تنش، طول
 شکستگی نیز افزایش می‌یابد (توییس و مورس،
 2001). شکستگی‌های بزرگتر تنها در واتنش زیاد
 شرکت می‌کنند و دچار تغییر می‌شوند؛ در صورتی
 که شکستگی‌های کوچکتر در واتنش کم نیز
 شرکت کرده و به صورت افزایش طول یا چرخش
 و تغییر در فاصله بین شکستگی‌ها تغییر می‌کنند
 (اکرم‌ن و همکاران، 2001). برای تحلیل ارتباط
 طول شکستگی و واتنش به وجود آورنده آنها
 تحلیل توزیع طولی صورت می‌گیرد. به این ترتیب
 که طول و تعداد شکستگی‌ها بیانگر میزان واتنش
 به وجود آورنده آنها است؛ بنابراین تحلیل فراوانی
 طول شکستگی‌ها راه مناسب برای اکتساب هدف
 مذکور می‌باشد (دینگر، 1999). بطوریکه در یک
 تحلیل هرچه شیب نمودار بیشتر باشد، نشان-
 دهنده این است که در واتنش یکسان ساختارهای
 کوچکتر نسبت به ساختارهای بزرگتر اهمیت
 بیشتری دارند.

از جمله فاکتورهای مهم در مطالعه سیستم‌های
 شکستگی، فاصله‌بندی^۲ آنهاست (سولومون و
 همکاران، 2006؛ کاساس و همکاران، 2000).
 عبارت فاصله‌بندی برای فاصله بین دو درزه موازی
 و کنار هم استفاده می‌شود، که عمود بر دیواره آنها

الگوی مکانی هر متغیری به ترتیب زیر محاسبه
 می‌شود:

- شبکه‌ای متشکل از چندین سلول بر منطقه
 مورد نظر طراحی و انطباق داده می‌شود.

- در هر سلول از شبکه، مقدار متغیر مورد نظر با
 روش‌های آماری محاسبه می‌گردد.

- مقدار متغیر محاسبه شده به نقطه مرکزی هر
 سلول نسبت داده می‌شود.

- نقاط هم‌ارزش به همدیگر متصل می‌گردد.

- از اتصال نقاط به هم، منحنی‌های بسته هم‌ارزش
 محاسبه شده و در نهایت الگوی مکانی متغیر
 مورد نظر به صورت نقشه‌ای آشکار می‌شود.

محققان زیادی با مطالعه شکستگی‌ها بر آن شدند
 که مدلی مناسب برای هندسه و الگوی شکستگی
 و توزیع در مکان‌های مختلف دست یابند
 (تورکوت، 1986؛ چایلز، 1988؛ دیوی و
 همکاران، 1990؛ اوپیلن و همکاران، 1995 و
 1996؛ کستینگ و همکاران، 1996؛ اکرم‌ن و
 همکاران، 2001؛ نیئتو و همکاران، 2005؛ کویک
 و ایچیکاوا، 2006؛ زازون، 2008).

تراکم خطوط به یکی از دو طریق زیر بیان می-
 شود:

تعداد خطوط در واحد سطح (دیوی و همکاران،
 1990) یا همان تجمع (رابطه 1)

طول کلی خطوط در واحد سطح (بور، 1997) یا
 همان تراکم طولی (رابطه 2)

اندازه گرفته می‌شود. فاصله‌بندی شکستگی از پارامترهای کمی حائز اهمیت سیستم شکستگی است که در بحث جریان سیالات بسیار حائز اهمیت است؛ همچنین تغییر فاصله‌بندی شکستگی می‌تواند تاثیر چشمگیری بر تخلخل و تراوایی شکستگی بگذارد (نلسون، 2001). از آنجائیکه شکستگی‌های متعلق به یک دسته به طور کامل و آرمانی باهم موازی نیستند و در بیشتر موارد فاصله دو شکستگی در امتداد آنها متغیر است، بایستی از داده‌های هر دو خطواره میانگین گرفت. روش‌های متفاوتی برای محاسبه میانگین فاصله وجود دارد. در ساده‌ترین حالت تنها به یک اندازه‌گیری اکتفا می‌شود و برای یافتن نزدیک‌ترین فاصله به میانگین از چشم کمک گرفته می‌شود؛ این روش کاملاً دستی می‌باشد. از پارامترهای کاربردی دیگر در محاسبات آماری خطواره‌ها، محاسبه نقاط تلاقی شکستگی‌ها³ می‌باشد. تراکم تقاطع خطواره‌ها، یک نقشه از فراوانی تقاطع‌هایی که در سلول واحد اتفاق افتاده‌اند، است. هدف از استفاده نقشه تراکم تقاطع خط-واره‌ها، برآورد مناطقی از جهت‌گیری متنوع خط-واره‌ها است. اگر خطواره‌ها در یک منطقه یکدیگر را قطع نکنند، نقشه حاصل شده، یک نقشه ساده با تقریباً هیچ کانتور تراکمی خواهد بود. این بدین معناست که در این منطقه خطواره‌ها اگر از نظر طول کوتاه نباشند، تقریباً موازی تا نیمه موازی هستند. تراکم خطواره‌ها با شمارش تعداد تقاطع خطواره‌ها بر واحد سطح بدست می‌آید.

زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه (اخلمد) در طول جغرافیایی $59^{\circ} 5'$ تا $58^{\circ} 41'$ شرقی و عرض جغرافیایی $36^{\circ} 32'$ تا $36^{\circ} 42'$ شمالی واقع در شمال غرب ارتفاعات بینالود قرار دارد. این ناحیه از نظر

تقسیم‌بندی ایالت‌های ساختاری عمده ایران در زون بینالود قرار می‌گیرد. رشته‌کوه‌های بینالود در شمال شرقی ایران با روند تقریبی شمال‌غرب-جنوب‌شرق، بین پلیت مستحکم توران و خردقاره ایران مرکزی محاط شده است. این کوه‌ها به عنوان بخشی از رشته‌کوه البرز، یک کمربند چین خورده و گسلیده نازک ورقه است که در آن سنگ‌های کامبرین تا دونین فوقانی، تریاس فوقانی تا کرتاسه تحتانی و سنوزوئیک بیرون‌زدگی دارند (علوی، 1991). سنگ‌های ژوراسیک میانی تا پسین در بخش غربی بینالود از گسترش و ستبرای زیادی برخوردار می‌باشند. رسوبات ژوراسیک پیشین و میانی در رشته‌کوه‌های بینالود بیشتر سیلیسی-آواری و رسوبات ژوراسیک فوقانی از سنگ آهک و مارن تشکیل شده است (شهرابی و داوودزاده، 1986). در منطقه مورد مطالعه عمده رخنمون سنگ‌های کربناته به سن ژوراسیک میانی و پسین است. این رسوبات از نظر رخساره و ویژگی‌های سنگی تا حدی به هم شباهت دارند که در نقشه 1:250000 مشهد، این رسوبات به عنوان سازند مشخصی معرفی نشده است و نام سازندهای ژوراسیک میانی و پسین البرز و کپه‌داغ برای این نهشته‌ها به کار می‌رود. با توجه به اینکه افشارحرب، واحدهای ژوراسیک بینالود را جزئی از کپه‌داغ معرفی می‌کند، ناگزیر این واحدهای کربناته در مواردی نیز جزء واحدهای کپه‌داغ در نظر گرفته می‌شود. اما با مطالعاتی که نظرزاده (1383) در دو برش چینه-ای رسوبات ژوراسیک در روستاهای خیج و خرم-آباد، براساس قابلیت تفکیک رسوبات ژوراسیک فوقانی به دو بخش جداگانه از نظر رخساره‌ای و سنگ‌شناسی و همچنین شباهت رخساره‌ای با سازند لار انجام داده است، سنگ آهک نخودی

