

تحلیل تکتونیکی ناحیه انارک بر اساس مطالعات سنجش از دور و بررسی های میدانی

پانید خاکپورمقدم؛ دانشجوی دکتری زمین شناسی، گرایش تکتونیک، گروه زمین شناسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محمود الماسیان^۱؛ استادیار، گروه زمین شناسی، گروه زمین شناسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محسن پورکرمانی؛ استاد، گروه زمین شناسی، گروه زمین شناسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

علی سربی؛ استادیار، گروه زمین شناسی، گروه زمین شناسی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۱

چکیده

منطقه مورد مطالعه در شمال شرقی استان اصفهان بین طول جغرافیایی $30^{\circ} 53'$ الی 54° و عرض جغرافیایی $30^{\circ} 33'$ الی 33° واقع شده است. مطالعات سنجش از دور و نقشه های زمین شناسی نشان می دهند که گسل های این ناحیه نقش مهمی در شکل دهی به چین خوردگی های منطقه دارند. نقشه تراکم خطواره ها نشان می دهد، بیشترین تراکم خطواره های گسلی در مناطقی هستند که دچار تغییر شکل زیاد و گسل خوردگی شده اند. همچنین با محاسبه پتانسیل حرکتی گسل در هر مقطع، مشخص می شود که گسل های شوراب و دولدول بالاترین پتانسیل حرکتی را نسبت به سایر گسل ها دارند. این نتایج با فراوانی زمین لرزه های رخ داده در منطقه، هماهنگ هستند. بر اساس این نتایج، می توان گفت که جنوب خاور گسل دولدول در مرحله پیش لرزه است و در جنوب خاور ناحیه نیاز به مطالعه بیشتری درباره گسل های ترکمانی - اربید، کوه پل خاوند و بیابانک وجود دارد. در این منطقه، ۱۹۸ خطواره، ۱۸ گسل رومی و ۹ گسل احتمالی راهبردی شناسایی شده اند که بیشترین فراوانی خطواره ها و گسل ها در شمال باختر ناحیه است. نقشه لیتولوژی تهیه شده با داده های سنجش از دور، با نقشه زمین شناسی همخوانی بالایی دارد و می توان از آن برای نمایش آلتراسیون ها و رخنمون های لیتولوژی و ساختاری استفاده کرد.

واژه های کلیدی: تحلیل ساختاری، تصاویر ماهواره ای، تراکم خطواره، سنجش از دور، گسل.

۱- مقدمه

تصاویر ماهواره ای به دلیل دارا بودن دید منطقه ای وسیع، ابزاری بسیار سودمند در مطالعات ژئومورفولوژی و زمین شناسی محسوب می شوند. این تصاویر قادرند ابعاد، گستردگی، روابط هندسی انواع ساختمان های زمین شناسی محلی و ناحیه ای را به دقت تعیین کنند. ماهواره ها امکان شناسایی عوارض خطی پوسته زمین را نیز بهبود می بخشد (کوییک و همکاران، ۱۹۹۸، خان و گلن، ۲۰۰۶). یکی از کاربردهای مهم تصاویر ماهواره ای، کمک به شناسایی عوارض خطی پوسته زمین است (کوییک و همکاران، ۱۹۹۸، خان و گلن، ۲۰۰۶). در تصاویر ماهواره ای، می توان خطواره های ساختاری بزرگ و ناحیه ای که مشاهده یا برداشت مستقیم آن ها از طریق پیمایش صحرائی ممکن نیست را به خوبی شناسایی کرد (پروست، ۱۹۹۴، سابینز، ۱۹۹۷). این نمونه سیماهای خطی با مناطق ضعف پوسته زمین (نظیر درزه های سیستماتیک و شکستگی های بزرگ مقیاس) یا نواحی جابه جایی ساختاری (گسلش)

مرتبط است. سیما سطحی پدیده‌های شکستگی و گسلش ناحیه‌ای در تصاویر ماهواره‌های معمولاً به حالت انواع اشکال زمینی خطی (نظیر گودی‌ها، گنبد‌ها، پشته‌ها، پرتگاه‌ها، دره‌ها و آبراهه‌ها) یا کشیدگی و چرخش محور چین‌ها در روند خاصی نشان داده می‌شود. در برخی موارد می‌توان از طریق عوارض طبیعی خطی یا خطی - منحنی (نظیر پوشش گیاهی و تغییر تن خاک)، آثار دگرشکلی را مشخص نمود. (عزیززاده، ۱۳۸۶).

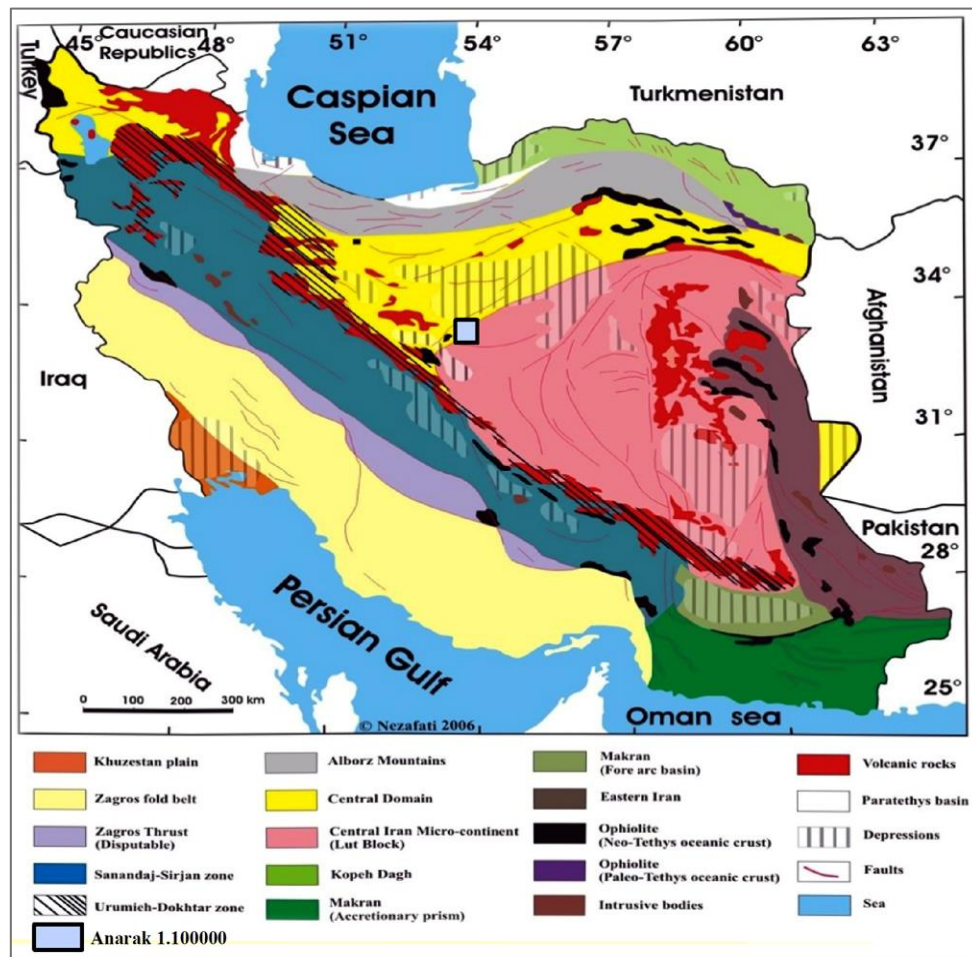
شناسایی و برداشت آثار شکستگی/گسلش از روی تصاویر ماهواره‌ای معمولاً به دو طریق مستقیم (روش تفسیر بصری) یا غیرمستقیم (استفاده از تکنیک‌های نرم‌افزاری) انجام می‌شود. استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور برای تهیه نقشه آثار شکستگی و گسلش از راه‌های معمول و متداول است؛ همچنین پژوهشگران در سرتاسر جهان از این تصاویر برای بررسی‌های مورفوتکتونیکی و تئوتکتونیکی (واکر، ۲۰۰۶)، تحلیل‌های ساختاری و زمین‌ساختی (مصطفی و ذاکر، ۱۹۹۶، آرلگوی و سوریانو، ۱۹۹۸)، مطالعات هیدرولوژی و هیدروژئولوژی (ادت و همکاران، ۱۹۹۸، ساندر، ۲۰۰۷)، کاوش‌های معدنی و اکتشاف منابع هیدروکربوری (پروست، ۱۹۹۴، وودال، ۱۹۹۴) استفاده کرده‌اند. در دهه‌های اخیر، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، مطالعات زمین‌شناسی در نواحی مختلف کشور انجام می‌شود (میلیاریسیس، ۲۰۰۱، عزیززاده، ۱۳۸۶، شهریاری و همکاران، ۱۳۸۶، عزیززاده و همکاران، ۲۰۰۸، مباشر و بابایی، ۲۰۰۸). در تحقیق حاضر، از تکنیک سنجش از دور برای مطالعات ساختاری گسل‌ها و تکتونیک ورقه انارک استفاده شده است. این مقاله با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی ارتفاع نمایی، ساختار و سازوکار حرکات گسل‌ها و تأثیر آن‌ها در تکوین زمین‌ساختی منطقه انارک را مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جایگاه زمین‌شناسی

منطقه ایران مرکزی، به عنوان یک ناحیه مهم زمین‌شناسی و تکتونیکی در ایران، در قالب یک مثلث گسترده واقع شده است که از طرف شرق به بلوک لوت، از طرف شمال به سلسله جبال البرز و از جنوب و غرب به زون سنندج - سیرجان محدود می‌شود. فرورفتگی‌های گوناگون، این ناحیه را از مناطقی مانند سنندج - سیرجان جدا کرده‌اند. در دوران پالئوزوئیک، این ناحیه به عنوان یک پلتفرم استوار شناخته می‌شود که کویر بزرگ و فرورفتگی‌های ایران مرکزی را تشکیل می‌دهد. در دوره‌های مزوزوئیک و سنوزوئیک، ایران مرکزی یک ناحیه فعال تکتونیکی بوده و تحت تأثیر حرکات تکتونیکی فعال قرار گرفته است. این فعالیت‌ها علاوه بر ایجاد دگرشیبی‌های گوناگون، منجر به فعالیت‌های ماگمایی شده و سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های گرانیتی نفوذی را در این ناحیه ایجاد کرده‌اند. در دوره کواترنری، علاوه بر گسل‌های جوان و فعال، فعالیت‌های ولکانیکی با ترکیب بازالتی در برخی از نقاط نیز مشاهده شده است.

