

تهیه نقشه زمین‌شناسی شکستگی‌ها و خطواره‌ها با استفاده از پردازش تصاویر رادار روزنه ترکیبی (SAR) (مطالعه موردی تصویر منطقه کلات نادری)

رضا ملکی^{۱*}، مهدی مختارزاده^۲، علی اکبر آبکار^۳، محمدجواد ولدان‌زوج^۴، علی غفوری^۵

۱- کارشناس ارشد ۲ و ۳- استادیار ۴- دانشیار، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی،

۵- کارشناس ارشد سنجش از دور مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران

(دریافت: ۹۲/۰۹/۰۵، پذیرش: ۹۳/۰۱/۱۶)

چکیده

خطواره‌ها از مهم‌ترین پدیده‌های زمین‌شناسی در مطالعات اکتشافی مخازن هیدروکربن می‌باشد. برداشت‌های زمینی زمین‌شناسان جهت دستیابی به نقشه این خطوط، هزینه و زمان بسیاری را معطوف خود می‌سازد که بنا به نوع کار، از دقت چندانی هم برخوردار نیستند. یکی از راه‌های استخراج خطواره‌ها، استفاده از روش‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای است. در این مقاله، ضمن مروری بر روش‌های استخراج خطواره‌ها، روشی بر مبنای کشف لبه کنی مطرح شده است. در این تحقیق مشخص می‌گردد که استفاده از معیار متریک پرات، پارامتر سیگمای ۱ و حد آستانه ۰/۶ برای پارامترهای تشخیص لبه کنی، بهترین نتیجه را روی تصویر ENVISAT1 به‌دنبال خواهد داشت. این مقاله با تعیین برخی قیود هندسی، معیار مشخصی برای بهبود دقت کیفی و کمی نقشه خطواره‌ها ارائه می‌نماید.

واژگان کلیدی:

الگوریتم کشف لبه کنی، خطواره‌های زمین‌شناسی، رادار روزنه ترکیبی، منطقه کلات نادری

۱. مقدمه

آغاز پروژه‌های اکتشافی غالباً دارای مقدماتی است. به‌عبارت دیگر، پیش از حفاری نخستین چاه اکتشافی لازم است مطالعاتی برای پی بردن به وجود شرایط لازم برای استخراج و تولید معادن و مخازن هیدروکربن به شرح ذیل صورت پذیرد:

- بررسی‌های میدانی و زمین‌شناسی منطقه
- بررسی‌های مغناطیسی و یا ثقل‌سنجی
- بررسی‌های لرزه‌نگاری

استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی و اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی سنگ‌های سطحی، برای اکتشاف ذخایر پنهان‌شده در زیر زمین (از قبیل نفت، گاز، آب، کانی و...) و یا برای مقاصد مهندسی است که به سه بخش تقسیم می‌شوند:

خطواره‌ها عبارت‌اند از شکستگی‌های نزدیک سطح زمین که از آنها در شناسایی و تحلیل بهتر منطقه از لحاظ سنگ‌شناسی و ساختاری استفاده می‌شود. متداول‌ترین روش در شناسایی ساختمان‌های زیرسطحی به‌منظور انجام عملیات اکتشافی معدنی و هیدروکربنی اعم از نفت و گاز، روش‌های لرزه‌نگاری می‌باشد که همواره هزینه‌های بسیار هنگفتی را دربر دارند و به دلایل مختلف، داده‌های برداشت‌شده از اطمینان و صحت کافی برخوردار نبوده و استفاده از روش‌هایی که احتمال موفقیت را در این حوزه قوت ببخشد همواره مورد استقبال قرار می‌گیرد. خطواره‌های زمین‌شناسی نقش درخور توجهی نیز در شکل‌گیری فرآورده‌های هیدروکربوری، مهاجرت و حتی خواص این مواد دارند [۱].

¹ Well Logging

* رایانامه نویسنده پاسخگو: Rezaa_Maleki@yahoo.com

قابلیت‌های پردازش تصاویر سنجش از دور و به‌طور خاص، روش‌های شناسایی الگو^۷ (اعم از الگوهای نقطه‌ای، خطی و سطحی) به‌طور گسترده‌ای، در دانش‌های مربوط به زمین برای استخراج عوارض خطی بزرگ و حتی کوچک‌مقیاس استفاده می‌شود.

برخی از مطالعات و پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینه استخراج خطواره‌ها با استفاده از سنجنده‌های مختلف ماهواره‌های سنجش از دور، به‌صورت زیر است:

از جمله الگوریتم‌های سنجش از دور در تشخیص خطواره‌های زمین‌شناسی، اپراتور بهینه‌سازی شده تشخیص لبه با نام کنی^۷، با قابلیت پیاده‌سازی بر روی تصاویر نوری یا راداری می‌باشد که در پژوهش‌های متعدد، نتایج مناسبی در مطالعات زمین‌شناسی به‌دنبال داشته است [۴].

روش تشخیص لبه کنی، لبه‌ها را با جستجوی ماکزیمم‌های محلی گرادیان تصویر استخراج می‌کند. گرادیان از روی مشتق فیلتر گاوسین محاسبه می‌شود. این روش از دو آستانه استفاده کرده تا لبه‌های ضعیف و قوی را پیدا کند. در صورتی که لبه‌های ضعیف به لبه‌های قوی متصل باشند، لبه استخراج می‌شود. این روش بیشتر به کشف لبه‌های ضعیف می‌پردازد و کمتر فریب نویزها را می‌خورد و از بقیه روش‌های کشف لبه بهتر است [۴].

در پژوهش بغدادی^۸ و همکاران، تفسیر بصری باندهای L، C و X داده‌های SIRC برای تشخیص خطواره‌ها با فاصله‌های ۳۶ درجه ای در منطقه نیمه‌خشک موریتانی مورد استفاده قرار گرفته است. این تحقیق دارای نتایج خوبی برای باند L بدون در نظر گرفتن قطبش^۹ را نشان داده اما باند C با قطبش HH کارآمدتر بوده است [۶]. همچنین استفاده از تفسیر بصری اجزای اصلی تصاویر Radarsat-1 در ایالت آلبرتا^{۱۰} مرکزی (کانادا) نشان داد که استفاده از باند C با قطبش HH، بهترین نتایج در استخراج خطواره‌ها را داشته است [۶].

