

علمی - تخصصی

کاربرد دورسنجی در شناسایی و استخراج خطواره‌ها برای تعیین مسیر تونل انتقال آب کانی سیب

بهنام تقوی^{۱*}، هومن شکروی^۲، امیر زینالی^۳

۱- دانشجوی دکتری (گروه معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه)

۲- کارشناسی ارشد (دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تبریز)

۳- کارشناسی ارشد (دانشگاه تربیت مدرس)

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۳)

چکیده

یکی از ابزارهای نوین در زمینه مطالعات محیط‌زیست و علوم زمین، استفاده از فناوری سنجش‌ازدور است. برخلاف روش‌های مرسوم تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی که پرهزینه و وقت‌گیر هستند؛ فنون سنجش‌ازدور، علاوه بر قدرت تفکیک مکانی، کم‌هزینه و سریع‌اند. استفاده از مشخص کردن واحدها و پدیده‌های مختلف، سبب صرفه‌جویی در زمان، هزینه و نیروی انسانی در بررسی‌های مختلف منابع معدنی شده و به علت دید بسیار وسیع نسبت به عکس‌های هوایی این اجازه را به مفسر می‌دهد که همبستگی بین عوارض مختلف زمین‌شناسی ناحیه را تعیین کند. در این پژوهش، از روش‌های انتخاب بهترین آرایش باندی، روش بهترین ترکیب باندی، فیلترگذاری و آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) بر اساس نسبت گیری آماری (OFI) بر روی باندهای ۱ تا ۵ و باند ۷ تصاویر سنجنده ETM+ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر جهت پردازش و شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در منطقه و تعیین محور تونل انتقال آب کانی سیب استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که روش‌های مختلف پردازش داده‌های ماهواره‌ای لندست+ETM می‌تواند در انجام مطالعات زمین‌شناسی و بررسی‌های ساختاری در مناطق وسیع و یا مناطقی که دسترسی به آن‌ها مشکل است، کارایی داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: دورسنجی، تونل، خطواره، ETM+

۱. مقدمه

در راستای استخراج عوارض ساختاری به‌ویژه خطواره‌ها به‌منظور شناخت منشأ زمین‌ساختی آن‌ها استفاده کرده‌اند [۳]. آشکار سازی خطواره‌ها به‌وسیله سنجش‌ازدور در نواحی بیابانی و نیمه بیابانی که در آن سنگ‌بستر کامل نمایان است می‌تواند نتایج بهتری دربر داشته باشد [۴].

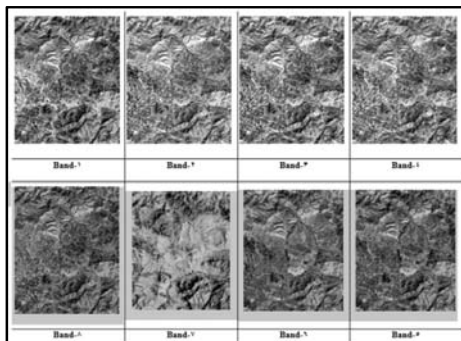
استفاده از این روش با توجه به هزینه پایین‌تر و همچنین وسعت محدوده مورد بررسی و سرعت انجام این تحلیل‌ها جهت انجام مطالعات اولیه ژئوتکنیکی پیشنهاد می‌شود.

در این پژوهش، با انجام پردازش‌های دورسنجی و با استفاده از نرم‌افزارهای ENVI، ArcGis، Geomatica و RockWarks؛ تصویر ماهواره‌ای لندست+ETM منطقه، مورد پردازش قرار گرفته و تمامی لایه‌ها و اثر هر یک بر شرایط زیر سطحی تونل انتقال آب کانی سیب در نواحی مختلف تفسیر و

با توجه به زمان‌بر و پرهزینه بودن اکتشافات ژئوفیزیکی و سایر روش‌های مرسوم در مناطق اکتشافی بزرگ، استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و تلفیق با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌تواند برای محدود کردن مناطق اکتشافی، اکتشاف آب‌های زیرزمینی و تعیین محور تونل مؤثر باشد [۱]. آشکار سازی خطواره‌ها با استفاده از داده‌ها و روش‌های دورسنجی یک موفقیت مهم در مطالعات زمین‌شناسی به‌ویژه مطالعات زمین‌ساخت و تهیه نقشه است [۲]. از آنجایی که ساختارهای زمین‌شناسی همچون شکستگی‌ها (گسل‌ها و درزه‌ها)، پهنه‌های برشی و برگواری در سطح زمین به‌صورت خطواره در تصاویر ماهواره‌ای و هوایی آشکار و نشان داده شده است، برخی از پژوهشگران از روش‌های سنجش‌ازدور به همراه مطالعات صحرایی

جدول (۱). قدرت تفکیک طیفی و مکانی باندهای ETM+

| باند | قدرت تفکیک طیفی (nm) | قدرت تفکیک مکانی (m) |
|---------------------------|----------------------|----------------------|
| (Visible Blue) ۱ | ۴۵۰ - ۴۷۰ | ۳۰ x ۳۰ |
| (Visible Green) ۲ | ۵۲۰ - ۶۰۰ | ۳۰ x ۳۰ |
| (Visible Red) ۳ | ۶۳۰ - ۶۹۰ | ۳۰ x ۳۰ |
| (Near Infrared) ۴ | ۷۶۰ - ۹۰۰ | ۳۰ x ۳۰ |
| (Middle Infrared) ۵ | ۵۵۰ - ۵۶۰ | ۳۰ x ۳۰ |
| (6L6H Thermal Infrared) ۶ | ۴۰۰ - ۵۰۰ | ۶۰ x ۶۰ |
| (Middle Infrared) ۷ | ۰.۸۲ - ۳.۵۲ | ۳۰ x ۳۰ |
| (Panchromatic) ۸ | ۵۲۰ - ۹۰۰ | ۱۵ x ۱۵ |



شکل (۱). تصاویر ۸ باند ETM+ مربوط به منطقه مطالعاتی (محور تونل انتقال آب کانی سبب)

در تصاویر ماهواره‌ای سه راه برای تشخیص خطوط شکستگی ساختاری وجود دارد [۵]:

- تشخیص تغییرات ناگهانی مرزهای لیتولوژی و جابجایی لایه‌ها در تصاویر رنگی.
- بررسی فرورفتگی‌ها و دره‌های مستقیم به‌عنوان زون‌های شکستگی.
- بررسی برآمدگی‌های خطی به‌عنوان Scarp‌های گسلی و دایک‌ها.