لندست، از ترکیب باندهای RGB=543 که بهترین خروجی را جهت تفکیک واحدها و شکستگی منطقه در برداشت، استفاده شد. همچنین روش ترکیب نسبت باندهای RGB=5/7, 5/4, 3/1 نیز کمک شایانی در مشخص نمودن شکستگیهای منطقه داشت. از آنجایی که دادههای Landsat ETM⁺ با وجود تفکیک نسبتاً خوب واحدها، قادر به جداسازی برخی واحدها و تفکیک کامل نمی باشد؛ لذا در مرحله بعدی سعی بر این شد تا با استفاده از دادههای ASTER و انجام مطالعات با جزئیات بیشتر و موضوعی، آلتراسیونهای احتمالی محدوده که می توانند در ارتباط با شکستگیها باشند، تفکیک شود. در نتیجه از ترکیب باندهای 2 و 4 و 7 (2 در B و 4 در G و 7 در R) نیز با توجه به نتیجه خوب، برای بارزسازی خطوارههای موجود در محدوده استفاده گردید. در نهایت استفاده از داده مولتی اسپکترال SPOT-5 با تفکیک مکانی 2/5 متر، قابلیت برجسته بینی و استفاده همزمان از انواع فیلترهای بارزکننده خط-وارهها، و همچنین استفاده از روش PCA و مولفه PC1 آن بر روی این داده، بهترین خروجی جهت تفکیک انواع دسته های شکستگی بدست آمد و شکستگیها بصورت وکتور رسم شد (غلامزاده و همکاران 1393). تهیه سایه مجازی⁴ با استفاده از تصاویر DEM منطقه با تفکیک مکانی 10 متر نیز ابزار مناسبی جهت تکمیل و ترسیم نقشه شکستگیهای محدوده مورد مطالعه بود. در مقاله حاضر 2 مورد از تکنیکهای بارزسازی را توصیف نموده، خطوط گسلی در منطقه فوق دسته بندی و پارامترهای کمی و خصوصیات آماری حاکم بر شبکه گسلی را بررسی خواهیم کرد.

نتایج

روشن توده ای منطقه مورد مطالعه را به عنوان سازند لار معرفی کرده است.

مواد و روشها

امروزه برای انجام مطالعات آماری شکستگیها، تنها به یافتهها و برداشتهای صحرایی اکتفا نشده و برای رسم نقشه پایه پراکندگی شکستگیها، از تکنیکهای دیگری از جمله سنجش از دور و پردازش دادههای ماهواره استفاده می شود (حاجی، 1387 و احمدی روحانی، 1390). منطقه اخلمد با توجه به گسله بودن منطقه، وضوح بالای شکستگیها در تصاویر ماهواره ای، مرتفع بودن رخنمونها، پوشیده نبودن توسط آبرفت در گستره بسیار زیاد و همچنین پتانسیل مناسب معدنی (کانه زایی فلزی) (بازرگانی گیلانی و همکاران، 1391) و منابع آبی حائز اهمیت است. لذا با توجه به دلایل ذکر شده و این مساله که مطالعات آماری در این منطقه تاکنون انجام نشده، و در نظر گرفتن این خصوصیت که روشهای دورسنجی در مقیاس وسیع می تواند کمک شایانی به توصیف الگوی تغییر شکل ساختاری نماید، این منطقه برای مطالعه مناسب تشخیص داده شد. در مرحله پردازش دادههای ماهواره به منظور تهیه نقشه شکستگیها به ترتیب از داده Landsat ETM⁺ با تفکیک مکانی 14/25 متر (داده تلفیقی با باند 8)، داده ASTER با تفکیک مکانی 15 متر و داده مولتی اسپکترال تلفیقی با باند Pan داده SPOT-5 با تفکیک مکانی 2/5 متر استفاده گردید و تصاویر فوق پس از پردازش مورد تعبیر و تفسیر قرار گرفت. نرم افزارهای مورد استفاده ENVI نسخه 4.7، Arc-ER- Mapper نسخه 7.01 و GIS نسخه 9.3 بوده است. در پردازش دادههای

4- Hill shade

مطالعه، ترکیب 543 انتخاب شد (جدول 1 و شکل 1).

پردازش داده‌ها با استفاده از تصاویر RGB (Composition): هدف در اینجا پیدا کردن قطع-شدگی‌ها و تغییرات ناگهانی واحدهای سنگی و در نتیجه جدایش‌های امتدادی در راستای خطواره-های ساختاری است (حاجی، 1387). ترکیب شش باند 1، 2، 3، 4، 5 و 7 داده‌های Landsat ETM⁺ برای مقصود ما مناسب‌ترین است. از آنجا که برای ساختن یک تصویر RGB سه باند برای سه رنگ اصلی مورد نیاز است (محمودزاده، 1388)، از شش باند 1، 2، 3، 4، 5 و 7 (به جز باند حرارتی 6) برای ترکیب (غیرتکراری) از رابطه ترکیب کمک گرفته می‌شود:

$$C(n,r) = n!/r!(n-r)!$$

در اینجا n تعداد کل باندهای مرئی (6) و r تعداد باندهای مورد استفاده در هر ترکیب (3) است. به این ترتیب 20 ترکیب مختلف می‌تواند ساخته شود. این مسئله که کدام یک از این 20 ترکیب مناسب‌ترین است، بستگی به میزان اطلاعاتی دارد که هر کدام از آنها در اختیار قرار می‌دهد (فاطمی و رضایی، 1385). برای یافتن ترکیب موردنظر، از رابطه OIF⁵ کمک گرفته می‌شود (سنگیز و همکاران، 2006؛ چاوز و همکاران، 1982):

$$OIF = \frac{\sum_{k=1}^3 S_k}{\sum_{j=1}^3 Abs}$$

OIF پارامتری است که مجموع S_k یا انحراف معیار k باند را نسبت به مجموع $Abs(r_j)$ یا مقدار ماتریس همبستگی همان باندها محاسبه می‌کند (سلطانی، 1388). یعنی سه باندی که بیشترین وجوه تفاوت و کمترین وجوه اشتراک را با هم دارند، مشخص می‌نماید. بدین ترتیب اگر OIF را برای هر کدام از ترکیبات سه‌گانه محاسبه کنیم، بزرگترین عدد بین 20 حالت احتمالی، ترکیب مورد نظر خواهد بود. پس از محاسبه مقادیر OIF برای داده‌های Landsat ETM⁺ در منطقه مورد