منطقه مورد بررسی در این مقاله، به عنوان یک بخش از زون ایران مرکزی و زیر زون انارک - خور جای دارد (شکل ۱). ساختارهای سنگی در این ناحیه به وضوح قابل مشاهده بوده و از نظر زمین‌شناسی، این ناحیه در محدوده بلوک طبس واقع شده است. واحدهای سنگ - چینه‌ای قدیمی‌تر این منطقه از سنگ‌های دگرگونه مانند شیست، کوارتزیت، مرمر و آمفیبولیت و سرپانتینیت تشکیل و به مجموعه دگرگونی انارک تعلق دارد. منطقه انارک که در جنوب ایران مرکزی واقع است، به عنوان یک منطقه با روند عمومی ساختارهای تکتونیکی شمال غربی - جنوب شرقی مشخص می‌شود. ساختارهای چین - بلوک، ناشی از حرکات آلی و حرکات قدیمی‌تر، در این منطقه قابل مشاهده است. هر بلوک دارای ویژگی‌ها و خصوصیات زمین‌شناسی، الگوی ساختاری و دگرگونی مختصر خود بوده که منطقه را به یک محدوده پیچیده‌تر تبدیل کرده. طبق مطالعات و تحقیقات به دست آمده در این منطقه، وضعیت پتروژنز سن واحدها مشخص شده است. با توجه به داده‌های جدید از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های ژئومغناطیسی، ارائه

نتایج به‌روز و بهبودیافته امری ضروری به شمار می‌آید. در زمین‌شناسی منطقه انارک، ساختمان‌های اصلی با مقیاس‌های مگاسکوپی تا مزوسکوپی به دو دسته چین‌خوردگی‌ها و گسل‌ها تقسیم می‌شوند؛ همچنین عناصر دیگری نظیر درزها، نوارهای برشی و بودیناژها نیز به صورت پراکنده در کل منطقه مشاهده شده است.



شکل ۱: موقعیت محدوده مورد مطالعه در نقشه زون‌های ساختاری ایران

چین‌ها

به صورت کلی، با توجه به وضعیت سنگ‌شناسی منطقه انارک، چین‌های این ناحیه را می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم‌بندی کرد. (بول و مک فادن، ۱۹۹۷: ۱۸۱). این دسته‌بندی بر اساس زمان وقوع چین‌ها و ارتباط آن‌ها با ساختارهای زمین‌شناسی محلی انجام شده است.

• گروه الف: چین‌های این گروه در سنگ‌های قدیمی، به ویژه پی‌سنگ، شناسایی شده‌اند. این چین‌ها نیز در افیولیت‌ها و دگرگونی‌های انارک واقع شده و در طی زمان‌های گذشته شکل گرفته‌اند. این گروه از چین‌ها اطلاعات مهمی ارائه می‌دهند که درک تاریخچه سنگ‌شناسی منطقه بسیار حائز اهمیت است.

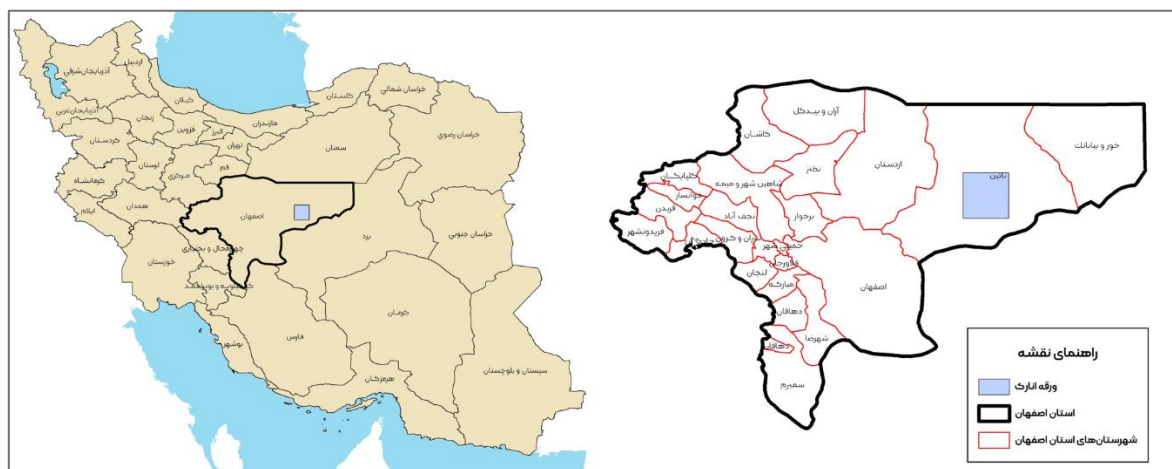
• گروه ب: چین‌های این گروه در سنگ‌های جوان‌تر از پی‌سنگ یعنی مزوزوئیک و سنوزوئیک واقع شده‌اند. این چین‌ها نشانگر فعالیت‌های زمین‌شناسی جدیدتر و تحولاتی در زمینه سنگ‌شناسی منطقه هستند.

گسل‌ها

به جهت موقعیت ویژه زمین‌شناسی منطقه، گسل‌های امتداد لغز و انواع گسل‌های شیب لغز از جمله گسل‌های رانده و رورانده قابل مشاهده است. این گسل‌ها ارتباط مستقیمی با لرزه‌خیزی داشته و از آنجاکه دارای نقش اساسی در ایجاد زمین‌لرزه هستند، ارزیابی دقیق و پارامتری مانند پتانسیل حرکتی گسل (FMP) می‌تواند در تحلیل خطر زمین‌لرزه در این ناحیه کارآمد باشد. در گستره مورد مطالعه، دو مجموعه سنگی اصلی مشاهده می‌شود: مجموعه دگرگونی پی‌سنگ پرکامبرین (شارکوفسکی و همکاران، ۱۹۸۴) یا به عبارت دیگر سیمبرین (باقری، ۱۳۸۵) و مجموعه پوشش رسوبی کرتاسه - ترشیاری. ارتباط این دو مجموعه با راندگی تا گسل‌های معکوس پرشیب در بسیاری از نقاط ناحیه قابل تشخیص است. این ساختاربخشی از یک مجموعه چین-گسل‌های پلکانی راست‌بر بوده که در شمال شرق خط اردکان - کاشان واقع شده (باقری، ۱۳۸۵) و ناشی از تحولات تکتونیکی در اقیانوس پالئوتتیس و نتوتتیس است. ساختار کلان ناحیه از شمال به گسل درونه، از جنوب غرب به گسل دهشیر بافت و از شرق و جنوب به گسل بیابانک محدود می‌شود. شکل‌گیری تاق‌دیس‌ها و ناودیس‌های چندگانه به صورت یک تاق‌دیس بزرگ مارپیچی شکل در تصویر ماهواره‌ای قابل مشاهده است. ماسه‌سنگ‌ها، سنگ جوش‌ها و مارن‌های قرمز رنگ الیگوسن - میوسن بر روی مسکوویت، مسکوویت - کلریت و اپیدوت - کلریت شیست‌های پروتروزوییک بالایی در منطقه انارک رانده شده‌اند و نیز مرز میان شیست‌های پروتروزوییک بالایی با مرمرها و سنگ دولومیت پالئوزوئیک زیرین دارای راندگی است. این سنگ‌ها با وجود راندگی و شیب لغزها، به شدت تغییر یافته‌اند. همچنین، داده‌های ماهواره‌ای ژئومغناطیسی و اطلاعات جدید به تغییر در تفسیر ساختار ناحیه و نیازمند بازبینی و اصلاح داده‌ها شده‌اند.

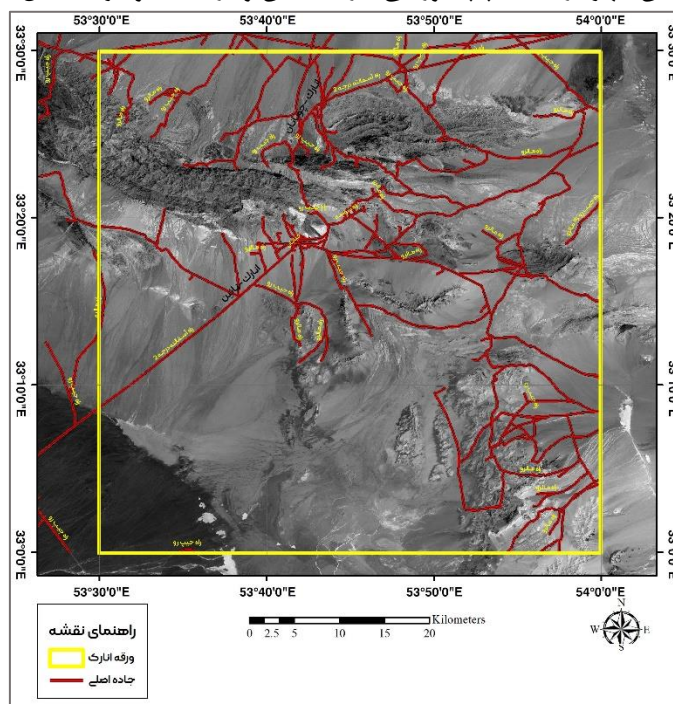
۲- مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در مرکز ایران، شرق استان اصفهان، در شهرستان نائین و بین شهرستان خور و بیابانک و اردستان در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ انارک قرار گرفته است. در شکل ۲، نمایی گرافیکی از موقعیت جغرافیایی منطقه ارائه شده است.



شکل ۱: موقعیت منطقه در تقسیم بندی سیاسی کشور

طبق شکل ۲، مسیر تهران به انارک از جاده قم-کاشان شروع می‌شود که پس از گذر از کاشان به سمت اردستان و سپس به سمت شهرستان نائین ادامه می‌یابد. این شهر در سمت چپ دوراهی انارک-نائین و در ۷۵ کیلومتری شمال شرقی نائین قرار گرفته است.