در این تحقیق جهت رؤیت و ترسیم حداکثر از گسل‌ها و شکستگی‌های ساختاری و از طرفی پرهیز هرچه تمام‌تر از بروز خطا (خطوط اثر محور چین‌ها، جاده‌ها، زمین‌های کشاورزی و سازه‌های انسانی) از پنج روش جداگانه بهره گرفته شده است.

۲-۱. استفاده از تصاویر RGB (RGB Composition)

هدف در این پژوهش شناسایی و استخراج خطوط ماهواره‌ای ساختاری در منطقه است. ۶ باند ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ برای این مقصود مناسب می‌باشد. از آنجاکه برای ساختن یک تصویر RGB، سه باند برای سه رنگ اصلی مورد نیاز است. برای ترکیب (غیر تکراری) ممکن از رابطه (۱) استفاده می‌شود [۶]:

$$C(n,r) = \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (1)$$

که n تعداد کل باندها (۶) و r تعداد باندها در هر ترکیب (۳) است. به این ترتیب ۲۰ ترکیب می‌تواند ساخته شود. این که کدام حالت از این ۲۰ ترکیب بهینه است، بستگی به مجموع اطلاعاتی دارد

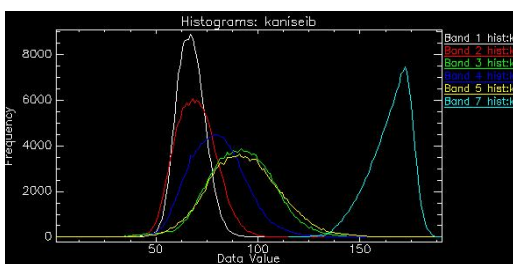
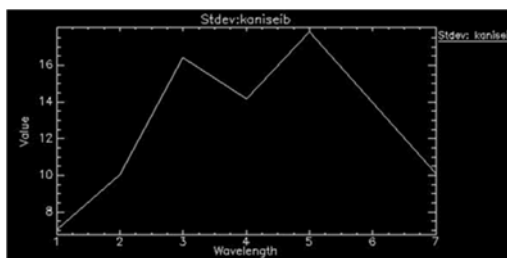
در نهایت گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در منطقه شناسایی و مسیر پیشنهادی حفر تونل تعیین گردید.

۲. روش تحقیق

تونل انتقال آب کانی سبب در بخش جنوبی استان آذربایجان غربی جهت هدایت آب مازاد رودخانه گلاس به حوضه آبریز دریاچه ارومیه و دشت نقده به منظور احیای دریاچه ارومیه و تأمین آب زراعی بخش عمده‌ای از این اراضی طراحی و اجرا گردید. دهانه ورودی این تونل از بالادست مخزن سد کانی سبب آبگیری (سمت پیرانشهر) می‌کند و دهانه خروجی این تونل در دامنه شمالی کوهستان بیگم قلعه، آب را وارد دشت نقده و حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌کند.

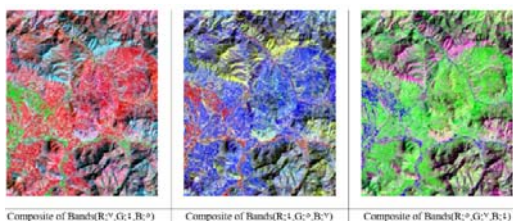
بررسی ناپیوستگی‌ها و شکستگی‌ها همواره مسئله مهمی در مطالعات اولیه و ژئوتکنیکی محسوب می‌شود. شناخت این نواحی از طریق روش‌های مستقیم برداشت صحرایی و یا روش‌های ژئوفیزیکی و در مقیاس‌های محدود انجام می‌گیرد. با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی و با داشتن داده‌های رقمی ماهواره‌ای منطقه و با پردازش این داده‌ها و فیلترگذاری می‌توان خطواره‌ها و به‌ویژه گسل‌ها را شناسایی کرد. با توجه به این که تصویر ماهواره‌ای، دید وسیعی از منطقه را در اختیار ما قرار می‌دهد، می‌توان ارتباط بین گسل‌ها و همچنین مکانیسم برخی گسل‌ها را مشخص کرد.

تصویر سنجنده ETM+ از ماهواره لندست، به سبب ماهیت چندطیفی و دید گسترده و زاویه تابش خورشیدی ملایم، ابزار سودمندی برای تحلیل‌های ناحیه‌ای دگرشکلی شکننده محسوب می‌شود. در موزاییک این تصاویر بسیاری از سیمایهای ساختاری اصلی (نظیر شکستگی‌های بزرگ) که امکان مشاهده مستقیم آن‌ها در پیمایش‌های صحرایی موجود نیست، به خوبی قابل تشخیص است، بنابراین در این پژوهش برای انجام پردازش دورسنجی، تصویری از ماهواره لندست ۷ که توسط سنجنده ETM+؛ تصویربرداری گردیده است، به صورت خام تهیه و پس از اعمال تصحیحات هندسی (مکان مرجع) استفاده گردید. در جدول (۱)، قدرت تفکیک طیفی و مکانی باندها و در شکل (۱)، تصاویر ۸ باند ETM+ مربوط به منطقه موردبررسی، آورده شده است.