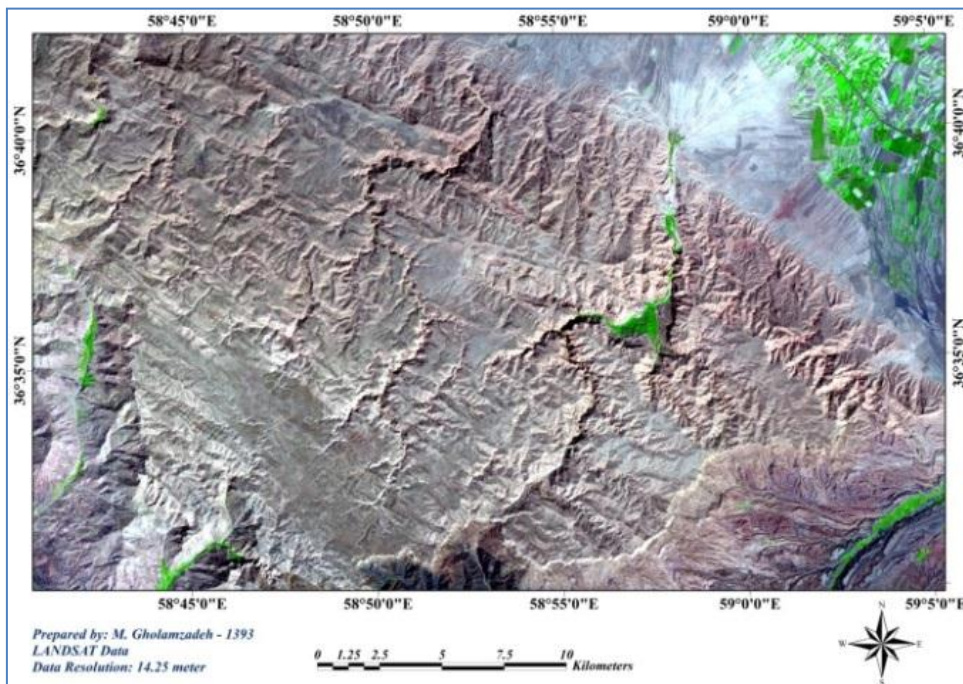
5- Optimum Index Factor

جدول 1: مقادیر مورد استفاده جهت بدست آوردن ترکیب بهینه داده‌های Landsat ETM⁺

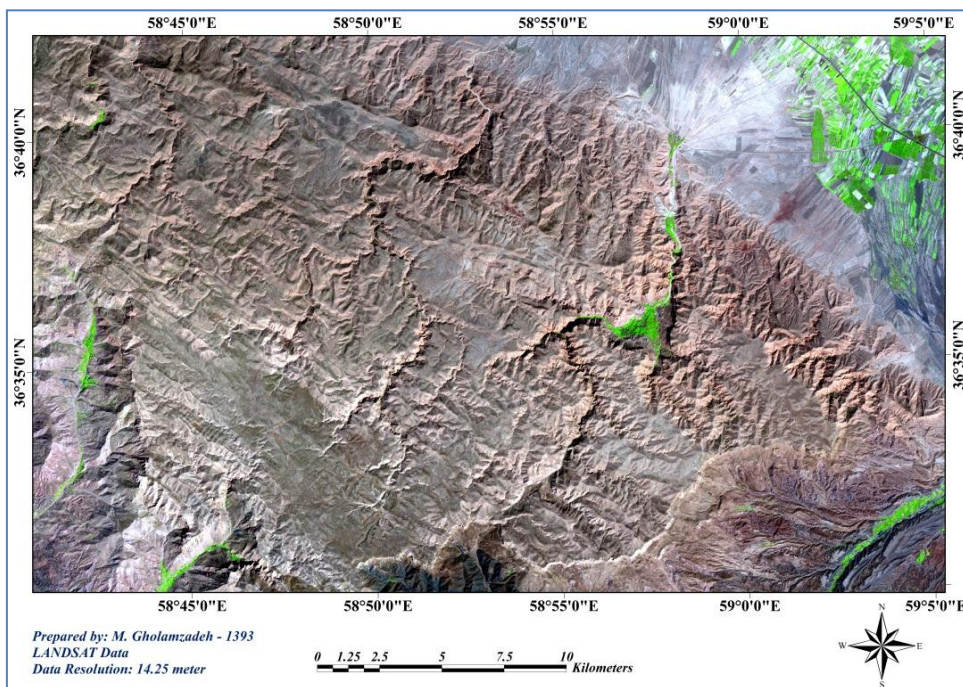
OIF	مجموع ماتریس همبستگی	مجموع انحراف معیار	باندهای ترکیب شده
15/29	2/852	42/604	1و2و3
15/62	2/561	40/001	1و2و4
17/376	2/627	45/64	1و2و5
16/127	2/649	42/721	1و2و7
18/946	2/507	47/5	1و3و4
19/947	2/614	52/138	1و3و5
18/627	2/642	49/218	1و3و7
20/171	2/406	48/536	1و4و5
19/36	2/356	45/616	1و4و7
20/042	2/557	51/255	1و5و7
18/808	2/643	49/715	2و3و4
20/108	2/753	55/353	2و3و5
18/875	2/778	52/434	2و3و7
20/182	2/564	51/751	2و4و5
19/45	2/511	48/831	2و4و7
20/064	2/715	54/47	2و5و7
22/328	2/609	58/249	3و4و5
21/6	2/561	55/329	3و4و7
21/722	2/807	60/968	3و5و7
21/873	2/623	57/366	4و5و7

برخی واحدها و تفکیک کامل نمی‌باشد؛ لذا در مرحله بعدی سعی براین شد تا با استفاده از داده‌های ASTER و انجام مطالعات با جزئیات بیشتر و موضوعی، آلتراسیون‌های احتمالی محدوده که می‌توانند در ارتباط با شکستگی‌ها باشند، تفکیک شود؛ که در نتیجه از ترکیب باندهای RGB=742 نیز با توجه به نتیجه خوب، برای بارسازی خطوط‌های موجود در محدوده استفاده گردید (روانوسگس، 2003) (شکل 3).

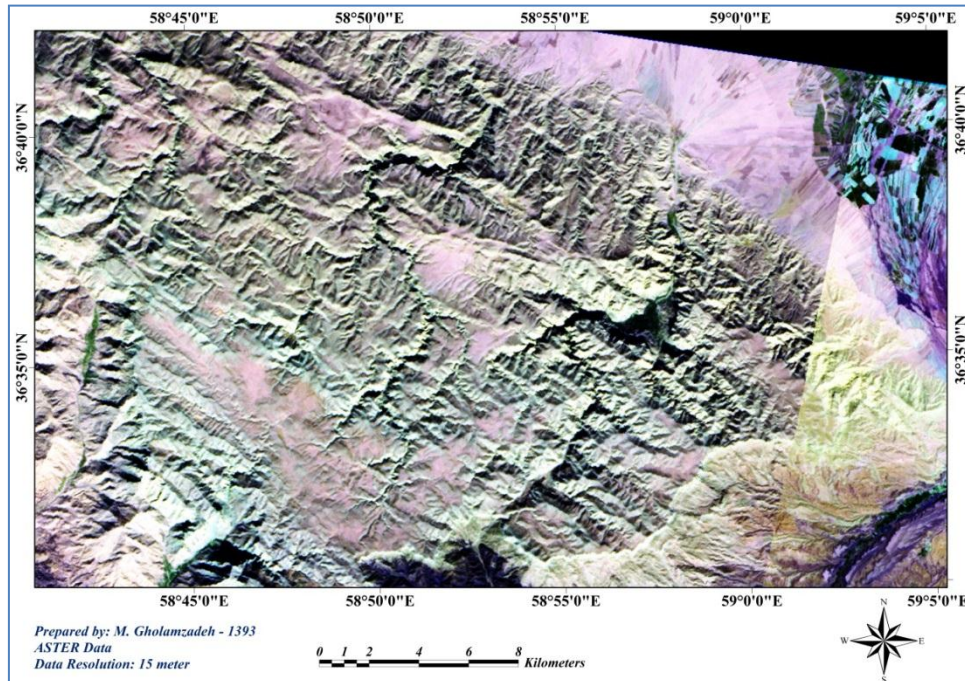
علاوه براین به منظور افزایش توان تفکیک تصویر به دست آمده داده‌های Landsat ETM⁺ با پیکسل‌هایی با ابعاد تقریبی 30×30 متر، با باند پانکروماتیک با اندازه پیکسلی 15×15 متر تلفیق گردید، به این روش توان تفکیک مکانی به دو برابر قبل افزایش یافت که برای یافتن خطوط‌های کوچکتر کمک شایانی می‌کند (شکل 2). مقایسه شکل 1 و 2 می‌تواند این موضوع را روشن نماید. از آنجایی که داده‌های لندست ETM⁺ با وجود تفکیک نسبتاً خوب واحدها، قادر به جداسازی



شکل 1: تصویر Landsat ETM⁺(RGB=543)، تغییر رنگ بیشتر بیانگر تغییر لیتولوژی است.



شکل 2: تصویر Landsat ETM⁺(RGB=543) تلفیق شده با باند 8.



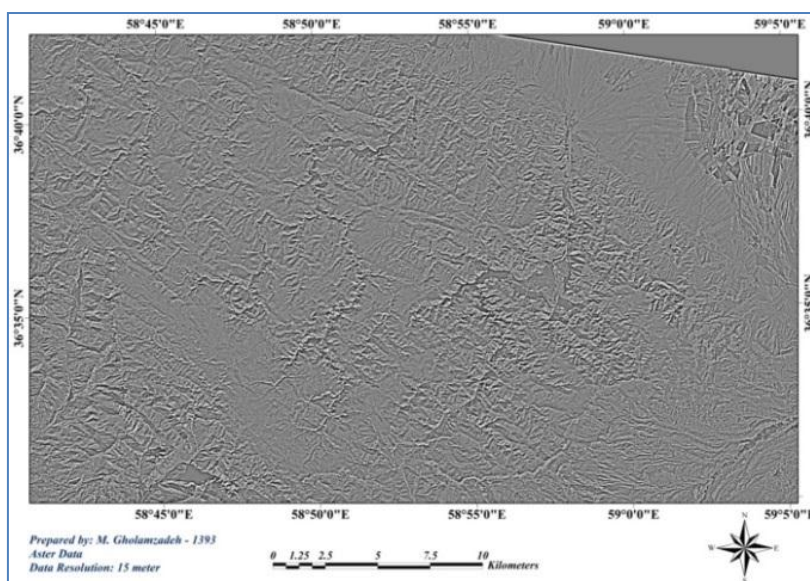
شکل 3: تصویر ASTER(RGB=742) برای بارزسازی خطواره‌های گسترده مورد مطالعه

خطواره‌های با روند عمود به جهت نور بارز شده-
اند.