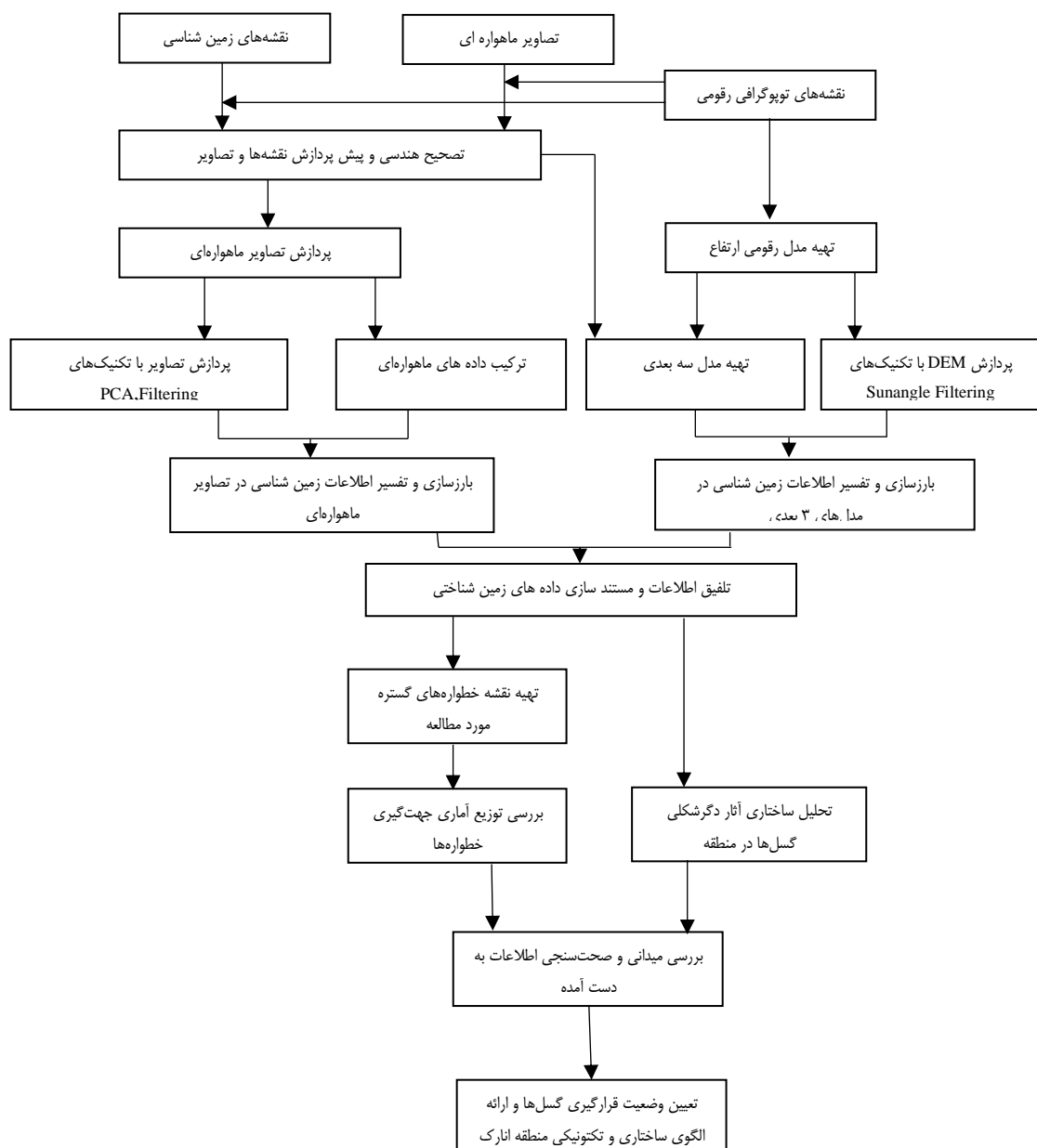


شکل ۲: مسیرهای دسترسی به منطقه مورد مطالعه

مراحل مطالعه انجام شده با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای Landsat7 سنجنده (ETM+) و Landsat8 سنجنده (OLI, TIRS) در پیاده‌سازی تکنیک‌های ذیل عبارت‌اند از:

- استفاده از نسبت بانندی (Band Ratio) جهت از بین بردن اثر توپوگرافی و سایه‌ها و جهت رویت کانی‌ها و دیگر عوارض مرتبط با گسل.
- پوشش گیاهی (NDVI) برای نمایان ساختن گیاهان در منطقه.
- ترکیب رنگی تصاویر (RGB) برای تفکیک واحدهای سنگی بر مبنای رنگ.
- اعمال فیلترهای Sunangle، Highpass و Edges به منظور بارزسازی خطوط اثر شکستگی‌ها، مرزها و لبه‌های تیز.
- استفاده از مدل ارتفاع رقومی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ و ASTER DEM، از DEM SRTM جهت تولید مدل سه بعدی محدوده و برای دید بهتر دره‌ها به کمک سایه ایجاد شده.
- استفاده از روش آماری PCA، برای کاهش ابعاد داده‌ها با حفظ اطلاعات (این روش جهت شناسایی گسل‌های زمین‌شناسی با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری یا مغناطیس‌سنجی به کار رفته است).
- استفاده از داده‌های ژئوفیزیک هوایی موسوم به داده‌های ۷.۵ کیلومتر جهت بررسی نقشه شدت میدان کل مغناطیسی، فیلترهای اصلی در تعیین مکان، وضعیت توده‌های مغناطیسی زیرسطحی، فیلتر سیگنال تحلیلی جهت مشخص کردن خطواره‌های مغناطیسی و گسل‌های پیدا و پنهان
- بررسی و ارزیابی لایه‌های اطلاعاتی به دست آمده در سامانه اطلاعات مکانی (GIS)
- بازدید صحرایی به منظور آشنایی با منطقه مورد مطالعه و انطباق اطلاعات موجود با مشاهدات صحرایی، شناسایی و تفکیک دقیق واحدهای سنگی و چگونگی ارتباط آن‌ها با یکدیگر و ارزیابی گسل‌های منطقه

فرایند مطالعات در ورقه انارک در فلوجارت ۱ نشان داده شده است.

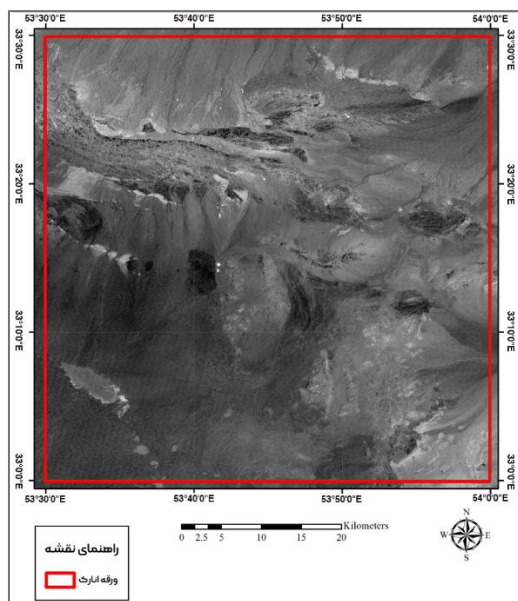


فلوچارت ۱: فرایند مطالعات

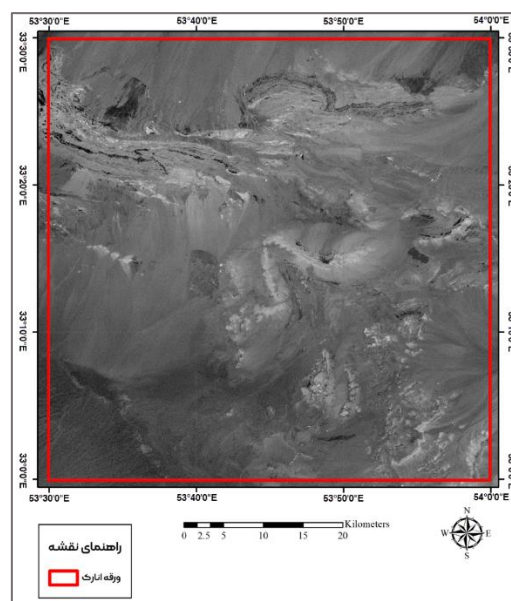
۳- یافته‌های پژوهش

۳-۱- استفاده از نسبت بانندی

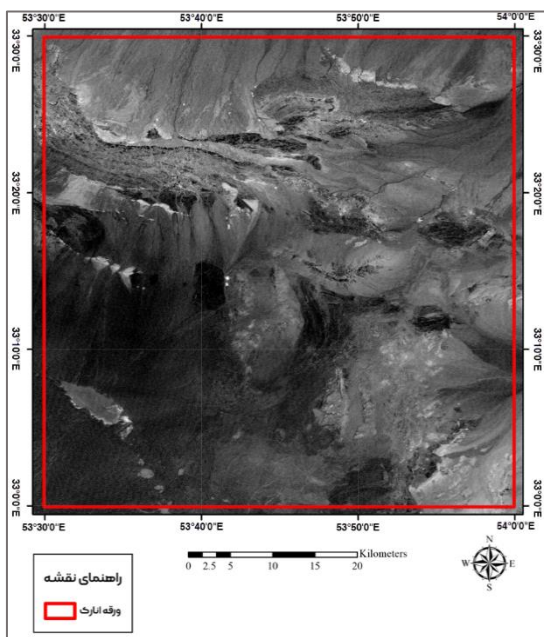
این تکنیک برای بارزسازی عوارض با استفاده از تفاوت در میزان جذب و انعکاس نور در پدیده‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله مزایای این روش می‌توان به از بین بردن اثر توپوگرافی و سایه‌ها اشاره کرد. در ذیل تصاویر نسبت بانندی ۵/۷ (شکل ۳) و ۴/۳ (شکل ۴) و ۳/۱ (شکل ۵) و شاخص گیاهی اختلاف نرمال شده NDVI (شکل ۶) آورده شده است.



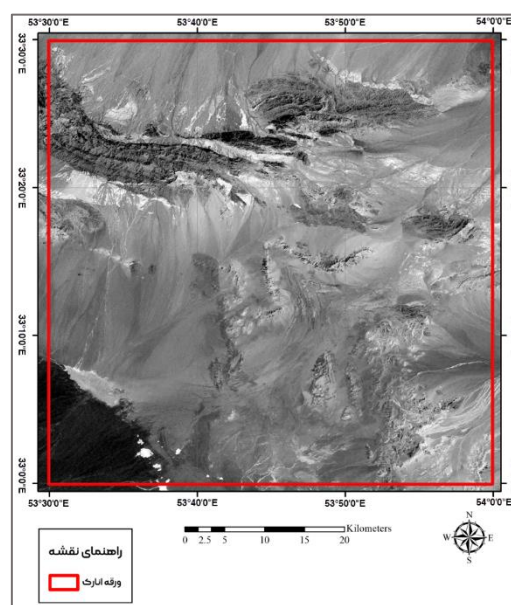
شکل ۴: نسبت ۴/۳ در تصویر خاکستری (گیاهان روشنتر از غیر گیاهان هستند).



شکل ۳: نسبت ۵/۷ در تصویر خاکستری (واحدهای دارای آتراسیون هیدروترمال روشن تر از بقیه نقاط هستند).



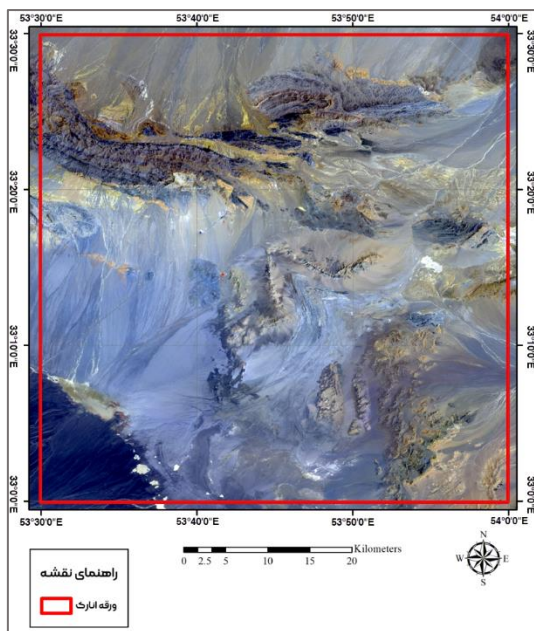
شکل ۶: تصویر شاخص گیاههای نرمال شده، در این تصویر گیاهان روشن تر از غیر گیاهان هستند.