شکل (۲). مقدار انحراف معیار و هیستوگرام باندهای انعکاسی منطقه

حال برای ترکیب سه باند یادشده، باز سه حالت (تکراری) امکان پذیر است که از نقطه نظر دید بصری ممکن است چشم در یک یا دو حالت از سه ترکیب به مغایرت رنگی تصویر را بهتر درک کند (۳). در نهایت از بین ترکیبات، ترکیب ۴، ۵، ۷ انتخاب گردید (باند ۵ به قرمز، باند ۷ به سبز و باند ۴ به آبی اختصاص داده شد).



شکل (۳). سه ترکیب ممکن RGB با توجه به برگ خرید شاخص بهینه (OIF)

۲-۲. فیلتر گذاری (Filtering)

نفوذپذیری رابطه مستقیمی با شکستگی‌ها دارد، اما زمانی که این شکستگی‌ها در واحدهای متخلخل آهکی و نهشته‌های آبرفتی قرار گیرند، میزان نفوذپذیری آب‌های زیرزمینی در محیط افزایش یافته، که می‌توان به‌عنوان نواحی مناسب و امیدبخش برای اکتشاف آب پیشنهاد کرد. یکی دیگر از روش‌های شناسایی این خطواره‌ها، فیلترینگ است. فیلتر مورد استفاده در این پژوهش؛ فیلتر طیفی بالاگذر (Highpass) می‌باشد، که با حذف فرکانس‌های کوتاه و نگاه داشتن فرکانس‌های بالا، می‌تواند لبه‌ها را در عوارض نقطه‌ای، عوارض خطی و یا مرز بین اشیا، استخراج نمود. این فیلترها موجب می‌گردند که لبه‌ها در تصاویر واضح‌تر شوند. این نوع فیلتر در نوع خودش جز فیلترهای لبه نیز به شمار می‌روند.

که هر کدام از ترکیب‌ها در اختیار می‌گذارد. برای یافتن ترکیب مورد نظر؛ می‌توان از فاکتور شاخص بهینه (OIF)، استفاده کرد. مراحل کار در جدول‌های (۲)، (۳) و (۴) مشهود است. با توجه به نتایج حاصل، باندهای ترکیبی بهینه ۴ و ۵ و ۷ می‌باشند. در شکل (۲)، مقادیر انحراف معیار و هیستوگرام‌های مربوط به باندهای انعکاسی در منطقه مورد مطالعه آورده شده است.

جدول (۲). پارامترهای آماری ۶ باند انتخابی Landsat (مقادیر انحراف معیار برای محاسبه در شاخص OIF)

| Num | Basic Stats | Min | Max | Mean | Stdev | Eigenvalue |
|-----|-------------|-----|-----|--------|-------|------------|
| 1 | Band 1 | 31 | 113 | 67.05 | 7.03 | 811.67 |
| 2 | Band 2 | 16 | 132 | 69.37 | 10.03 | 106.36 |
| 3 | Band 3 | 10 | 190 | 91.66 | 16.43 | 76.76 |
| 4 | Band 4 | 5 | 158 | 80.17 | 14.15 | 35.88 |
| 5 | Band 5 | 1 | 188 | 93.17 | 17.80 | 7.04 |
| 6 | Band 7 | 115 | 190 | 164.57 | 10.09 | 1.53 |

جدول (۳). مقادیر ماتریس همبستگی ۶ باند انتخابی Landsat

| Correlation | Band 1 | Band 2 | Band 3 | Band 4 | Band 5 | Band 7 |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Band 1 | 1 | 0.958535 | 0.91465 | 0.626592 | 0.794615 | 0.265142 |
| Band 2 | 0.958535 | 1 | 0.967943 | 0.698618 | 0.865104 | 0.2595 |
| Band 3 | 0.91465 | 0.967943 | 1 | 0.638313 | 0.88619 | 0.29835 |
| Band 4 | 0.626592 | 0.698618 | 0.638313 | 1 | 0.75163 | 0.12461 |
| Band 5 | 0.794615 | 0.865104 | 0.88619 | 0.75163 | 1 | 0.291804 |
| Band 7 | 0.265142 | 0.2595 | 0.29835 | 0.12461 | 0.291804 | 1 |

جدول (۴). محاسبه و مقایسه مقادیر OIF کلیه ترکیبات ممکن RGB و به دست آوردن ترکیب بهینه

| compound of bands | $\sum S_k$ | $\sum r_i$ | OIF |
|-------------------|------------|------------|-------------|
| 1,2,3 | 33.496895 | 4.543662 | 7.37222421 |
| 1,2,4 | 31.212892 | 2.585127 | 12.07402654 |
| 1,2,5 | 34.869696 | 2.75315 | 12.66538184 |
| 1,2,7 | 27.15132 | 2.223677 | 12.21010066 |
| 1,3,4 | 37.61477 | 2.541242 | 14.80172687 |
| 1,3,5 | 41.271574 | 2.709265 | 15.23349469 |
| 1,3,7 | 33.553198 | 2.17415 | 15.43278891 |
| 1,4,5 | 38.987571 | 2.421207 | 16.10253522 |
| 1,4,7 | 31.269195 | 1.891734 | 16.52938257 |
| 1,5,7 | 34.925999 | 2.059757 | 16.95636864 |
| 2,3,4 | 40.616614 | 2.666561 | 15.23183381 |
| 2,3,5 | 44.273418 | 2.833047 | 15.62749153 |
| 2,3,7 | 36.555042 | 2.227443 | 16.41121322 |
| 2,4,5 | 41.989415 | 2.563722 | 16.37830272 |
| 2,4,7 | 34.271039 | 1.958118 | 17.5020295 |
| 2,5,7 | 37.927843 | 2.124604 | 17.85172343 |
| 3,4,5 | 48.391293 | 2.524503 | 19.16864151 |
| 3,4,7 | 40.672917 | 1.936663 | 21.00154596 |
| 3,5,7 | 44.329721 | 2.18454 | 20.29247393 |
| 4,5,7 | 42.045718 | 1.87624 | 22.40956274 |

جدول (۷). ماتریس ضرایب همبستگی PCA مربوط به باندهای ۴، ۵ و ۷.