دسجاردینس^{۱۱} و همکاران، پتانسیل تصاویر Radarsat-1 به‌دست آمده در حالت F1 و S2 برای تشخیص خطواره در یک منطقه واقع در محدوده ۱۰۰ کیلومتری شمال شرق کبک^{۱۲} (کانادا) را بررسی کرده‌اند. ترکیب بهینه الگوریتم تشخیص لبه کنی با شبکه عصبی، بهترین نتایج را در حالت F1 با وضوح 8.4 m × 9.1 m داشته‌اند [۷]. ساموئل کورگن^{۱۳} و همکاران تحقیقی را بر روی داده‌های Radarsat-1 در زمان‌ها و زاویه‌های مختلف در یک ناحیه نیمه‌خشک

• سنجش از دور

• چاه‌پیمایی یا چاه‌نگاری^۱

• ژئوفیزیک سطحی^۲

گاه مطالعه برخی از نشانه‌های واقع بر روی سطح زمین، می‌تواند راهنمای کارشناسان برای کشف معادن فلزی/غیرفلزی و مخازن هیدروکربنی باشد. بخشی از هیدروکربن موجود مابین لایه‌هایی که هزاران متر در زیر زمین هستند، ممکن است در اثر عوامل مختلفی به سطح زمین رسیده باشد و آن بخش از لایه را که برونزد^۳ آن نامیده می‌شود، بر روی سطح زمین مشاهده گردد. سودمندترین نشانه‌های قابل تشخیص در داده‌های ماهواره‌ای برای مطالعات معادن و مخازن نفت و گاز، عبارت‌اند از [۲]:

• سیستم‌های شکستگی (عمدتاً خطواره‌ها) و ساختارهای طاقدیسی و چین - گسلی

• آلتراسیون‌های ژئوشیمیایی^۴ سنگ‌های سطحی

• چشمه‌های نفتی^۵ یا تراوشات هیدروکربنی

• استرس‌های پوشش گیاهی

در این تحقیق، با توجه به نیازسنجی که از مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران صورت‌گرفته است، به بررسی ماهیت و وجود خطواره‌ها که یکی از نشانه‌های ساختارهای زمین‌شناسی حاوی مواد هیدروکربنی است پرداخته می‌شود. خطواره‌ها در مفهوم ژئومورفولوژیکی به‌عنوان ویژگی‌های خطی روی سطح زمین هستند که دارای الگوی متفاوتی از عوارض مجاور خود بوده و این تفاوت، نماینده وجود یک علت زیرسطحی می‌باشد [۳]. یکی از روش‌های به نسبت کم‌هزینه برای استخراج خطواره‌ها، استفاده از تصاویر و داده‌های ماهواره‌های مختلف سنجش از دور می‌باشد زیرا بدون تماس مستقیم و با استفاده از برخی ویژگی‌های هندسی و طیفی این خطواره‌ها، می‌توان آنها را از روی تصاویر ماهواره‌ای شناسایی نمود. همچنین با اعمال روش‌های مختلف پردازش تصاویر می‌توان استخراج خطواره‌ها را به‌صورت خودکار انجام داد.

روش‌های مختلفی در تفسیر چشمی تصاویر هوایی و ماهواره‌ای، برای استخراج خطواره‌ها می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. همچنین روش‌های خودکار استخراج خطواره‌ها از تصاویر با روش‌های پردازش تصاویر در سال‌های اخیر گسترش یافته است [۴ و ۵]. امروزه

⁷ Canny edge detection method

⁸ Baghdad

⁹ Polarization

¹⁰ Alberta

¹¹ Desjardins

¹² Quebec

¹³ Samuel Kvrngn

¹ Well Logging

² Surface Geophysics

³ Outcrop

⁴ Geochemical Alterations

⁵ Oil Spring

⁶ Pattern Recognition Methods

۲. منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

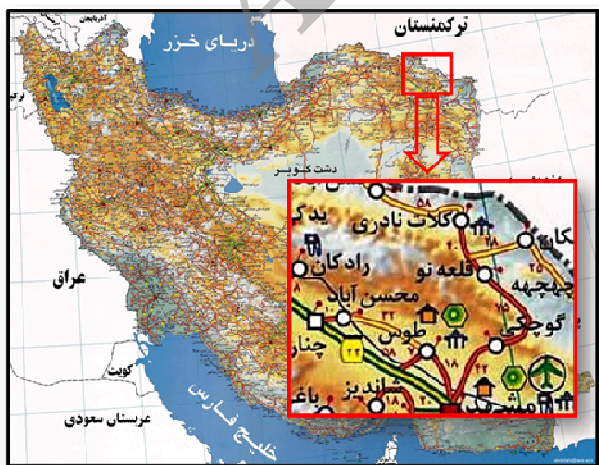
۲-۱. منطقه مورد مطالعه

با توجه به این‌که خطواره‌های پژوهش حاضر، مربوط به خطواره‌های مورد نظر در مطالعات زمین‌شناسی نفت می‌باشد، بدیهی است باید مناطقی مورد مطالعه قرار گیرد که پتانسیل وجود منابع هیدروکربوری و خطواره‌های حوزه زمین‌شناسی نفت باشد. پروژه‌های اکتشافی شرکت ملی نفت ایران در منطقه کپه‌داغ نشان‌دهنده وجود شکستگی‌های زیرسطحی می‌باشد. این شکستگی‌های زیرسطحی به‌صورت خطواره‌ها بر روی سطح پدیدار شده و قابل بررسی و ارزیابی هستند. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق بین عرض‌های جغرافیایی ۳۷ درجه و ۸ دقیقه شمالی و ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۴ دقیقه شرقی و ۱۶ درجه و ۱۹ دقیقه شرقی است. این منطقه در زون رسوبی قوچان، سرخس و مشهد قرار دارد و به لحاظ جغرافیایی هم‌مرز با کشور ترکمنستان می‌باشد. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه در اطراف کلات نادری می‌باشد که روی نقشه ایران نشان داده شده است [۸].

۲-۲. داده‌های مورد استفاده

۲-۲-۱. نقشه گسل‌های موجود در منطقه

وجود هر نوع شکل خطی طویل و غیر عادی در سطح زمین، خطواره نامیده می‌شود. خطواره‌ها نشانه‌ای لازم ولی غیرکافی برای یک گسل‌اند، زیرا خطواره‌ها ممکن است به دلیل وجود درز، دایک و لایه‌بندی نیز ایجاد شوند [۹]. به گسیختگی و یا شکست بخشی از پوسته زمین که به جایابی چینه‌های آن می‌انجامد اصطلاحاً گسل گفته می‌شود که منجر به به‌وجود آمدن خطواره‌ها بر پوسته زمین



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

به نام Soudano-Sahelian در آفریقا انجام دادند. هدف اصلی آنها پتانسیل‌سنجی داده‌های تصاویر سنجنده مذکور در ترکیب با داده‌های زمینی در سیستم اطلاعات مکانی و استفاده از داده‌های اپتیکی Landsat ETM+ برای استخراج خطواره‌های حوضه‌های آبی بود. جنس زمین با استفاده از الگوریتم SAVI اعمال شده، از تصاویر استخراج شده است. در تحقیق مذکور، برای بهبود خطواره‌ها از شروط هندسی بر پایه دانش متخصص استفاده شده است. برای فاصله اتصال خطواره‌ها حد آستانه ۱۰۰ متر و برای اختلاف زاویه اتصال خطواره‌ها حد آستانه ۱۵ درجه در نظر گرفته شده است [۷].