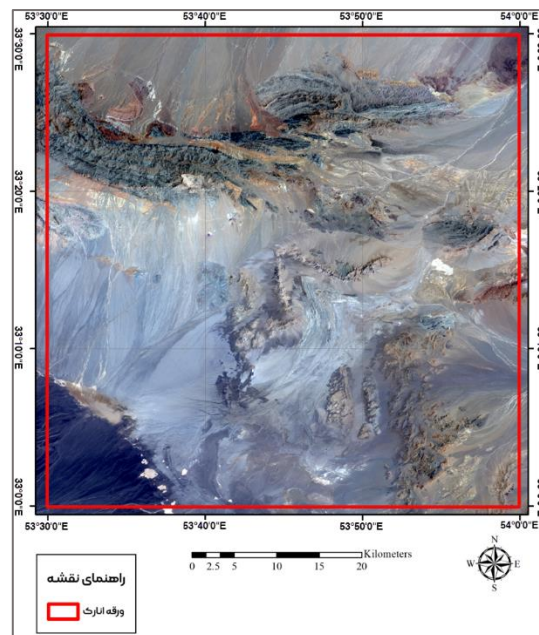
شکل ۵: نسبت ۳/۱ در تصویر خاکستری (نواحی دارای آهن فریک روشن تر از مناطق دیگر دیده می شود).

۳-۲- پردازش بر روی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸

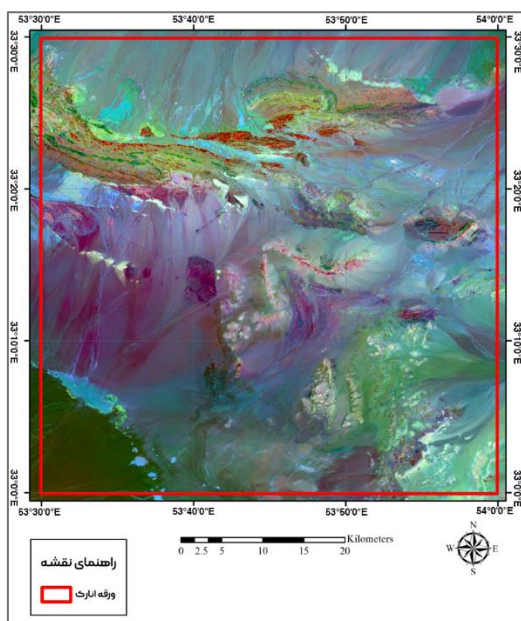
داده‌های ماهواره لندست ۸ این منطقه شامل یک سین به شماره ۳۷-۱۶۲ است. پردازش‌ها بر روی تصاویر این ماهوار شامل چهار نوع RGB که به ترتیب رنگ طبیعی منطقه (شکل ۷)، پوشش گیاهی (شکل ۸)، تفکیک واحدهای سنگی (شکل ۹) و در نهایت تفکیک واحدهای سنگی (شکل ۱۰) به همراه دگرسانی‌ها تولید می‌گردد.



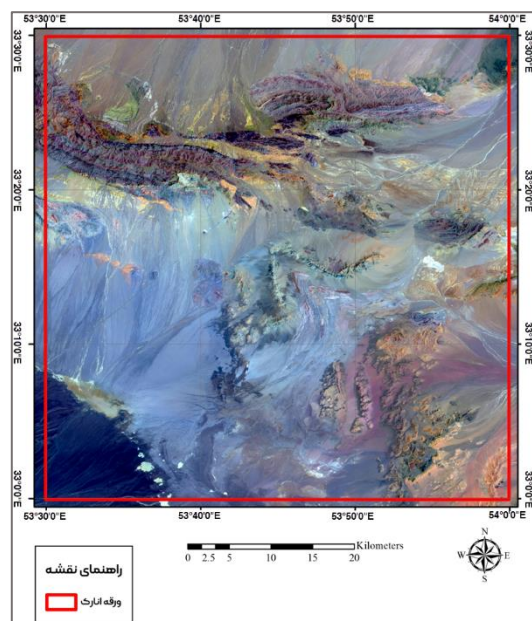
شکل ۸: تصویر پوشش گیاهی منطقه در قالب RGB با استفاده از باندهای R:5 G:4 B:2 ماهواره لندست ۸ همان طور که مشخص شده است، پوشش گیاهی به صورت نقاط قرمز رنگ شاخص است.



شکل ۷: تصویر رنگ طبیعی منطقه در قالب RGB با استفاده از باندهای R:4 G:3 B:2 ماهواره لندست ۸



شکل ۱۰: تصویر تفکیک واحدهای سنگی به همراه دگرسانی‌ها در قالب RGB با استفاده از باندهای R:6/7 G:5/4 B:4/2 ماهواره لندست ۸



شکل ۹: تصویر تفکیک واحدهای سنگی منطقه در قالب RGB با استفاده از باندهای R:6 G:4 B:2 ماهواره لندست ۸

۳-۳- فیلترگذاری

فیلترکردن نوعی تغییر ارزش‌های طیفی بوده که باعث تغییر کنتراست تصویر نسبت به پیکسل‌های همسایه می‌شود. این فیلترها، ماتریس‌هایی با تعداد سلول‌های فرد هستند و تغییراتی در ارزش پیکسل مرکزی را با توجه به پیکسل‌های اطراف اعمال می‌کنند.

ابعاد متداول فیلترها شامل ۳*۳، ۵*۵ و ۷*۷ است. اندازه بزرگ‌تر ماتریس فیلتر منجر به افزایش سرعت عملیات ولی دقت کمتر می‌شود.

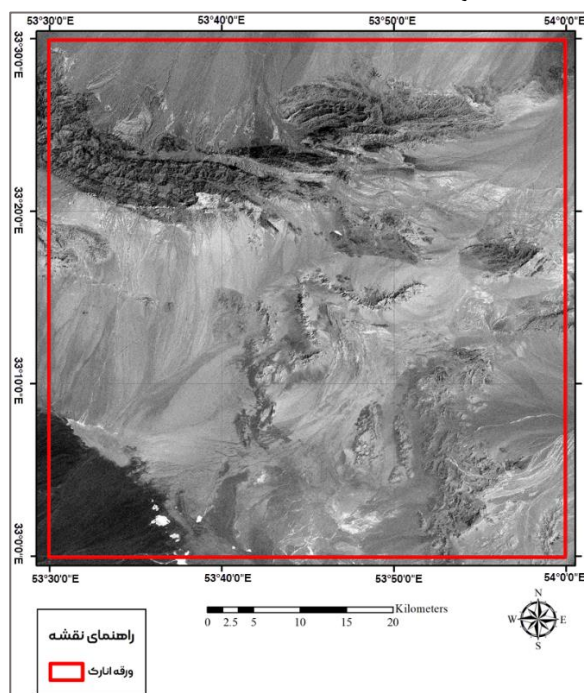
انواع فیلترهای به کار رفته در این بخش به شرح ذیل است:

- فیلترهای بالاگذر (High-pass filters): این فیلترها به عنوان تشخیص دهنده‌های لبه عمل می‌کنند و تنها اجازه عبور پیکسل‌های خاکستری با فرکانس بالا را خواهند داد؛ همچنین این فیلترها دیگر عوارض را محو نمی‌کند (بابا احمدی ۱۳۸۸). (شکل ۱۱)
- فیلترهای آشکارساز لبه (Edge detector filters): همان‌طور که از نام آن برمی‌آید، لبه‌های موجود در تصاویر همچون خطواره‌های ساختاری، جاده‌ها و رودخانه‌ها را مشخص می‌کند و در زمین‌شناسی ساختاری برای تشخیص خطواره‌های گسلی حائز اهمیت است (بابا احمدی ۱۳۸۸). (شکل ۱۲، شکل ۱۳، شکل ۱۴)
- فیلترهای جهتی (Sunangle filter): این فیلترها از جمله تکنیک‌های ساده و بسیار مفید جهت بارزسازی لبه‌های تیز و مرزها مانند خطوط گسل و درزه‌ها هستند (حاجی، ۱۳۸۷). در این فیلتر، خط واردها در جهتی که قطر با درایه‌های صفر قرار دارد، بارز می‌شود. (شکل ۱۵، شکل ۱۶، شکل ۱۷، شکل ۱۸)

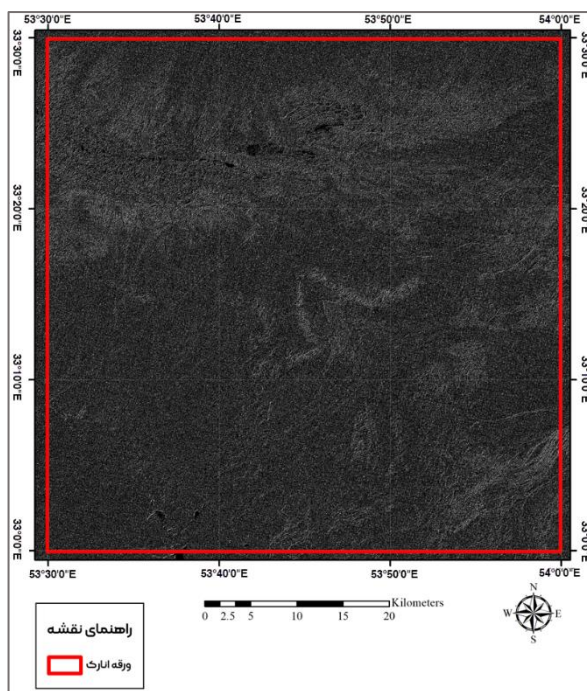
این فیلترها بر روی تصویر باند ۸ خاکستری (لندست ۸) اعمال شده است. دلیل انتخاب این باند توان تفکیک مکانی بیشتر نسبت به باندهای دیگر لندست است.

جدول ۱: ماتریس فیلتر High pass (sharpen 5*5 ker)

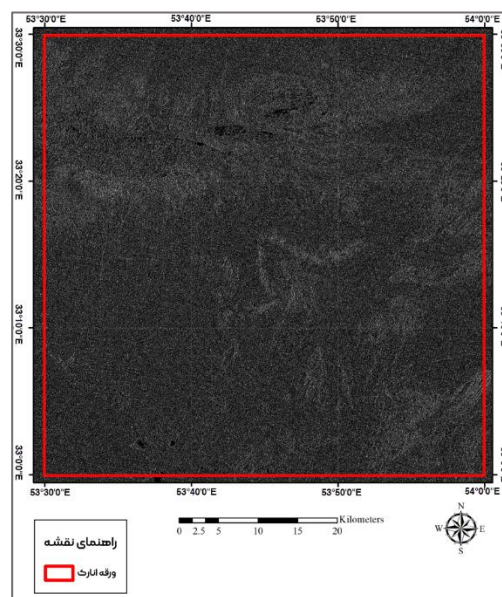
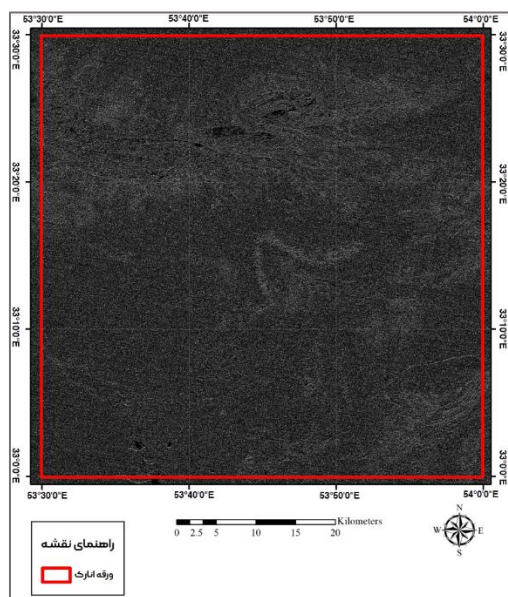
-۱	-۱	-۱	-۱	-۱
-۱	-۱	-۱	-۱	-۱
-۱	-۱	۴۹	-۱	-۱
-۱	-۱	-۱	-۱	-۱
-۱	-۱	-۱	-۱	-۱