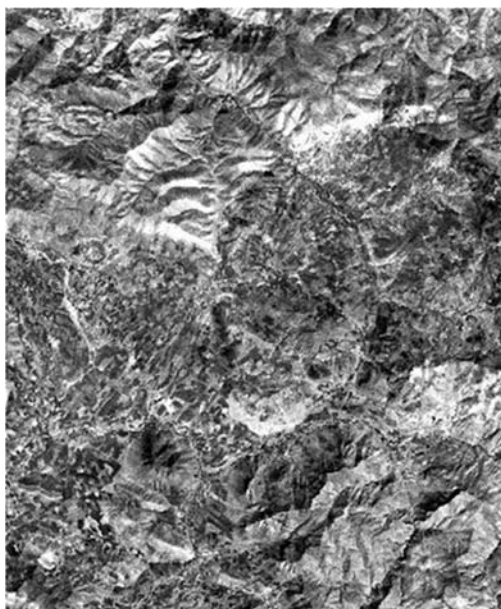
| Correlation | Band ۴ | Band ۵ | Band ۷ |
|-------------|----------|----------|----------|
| Band ۴ | ۱ | ۰,۷۴۱۴۰۳ | ۰,۸۴۶۹۰۵ |
| Band ۵ | ۰,۷۴۱۴۰۳ | ۱ | ۰,۷۳۱۸۷۹ |
| Band ۷ | ۰,۸۴۶۹۰۵ | ۰,۷۳۱۸۷۹ | ۱ |

جدول (۸). مقدار ویژه مؤلفه‌های اصلی باندهای ۴، ۵ و ۷.

| Eigenvector | Band ۴ | Band ۵ | Band ۷ |
|-------------|----------|----------|----------|
| PC ۱ | ۰,۶۸۴۶۳ | ۰,۴۶۶۰۳۳ | ۰,۵۶۰۴۴۲ |
| PC ۲ | ۰,۴۱۴۸۴۶ | -۰,۸۱۱۳۵ | ۰,۲۲۶۱۱۱ |
| PC ۳ | -۰,۵۹۹۳۲ | -۰,۰۷۷۷ | ۰,۷۹۶۷۳ |

۲-۴. به‌کارگیری تصاویر مدل رقومی ارتفاع (DEM)

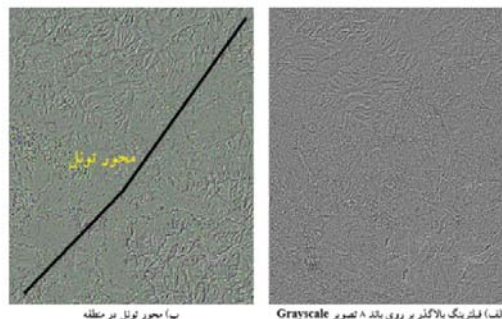
با توجه به ویژگی‌های داده‌های مدل ارتفاع رقومی (DEM) در بهره‌گیری از ضریب تغییرات ارتفاعی برای آشکارسازی خطواره‌ها، از این داده با تفکیک مکانی ده متر برای ایجاد سایه مجازی منطقه استفاده شد و با اعمال فیلتر Directional در هشت جهت جغرافیایی و با زاویه نزدیک به افق برای رسم خطوط ایجاد شده توسط سایه‌ها استفاده گردید (شکل ۶).



در این پژوهش، فیلتر بالاگذر بر روی باند ۸ تصویر Grayscale، از منطقه به‌کار گرفته شده است (شکل ۴). با استفاده از این روش سه دسته گسل اصلی در واحدهای سنگی منطقه با روندهای عمومی شمال شرقی - جنوب غربی و شمال غربی-جنوب شرقی شناسایی شد.

۲-۳. بهره‌گیری از روش PCA

ترکیب باندی ۴-۵-۷ برای تعیین خطواره‌ها انتخاب گردید. ابتدا اطلاعات آماری این گروه را محاسبه می‌کنیم. نتایج حاصل از آنالیز مؤلفه اصلی به همراه ماتریس بردارهای ویژه این ترکیب باندی در جدول (۵)، (۶) و (۷) آورده شده است، مطابق جدول (۸)؛ بیشترین اختلاف بین مقادیر بردارهای ویژه، باندهای ۴ و ۷ در مؤلفه سوم (PC 3) مشاهده می‌گردد. بنابراین مؤلفه سوم انتخاب می‌شود؛ اما چون باند ۴ دارای علامت منفی است، بنابراین باید منفی مؤلفه سوم لحاظ گردد. تصویر این PC به صورت Gray Scale در شکل (۵) مشاهده می‌گردد، آلتراسیون‌ها با پیکسل‌های روشن در این تصویر مشهود می‌باشند.