الگوریتم کشف لبه کنی یکی از الگوریتم‌های پرکاربرد در اکتشاف خطوط لبه از تصاویر، برای استخراج خطواره‌ها می‌باشد و نیاز است پارامترهای آن به‌دقت انتخاب شود؛ زیرا پارامترهای کشف لبه کنی تاثیر بسزایی را در بهبود کشف لبه خطوط بر روی تصاویر مختلف داراست. انتخاب نادقیق پارامترهای الگوریتم کنی موجب کشف خطواره‌های اضافی و یا کشف نشدن برخی خطواره‌ها می‌شود. همچنین پارامترهای مذکور از تصویری به تصویر دیگر ممکن است متفاوت باشد، در نتیجه برای تصاویر مختلف باید جداگانه بررسی و تعیین گردد [۴].

در برخی از تحقیقات مذکور؛ از شروط هندسی بر پایه دانش متخصص و قضاوت‌های مهندسی برای بهبود خطواره‌ها استفاده شده است اما میزان مناسب حد آستانه‌های شروط هندسی مورد آزمایش قرار نگرفته است. نیاز است شروط هندسی که تاثیر مستقیم بر روی خطواره‌ها می‌گذارد با دقت بیشتری انتخاب شود. در این مقاله بعد از برآورد پارامترهای مناسب برای الگوریتم کنی جهت استخراج خطواره‌ها، به بررسی شروط هندسی مناسب برای اعمال بر خطواره‌های استخراجی از الگوریتم کنی پرداخته می‌شود.

این مقاله طی چهار بخش اصلی ارائه می‌گردد. همان‌طور که ملاحظه گردید، در بخش اول، مقدمه‌ای جهت ورود به موضوع اصلی بیان شده است که شامل توضیح مختصری از نیازسنجی و اهمیت خطواره‌های زمین‌شناسی در روند اکتشاف نفت، نقش سنجنش از دور در اکتشاف خطواره‌ها، مطالعه‌ای بر تحقیقات صورت‌گرفته و بیان نیازهای این حوزه می‌باشد. در بخش دوم به معرفی منطقه مورد مطالعه و داده‌های مختلف استفاده‌شده در پژوهش حاضر پرداخته می‌شود. بخش سوم، روش انجام تحقیق و نتایج پیاده‌سازی حاصل از روش پیشنهادی ارائه گردیده و در بخش آخر، جمع‌بندی از نتایج و نتیجه‌گیری بیان می‌گردد.

¹ Samuel Corgne

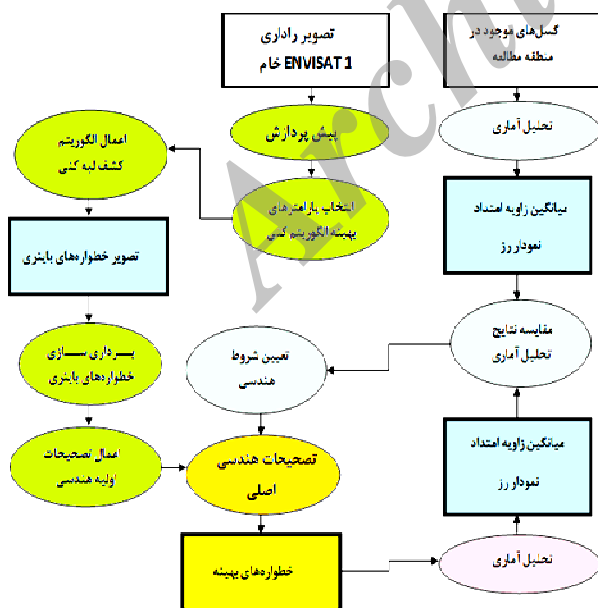
خطواره‌ها، انتخاب نوع و کیفیت داده‌ها و اطلاعات ماهواره‌ای بایستی مطابق با روش‌های پردازش، وابسته به منطقه مورد مطالعه و اهداف خاص استخراج خطواره‌ها انجام گیرد [۵]. تصویر سنجنده ASAR ماهواره ENVISAT1 با توان تفکیک مکانی حدود ۵۰ متر در باند C با پلاریزاسیون HH در تاریخ 25.1.2012 اخذ گردیده است و پایه تصویر^۳ در عرض و طول جغرافیایی ۳۷/۳۹-۵۹/۶۹، ۳۷/۲-۶۰/۸۲، ۳۶/۲۵-۶۰/۵۷، ۳۶/۴۴-۵۹/۴۵ می‌باشد.

۳. تهیه نقشه زمین‌شناسی شکستگی‌ها و خطواره‌ها

بعد از اصلاح تصویر در پیش‌پردازش‌های لازم، تصویر راداری برای استخراج خطواره‌ها آماده شده است. برای استخراج خطواره‌ها از الگوریتم‌های کشف لبه کنی استفاده گردیده و تصویر باینری خطواره‌ها تشکیل شده است. سپس خطواره‌های باینری به خطواره‌ها برداری، برای تحلیل‌های هندسی خطواره‌ها تبدیل گردیده و خطواره‌هایی که از نظر هندسی با ویژگی‌های خطواره‌های مورد نیاز مدیریت اکتشاف مغایرت دارد حذف گردیده است. شکل ۳ روند استخراج خطواره‌ها از تصاویر راداری را نشان می‌دهد. در ادامه به بررسی مراحل روند تحقیق می‌پردازیم.

۳-۱. بررسی آماری گسل‌های موجود در منطقه

برای نشان دادن میزان تکرار آزمون خطواره‌ها، از نمودار رز



شکل ۳. روند نمای مطالعه در پژوهش حاضر

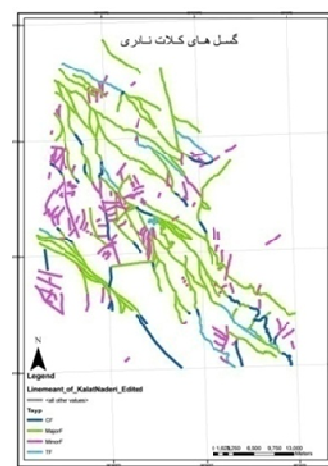
می‌شوند. در واقع این شکستگی‌ها نتیجه حرکت برشی زمین هستند و بزرگ‌ترین نمونه‌های این پدیده‌های زمین‌شناسی، مرزهای میان ورقه‌های زمین‌ساختی پوسته کره زمین است.

از آنجا که شکستگی‌ها معمولاً از یک شیار مستقیم و مرتب تشکیل نشده و ناحیه‌ای از تغییر شکل‌های پیچیده زمین را دربر می‌گیرد معمولاً به جای گسل از عبارت «منطقه گسلی»^۱ که مملو از خطواره‌های متعدد زمین‌شناسی با دلیل شکستگی‌های ناشی از حرکت‌های پوسته می‌باشد، استفاده می‌شود [۱۰].

شکل ۲ نشان‌دهنده گسل‌های موجود در یک منطقه از نقشه زمین‌شناسی، گزارش ورقه ۱:۱۰۰,۰۰۰ کلات نادری رقومی‌سازی شده است. نقشه گسل‌ها در عرض و طول جغرافیایی ۵۹/۵-۶۰ و ۳۶/۵-۳۷ می‌باشد. این نقشه توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در سال ۱۹۹۸ تهیه گردیده است.