شکل ۱۱: تصویر باند بانکروماتیک لندست ۸ در محدوده مورد مطالعه پس از اعمال فیلتر High pass (sharpen 5*5 ker)



شکل ۱۲: تصویر باند پانکروماتیک لندست ۸ در محدوده مورد مطالعه پس از اعمال فیلتر Edges-Different.Ker



شکل ۱۴: تصویر باند پانکروماتیک لندست ۸ در محدوده مورد مطالعه پس از اعمال فیلتر Edges-gradient Y.ker

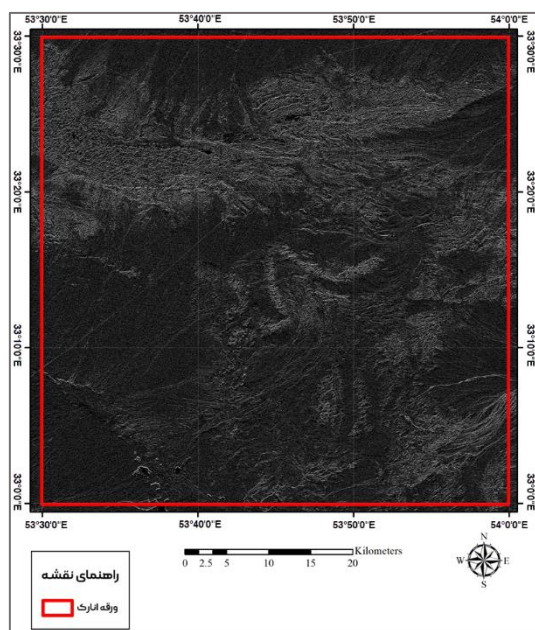
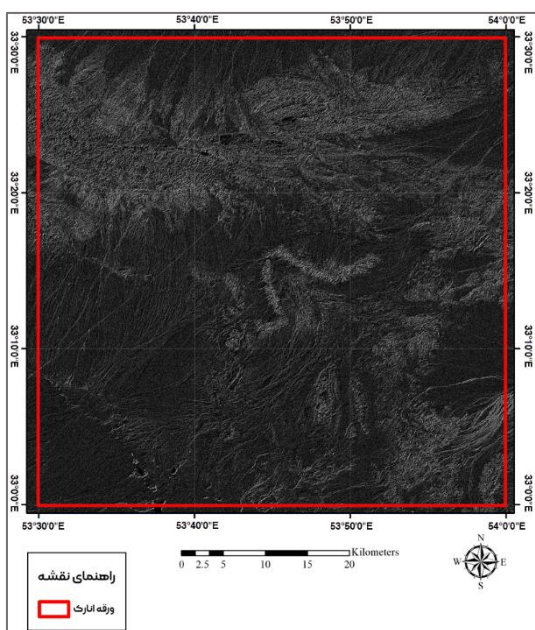
شکل ۱۳: تصویر باند پانکروماتیک لندست ۸ در محدوده مورد مطالعه پس از اعمال فیلتر Edges-gradient x.ker

جدول ۳: ماتریس فیلتر Edges-gradient Y.ker

-۱
-۱
-۱

جدول ۲: ماتریس فیلتر Edges-gradient x.ker

-۱	-۱	۰
----	----	---



شکل ۱۶: تصویر باند پانکروماتیک لندست ۸ در محدوده مورد مطالعه پس از اعمال فیلتر Sunangle (جهت تابش از جنوب خاوری و بارز شدن گسل‌ها و خطواره‌های شمال خاوری - جنوب باختری).

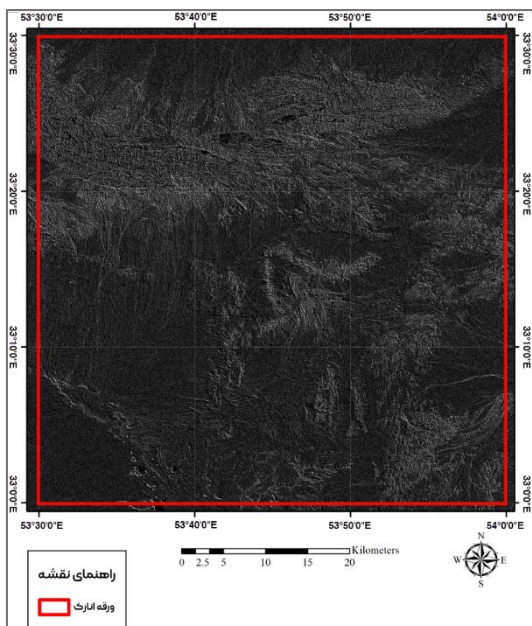
شکل ۱۵: تصویر باند پانکروماتیک لندست ۸ در محدوده مورد مطالعه پس از اعمال فیلتر Sunangle (جهت تابش شمالی - جنوبی و بارز شدن گسل‌ها و خطواره‌های خاوری - باختری).

جدول ۵: ماتریس Filteres_Sunangle.South_East.ker

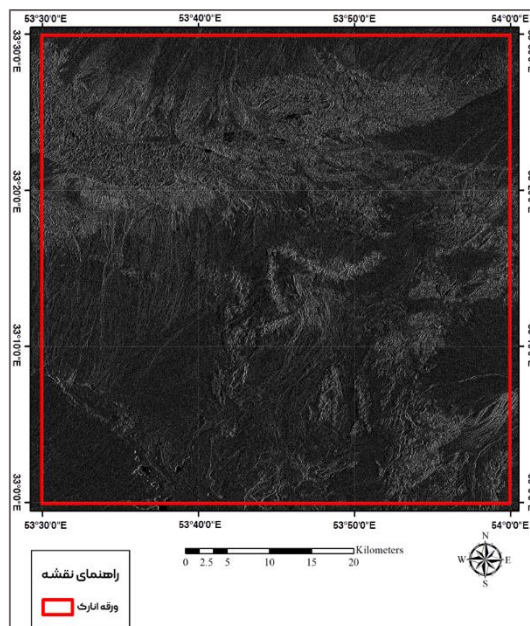
۱	۱	۰
۱	۰	-۱
۰	-۱	-۱

جدول ۴: ماتریس Filteres_Sunangle.North_South.ker

-۱	-۱	-۱
۰	۰	۰
۱	۱	۱



شکل ۱۸: تصویر باند پانکروماتیک لندست ۸ در محدوده مورد مطالعه پس از اعمال فیلتر Sunangle (جهت تابش از جنوب باختری و بارز شدن گسل‌ها و خطواره‌های شمال باختر - جنوب خاور)



شکل ۱۷: تصویر باند پانکروماتیک لندست ۸ در محدوده مورد مطالعه پس از اعمال فیلتر Sunangle (جهت تابش خاوری - باختری و بارز شدن گسل‌ها و خطواره‌های شمالی - جنوبی)

جدول ۷: ماتریس Filteres_Sunangle. South_West.ker

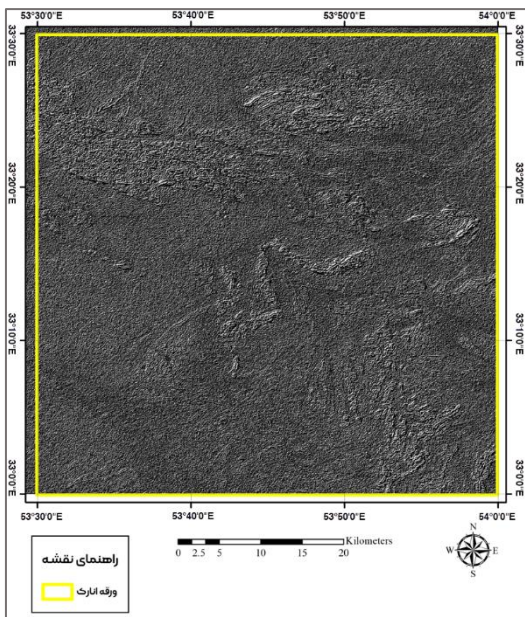
۰	۱	۱
-۱	۰	۱
-۱	-۱	۰

جدول ۶: ماتریس Filteres_Sunangle. East_West.ker

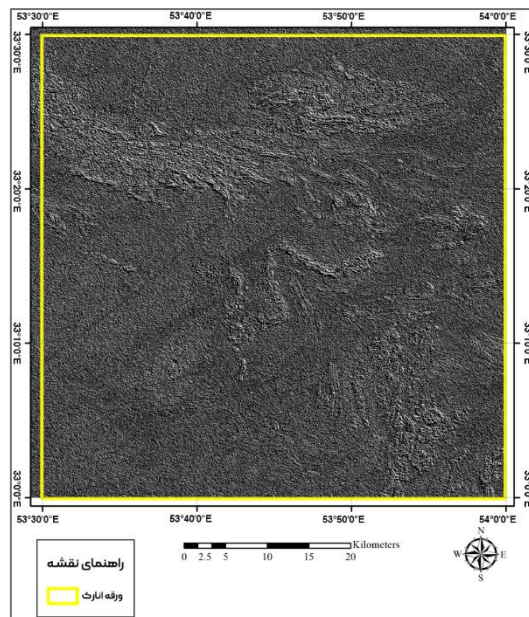
-۱	۰	۱
-۱	۰	۱
-۱	۰	۱

۳-۴- پردازش بر روی DEM SRTM

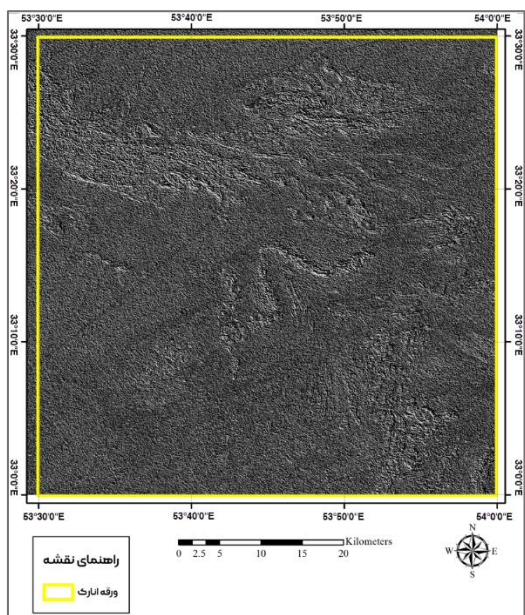
استفاده از تکنیک Sun-Shading یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود دید در مناطق با تپه‌ها و سطوح بلند است. این ابزار امکان تاباندن نور خورشید به صورت دلخواه بر روی تصویر (DEM) Digital Elevation Model را فراهم می‌کند و امکان بررسی سایه‌های ایجاد شده را به ما می‌دهد. روش فوق در چهار جهت جغرافیایی مورد استفاده قرار گرفته که خطوط خطواره‌های منطقه و سایه‌های ایجاد شده بر روی تصاویر DEM رسم شده است. (شکل ۱۹، شکل ۲۰، شکل ۲۱، شکل ۲۲)