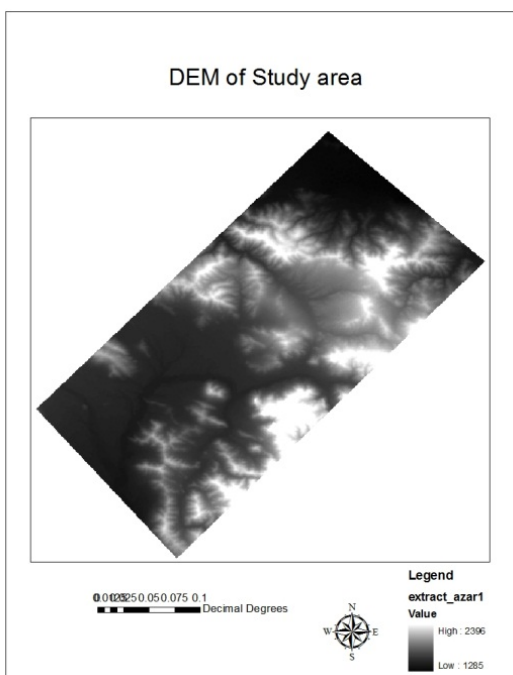
شکل (۴). تصویر ماهواره‌ای منطقه بعد از اجرای فیلتر

جدول (۵). توزیع آماری و ضرایب PC مربوط به باندهای ۴، ۵ و ۷.

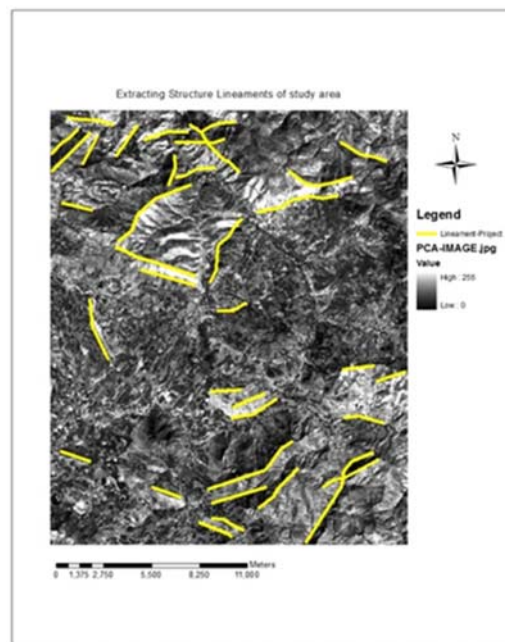
| Basic Stats | Min | Max | Stdev | Eigen value |
|-------------|-----|-----|----------|-------------|
| Band 4 | 0 | 66 | 5.734103 | 64.65662 |
| Band 5 | 5 | 82 | 4.355275 | 6.30922 |
| Band 7 | 0 | 55 | 4.822995 | 4.143793 |

جدول (۶). ماتریس کوواریانس PCA مربوط به باندهای ۴، ۵ و ۷.

| Covariance | Band ۱ | Band ۲ | Band ۳ |
|------------|----------|----------|----------|
| Band ۱ | ۳۲,۸۷۹۹۳ | ۱۸,۵۱۵۵ | ۲۳,۴۲۱۶۱ |
| Band ۲ | ۱۸,۵۱۵۵ | ۱۸,۹۶۸۴۲ | ۱۵,۳۷۳۴۷ |
| Band ۳ | ۲۳,۴۲۱۶۱ | ۱۵,۳۷۳۴۷ | ۲۳,۲۶۱۲۸ |



شکل (۶). تصویر Dem از منطقه تونل در راستای محور تونل انتقال آب کانی سیب.



شکل (۵). تصویر (PC3) مربوط به ترکیب باندهای ۴، ۵، ۷ تصویر بالا؛ پیکسل‌های روشن‌تر نشان‌دهنده لبه‌ها در عوارض تصویر پائین: استخراج لبه‌ها.

تکنیک فوق در دو حالت مختلف به کار گرفته شد؛ الف) روی تصاویر خاکستری ب) بر روی تصاویر مرکب RGB. نتیجه تقسیم مقادیر درجه روشنایی پیکسل‌ها در یک باند طیفی به باند دیگر را، نسبت باندی می‌گویند. نسبت‌گیری باندی برای آشکار ساختن تغییراتی که در تصویر باندهای تک قابل‌دیدن نیستند، به کار می‌رود [۸]. یکی از مزایای اصلی تصاویر نسبتی این است که؛ خصوصیات طیفی یا رنگی پدیده‌های تصویر را بدون توجه به تغییرات شرایط تابشی نظیر توپوگرافی و روبه سطح زمین آشکار می‌سازد، علاوه بر آن اختلاف بین درجات روشنایی را آشکار کرده و مرزها را مشخص‌تر می‌کند. بنابراین برای جدا کردن مرز واحدهای سنگی و تشخیص سنگ‌ها به کار می‌رود. با شناخت خصوصیات انعکاسی پدیده‌های مختلف و با استفاده از روش فوق می‌توان پدیده‌های مختلف را بارز ساخت.

در مورد لندست، رس‌ها در باند ۵ بازتاب و در باند ۷ نور را جذب می‌کنند، بنابراین با تقسیم کردن مقادیر پیکسلی باند ۵ به باند ۷ می‌توانیم برای بارز سازی مناطق غنی از کانی‌های رسی و آلونیت استفاده نماییم. این تصویر برای آشکارسازی دگرسانی حاوی کانی‌های هیدروکسید (آرژیلیک و سریسیتیک) کاربرد دارد. پیکسل‌های روشن بیان‌گر زون‌های مربوط به کانی‌های هیدروکسیددار است که می‌تواند نشان‌دهنده نواحی تخریب گسل‌ها باشد (شکل ۷). همچنین اکسیدهای آهن، دارای حداکثر انعکاس در باند ۳ و حداقل انعکاس در باند ۱ هستند، لذا تصویر

۲-۵. بهره‌گیری از نسبت باندی

برای شناسایی آثار شکستگی‌های ساختاری، بررسی سه عارضه مرتبط (خطی) مفید است [۷]؛

- تجمع آثار رس و کانی‌های رسی و دیگر مواد هیدروترمال (در اطراف نواحی تخریب گسل‌ها)
- تجمع ترکیبات آهن (بیرون‌زده در بازشدگی شکستگی‌ها)
- پوشش گیاهی (که به‌طور معمول در اطراف گسل‌ها و درزه‌ها بیشتر گسترش دارد)