۲-۲-۲. تصاویر ماهواره‌ای

تصاویر راداری، به‌طور موثری برای تهیه نقشه عوارض مورفولوژیکی^۲ و تعریف ساختارهای مورفولوژیکی استفاده می‌شوند. همچنین امواج رادار در مناطق خشک صحرای همراه‌شن‌های با یک سری از ویژگی‌ها، با استفاده از باند C و پلاریزیشن HH در زمین نفوذ می‌کنند. در نتیجه می‌توانیم اطلاعاتی تا عمق حداکثر ۲ متر از زمین داشته باشیم. این تصاویر مورفولوژیک و ساختارهای هندسی زمین را بهتر نمایش می‌دهند. تصاویر راداری بهتر از تصاویر اپتیکی، ساختارهای سنگ بستر را نشان می‌دهند [۲]. برای استخراج



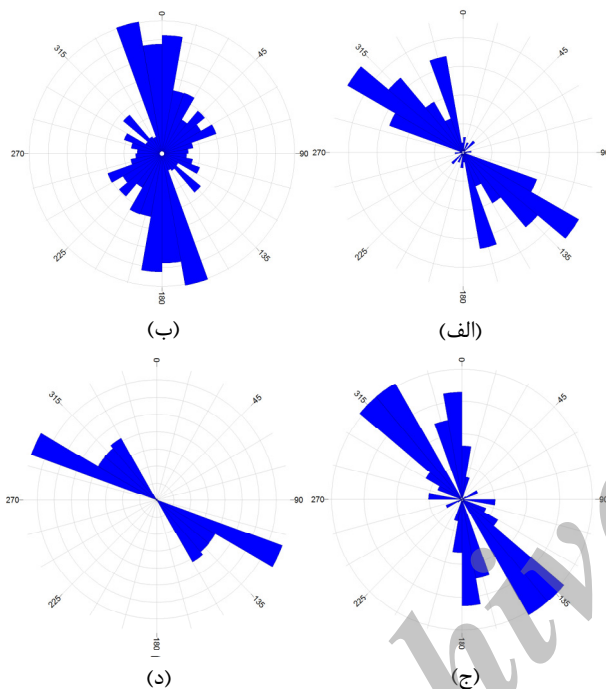
شکل ۲. نقشه گسل‌های منطقه مورد مطالعه - سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

³ FootPrint

¹ Fault System

² Morphological

وسیله ابزار Rose Diagram در منوی اصلی linear و در حالت Length Based Analyses ترسیم شده است. RockWorks 14 نسخه‌ای از بسته نرم‌افزار یکپارچه RockWare برای مدیریت، تجزیه و تحلیل، ترسیم و تجسم داده‌های زمین‌شناسی می‌باشد. برای استفاده از این ابزار باید خطواره‌های موجود به صورت فایل متنی از نقاط ابتدا و انتهای خطواره‌ها باشد. شکل ۵. نمودار رز برای گسل اصلی، فرعی، پنهان و تراستی^۳ با کلاس‌های ۱۰ درجه‌ای است.



شکل ۵. نمودار رز خطواره‌های موجود در منطقه، الف) گسل‌های اصلی، ب) گسل‌های فرعی، ج) گسل‌های پنهان، د) گسل‌های تراستی

۳-۱-۲. میانگین زاویه امتداد

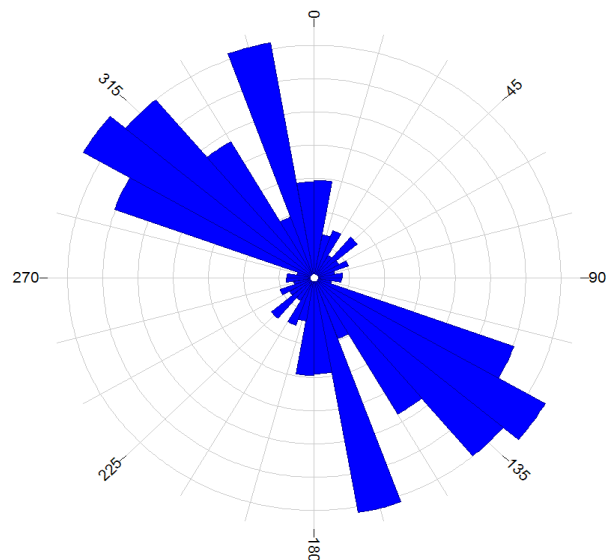
نتایج حاصل از استخراج خطواره‌ها به صورت مجموعه‌ای از خطوط مستقیم، در امتدادهای مختلف است. یکی از راه‌های ارزیابی درستی خطواره‌ها، بررسی امتداد خطواره‌ها و مقایسه آن با امتداد خطواره‌های مرجع می‌باشد. البته منظور از امتداد خطواره‌ها، امتداد تک به تک خطوط نیست بلکه میانگین امتداد خطواره‌ها نسبت به طول هر خطواره است. در واقع طول هر خطواره به صورت وزن آن خط وارد محاسبات میانگین امتداد خطواره‌ها می‌شود و هرچه طول خط بیشتر باشد، تاثیر آن خط بر میانگین زاویه‌ای بیشتر است. معادله (۱) برای محاسبه میانگین زاویه امتداد خطواره‌ها (Meanangle) است که در آن، N تعداد کل خطواره‌ها، i شماره

³ Thrust

استفاده شده و میزان تکرار آزمون با توجه به طول خطواره‌ها در نظر گرفته شده است. هرچه طول خطواره‌ای بلندتر باشد، تاثیر بیشتری بر روی نمودار رز در جهت آن خطواره گذاشته و در واقع میزان تکرار در هر جهت، وابسته به طول خطواره‌ها در آن جهت است. شکل ۴ نمودار رز از کل گسل‌های موجود در منطقه مورد مطالعه است. فاصله کلاس‌ها ۱۰ درجه و میانگین زاویه‌های امتداد ۱۴۳/۶ درجه (۳۲۳/۶۵ درجه) با فاصله اطمینان ۸/۵ درجه (۹۵ درصد) است.

۳-۱-۱. نمودار رز

نمودار گل رز، نمودار هیستوگرامی دایره‌ای است که برای نمایش داده‌های جهت‌دار و میزان تکرار هر دسته از داده است. معمولاً نمودار رز در زمین‌شناسی رسوبی برای نشان دادن داده‌های سن زمین‌شناسی و یا جهت اجزا و در زمین‌شناسی ساختمانی، برای نمایش جهت گسل، خطواره، اتصال^۱ و دایک^۲ استفاده می‌شود. نمودار مذکور می‌تواند هم بر حسب تعداد خط‌ها در امتداد مشخص و یا طول کل خط‌ها در جهت مشخص نشان داده شود. اگر خط‌ها دارای جهت باشند، نمودار رز ۳۶۰ درجه یا دایره کامل نامتقارن است ولی اگر امتداد خط مد نظر باشد، نمودار ۱۸۰ درجه یا نیم‌دایره بوده و نیمه دیگر دایره مشابه آن است و یا به عبارتی، نمودار متقارن می‌باشد. در خطواره‌ها که خطوط جهت ندارند، امتداد خطوط مد نظر بوده، بنابراین نمودار رز به صورت نیم دایره یا دایره متقارن ترسیم می‌گردد [۱۱]. نمودار رز در نرم‌افزار RockWorks 14 و به