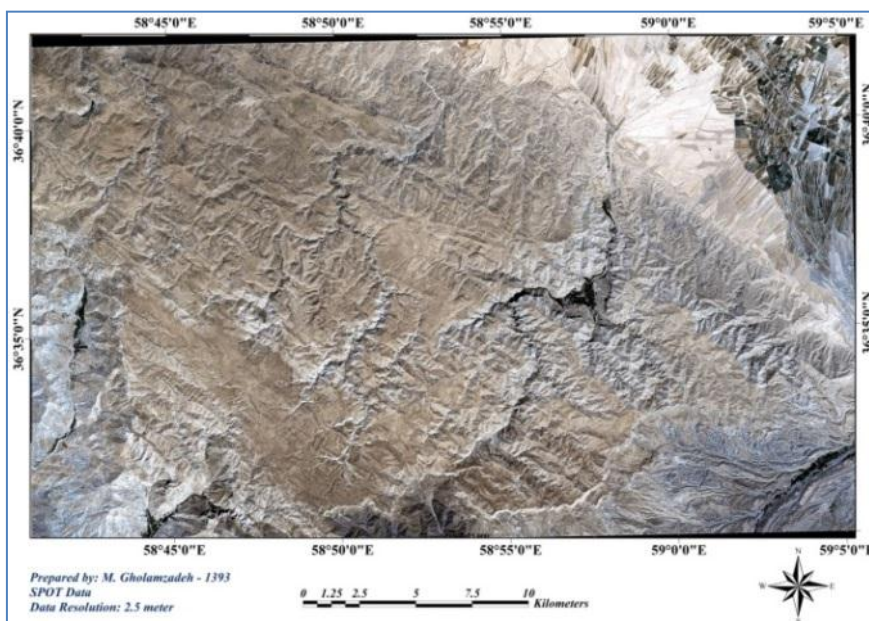
فیلترگذاری بر روی تصویر: فیلترهای بالاگذر برای بارزسازی خطواره‌ها بر روی ترکیب باندی 7.4.2 داده‌های ASTER و فیلتر بارزکننده تصویر بر روی داده‌های چندباندی SPOT در نرم‌افزار ER Mapper استفاده گردید. نتیجه پردازش (بارزسازی خطواره‌های موجود در منطقه) در شکل‌های 4 و 5 نشان داده شده است.

از جمله روش‌های ساده ولی بسیار مفید جهت بارزسازی لبه‌ها (مانند خطوط شکستگی) فیلترهای جهت‌دار^۶ است. بدین ترتیب این نوع فیلتر برای 8 جهت اصلی و فرعی جغرافیایی بر روی داده SPOT به کارگرفته شد. در هر کدام از تصاویر حاصل از اعمال فیلتر گروهی از خطواره-های گسلی برجسته‌تر از سایر خطوط دیده می‌شوند. در شکل 6 یکی از تصاویر به منظور مشاهده نتیجه آورده شده است، در این تصویر جهت مجازی تابش خورشید از شمال است و

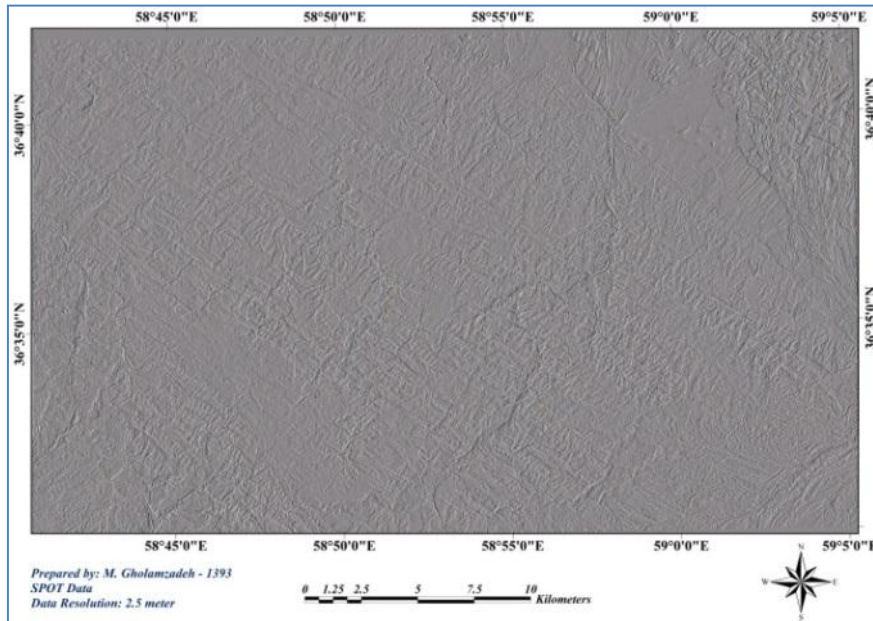
6- Directional Filters



شکل 4: بارزسازی خطواره‌ها با استفاده از پردازش داده‌های ASTER و اعمال فیلتر بالاگذرا از نوع Sharpen Edge 11×11

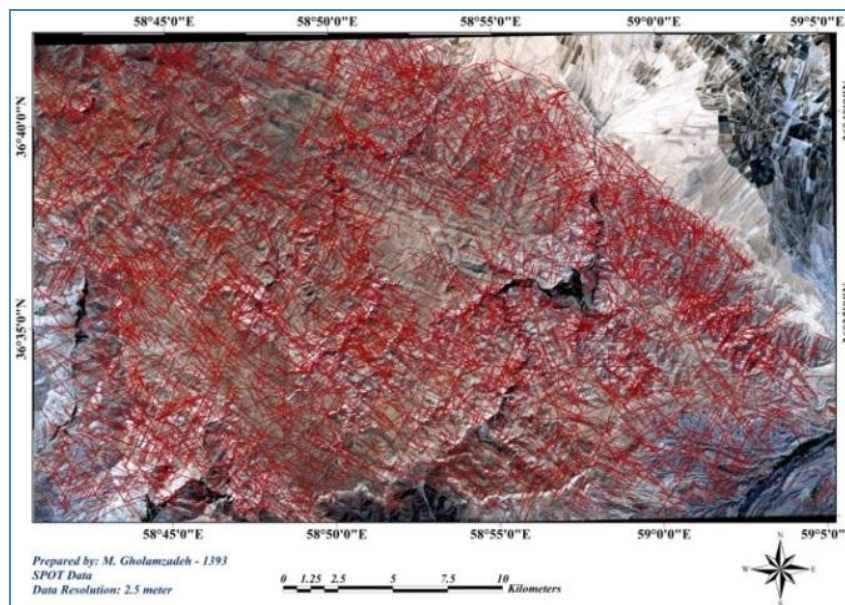


شکل 5: تصویر SPOT محدوده حاصل از اعمال فیلتر بارزکننده تصویر، جهت بارزسازی خطواره‌ها



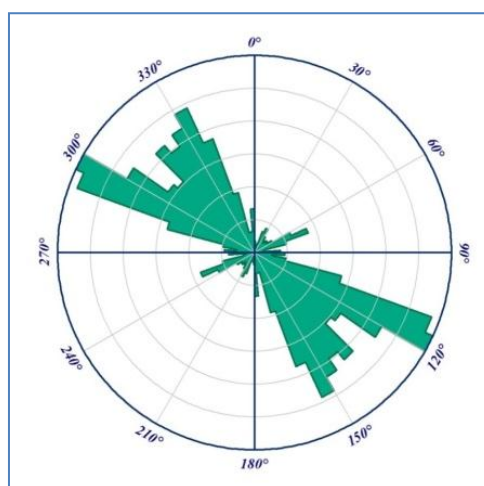
شکل 6: تصویر SPOT منطقه مورد مطالعه پس از اعمال فیلتر Directional، تابش مجازی نور از شمال، همانطور که مشاهده می‌شود دسته خطواره عمود به تابش بارز شده است.

مطالعه آماری طول شکستگی‌ها: در نهایت آثار خطی مربوط به شکستگی‌های ساختاری موجود در منطقه به منظور ارائه نقشه شکستگی‌های ساختاری^۷، روی تصویر SPOT منطقه منتقل شد که در شکل 7 قابل مشاهده است. نقشه رسم شده، سیستم‌های شکستگی حاکم بر منطقه اخلمد را به خوبی نمایش می‌دهد.