آن خطواره می‌گذارد. در واقع میزان تکرار در هر جهت، وابسته به طول خطواره‌ها در آن جهت است. نمودار رز با استفاده از مجموعه نرم‌افزار RockWorks، که یک نرم‌افزار یکپارچه برای مدیریت، تجزیه و تحلیل، ترسیم و تجسم داده‌های زمین‌شناسی است، رسم گردید.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. پردازش داده‌ها باهدف آشکارسازی کل خطواره‌ها

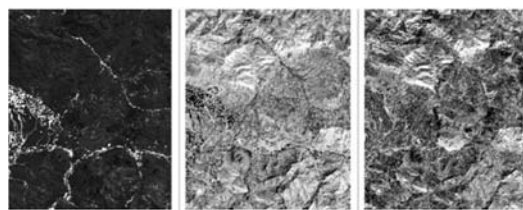
حفر تونل موجب ایجاد جابجایی‌های عمودی و افقی در زمین می‌شود. بسته به شرایط ژئوتکنیکی منطقه و پارامترهای حفاری تونل این جابجایی‌ها می‌تواند به سطح زمین رسیده و موجب آسیب به سازه‌های سطحی گردد، بنابراین شناسایی دقیق خطواره‌ها جهت جلوگیری از آسیب‌های زیست‌محیطی ضروری است [۹].

با استفاده از روش‌های خودکار از تصویر سنجنده LandsatETM+ و ابزار Line در نرم‌افزار PCI Geomatica، خطواره‌های ساختاری در منطقه مورد مطالعه استخراج گردید. افزون بر استخراج خطواره‌های اصلی، 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، مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۸) و به منظور تحلیل این درزه‌ها آزمایشات آن‌ها محاسبه و نمودار گل‌سرخ برای همه خطواره‌ها رسم شد.

در شکل (۹)؛ نمودار رز برای کل گسل‌های موجود در منطقه مورد مطالعه بافاصله کلاس‌های ۱۰ درجه در حالت Length با استفاده از نقاط انتهایی با خطای ۰/۵ رسم شده است، که در آن میانگین زاویه‌های امتداد ۹۰ درجه (۲۷۰ درجه) بافاصله اطمینان ۲۴/۲ درجه (۹۵٪) و انحراف معیار ۴/۶ درصد است. با استفاده از این روش سه دسته گسل اصلی در واحدهای سنگی منطقه شناسایی شد، دسته اول گسل‌هایی با روند شمال غربی - جنوب شرقی، دسته دوم گسل‌ها دارای روند عمومی شمال شرقی - جنوب غربی و دسته سوم گسل‌هایی با روند عمومی تقریباً شرقی-غربی می‌باشد.

نسبتی ۳ به ۱ برای آشکارسازی آهن فریم استفاده می‌شود. پیکسل‌های روشن بیان‌گر زون‌های اکسید آهن در منطقه است که می‌تواند ناشی از بیرون‌زدگی در شکاف و بازشدگی‌های گسل‌ها باشد.

با تقسیم باندهای ۴ به ۳ که بهترین ترکیب جهت بارز سازی پوشش گیاهی منطقه می‌باشد می‌توان مناطق پوشش گیاهی را مشخص کرد، ولی برای جداسازی مناطق دارای پوشش گیاهی از مناطق آلتراسیون از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی استفاده نمود. مشخص کردن مناطق با پوشش گیاهی، جهت تشخیص مناطق آبراه‌های و مسیر گسل‌ها مؤثر می‌باشد.



شکل (۷). تصاویر ماهواره‌ای در منطقه مورد مطالعه با بهره‌گیری از روش نسبت باندهای

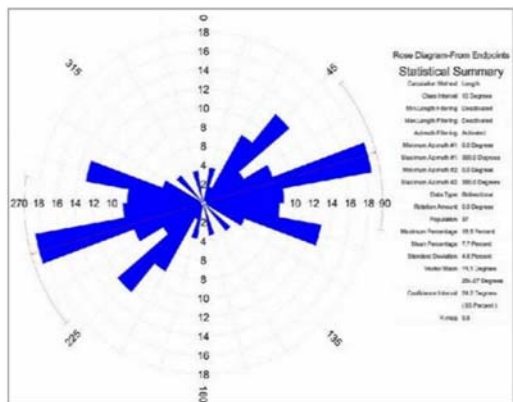
۲-۶. تحلیل خطواره‌ها با استفاده از متغیرهای آماری

نمودار گل رز، نمودار هیستوگرامی دایره‌ای شکلی است که برای نمایش داده‌های جهت‌دار و میزان تکرار هر دسته از آن‌ها به کار می‌رود. در زمین‌شناسی رسوبی، نمودار رز برای نشان دادن داده‌های سن زمین‌شناسی یا جهت اجزا استفاده می‌شود و در زمین‌شناسی ساختاری برای نمایش جهت گسل، خطواره، اتصال و دایک به کار می‌رود. نمودار رز همچنین می‌تواند برحسب تعداد خط‌ها در امتدادی مشخص یا طول کل خط‌ها در جهتی مشخص استفاده شود.