شکل ۴. نمودار رز از کل گسل‌های موجود در منطقه مورد مطالعه

¹ Joints

² Dykes

شد. در نهایت، تصاویر ارتوفتو راداری برای مراحل بعدی روند استخراج خطوطاره‌ها مورد استفاده قرار گرفت. پیش‌پردازش داده‌های راداری شامل موارد زیر است:

- تبدیل فاصله اریب به فاصله زمینی
- کاهش نویز اسپیکل^۱
- زمین مرجع کردن

۳-۳. انتخاب پارامترها و اعمال الگوریتم کشف لبه کنی

برای جلوگیری از حذف خطوطاره‌های ضعیف و منقطع باید از الگوریتمی برای کشف لبه استفاده نمود که خطوط منقطع و ضعیف را شناسایی و با توجه به دیگر خطوط، کشف کند. یکی از الگوریتم‌های پرکاربرد کشف لبه در مطالعات زمین‌شناسی که دارای خاصیت مذکور است، الگوریتم کشف لبه کنی می‌باشد.

برای ارزیابی لبه‌های کشف شده با توجه به لبه‌ها در محیط واقعی، از معیار متریک^۲ پرات استفاده شده است. این آزمون برای میزان درستی لبه‌های کشف شده در روش‌های تشخیص لبه با توجه به پیکسل‌های درست و غلط و فاصله با واقعیت می‌باشد. در ادامه، معادله متریک پرات آورده شده است [۱۲].

$$F = \frac{1}{\max(N_{IE}, N_{AE})} \sum_{i=1}^{N_{AE}} \frac{1}{1 + C_s (d_i)^2} \quad (3)$$

در این معادله:

- تعداد پیکسل‌های لبه ایده آل موجود در محیط (NIE)
- تعداد پیکسل‌های لبه استخراج شده از تصویر (NAE)
- مسافت بین لبه تصویر و نزدیکترین لبه ایده آل در محیط (di)
- ثابت مقیاس (Cs) برابر ۰/۱۱۱۱

برای کشف لبه، سیگما بین اعداد ۱ تا ۵ با فاصله ۱ واحد و حد آستانه بین ۰/۳ تا ۰/۸ با فاصله ۰/۱ واحد انتخاب شده که در کل ۳۰ حالت مختلف کشف لبه کنی را ایجاد نموده است. تصویر لبه استخراج شده با توجه به موقعیت درست لبه‌ها در محیط واقعی و با معیار متریک پرات ارزیابی شده‌اند. جدول ۱ نشان‌دهنده معیار ارزیابی پرات روی تصاویر مختلف کشف لبه با پارامترهای مختلف الگوریتم کنی برای مقایسه لبه‌های کشف شده با واقعیت، روی تصویر نمونه است. مقادیر NaN برای مواردی است که با پارامترهای مربوطه کشف لبه کنی، لبه‌ای کشف نشده است.

با مقایسه بین اعداد متریک پرات، مشخص است که سیگمای ۱

خطواره مورد نظر، d_i طول خطواره l_i ، $angle_i$ زاویه امتداد خطواره l_i و D مجموع طول کل خطواره‌ها می‌باشد [۱۱].

$$Meanangle = \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i}{D} \times angle_i \right) \quad (1)$$

برای مقایسه و ارزیابی میزان درستی امتداد خطواره‌ها، بین امتداد میانگین خطواره‌های استخراجی و مرجع، مقایسه انجام می‌شود. به این صورت که اختلاف زاویه میانگین دو امتداد را از کل زاویه (۱۸۰ درجه) تفریق کرده و بر کل زاویه (۱۸۰ درجه) تقسیم نموده و در ۱۰۰ ضرب کرده و در نتیجه، درصد درستی امتداد خطواره استخراجی حاصل می‌شود. معادله (۲) برای محاسبه درصد درستی امتداد خطواره‌ها (AOA%) می‌باشد که در آن، $angleA$ و $angleB$ میانگین زوایای امتداد خطواره استخراجی و مرجع هستند. هر چه مقدار AOA به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد، دو امتداد به هم نزدیک‌ترند [۱۱].

$$AOA \% = \frac{(180 - \sqrt{(angleA - angleB)^2})}{180} \times 100 \quad (2)$$

در جدول ۱ میانگین زاویه گسل‌ها در حالت‌های گسل‌ها، (گسل‌های اصلی، فرعی، پنهان و تراستی) به همراه میزان فاصله اطمینان ۹۵ درصدی برای فواصل زاویه‌ای آورده شده است. با توجه به جدول مذکور، عموم گسل‌های موجود در منطقه در جهت NW-SE قرار دارد. همچنین گسل‌های اصلی در جهت WNW-ESE، گسل‌های فرعی در جهت N-S، گسل‌های پنهان در جهت NNW-SSE و گسل‌های تراستی در جهت WNW-ESE قرار دارند.

۳-۲. پیش‌پردازش تصاویر راداری

اولین مرحله بعد از اخذ تصاویر نوری و راداری، پیش‌پردازش‌های لازم بر روی این تصاویر شامل تصحیحات اتمسفری، هندسی و رادیومتریک می‌باشد. تصحیح رادیومتریکی و هندسی تصاویر راداری با استفاده از نرم‌افزار ENVI4.7 و NEST4C و DEM منطقه انجام

جدول ۱. میانگین زاویه گسل‌ها در حالت‌های مختلف گسل‌های موجود

در منطقه

نوع گسل	تعداد	میانگین زاویه امتداد (درجه)	فاصله اطمینان (درجه)
کل گسل‌ها	۳۲۸	۱۴۶/۸ (۳۲۶/۸)	۸/۹
اصلی	۱۱۵	۱۳۸/۶ (۳۱۸/۶)	۹/۲
فرعی	۱۶۵	۶/۱ (۱۸۶/۱۱)	۲۰/۱
پنهان	۳۲	۱۵۰/۸ (۳۳۰/۷۶)	۱۸/۷
تراستی	۱۶	۱۲۷/۰ (۳۰۷/۰۴)	۱۱/۴

¹ Speckle Noise

² Pratt Metric

است برخی از ایرادات مذکور حذف شود. برای حذف ایرادات از یک سری شروط هندسی اولیه استفاده شده است. برای رفع دو خطی شدن خطواره‌ها، دو لبه که در فاصله کمتر از ۶ پیکسل از هم قرار دارند، با هم ادغام شده و در مرکز دو خط، یک خط به‌عنوان استخراجی در نظر گرفته می‌شود. این عدد با توجه به حداکثر فاصله لبه‌های دو خطی در نقاط مختلف تصویر لبه‌ها در نظر گرفته شده است. برای حذف خطوط بسته شده در دور، به این صورت عمل شده که اگر فاصله ابتدا و انتهای خطواره از $\frac{2\sqrt{2}}{3 \times \pi}$ طول کل خطواره کوتاه‌تر باشد، آن مجموعه خطوط حذف شده است. ضریب مذکور با توجه به فاصله ابتدا و انتهای $3/4$ یک دایره به‌دست آمده است. خطواره مقطع، خطواره‌ای است که از چند خط نزدیک به هم و هم جهت تشکیل شده است. برای حد آستانه حداقلی اتصال خطواره‌های مقطع، منطبق بودن ابتدا یا انتهای خطی به خط دیگر در نظر گرفته شده است. شکل ۷ نمایشی از خطواره‌های بسته‌شده در دور و لبه دو خطی می‌باشد.