شکل 7: نقشه شکستگی‌های ساختاری منطقه مورد مطالعه روی تصویر ماهواره‌ای SPOT-5 با تفکیک مکانی 2/5 متر پس از پردازش داده‌های فوق و ترسیم نقشه شکستگی‌های منطقه (غلامزاده و همکاران، 1393)، در مرحله بعدی مطالعات شکستگی‌های حاصله انجام شد. در این مرحله بر مبنای محاسبات صورت گرفته الگوی تشکیل و توسعه شکستگی‌ها را مورد بررسی قرار خواهیم داد. بدین منظور ابتدا بایستی تصویری کلی از پراکندگی روند آنها به دست آورد تا در مراحل بعد براساس

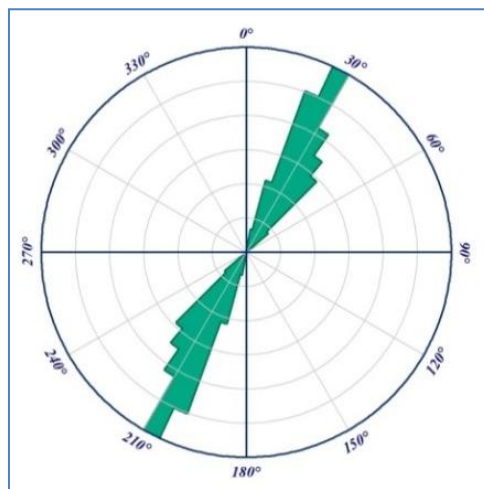
شکل 8: دیاگرام گل سرخی فراوانی روند شکستگی‌های ساختاری منطقه اخلمد



شکل 8: دیاگرام گل سرخی فراوانی روند شکستگی‌های ساختاری منطقه اخلمد

-دسته شماره 4) امتداد از 81 تا 100 درجه (E-W)
-دسته شماره 5) امتداد از 101 تا 135 درجه (WNW-ESE)
-دسته شماره 6) امتداد از 136 تا 170 درجه (NNW-SSE)
به عنوان نمونه، نتیجه دسته شماره 2 در شکل 9 قابل رویت است. خطواره‌های N-S و E-W در محدوده زاویه‌ای 20 درجه و چهار دسته دیگر در محدوده 35 درجه تعریف شده‌اند.

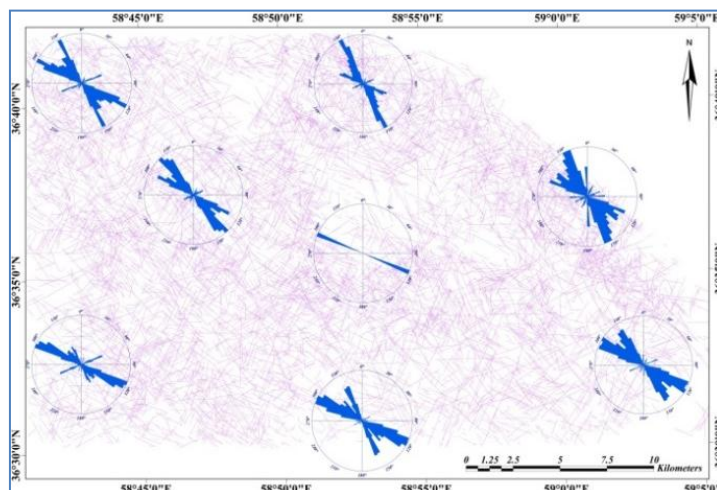
برای مطالعه دقیق‌تر، روندهای فوق به شش جهت اصلی تفکیک و برای هر 6 دسته رزیدیاگرام جداگانه‌ای رسم شد. این 6 دسته خطواره به صورت زیر تفکیک می‌شوند:
-دسته شماره 1) امتداد از 1 تا 10 و از 171 تا 180 درجه (N-S)
-دسته شماره 2) امتداد از 11 تا 45 درجه (NNE-SSW)
-دسته شماره 3) امتداد از 46 تا 80 درجه (ENE-WSW)



شکل 9: تصویر Rose Diagram فراوانی شکستگی‌های ساختاری با روند NNE-SSW منطقه اخمد

مرکزی عمده شکستگی‌ها هستند. شکستگی‌های دارای روند N-S، NNE-SSW و E-W (دسته 2، 1 و 4) در شرق، شکستگی‌های با روند NNW-SSE (دسته 6) در بخش‌های شمالی و شرقی منطقه و شکستگی‌های واجد روند ENE-WSW (دسته 3) در غرب منطقه تمرکز یافته‌اند. در یک نگاه اجمالی بخش‌های شرقی منطقه دارای بالاترین تنوع و تعداد شکستگی‌های ساختاری می‌باشند.

پس از تفکیک شکستگی‌ها به دسته‌های شش-گانه، با کمی دقت در نقشه ساختاری رسم شده، می‌توان محدوده‌های متفاوتی از نظر حضور یا عدم حضور هر دسته خطواره در منطقه مشخص کرد (سولومون و غریب، 2006). در شکل 10، محدوده‌های متفاوتی مشخص شده است، که هر دیاگرام گل‌سرخ‌ی معرف محدوده زیر آن (6×6 کیلومتر) است. همانگونه که مشاهده می‌شود، شکستگی‌های WNW-ESE (دسته 5) در جنوب منطقه توزیع بیشتری دارند و همین‌طور در بخش



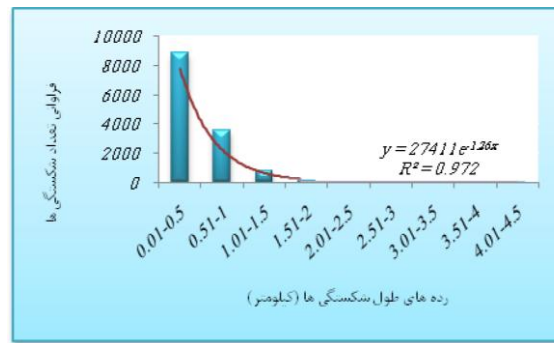
شکل 10: تصاویر Rose Diagram برای 8 محدوده انتخابی بر روی نقشه شکستگی‌های منطقه اخلمد

کلاس ابتدایی این رده‌بندی از 0/01 کیلومتر تا 0/5 کیلومتر است، به این دلیل که اندازه کوچکترین شکستگی تقریباً 15/7 متر است. هیستوگرام مربوط به دسته 2 (NNE-SSW) برای نمونه آورده شده است (شکل 12). در نگاه کلی تمام هیستوگرام‌های رسم شده از توزیع نمایی برخوردارند و این امر به عنوان خصوصیتی طبیعی برای گسل‌ها اعتبار بالای تکنیک‌های دورسنجی برای تشخیص شکستگی‌ها را نشان می‌دهد. نمایی بودن توزیع تعداد به طول شکستگی‌ها در یک ناحیه طبیعتاً نمایانگر بلوغ ساختاری و حد نهایی توسعه شکستگی‌های ساختاری در آن ناحیه است (ایگزپولپاس و کوکولاس، 2004). این روند نمایی برای طول دارای مقدار 0/97 و توزیع توانی 1/26 است.

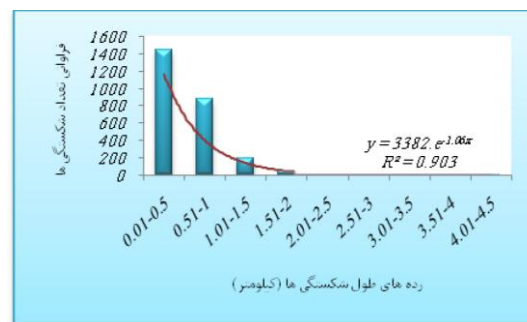
تحلیل طول، و فاصله‌بندی گسل‌ها: یک نگاه کلی به نمودار، می‌توان تمام شکستگی‌ها را به 4 گروه از نظر مقدار طول دسته‌بندی نمود:

- 1- شکستگی‌های بسیار کوتاه، با طول 0/01 تا 0/5 کیلومتر، با فراوانی غالب (8885)
- 2- شکستگی‌های کوتاه، با طول 0/5 تا 1 کیلومتر، با فراوانی متوسط (3572)
- 3- شکستگی‌های متوسط، با طول 1/01 تا 1/5 کیلومتر، با فراوانی کم (793)
- 4- شکستگی‌های بلند، با طول 1/51 تا 4/1 کیلومتر، با فراوانی بسیار کم (197)

شکل 11 نمودار فراوانی طول شکستگی‌ها است که از طول گسل‌ها و فراوانی آنها بدست می‌آید. جهت مشاهده جزئیات بیشتر فاکتور طول، نمودار فراوانی طول برای هر کدام از دستجات شکستگی‌ها، در کلاس‌های 0/49 کیلومتری، رسم شد.