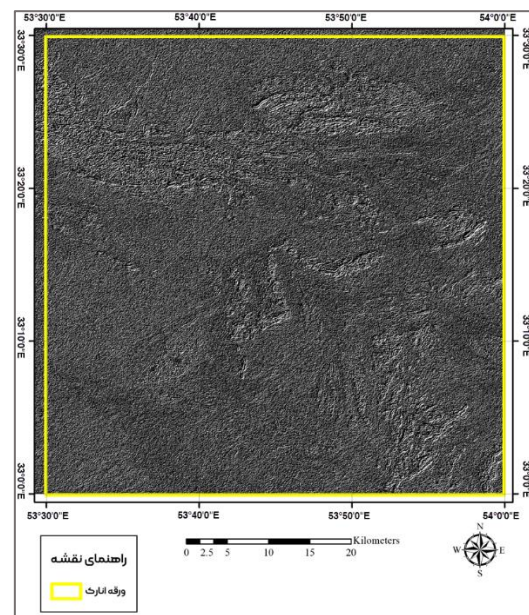
شکل ۲۰: تصویر فیلتر Sunshading زاویه تابش جهت شمال باختر



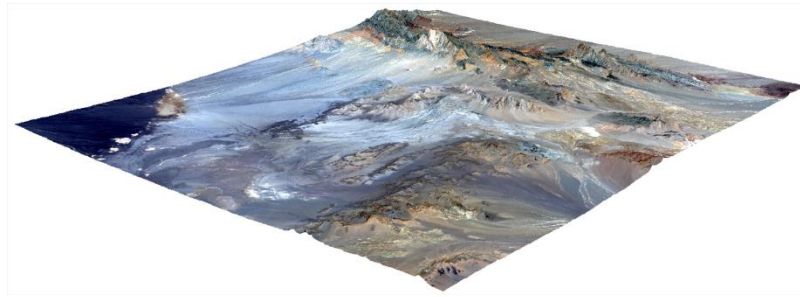
شکل ۱۹: تصویر فیلتر Sunshading زاویه تابش جهت شمال خاور



شکل ۲۲: تصویر فیلتر Sunshading زاویه تابش جهت جنوب باختر



شکل ۲۱: تصویر فیلتر Sunshading زاویه تابش جهت جنوب خاور



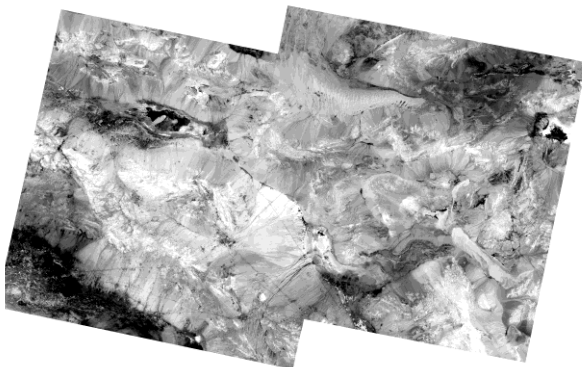
شکل ۲۳: نمای سه بعدی محدوده بر اساس تصویر طبیعی منطقه (ماهواره لندست ۸ و DEM SRTM)

۳-۵- موزائیک نمودن تصاویر

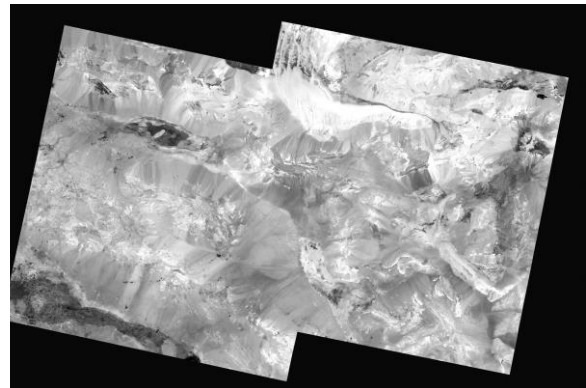
با توجه به این که ورقه زمین شناسی انارک در دو Scene تصویر ماهواره Landsat8 قرار داشتند، تصاویر مورد نظر برای ایجاد یک تصویر یکپارچه در نرم افزار ENVI تهیه شده است. (شکل ۲۴)

• تحلیل مولفه های اصلی (Principal Components Analysis)

تحلیل مولفه های اصلی یک روش تکنیکی است که امکان تولید تصاویر با همبستگی نزدیک به صفر یا به صورت تقریبی صفر را فراهم می کند (شکل ۲۵). یکی از مزایای اساسی تحلیل مولفه های اصلی (PCA) این است که اطلاعات موجود در همه باندهای تصویر، می توانند با کاهش تعداد باندها، بدون از دست دادن اطلاعات مهم باندها، بازتولید شوند (Mather، ۲۰۰۵؛ Gibson و Power، ۲۰۰۰).



شکل ۲۵: تصویر بدست آمده به روش PC



شکل ۲۴: تصویر scene گستره مورد مطالعه

۳-۶- ژئوفیزیک هوایی

داده های ژئوفیزیک هوایی استفاده شده در این مقاله مربوط به داده های ژئوفیزیک هوایی (موسوم به داده های ۷.۵ کیلومتر) از سازمان زمین شناسی تهیه شد. این داده ها دارای ارتفاع پرواز تقریبی ۱۲۰۰ متری بوده و فاصله بین خطوط برداشت ۷.۵ کیلومتر است. در ادامه به بررسی آن ها می پردازیم.

• آنومالی شدت میدان کل

پیش از شروع مراحل آنومالی شدت میدان کل، مراحل تصحیح با استفاده از مدل IGRF (International Geomagnetic Reference Field) انجام شد و در نتیجه داده های ورودی مورد نیاز برای انجام مراحل بعدی ایجاد گردید. خروجی حاصل، در شکل ۲۶ نشان می دهد با نزدیک تر شدن به رنگ صورتی شدت میدان مغناطیسی بالاتر و با نزدیک شدن به رنگ آبی شدت میدان

مغناطیسی کاهش می‌یابد. در ادامه بعد از تصحیح IGRF، فیلتر برگردان به قطب، پیاده‌سازی می‌شود و بقیه فیلترها بر روی فیلتر برگردان به قطب، اعمال می‌گردد.

• تولید نقشه برگردان به قطب (RTP)

نقشه برگردان به قطب با اعمال فیلتر برگردان به قطب در نرم‌افزار تولید می‌شود. محل اصلی توده با شدت مغناطیسی بالا، در مرکز منطقه و در امتداد شمال شرق - جنوب غربی و نیز در شرق منطقه مشخص شده است. پس از اعمال فیلتر، تقریباً در مرکز قرار می‌گیرد و منطقه را از نقطه نظر مغناطیسی حائز اهمیت می‌کند. (شکل ۲۷)

• تولید نقشه سیگنال تحلیلی (AS)

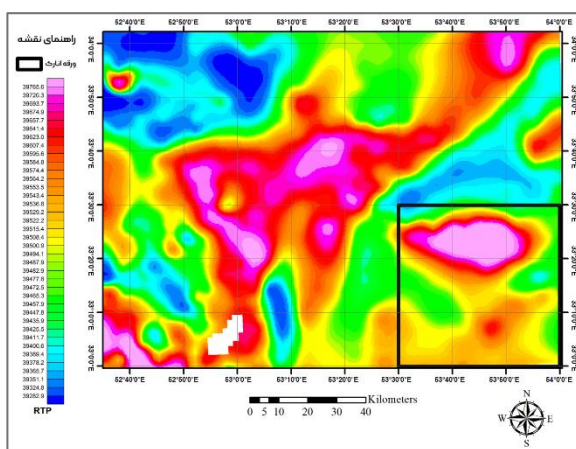
آنومالی در شمال شرقی، شرق، شمال غربی و جنوب غربی منطقه مشاهده می‌شود. این ناحیه از نظر زمین‌شناسی، یک ساختار سنگی مهم و قابل بررسی بوده و مرز اصلی این توده نیز تقریباً مشخص شده است. این مرز با مرزهای زمین‌شناسی تطابق خوبی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی یکی از ویژگی‌های فیلتر سیگنال تحلیلی مشخص کردن خطواره‌های مغناطیسی و گسل‌های پیدا پنهان است. (شکل ۲۸)

• تعیین جهت گسل

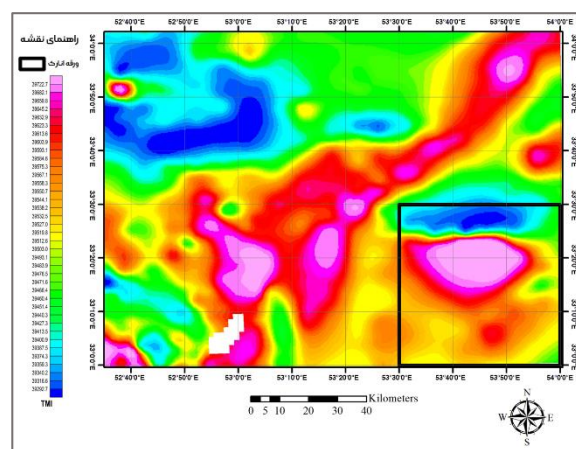
به گفته (2012) Feumoe می‌توان جهت گسل را طبق مراحل زیر تعیین کرد:

- ۱) در ابتدا فیلتر فراسو یا Upward بر روی RTP اعمال می‌شود که این عمل جهت حذف آنومالی‌های سطحی است. (این پژوهش در ارتفاع ۲۰۰ متر در نظر گرفته شده است.)
- ۲) سپس فیلتر Trend بر روی TMA اعمال می‌شود که هدف از این کار حذف روندهاست؛ در واقع روندهای اشتباه و ناهمگون را روان می‌کند.
- ۳) به‌وسیله اعمال ریاضی نرم‌افزار Geo soft فیلتر Trend از Up-200m کاسته می‌شود.
- ۴) فیلتر مشتق اول قائم، بر روی UP-TREND اعمال شده و تنها یکبار مشتق گرفته می‌شود.