برای کشف لبه مناسب‌تر است زیرا در سیگماهای بالاتر در برخی از حد آستانه‌ها، لبه‌ای کشف نشده است ولی در سیگمای ۱، در همه حد آستانه‌ها لبه کشف شده است. در سیگمای ۱ با حد آستانه‌های $0/18$ ، $0/17$ و $0/16$ متریک پرات مقادیر بالاتری دارد. شکل ۴، نشان‌دهنده لبه‌های کشف‌شده با سیگمای ۱ و حد آستانه‌های $0/18$ ، $0/17$ و $0/16$ است. همان‌طور که از تصویر برآورد می‌شود، حالت (الف) با حد آستانه $0/16$ بیشترین تطابق را با تصویر لبه نمونه در شکل ۴ دارد و در حالت (ب) و (ج)، الگوریتم کنی، موفق به کشف چندین مورد از این لبه‌ها نشده است.

۳-۴. برداری‌سازی و تصحیحات هندسی اولیه

بعد از اعمال الگوریتم کشف لبه کنی با پارامترهای برآورد شده، خطواره‌های باینری با ابزار ArcGIS به خطواره‌های برداری تبدیل شده است. خطواره‌های استخراجی در مرحله برداری‌سازی دارای ایراداتی از قبیل دو خطی شدن، بسته شدن خطوط در یک دور و مقطع شدن خطواره‌ها هستند. برای تحلیل آماری خطواره‌ها نیاز



شکل ۶. نتایج اعمال الگوریتم کشف لبه کنی با مقادیر سیگما و حد آستانه مختلف (الف) تصویر منطقه آزمایش (ب) خطواره‌های استخراجی به‌صورت بصری (ج) سیگما ۱ و حد آستانه $0/16$ (د) سیگما ۱ و حد آستانه $0/17$ (ه) سیگما ۱ و حد آستانه $0/18$

جدول ۱. ارزیابی الگوریتم کشف لبه کنی در سیگما و حد آستانه‌های متفاوت با استفاده از معیار متریک پرات

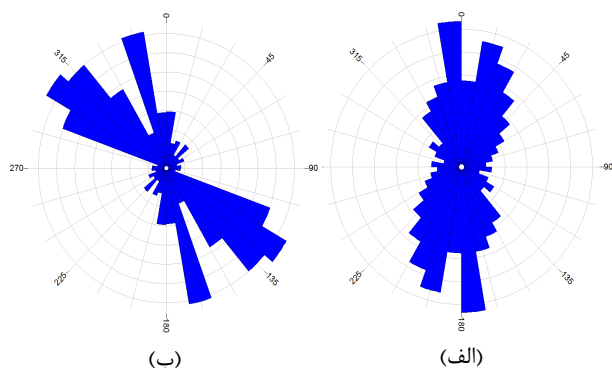
حد آستانه	سیگما	متریک پرات	حد آستانه	سیگما	متریک پرات	حد آستانه	سیگما	متریک پرات
0/3	۱	0/0239	0/4	۱	0/0381	0/5	۱	0/078
	۲	0/0488		۲	0/0787		۲	0/1622
	۳	0/0681		۳	0/138		۳	0/2979
	۴	0/1489		۴	0/247		۴	NaN
	۵	0/0928		۵	NaN		۵	NaN
0/6	۱	0/1066	0/7	۱	0/1724	0/8	۱	0/2085
	۲	0/2797		۲	NaN		۲	NaN
	۳	NaN		۳	NaN		۳	NaN
	۴	NaN		۴	NaN		۴	NaN
	۵	NaN		۵	NaN		۵	NaN

جدول ۳. مقایسه نتایج حاصل از اعمال شروط هندسی روی خطواره‌ها با

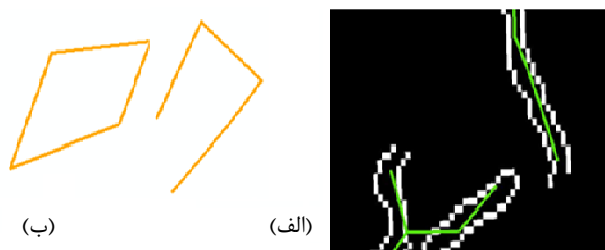
فاصله اطمینان (درجه)	میانگین زاویه نمودار رز (درجه)	حد آستانه فاصله اتصال (متر)	حد آستانه زاویه‌ای (درجه)
۵/۵	۱۲/۹ (۱۹۲/۹۴)	۱۰۰	۱۰
۵/۴	۱۲/۱ (۱۹۲/۰۶)	۲۰۰	
۵/۱	۸/۴ (۱۸۸/۴۲)	۳۰۰	
۵/۴	۱۳/۴ (۱۹۳/۳۷)	۱۰۰	۱۵
۵/۵	۱۲/۶ (۱۹۲/۶۴)	۲۰۰	
۵/۳	۱۱/۰ (۱۹۱/۰۱)	۳۰۰	
۵/۳	۱۳/۲ (۱۹۳/۲۱)	۱۰۰	۲۰
۵/۲	۱۱/۹ (۱۹۱/۹۵)	۲۰۰	
۴/۸	۱۰/۳ (۱۹۰/۲۸)	۳۰۰	

برای تشخیص حد آستانه‌های بهینه، ترکیبی از حد آستانه زاویه‌ای و فاصله‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. مثلاً اگر فاصله رأس دو خط از ۱۰۰ متر کمتر و اختلاف زاویه امتداد دو خط کمتر از ۱۵ درجه باشد، دو خط از آن رأس نزدیک‌تر، به هم متصل شده و تشکیل یک خطواره را می‌دهند. برای تشخیص حد آستانه زاویه‌ای مناسب‌تر، سه زاویه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه و برای یافتن حد آستانه مناسب‌تر فاصله‌ای، فاصله‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ متر مورد آزمایش قرار گرفته است. در واقع ۹ حالت مختلف حد آستانه برای اعمال در روش اعمال شروط هندسی ایجاد و بر روی خطواره‌های استخراجی اعمال می‌شود. شکل ۸ نمودار رز خطواره‌های استخراجی بعد از اعمال شروط هندسی است. جدول ۳ مقایسه‌ای بین میانگین زاویه امتداد خطواره‌های استخراجی بعد از اعمال شروط هندسی می‌باشد.

شکل ۹ نمودار رز کل خطواره‌های موجود در منطقه می‌باشد.