شکل 11: هیستوگرام فراوانی طول شکستگی‌های ساختاری منطقه اخلمد؛ رده‌های طول شکستگی به واحد متر در نمودار افقی و فراوانی تعداد شکستگی‌ها در نمودار عمودی به نمایش درآمده است.



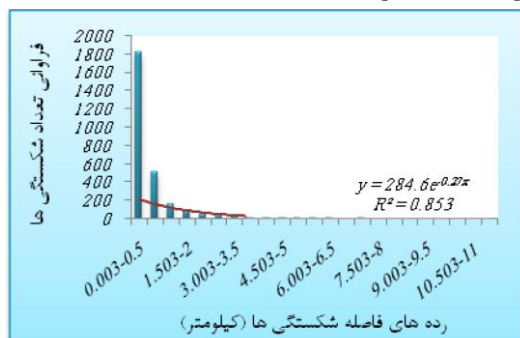
شکل 12: هیستوگرام توزیع طول دسته شکستگی شماره 2 منطقه اخلمد؛ رده‌های طول شکستگی به واحد متر در نمودار افقی و فراوانی تعداد شکستگی‌ها در نمودار عمودی به نمایش درآمده است.

شکستگی‌ها در واحد سطح (مساحت واحد) تعریف می‌شوند. برای رسم یک شبکه مناسب، وسعت منطقه و مقدار پخش‌شدگی مکانی شکستگی‌ها باید در نظر گرفته شوند. وسیع بودن محدوده، ابعاد بزرگتر شکستگی‌ها و تجمع بالای آنها در یک یا چند ناحیه ابعاد کوچکتری را برای سلول‌های شبکه ایجاب می‌کند. با توجه به وضعیت تراکم شکستگی‌های نهشته‌های ژوراسیک در منطقه اخلمد، این منطقه به 200 سلول مربعی با اضلاع 2 در 2 کیلومتر شبکه‌بندی شد. سپس پارامترهای تراکم، تجمع و نقاط تلاقی برای هر سلول به طور دستی و جداگانه محاسبه گردید. نتیجه تجزیه و تحلیل فراوانی خطواره‌ها در شکل 15 نشان داده شده است. با توجه به نقشه رسم شده در بخش مرکزی منطقه بیشترین تراکم خطواره‌ها مشاهده می‌شود. نقشه تراکم طول خطواره‌های اندازه‌گیری شده در شبکه انتخاب

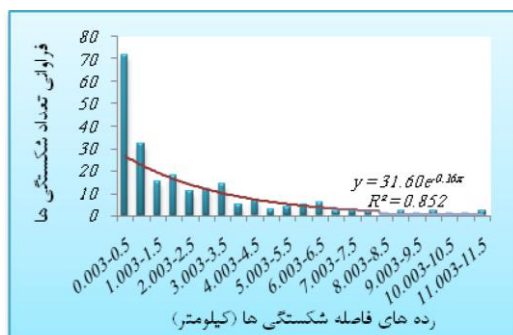
سیمای کلی فواصل شکستگی‌ها در منطقه اخلمد را در شکل 13 مشاهده می‌کنیم. کاهش بودن فراوانی نسبت به افزایش فاصله‌بندی به صورت نمایی درخور توجه است. بررسی هرکدام از دسته‌ها به صورت جداگانه در هیستوگرام نیز موید توزیع نمایی است. به عنوان نمونه هیستوگرام مربوط به دسته نخست (N-S) در شکل 14 نشان داده شده است. به مانند فاکتور طول، نمایی بودن نسبت تعداد به فواصل شکستگی‌ها نشان‌دهنده بلوغ ساختاری نسبی و توسعه خوب گسل‌ها در یک ناحیه است (ایگزپولیا س و کوکولاس، 2004) که منطقه اخلمد هم از نظر طول و هم فاصله دارای چنین خصوصیتی است. و این روند نمایی برای فاصله‌بندی دارای مقداری بین 0/7 تا 0/95 است.

تحلیل تراکم فراوانی، طولی و نقاط تلاقی شکستگی‌ها: پارامترهای تراکم فراوانی، طولی و نقاط تلاقی

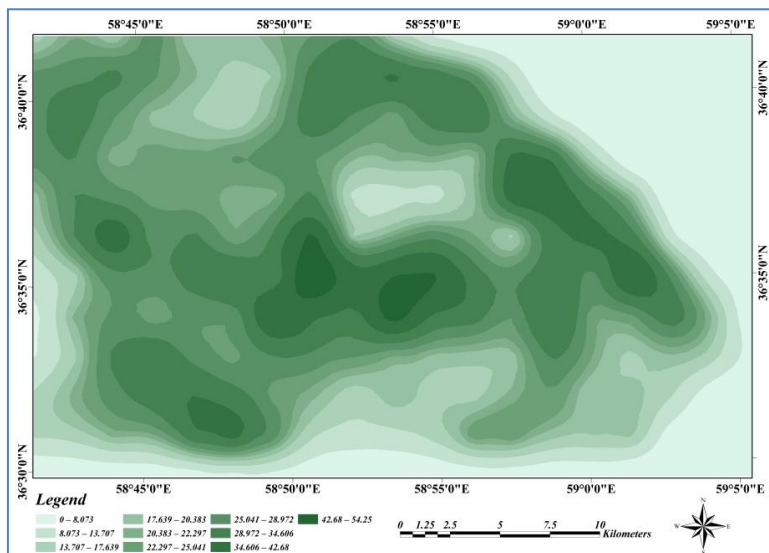
شده، در شکل 16 آماده شده است. بیشترین مشخصه این نقشه این است که بالاترین تمرکز طول در جنوب، شرق و شمال منطقه با راستای E-W، NNW-SSE و ENE است. این نشان‌دهنده تمرکز شکستگی‌ها با طول بزرگتر است.



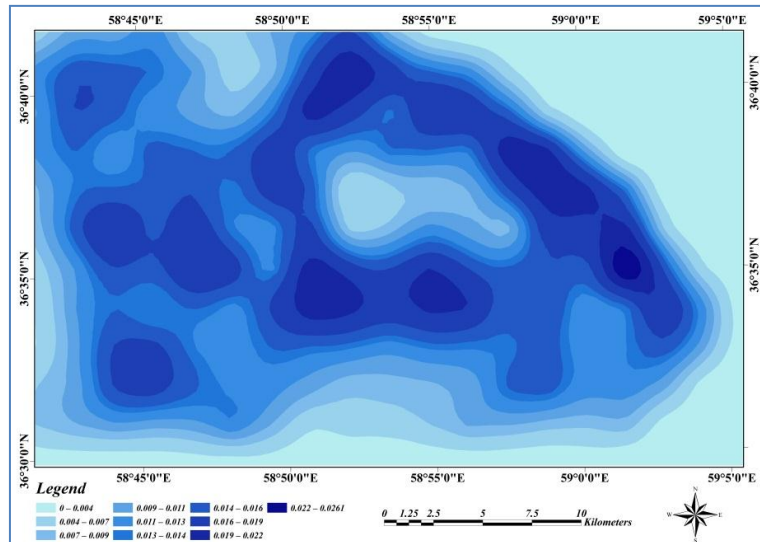
شکل 13: هیستوگرام توزیع فاصله شکستگی‌های ساختاری منطقه اخلمد



شکل 14: هیستوگرام توزیع فاصله دسته شکستگی شماره 1 منطقه اخلمد



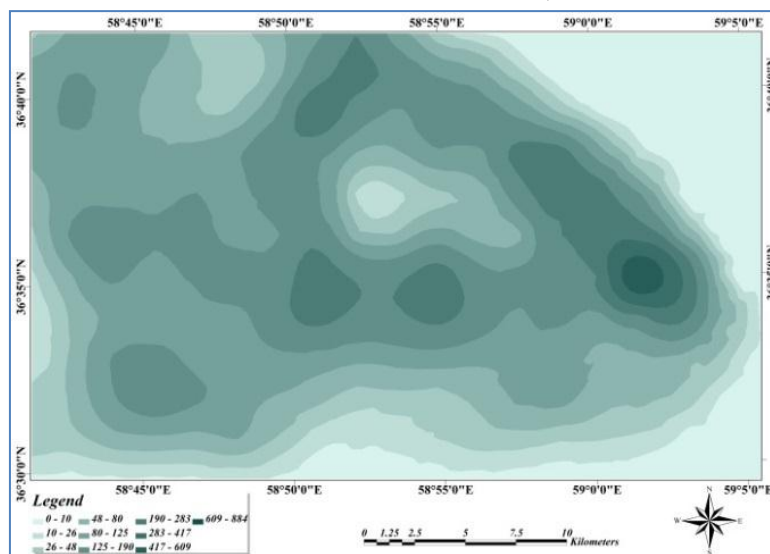
شکل 15: نقشه منحنی‌های میزان تجمع (فراوانی) شکستگی‌های ساختاری منطقه اخلمد (Km⁻²).