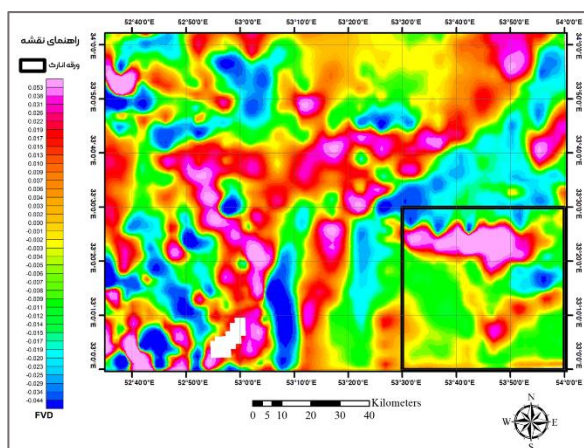
نتیجه انجام مراحل ذکر شده ایجاد خطوط قرمز و آبی بر روی تصویر است. در هر قسمتی که خطوط قرمز و آبی در کنار هم قرار دارند، می‌توان جهت گسل را مشخص کرد. به‌طور کلی می‌توان گفت مرز بین نقاط آبی و بنفش رنگ که ساختار خطی دارند، خطواره هستند. (شکل ۲۹)



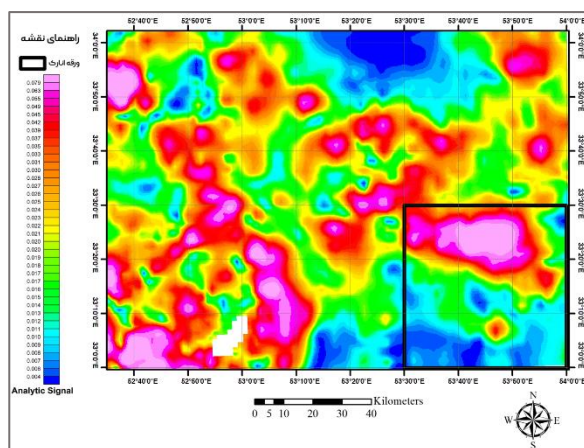
شکل ۲۷: نقشه برگردان به قطب (RTP)



شکل ۲۶: نقشه شدت کل میدان مغناطیسی Total Magnetic Intensity



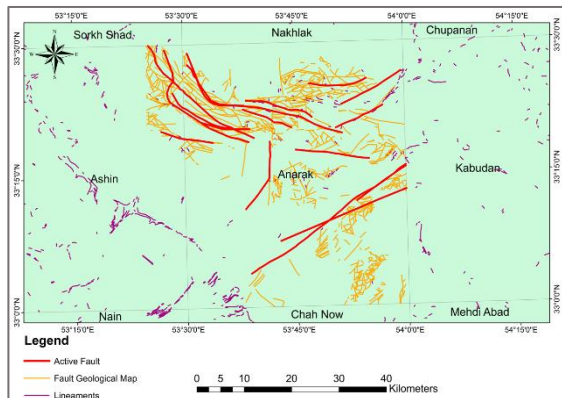
شکل ۲۹: نقشه فیلتر مشتق اول قائم (FVD)



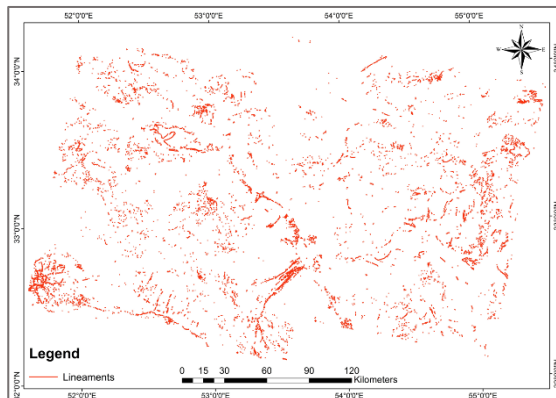
شکل ۲۸: نقشه سیگنال تحلیلی

با اجرای تحلیل بر روی تصاویر ماهواره‌ای متنوع و بهره‌گیری از تکنیک‌های نسبت بانندی و فیلترهای مناسب، همچنین تحلیل داده‌های ژئوفیزیک هوایی جهت ابراز خطواره‌های گسترده مورد مطالعه، نقشه تراکم خطواره‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. به عبارت دیگر، پس از وارد کردن خطواره‌ها به نرم‌افزار مذکور و در نظر گرفتن هر واحد منطقه مورد مطالعه با ابعاد یک کیلومترمربع، تراکم خطواره‌ها در هر واحد تعیین گردید.

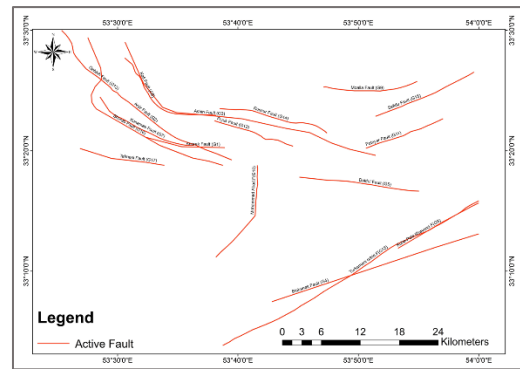
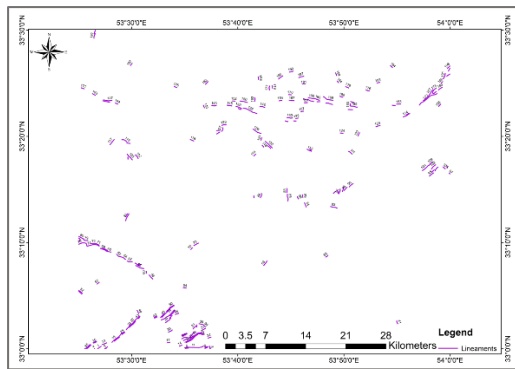
در شکل ۳۰، شکل ۳۱، شکل ۳۲ و شکل ۳۳ رنگ‌ها بیانگر شدت تراکم خطواره‌ها هستند. به طوری که رنگ قرمز تعیین کننده تراکم بیشینه است و روند شمال باختر - جنوب خاور را نشان می‌دهد.



شکل ۳۱: نمایش خطواره‌ها به روش PCA گسترده مورد پژوهش به همراه گسل‌های نقشه‌های زمین‌شناسی ناحیه (ورقه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ مختلف)

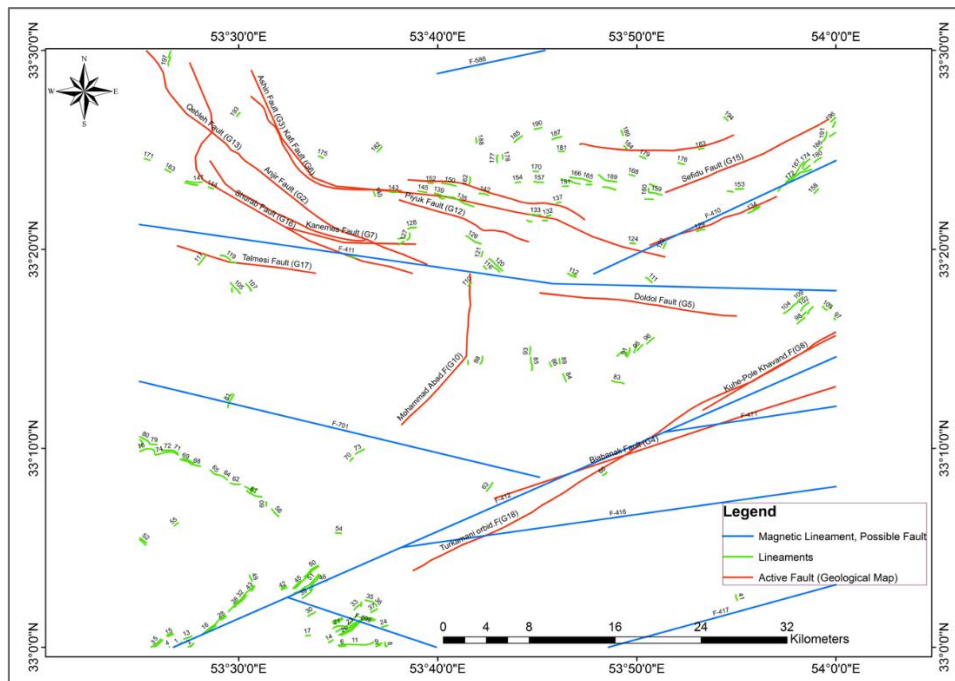


شکل ۳۰: خطواره‌های به دست آمده به روش PCA

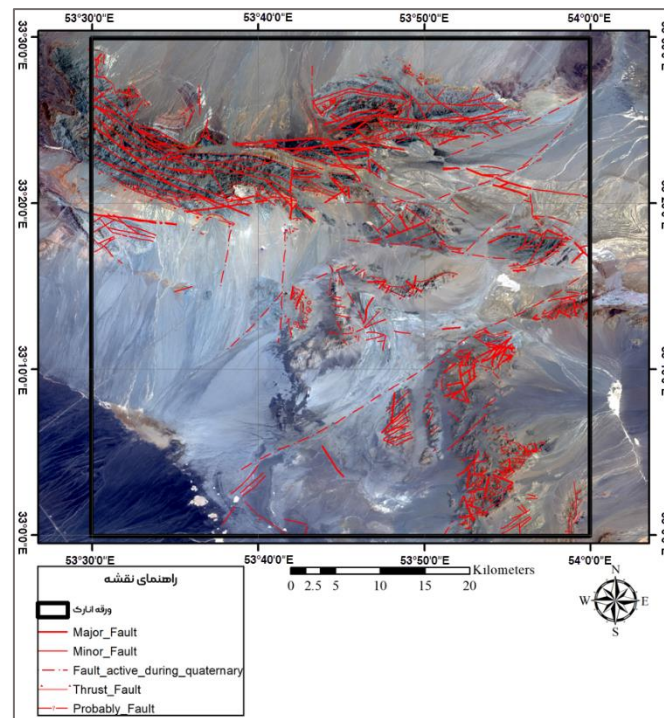


شکل ۳۵: گسل‌های رقمی شده بر گره‌های ۱۰:۱۰۰۰۰ ناحیه (گسل‌های جنبی با طول تقریبی بالاتر از ۱۰ کیلومتر)

شکل ۳۶: خطواره جدید شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه با روش دورسنجی (PCA)

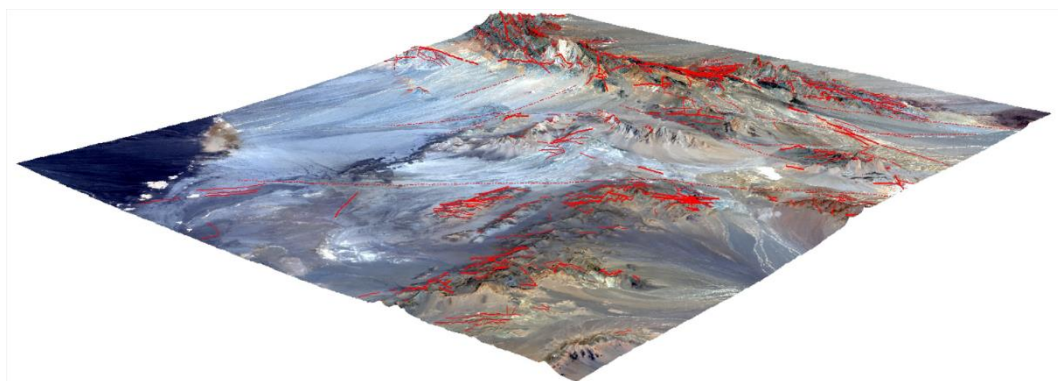


شکل ۳۷: مقایسه خطواره‌های سطحی با گسل‌های مغناطیسی و اصلی (خطواره‌ها، لایه‌های رقمی نقشه زمین‌شناسی بالاتر از ۱۰ کیلومتر و داده‌های مغناطیسی)



شکل ۳۸: نقشه گسل‌های منطقه بر روی تصویر لندست ۸

در گستره مورد مطالعه ۱۹۸ خطواره با مطالعات سنجش از دور و ۱۸ گسل رقمی شده بالای ده کیلومتر از نقشه زمین‌شناسی انارک و ۹ گسل احتمالی داده مغناطیسی تشخیص داده شده است.