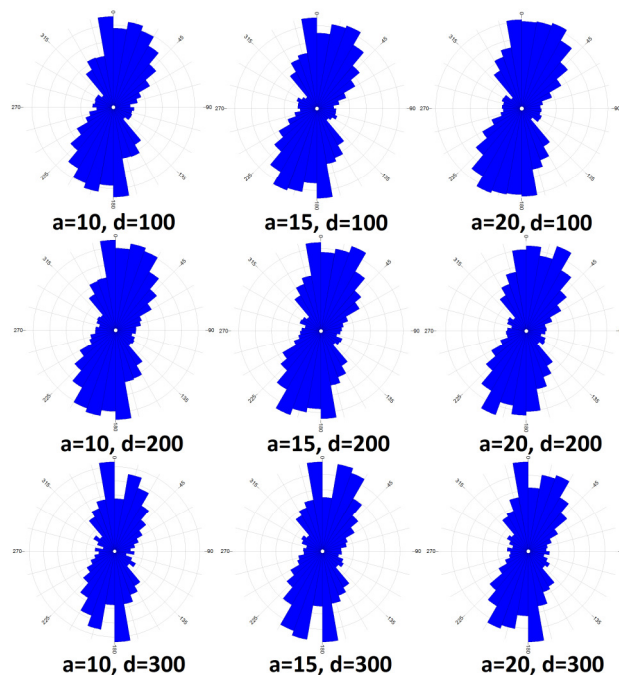
شکل ۹. نمودار رز خطواره‌های الف) استخراجی، ب) موجود در منطقه



شکل ۷. الف) لبه دو خطی، ب) خطواره‌های بسته شده در دور

۳-۵. اعمال تصحیحات هندسی اصلی

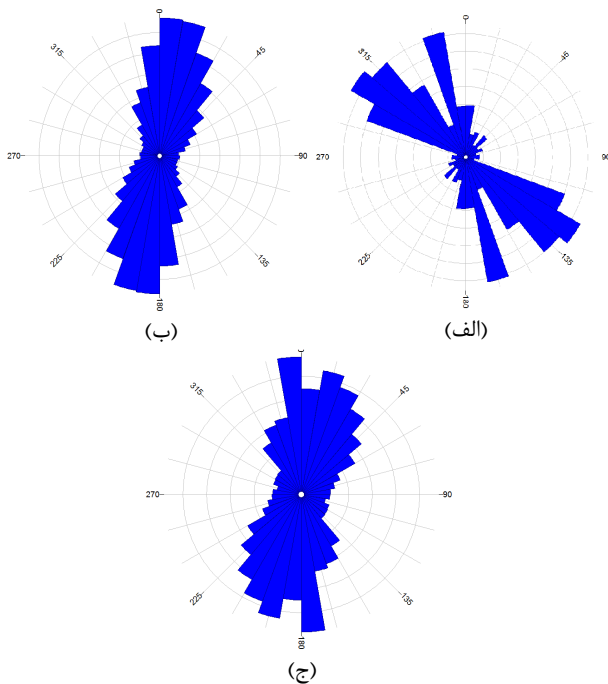
حد آستانه بر پایه دانش متخصص، برای بهینه کردن تصمیم‌گیری‌ها استفاده می‌شود. مقصود از حد آستانه، اختلاف زاویه برای اتصال دو خطواره است که اگر دو خط از فاصله اتصال، فاصله کمتری داشتند و اختلاف زاویه امتداد آنها از حد آستانه اختلاف زاویه، کمتر بود، دو خط را به هم متصل کرده و یک خطواره کلی ایجاد نماید. همچنین برای حد آستانه فاصله اتصال، خطواره‌هایی که فاصله کمتر از فاصله اتصال دارند، به هم متصل شده و یک خطواره ایجاد می‌شود. حد آستانه‌های مذکور، برای بهبود در ساختار هندسی خطواره‌های استخراجی می‌باشد زیرا ممکن است خطواره‌های استخراجی اولیه دارای ویژگی‌های هندسی باشند که با خطواره‌های طبیعی متفاوت هستند.



شکل ۸. نمودار رز خطواره‌های استخراج شده بعد از اعمال شروط هندسی،

a اختلاف زاویه انحراف دو امتداد بر حسب درجه و d حداکثر فاصله

اتصال خطواره‌ها بر حسب متر



شکل ۱۱. نمودار رز (الف) خطواره‌های موجود در منطقه (ب) خطواره‌های استخراجی قبل از اعمال شروط هندسی (ج) خطواره‌های استخراجی بعد از اعمال شروط هندسی

۷۰/۳۹ درصد، با خطواره‌های فرعی، ۹۶/۷۹ درصد، با خطواره‌های پنهان، ۷۷/۱۷ درصد و با خطواره‌های تراستی ۶۳/۹۵ درصد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که با اعمال تصحیحات هندسی، درصد تطابق میانگین زاویه‌ای خطواره‌های استخراجی افزایش داشته است.

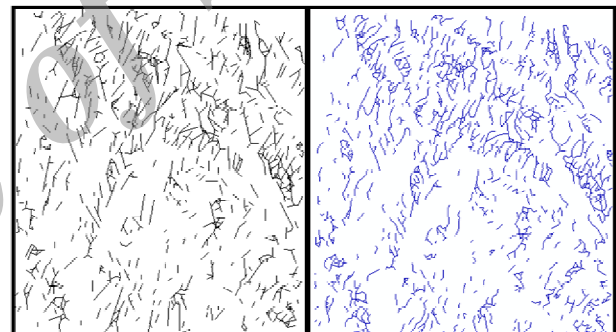
با مقایسه درصد تطابق میانگین‌های زاویه‌ای مشخص است که روش پیشنهادی از دقت خوبی (۹۶/۷۳ درصد) برای استخراج خطواره‌های فرعی برخوردار است ولی این امر برای خطواره‌های اصلی، پنهان و تراستی صادق نیست.

۴. نتیجه‌گیری

برای اعمال الگوریتم کشف لبه‌کنی، پارامترهای حد آستانه ۰/۶ و سیگمای ۱ بهترین نتیجه را در متریک پرات جهت ارزیابی کشف لبه‌کنی داشته است. برای بررسی میزان درستی شروط هندسی، از تطابق نمودار رز خطواره‌های موجود در منطقه و نمودار رز خطواره‌ها استخراجی بعد از اعمال شروط هندسی با توجه به میانگین امتداد خطواره‌ها استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده تطابق ۹۶/۷۳ درصدی میانگین امتداد خطواره‌های استخراجی با گسل‌های فرعی به‌وسیله روش پیشنهادی است. همچنین برای تصحیحات هندسی، حد آستانه فاصله‌ای ۲۲۵ متر و حد آستانه اختلاف زاویه ۱۰ درجه انتخاب گردید.

ترسیم نمودار رز مذکور با توجه به طول خطواره‌ها صورت‌گرفته است. فاصله کلاس‌ها ۱۰ درجه و میانگین زاویه‌های امتداد ۱۴۳/۶ درجه (۳۲۳/۶۵ درجه) با فاصله اطمینان ۸/۵ درجه (۹۵ درصد) است. با مقایسه بصری، حالت حداکثر فاصله اتصال ۳۰۰ متر و حد آستانه زاویه‌ای ۱۰ درجه، نتیجه بهتری نسبت به دیگر حالات داشته است. جدول ۳ که مقایسه‌ای بین میانگین زاویه امتداد خطواره‌های استخراجی است، نتایج مقایسه بصری را تأیید می‌کند. نتایج جدول مذکور با نمودار رز و میانگین زاویه امتداد خطواره‌های موجود در منطقه، مقایسه شده است. شکل ۹ خطواره‌های استخراجی بعد از اعمال شروط هندسی زاویه‌ای و فاصله‌ای را نشان می‌دهد. به‌علت این که کوچکترین طول خطواره موجود در منطقه، ۲۲۵/۵ متر است، حد آستانه فاصله، حداکثر ۲۲۵ متر در نظر گرفته شده است که از کمترین طول خطواره موجود در منطقه کوچک‌تری باشد.