شکل 16: نقشه منحنی‌های میزان تراکم طول شکستگی‌های ساختاری منطقه اخمد (m^{-1}).

منطقه است. این بدین معناست که در این ناحیه شکستگی‌ها دارای جهت‌گیری متنوعی هستند.

از تجزیه و تحلیل نقاط برخورد شکستگی‌ها در شبکه انتخاب شده، نقشه شکل 17 بدست آمده است. با توجه به شکل بیشترین تراکم در شرق



شکل 17: نقشه منحنی میزان نقاط تلاقی شکستگی‌های ساختاری منطقه اخمد

مناطق مناسبی را برای اکتشافات هیدروژئولوژیکی و معدنی مشخص کند. الگوهای آماری سیستم‌های شکستگی در بسیاری از مناطق مورد مطالعه قرار گرفته است. تریپ، 2002 ساختار را یکی از عوامل کنترل‌کننده اصلی در سنگ معدن آرکئن می‌دانند و معتقدند شکل‌گیری زون‌های با تراکم

بحث و نتیجه‌گیری

مطالعه شکستگی‌ها، به دلیل اهمیتی که در هدایت و نفوذ سیال و آب و ایجاد تخلخل ثانویه دارد، ضروری می‌باشد. مناطقی که دارای فراوانی زیاد خطواره‌ها می‌باشند، دارای درجه بالایی از شکستگی‌ها هستند که تراکم خطواره‌ها می‌تواند

نشان نمی‌دهد. در عین حال توزیع تجمعی فراوانی و تراکم طولی نشان‌دهنده شکل‌گیری گسل‌های جدید نسبت به رشد و افزایش طول گسل‌های اولیه است. نمایی بودن هیستوگرام‌های رسم شده توزیع تعداد به طول و نسبت تعداد به فواصل شکستگی‌ها، به عنوان خصوصیتی طبیعی برای شکستگی‌ها اعتبار بالایی تکنیک‌های دورسنجی برای تشخیص شکستگی‌ها را نشان می‌دهد. مقادیر طول و فاصله‌بندی شکستگی‌ها نسبت به افزایش فراوانی آنها در هیستوگرام‌های مربوطه کاهش می‌یابند. نمایی بودن توزیع تعداد به طول شکستگی‌ها در یک ناحیه طبیعتاً نمایانگر بلوغ ساختاری و حد نهایی توسعه شکستگی‌های ساختاری در آن ناحیه است. به مانند فاکتور طول، نمایی بودن نسبت تعداد به فواصل شکستگی‌ها نشان دهنده بلوغ ساختاری نسبی و توسعه خوب گسل‌ها در یک ناحیه می‌باشد که منطقه اخلمد هم از نظر طول و هم فاصله دارای چنین خصوصیتی است. مقایسه تصویری نقشه‌های تراکم طول و نقاط تلاقی خطواره‌ها نشان می‌دهد که هردو نقشه تقریباً از نظر تراکم مشابه یکدیگرند. برای مثال هردو تراکم بالایی را در شرق منطقه نشان می‌دهند. به عبارت دیگر در مناطقی که تراکم طول خطواره‌ها بیشتر بوده، امکان تلاقی خطواره‌ها با یکدیگر نیز بیشتر است. این تراکم تلاقی خطواره‌ها در قابلیت هدایت یک شبکه شکستگی موثر است. با توجه به این موضوع که نقاط تلاقی مکان مناسبی برای کانی‌سازی است؛ بنابراین احتمال وجود کانی‌سازی در این مناطق بیشتر است. مقایسه تصویری نقشه‌های تجمع و نقاط تلاقی خطواره‌ها نشان می‌دهد که در بخش‌های کوچکی از نظر تراکم مشابه یکدیگر هستند و در بسیاری از مناطق، تراکم نقاط تلاقی متفاوت از تجمع خطواره‌هاست. برای مثال در بخش جنوبی

بالای شکستگی یا گسلی ممکن است مسیرهایی با افزایش نفوذپذیری و جریان محلول‌ها طی دگرگونی را فراهم کند. و متوجه شدند، در شمال منطقه Kalgoorlie، بین تراکم شکستگی و توزیع کانی‌شناسی و توسعه معدن رابطه وجود دارد. نتیجه آنالیز خطواره‌ها در منطقه Ondo در نیجریه توسط مוגاجی و همکاران (2011) نشان می‌دهد تراکم تقاطع خطواره‌ها در بخش‌های مرکزی، شمال شرق و جنوب غرب منطقه مورد مطالعه زیاد است و این زون‌های با تراکم زیاد تقاطع خطواره‌ها، زون‌های محتمل برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی با توجه به تصاویر دورسنجی در منطقه است. نتایج این مطالعه نشان داده است که تکنیک‌های دورسنجی در استخراج تمایل خط-واره‌ها در یک جنگل استوایی توانا است. همین‌طور در پژوهشی که توسط ماگوو و همکاران (1999) در یک منطقه کوچک از شمال غرب بوتسواتا متمرکز شده است؛ با توجه به تراکم و نرخ تقاطع شکستگی‌های بالاتر مناطق با احتمال وقوع آب‌های زیرزمینی را در منطقه پیش‌بینی کرده‌اند. تحلیل آماری توزیع طولی، فراوانی و تراکم طولی گسل‌های بزرگ مقیاس منطقه زاگرس و الگوهای مکانی این متغیرها توسط چاوهری بایزدی (1392) انجام گرفته است. نتایج این بررسی‌ها نشان داده است که توزیع طولی گسل‌ها از قانون توانی با ضریب توانی $1/29$ و توزیع تجمعی گسل‌ها نیز از تابع نمایی پیروی می‌کند. توزیع طولی و توزیع تجمعی طولی گسل‌ها در 4 دسته، نتایج مشابهی را به جز دسته اول نشان می‌دهد که موید آن است که به جز دسته اول، گسل‌های دیگر در یک میدان تنشی تقریباً مشابه از لحاظ جهت به‌وجود آمده‌اند. توزیع تراکم گسل‌ها الگوی یک تابع نمایی را نشان می‌دهد؛ درحالی‌که تراکم طولی آنها تابع توزیعی خاصی را

کم است. در این منطقه تراکم شکستگی و نرخ تقاطع شکستگی بالاتر می‌تواند پیش‌بینی‌های لازم را در خصوص اکتشاف ذخایر معدنی و آبی فراهم آورد.

اگرچه تجمع خطواره‌ها بالاست اما تراکم نقاط تلاقی پایین است. این بدان معناست که با وجود فراوانی شکستگی در این بخش، به سبب اینکه بیشتر شکستگی‌ها موازی با یکدیگرند، آنها همدیگر را قطع نمی‌کنند و بنابراین تراکم تلاقی

منابع

-غلامزاده، م.، رحیمی، ب.، قائمی، ف. و احمدی روحانی، ر.، 1393. بررسی شکستگی‌های ساختاری منطقه اخلمد (شمال غرب بینالود) با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و مطالعه الگوهای فراکتالی سیستم‌های شکستگی منطقه بر روی نقشه رسم شده از روش‌های دورسنجی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم پایه، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، 154 ص.

-احمدی روحانی، ر.، 1390. گزارش دورسنجی شهرستان گناباد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، مدیریت منطقه شمال شرق، 102 ص.