شکل ۳۹: نمای سه بعدی محدوده بر اساس تصویر طبیعی و گسل‌های منطقه (ماهواره لندست ۸ و DEM SRTM)

۳-۸- بازدید میدانی

پس از تولید لایه‌های اطلاعاتی فوق در جهت بررسی و ارزیابی مطالعات انجام شده و تعیین گسل‌های منطقه، عملیات صحرایی انجام شد.



شکل ۴۱: پهله گسلی با موقعیت NW 010/76 که دگرسانی کلریتی در آن مشاهده می شود و ۷۶ درجه شیب به سمت شمال باختر دارد؛ دید به سمت جنوب شرق.



شکل ۴۰: پهله گسلی با روند شمال باختری-جنوب خاوری و ۶۹ درجه شیب به سمت جنوب باختر. (دید به سمت جنوب شرق).



شکل ۴۳: گسل های منطقه با موقعیت SE 195/89 NW 044/71 که در راستای گسل دارای شیب ۷۱ درجه اکسید آهن تشکیل شده است؛ دید به سمت شمال شرق.



شکل ۴۲: گسل های مزدوج با مشخصات NE 150/41 NW 046/64 در راستای شمال باختری جنوب خاوری و شمال خاوری - جنوب باختری؛ دید به سمت جنوب غرب.

۴- بحث

طبق بررسی های زمین شناسی، سنجش از دور، ژئوفیزیک هوایی در محیط سامانه اطلاعات مکانی (GIS) و مطالعات صحرایی در محدوده مورد مطالعه، مشخص گردید که نقشه تراکم خطواره ها بر روند شمال باختر - جنوب خاور منطقه تأثیر گذار بوده و نشانگر تغییرات چشمگیر در تراکم خطواره های گسلی، به ویژه در مناطق گسل خوردگی است. پس از بررسی چین خوردگی های منطقه مشخص گردید که تأثیر گسل های ناحیه، ریخت نهایی چین خوردگی های منطقه را کنترل می کند. طبق محاسبات پتانسیل حرکتی گسل، در هر مقطع از گسل های ناحیه، دو گسل شوراب و دولدول دارای بیشترین پتانسیل حرکتی هستند. به عبارت دیگر، بخش شمال خاوری گسل دولدول نسبت به سایر بخش ها، نرخ لرزه خیزی بیشتری دارد. این واقعیت در حالی است که آخرین فعالیت های لرزه ای در ناحیه، به ویژه در نزدیکی گسل های اصلی رخ داده اند. نرخ لرزه خیزی به تدریج در جهت پایانه شمالی گسل های جنبای ناحیه افزایش می یابد و به بیان دیگر در جنوب خاور ناحیه با افت حداکثری پتانسیل حرکتی برای گسل های ترکمانی - اربید، کوه پل خاوند و بیابانک مشاهده می شود. همچنین، در جهت پایانه شمال باختر گسل انارک، نرخ لرزه خیزی افزایش می یابد.

۵- نتیجه گیری

- روند گسل‌های فعال در منطقه مورد مطالعه، نشان‌دهنده یک الگوی شمال باختر - جنوب خاور است که با داده‌های حاصل از برداشت‌های صحرایی تطابق دارد.
- با توجه به سرعت متوسط لغزش گسل‌های ناحیه در سال‌های اخیر و نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات پیشین، بخش شمال باختری گسل انارک (از انارک تا گسل شوراب - مقطع طالمسی)، منطقه‌ای با بیشترین احتمال لغزش در آینده، شناخته شد.
- نیمه شمال باختری گستره مورد مطالعه با قابل توجه‌ترین نرخ پتانسیل حرکتی گسل همراه است و ساختارهای تکتونیکی نواحی شمال باختر، جوان‌ترین فعالیت‌های نئوتکتونیکی معرفی می‌شوند. از داده‌های حاصل از مطالعات سنجش‌ازدور به عنوان ابزاری مناسب برای نمایش آلتراسیون‌ها و رخنمون‌های لیتولوژی و ساختاری استفاده شد.
- در گستره مورد مطالعه که شامل ۱۹۸ خطواره (از مطالعات سنجش‌ازدور و ۱۸ گسل رقومی بالای ده کیلومتر از نقشه زمین‌شناسی انارک و ۹ گسل احتمالی داده مغناطیسی) است، فراوانی بیشتر خطواره‌ها در جنوب باختر ناحیه مشاهده می‌شود، اما این خطواره‌ها هیچ معادل گسلی در نقشه‌های زمین‌شناسی ندارند.
- خطواره‌های مغناطیسی با گسل‌های برگه زمین‌شناسی به خوبی هماهنگ هستند به جز خطواره‌های F-۴۱۷، F-۷۰۱، F-۵۸۶، F-۴۱۶، F-۶۹۸، که هیچ معادل گسلی در نقشه‌های موجود ندارند.
- تمامی ۱۹۸ خطواره نیازمند مطالعات میدانی هستند و بیشتر آن‌ها در رسوبات آبرفتی قرار دارند و می‌تواند به عنوان رخنمون‌های گسلی جدید مطرح شوند. تطابق بسیار بالایی پس از همپوشانی نقشه لیتولوژی با نقشه زمین‌شناسی، دیده شد.

منابع

- پانید، خاکپورمقدم و همکاران. "تحلیل تکتونیکی چهارگوش انارک بر اساس مطالعات سنجش از دور"، رساله دکتری دانشکده علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران. ۱۴۰۲.
- محمود، الماسیان. "تکتونیک منطقه انارک"، رساله دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران. ۱۳۷۶.
- عبدالله‌زاده، محمد. "زمین‌شناسی ایران: اصول و کاربردها". انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران. ۱۳۹۸.
- خدادادی، علی. "مبانی ژئوفیزیک". انتشارات دانشگاه تهران، تهران. ۱۳۹۳.
- سلمانی، علی. "مبانی سنجش از دور". انتشارات دانشگاه تهران، تهران. ۱۳۹۸.
- احمدی، جمشید. "آشنایی با اصول و مبانی ژئوفیزیک کاربردی". انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز. ۱۳۹۷.
- حسینی، محمدرضا. "تحلیل ساختاری ورقه انارک و تطبیق آن با مدل‌های تکتونیکی جهانی". مجله زمین‌شناسی ایران، دوره ۶، شماره ۲۲ (۱۳۹۴): ۸۳-۹۴.
- زارع، مریم، و همکاران. "بررسی ژئوشیمی، تکتونیک و محیط رسوبی توده‌های سنگی کوه سرخ انارک، استان اصفهان". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان، اصفهان. ۱۳۹۸.
- صدرنیا، محمدرضا، و همکاران. "تحلیل تکتونیک و ژئوفیزیکی ورقه انارک". مجله علوم زمین، دوره ۱۰۴، شماره ۳ (۱۳۹۷): ۷۷-۹۰.
- عزیزی، محمدرضا. "تحلیل تکتونیکی و ژئوفیزیکی ورقه انارک و مقایسه آن با مدل‌های تکتونیکی جهانی". مجله زمین‌شناسی ایران، دوره ۹، شماره ۳۳ (۱۳۹۷): ۱-۱۱۵.

Koike, K., Nagano, S., and Kawaba, K., 1998, Construction and Analysis of Interpreted Fracture Planes Through Combination of Satellite-image Derived Lineaments and Digital Elevation Model Data, *Computer & Geosciences*, Vol. 24, No. 6, pp. 573-583.

Khan, S.D. and Glenn, N.F., 2006, New Strike-Slip Faults and Litho-units Mapped in Chitral (in Pakistan) Using Field and ASTER Data Yield Regionally Significant Results, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, Nos. 18-20, pp. 4495-4512.

Prost, G. L., 1994, *Interpretation of Remote Sensing Images for the Petroleum Industry: Exploration, Exploitation and Environmental Monitoring*, Gordon and Breach Science Publishers, Inc., New York, 342 p.

Sabins, F. F., 1997, *Remote Sensing: Principles and Interpretation*, 3rd edition. W. H. Freeman and Company, New York, 494 p.

Azizzadeh, M., 1996, *Fracture Analysis of the Qatar-Kazerun Fault and its Influence on Developing of Karstic Aquifers*, M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, 281 p. (in Farsi).

Edet, A.E., C.S. Okereke, S.C. Teme, and Esu, E.O., 1998, Application of Remote-sensing Data to Groundwater Exploration: A Case Study of the Cross River State, Southeastern Nigeria, *Hydrogeology Journal*, Vol. 6, pp. 394–404.

Walker, T. R., 2006, A Remote Sensing Study of Active Folding and Faulting in Southern Kerman province SE Iran, *Jour. of Structural Geology*, Vol. 28, pp. 654-668.

Mostafa, M. E., and Zakir, F. A., 1996, New Enhancement Techniques for Azimuthal Analysis of Lineaments for Detecting Tectonic Trends in and Around the Afro-Arabian Shield, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.17, No.15, pp. 2923-2943.

Arlegui, L. E., and Soriano, M. A., 1998, Characterizing Lineaments from Satellite Images and Field Studies in the Central Ebro Basin (NE Spain), *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 16, pp. 3169-3185.

Woodall, R., 1994, Empiricism and Concept in Successful Mineral Exploration, *Australian Journal of Earth Sciences*, Vol. 41, No. 1, pp. 1-10.

Sander, P., 2007, Lineaments in Groundwater Exploration: A Review of applications and Limitations, *Hydrogeology Journal*, Vol. 15, pp. 71-74.

Miliareisis, G. Ch., 2001, Geomorphometric mapping of Zagros Ranges at Regional Scale, *Computers & Geosciences*, Vol. 27, pp. 775–786.

Shahriyari, S., Azizzadeh, M., Shayan, S., and Sajadiyan, V. A., 2007, Remote Sensing Effectiveness in Hydrocarbon Reservoirs Modeling in Southwest of Iran: Asmari Formation as a Case Study, *Modarres Human Sciences Quarterly Journal*, Tome 53, pp. 183-214, (in Farsi).

Mobasher, K., and Babaie, H.A., 2008, Kinematic Significance of Fold- and Fault-related Fracture systems in the Zagros Mountains, southern Iran. *Tectonophysics*, Vol. 451, pp. 156–169.

Azizzadeh, M., Shahriari, S., and Molamehr Alizadeh, F., 2008, Fracture Analysis of the Kuh-e Asmari Anticline Using Remote Sensing Techniques: A Case Study from Zagros Mountain, SW Iran, *International Journal of Geoinformatics*, Vol. 4, No. 2, pp. 43-50.