شکل ۱۰ خطواره‌های موجود در منطقه بعد از اعمال شرط هندسی زاویه‌ای ۱۰ درجه و شرط طولی ۲۲۵ متر است.



شکل ۱۰. الف) قسمتی از خطواره‌ها پیش از اعمال شروط هندسی (ب) خطواره‌ها بعد از اعمال شرط زاویه‌ای ۱۰ درجه و شرط فاصله‌ای ۲۲۵ متر

شکل ۱۱ نمودار رز خطواره‌های استخراجی قبل و بعد از اعمال شروط هندسی مذکور می‌باشد. بعد از اعمال شروط هندسی، میانگین زاویه‌ای خطواره‌ها ۱۱/۹ درجه (۱۹۱/۸۹ درجه) با فاصله اطمینان ۵/۵ درجه است. درصد تطابق میانگین زاویه‌ای ۷۴/۹۵ درصد می‌باشد.

درصد تطابق میانگین زاویه امتداد خطواره‌های استخراجی قبل از اعمال شرط هندسی با کل خطواره‌های موجود در منطقه، ۷۴/۸۹ درصد، با خطواره‌های اصلی، ۷۰/۳۳ درصد، با خطواره‌های فرعی، ۹۶/۷۳ درصد، با خطواره‌های پنهان، ۷۷/۱۱ درصد و با خطواره‌های تراستی ۶۳/۸۹ درصد می‌باشد. درصد تطابق میانگین زاویه امتداد خطواره‌های استخراجی بعد از اعمال شروط هندسی فاصله اتصال ۲۲۵ متر و اختلاف زاویه امتداد ۱۰ درجه با خطواره‌های اصلی،

۶. مراجع

- [1] Rezai. M. R., "Petroleum Geology"; Press: Alavi, 2001, in Persian.
- [2] Sherrie A. P., Mohamed G. A., "Orbital remote sensing for geological mapping in southern Tunisia: Implication for oil and gas exploration.", *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 44, pp. 203-219, 2006.
- [3] O'Leary, D., Friedman, J., Pohn, H., "Lineament, linear, lineation: Some proposed newstandards for old terms", *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 87, No.7, pp. 1463-1469, 1976.
- [4] Argialas, D., Mavrantza, O., "Comparison of edge detection and Houghtransform techniques for the extraction of geologic features", *IAPRS, Chapter XXth ISPRS Congress*, pp. 790-796, 2004.
- [5] Arlegui, L. E., Soriano, M. A., "Characterizing lineaments from satellite images and field studies in the central Ebro basin (NE Spain)", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 16, pp. 3169-3185, 1998.
- [6] Baghdadi, N., Grandjean, G., Lahondère, D., Paillou, P., Lasne, Y., "Apportdel'imageriesatellitaire radar pourl'explorationgéologique en zones arides", Elsevier, *CR Geosciences*, Vol. 337, pp. 719-728, 2005.
- [7] Paganelli, F., Grunsky, E., Richards, J., Pryde, R., "Use of radarsat-1 principal component imagery for structural mapping: A case study in the buffalo head hills area, northern 11 central Alberta, Canada." *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 1, pp. 111-140, 2003.
- [8] Madani. H., "Structural and Tectonics Geology", Press: Jahad Daneshgahi, 2004, in Persian.
- [9] Masoud, A.A., Koike, K., "Morphotectonics inferred from the analysis of topographic lineaments auto-detected from DEMs: Application and validation for the Sinai Peninsula, Egypt.", Elsevier *Tectonophysics*, Vol. 510, pp. 291-308, 2011.
- [10] Pour kermani. M, Motamedi. H., "Basic methods of structural geology", Shahid Beheshti Univ. Press: Shahid Beheshti University, in Persian.
- [11] Mostafa, M., Zakir, F., "New enhanced techniques for azimuthal analysis of lineaments for detecting tectonic trends in and around the Afro-Arabian Shield", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 17, pp. 2923-2943, 1996.
- [12] Pratt, W.K., "Digital Image Processing : PIKS Scientific Inside", Press: Wiley, 1978.

با بررسی گسل‌های موجود در منطقه و مقایسه آن با گسل‌های استخراجی، مشخص شد تعدادی از گسل‌های اصلی، پنهان و تراستی استخراج نشده‌اند. درصد تطابق میانگین زاویه‌ای خطواره‌ها نیز، این امر را تایید می‌نماید. بنابراین برای استخراج خطواره‌های اصلی، پنهان و تراستی نیاز است روش‌ها و تصاویر دیگری مورد آزمایش قرار گیرد. همچنین برای بهبود دقت استخراج خطواره‌ها می‌توان شروط هندسی دیگری در نظر گرفت و مورد ارزیابی قرار داد. بهتر است برای انتخاب و ارزیابی شروط هندسی، از الگوریتم‌های محاسبه هوشمند و روش‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک استفاده شود.

۵. سپاسگزاری

جای دارد از راهنمایی‌های آقای مهندس مهرداد ملکی به‌عنوان مشاور صنعتی پژوهش حاضر تشکر نمایم. همچنین از مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران به جهت حمایت، آژانس فضایی اروپا به دلیل در اختیار گذاشتن تصاویر ENVISAT1 و موسسه تصاویر ماهواره‌ای بصیر به دلیل در اختیار قرار دادن مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه سپاس‌گزاری نمائیم.

Geological mapping of fractures and lineaments using image processing of Synthetic Aperture Radar (SAR) (Case study: Kalate Naderi)

R. Maleki*, M. Mokhtarzade, A. A. Abkar, M. J. Valadan Zoej, A. Ghafoori

* Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, KN Toosi University of Technology
(Received:11/26/2013, Accepted:04/05/2014)

Abstract

Lineaments are the most important phenomena in geological exploration of hydrocarbon reservoirs. Acquisitions of land in order to map the contours of land need so much time and money that according to the type of work is not that much accurate. One of the most famous methods in lineaments extraction is satellite image processing. In this paper, an overview of lineament extraction methods and a new method based on Canny edge detection algorithm are raised. The results of this study indicates that by the Pratt metric, the use of parameters with sigma 1 and threshold 0.6 for Canny edge detection parameters cause the best results for ENVISAT1 images. Another achievement of this research is to improve geometric conditions to increase extracted Lineaments quantitative and qualitative precision.

Keywords: Canny edge detection algorithm, geological lineaments, Synthetic Aperture Radar (SAR), Kalat-Naderi region.

*Corresponding author E-mail: Rezaa_Maleki@yahoo.com