-بازرگانی گیلانی، ک.، قریشی‌نیا، س.ک. و کریم‌زاده، ز.، 1391. زمین‌شناسی و مشخصات بستر کربناته کانسار سرب و روی اخلمد، غرب چناران، البرز شرقی، ایران، چهارمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه بیرجند.

-فاطمی، س. ب. و رضایی، ی.، 1385. "مبانی سنجش از دور"، تهران، انتشارات آزاده.

-سلطانی، م.، 1388. جزوه درسی سنجش از دور مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات پیشرفته دانشگاه صنعتی شریف.

-محمودزاده، م.، الماسیان، م.، پورکرمانی، م. و سلطانی، م.، 1388. تحلیل ساختاری سامانه گسل تبریز با استفاده از داده‌های دورسنجی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران-شمال.

-فروند، ج.، 1387. آمار ریاضی، عمیدی، ع. و وحیدی اصل، م.، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.

-نظرزاده، م.، نجفی، م.، محبوبی، ا. و موسوی حرمی، ر.، 1383. بررسی چینه سنگی رسوبات ژوراسیک فوقانی واقع در شمال غرب مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، پایان‌نامه کارشناسی-ارشد، دانشکده علوم پایه.

-حاجی، ع.، رحیمی، ب. و سلطانی، م.، 1387. سیستم‌های شکستگی منطقه تکنار، ایران مرکزی با استفاده از داده‌های سنجش از دور و مطالعات صحرایی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه علوم پایه دامغان، دانشکده علوم زمین، 94 ص.

-Ackermann, R. V., Schlische, R. W. and Withjack, M. O., 2001. The geometric and statistical evolution of normal fault systems: an experimental study of the effects of mechanical layer thickness on scaling laws, *Journal of Structural Geology*, v. 25, p. 819-822.

Geological Society of America Bulletin, v.103, p.983-992.

-Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of Paleo-Tethys remnant in northeastern of Iran,

-Bonnet, E., Bour, O., Odling, N.E., Davy, P., Main, I., Cowie, P. and Berkowitz, B., 2001. Scaling of fracture systems in geological media, *Reviews of Geophysics*, v. 39, p. 347-383.

-Bour, O. and Davy, P., 1997. Connectivity of random fault networks following a power-law fault length

- distribution, *Water Resources Research*, v. 33(7), p. 1567-1583.
- Bour, O., Davy, Ph., Darcel, C. and Odling, N., 2001. A statistical scaling model for fracture network geometry, with validation on a multi-scale mapping of a joint network (Hornelen Basin, Norway), *Journal of Geophysical Research*, v. 107, p. 1-11.
- Cengiz, O., Sener, E. and Yagmurlu, F., 2006. A satellite image approach to the study of lineaments, circular structures and regional geology in the Goluk Crater district and its environs (Isparta, SW Turkey), *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 27, p. 155-163.
- Casas, A. M., Cortes, A. L., Maestro, A., Soriano, A., Riaguas, A. and Bernal, J., 2000. LINDENS: A program for lineament length and density analysis, *Journal of Computers & Geosciences*, v. 26, p.1011-1022.
- Castaing, C., Halawani, M.A., Gervais, F., Chilès, J.P., Genter, A., Bourguine, B., Ouillon, G., Brosse, J.M., Martin, P., Genna, A. and Janjou, D., 1996. Scaling relationships in intraplate fracture systems related to Red Sea rifting, *Journal of Tectonophysics*, v. 261, p. 291-314.
- Chaves, P. S., Berlin, G. L. and Sowers, L. B., 1982. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios, *British Journal of Photography*, v. 8, p. 23-30.
- Chaves, P.S. and Yaw Kwarteng, A., 1989. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis, *The U.S. Geological Survey Journal*, v. 55, p. 339-348.
- Chilès, J.P., 1988. Fractal and geostatistical methods for modeling of a fracture network, *Journal of Mathematical Geology*, v. 20(6), p. 631-654.
- Cowie, P. A., Sornette, D. and Vanneste, C., 1995. Multifractal scaling properties of a growing fault population, *Geophysical Journal International*, v. 122, p. 457-469.
- Davy, P. A. and Sornette, D., 1990. Some consequences of a proposed fractal nature of continental faulting, *Nature*, v. 348, p. 56-58.
- Davy, P., 1993. On the fault-length frequency distribution of the San Andreas fault system, *Journal of Geophysical Research*, v. 98(12), p.141-151.
- Koike, K. and Ichikawa, Y., 2006. Spatial correlation structures of fracture systems for deriving a scaling law and modeling fracture distributions, *Journal of Computers & Geosciences*, v. 32, p. 1079-1095.
- Magowe, M. and Carrb, J.R., 1999. Relationship between lineament and groundwater occurrence in Western Botswana, *International Journal of water resources and environmental engineering*, v. 37, p. 282-286.
- Mogaji, K.A., Aboyeji, O.S. and Omosuyi, G.O., 2011. Mapping of lineaments for groundwater targeting in basement complex area of Ondo state using remotely sensed data, *International Journal of water resources and environmental engineering*, v. 3, p. 150-160.
- Nelson, R.A., 2001. Geological analysis of naturally fractured reservoirs, 2nd edition, Gulf Professional Publishing, 332 p.
- Nieto-Samanigo, A.F., Alaniz-Alvarez, S.A., Tolson, G., Oleschko, K., Korvin, G., Xu, S.S. and Perez-venzor, J.A., 2005. Spatial distribution, scaling and self-similar behavior of fracture arrays in the Los Planes fault, Baja California Sur, Mexico, *Journal of Pure and Applied Geophysics*, v. 162, p. 805-826.
- Odling, N.E., Gillespie, P., Bourguine, B., Castaing, C., Chiles, 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, *Journal of Petroleum Geoscience*, v. 5, p. 373-384.
- Ouillon, G., Castaing, C. and Sornette, D., 1996. Hierarchical geometry of faulting, *Journal of geophysical research*, v. 101(B3), p. 5477-5487.
- Ouillon, G., Sornette, D. and Castaing, C., 1995. Organization of joints and faults from 1 to 100 scales revealed by Optimized Anisotropic Wavelet Coefficient Method and Multifractal analysis, *Journal of Nonlinear Processes in Geophysics*, v. 2, p. 158-177.
- Ouillon, G. and Sornette, D., 1996. Unbiased multifractal analysis Application to fault patterns, *Journal of Geophysical research letters*, v. 23(23), p. 3409.
- Peacock, D.C.P. and Mann, A., 2005. Evaluation of the controls on fracturing in reservoir rocks, *Journal of Petroleum Geology*, v. 28(4), p. 385-396.
- Rowan, L.C. and Mars, J.C., 2003. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data, *Remote Sensing of Environment*, v. 85, p. 350-366.
- Segall, P. and Pollard, D. D., 1983. Joint formation in granitic rock of the Sierra Nevada, *Geological Society of America Bulletin*, v. 94, p. 563-575.
- Shahrabi, M. and Davoudzadeh, M., 1986. Geological map of Mashhad (1:250000), Geological Survey of Iran, 1 Sheet.
- Solomon, S. and Ghebreab, W., 2006. Lineament Characterization and their tectonics significance using Landsat TM data and field studies in the central highlands of Eritrea, *Journal of African Earth Sciences*, v. 46, p. 371-378.
- Tripp, G. I. and Vearrcombe, J. R., 2004. Fault/Fracture density and mineralization: a contouring method for targeting in gold exploration, *Journal of structural geology*, p. 1087-1108.
- Turcotte, D.L., 1986. A fractal model for crustal deformation, *Journal of Tectonophysics*, v. 132, p. 261-269.
- Twiss, R. J. and Moores, E. M., 2001. *Structural geology*: W.H. Freeman and company, New York, 532 p.
- Webster, R. and Oliver, M. A., 2007. *Geostatistics for Environmental Scientists*, British: John Wiley & Sons, Ltd., 2nd Edition, 330 p.
- Xypolias, P. and Koukouvelas, I. K., 2004. Fault trace parameters as a tool for analyzing remotely sensed fault arrays: an example from the eastern Gulf of Corinth, Greece, *Journal of Remote Sensing*, v. 25(21), p. 4685-4699.
- Zazoun, R. S., 2008. The Fadnoun area, Tassili-n-Azdjer, Algeria: Fracture network geometry analysis, *Journal of African Earth Sciences*, v. 50(5), p. 273-285.