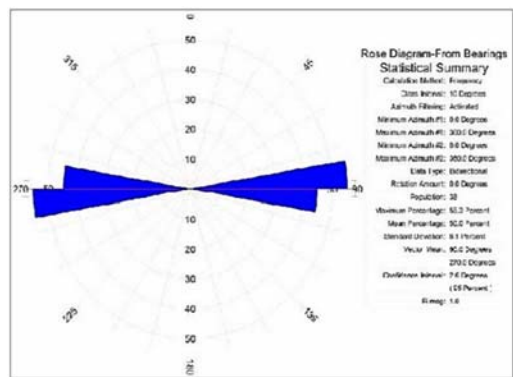
اگر خط‌ها دارای جهت باشند، نمودار رز ۳۶۰ درجه یا دایره کامل نامتقارن است ولی اگر امتداد خط مدنظر باشد، نمودار ۱۸۰ درجه یا نیم‌دایره بوده و نیمه دیگر دایره مشابه (متقارن) آن است. در خطواره‌ها که خطوط جهت ندارند، امتداد خطوط مدنظر است و بنابراین نمودار رز به صورت نیم‌دایره یا دایره متقارن رسم می‌شود [۱۰]. اندازه گلبرگ‌های دیاگرام گل‌سرخ بر اساس دو برگ خرید ترسیم می‌گردند که عبارت‌اند از؛ مقایسه جهات جغرافیایی مختلف از نظر طول خطواره‌های عبور کننده از آن‌ها و مقایسه جهات جغرافیایی مختلف از نظر فراوانی خطواره‌ها یا صفحات ساختاری.

برای نشان دادن میزان تکرار آزمایشات خطواره‌ها که با توجه به طول آن‌ها در نظر گرفته شده از نمودار رز استفاده شده است. هرچه طول خطواره‌های بلندتر باشد، تأثیر بیشتری بر نمودار رز در جهت

سنگی منطقه با روند عمومی شرقی-غربی شناسایی شده است.



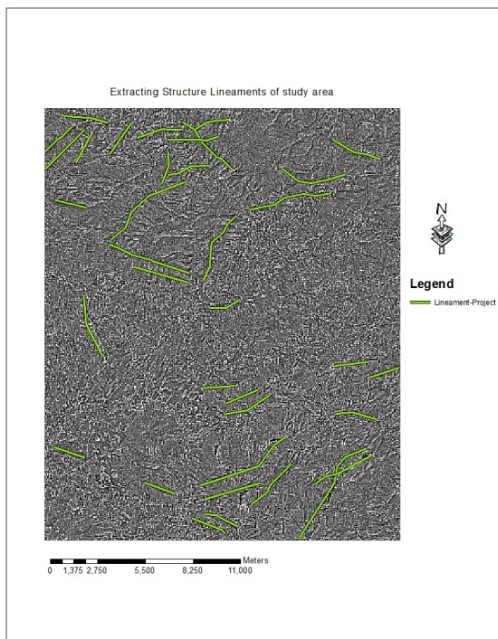
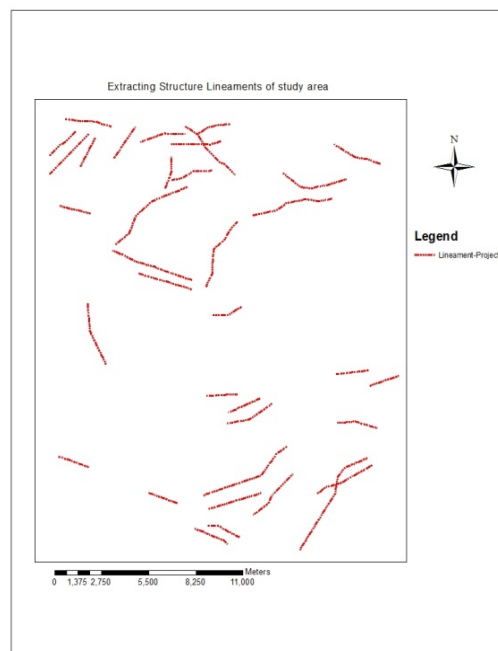
شکل (۹). نمودار رز گل از گل‌ها و خطوطاره‌های منطقه مورد مطالعه در حالت Length با نقاط انتهایی.



شکل (۱۰). نمودار رز از خطوطاره‌های منطقه مورد مطالعه در حالت Frequency با نقاط ابتدایی.

۲-۳. مطالعات صحرائی

به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از پردازش‌های دورسنجی و بررسی وضعیت ساختارها و مطالعه پراکنش شکستگی‌ها، داده‌های صحرائی در منطقه برداشت و بررسی گردید. از لحاظ ساختاری محدوده اجرای پروژه در شمال شرق پهنه ساختاری سنندج-سیرجان قرار دارد. وجود آمیزه‌های رنگی (کالروملانژها) در ارتفاعات اطراف پیرانشهر همچنین در شمال غربی منطقه مورد مطالعه و در نواحی خوی نشان از نزدیکی منطقه مورد مطالعه به پهنه برخوردی صفحه ایران و عربی دارد، نزدیکی به پهنه برخورد باعث به وجود آمدن پیچیدگی‌های ساختاری در محدوده مورد مطالعه شده است. وجود گسل‌های متعدد با راستاهای متفاوت سبب تکرار شدگی و حذف واحدهای لیتولوژیکی و همچنین تأثیر عناصر ساختاری با شاخصه‌های البرز غربی به همراه عوامل بالایی باعث افزایش پیچیدگی‌های ساختاری شده است.



شکل (۸). استخراج رقومی خطوطاره‌ها در منطقه مورد مطالعه از تصویر ماهواره‌ای + ETM در محیط نرم‌افزار ArcGIS و PCI Geomatica

در شکل (۱۰)؛ نمودار رز برای گل‌های موجود در منطقه مورد مطالعه با فاصله کلاس‌های ۱۰ درجه در حالت Frequency با استفاده از نقاط ابتدایی و با خطای برابر با ۱ رسم شده است، که در آن میانگین زاویه‌های امتداد ۹۰ درجه (۲۷۰ درجه) با فاصله اطمینان ۲/۶ درجه (۰/۹۵٪) و انحراف معیار ۶/۱ درصد است. با استفاده از این روش دودسته گسل اصلی در واحدهای

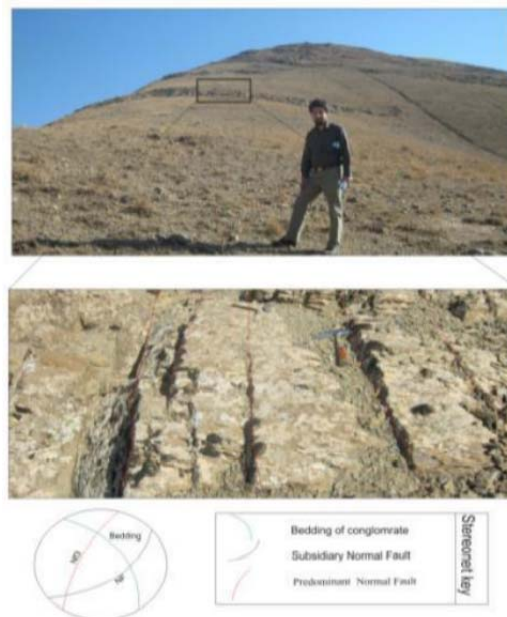
صحرائی برداشت شده در محور تونل، مؤید شناسایی درست و دقیق خطواره‌ها با استفاده از روش‌های دورسنجی می‌باشد.

۵. مراجع

- [1] B. Taghavi, F. Hajizadeh, and M. Abbasi, "Geoelectrical Imaging Surveys used for Pre-Investigation and Subsurface Layers Modeling at a Water Transfer Tunnel (Case Study)," *Journal of Engineering and Applied Sciences*: vol. 12 pp. 8409 - 8416, 2017.
- [2] M. Hashim, S. Ahmad, M. A. Md Johari and A. Beiravand Pour, "Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) imagery", *Advances in Space Research*: vol. 51, pp.874-890, 2013.
- [3] S. Solomon and G. Ghebreab, "Lineament characterization and their tectonic significance using Landsat TM data and field studies in the central highlands of Eritrea", *Journal of African Earth Sciences*: vol.46, pp.371-378, 2006.
- [4] Y. Eshghi Molan, D. Refahi and A.Hosseinmardi Tarashti, "Mineral mapping in the Maherabad area, eastern Iran, using the HyMap remote sensing data", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 27, pp.117-127, 2014.
- [5] B. Chandra, M. Giridhar and G. Viswanadh, "IDENTIFICATION OF GROUNDWATER POTENTIAL ZONES USING RS AND GIS," in 31st International Conference on Remote Sensing, Hanoi, Vietnam, 2010.
- [6] J. G. Liu, P. J. Mason, E. Yu, M.-C. Wu, C. Tang, R. Huang and H. Liu, "GIS modelling of earthquake damage zones using satellite remote sensing and," *Journal of Geomorphology*, pp. 518-535, 2012.
- [7] M. Honarmand, H. Ranjbar, Z. Moezifar, "Integration and analysis of Airborne geophysical and remote sensing data of Sar Cheshmeh area, using directed principal component analysis", *Exploration and Mining Geology*, vol.11: 43-48, 2004.
- [8] I. Novak and N. Soulakellis, "Identifying geomorphic features using LANDSAT-5r/TM data processing techniques on Lesbos", *Greece. Elsevier, Geomorphology*, vol. 34, pp.101-109, 2000.
- [9] M.A., Iranmanesh, A. Arinfar and S. Amun, "Numerical investigation of the effects of geotechnical parameters on surface settlement curves due to EPB-TBM urban tunneling in alluvial areas", *Journal of science and technology construction*, vol. 2, pp. 14-25, 2021 (In Persian).
- [10] M. Mostafa, F. Zakir, "New enhanced techniques for azimuthal analysis of lineaments for detecting tectonic trends in and around Remote Sensing, the Afro-Arabian Shield", *International Journal of Vol. 17, pp. 2923-2943, 1996.*

در این ناحیه همه واحدهای سنگی دچار شکستگی‌های فراوان بر اثر تنش‌های وارد شده به منطقه در ارتباط با گسل‌های اصلی پیرانشهر در جنوب و گسل‌های نرده در شمال شده‌اند. در نگاه کلی واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه را می‌توان به واحدهای آذرین و کربناته تقسیم نمود. با توجه به تنوع برون‌زدهای آذرین ممکن است نوع سنگ‌ها در برون‌زدها با انواع آن در عمق تونل متفاوت باشد، که این تفاوت در محل تماس توده آذرین با سنگ‌های درون‌گیر شاخص‌تر است. گرانیتهای بیش از ۴۵٪ از مسیر تونل را تشکیل می‌دهند و بیشتر به سمت دهانه خروجی تونل برون‌زد دارند. در واحدهای کنگلومرا یک سری گسل‌های نرمال با جابجایی در حد چند ده سانتی‌متر با راستای شمال‌شرق-جنوب‌غرب دیده می‌شود و وجود درزه و شکستگی موجب خردشدگی این سنگ به صورت بلوک‌هایی در چند ده سانتی‌متر و چند متر شده است.

نتایج حاصل از برداشت‌های صحرائی نیز نشان داد که دسته شکستگی‌های NE-SW از دید فراوانی روند اصلی منطقه بوده و به صورت موازی با گسل‌های اصلی منطقه ظاهر شده‌اند.



شکل (۱۱). توسعه شکستگی‌ها با جابجایی‌های نرمال در واحدهای کنگلومرا

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به زمان‌بر و پرهزینه بودن برداشت‌های صحرائی و عملیات حفاری و همچنین نتایج به دست آمده از این مطالعات؛ استفاده از روش‌های دورسنجی همراه با برنامه‌ریزی درست، انجام دقیق پردازش‌ها و تفسیر صحیح داده‌ها می‌تواند کاربرد حائز اهمیتی در مطالعات ساخت گاهی داشته باشد. به طوری که داده‌های