

جغرافیا و توسعه شماره ۵۶ پاییز ۱۳۹۸

وصول مقاله: ۹۶/۱۱/۰۷

تأیید نهایی: ۹۷/۱۲/۲۲

صفحات: ۲۰-۱

استفاده از داده‌های مغناطیس هوابرد و شواهد ژئومورفیک در جهت بررسی مسیر گسل پنهان دشت خرم‌آباد (غرب ایران)

دکتر سیامک شرفی^{۱*}، دکتر حبیب آراین‌تبار^۲

چکیده

دشت خرم‌آباد در واحد زاگرس چین‌خورده واقع شده و دارای گسل‌های فرعی و اصلی است که برخی از این گسل‌ها در زیر رسوبات کواترنری مدفون شده‌اند. از آنجا که وجود این گسل‌های پنهان با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی و شواهد ژئومورفیک امکان‌پذیر است؛ بنابراین در این تحقیق، هدف استفاده از این شواهد در جهت بررسی و شناسایی مسیر امتداد گسل خرم‌آباد در زیر رسوبات کواترنری دشت خرم‌آباد است. برای این منظور، داده‌های برداشت‌های مغناطیس هوابرد سال‌های ۱۳۵۳ تا ۱۳۵۵ منطقه خرم‌آباد از سازمان زمین‌شناسی کشور گرفته شد. پس از تصحیح، هم‌ترازی و ریزهم‌ترازی و اعمال فیلترهای اصلاحی متداول بر روی این داده‌ها در نرم‌افزار اوسیسی مونتاژ ۶.۴.۲ و ایجاد پایگاه داده‌های مغناطیس هوابرد در این نرم‌افزار، از شواهد ژئومورفیک و تغییرات ارتفاعی نیز در جهت اثبات وجود گسل پنهان در دشت خرم‌آباد استفاده شد. نتایج نشان داد که گسل خرم‌آباد پس از عبور از دامنه کوه‌های یافته و سفیدکوه وارد دشت خرم‌آباد شده‌است و در زیر رسوبات کواترنری در همین راستا امتداد می‌یابد. وجود ناهنجاری‌های مغناطیسی خطی در ادامه بخش آشکار گسل خرم‌آباد، شواهد ژئومورفیک مانند پشته‌ها، مخروط‌افکنه‌ها، پادگانه‌های رودخانه‌ای و تغییرات ارتفاعی در مقاطع توپوگرافی پیمایشی، تداوم این گسل را به صورت پنهان اثبات می‌کند. این خطواره با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرقی در بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه، با طول حدود ۳۸ کیلومتر از فاصله حدود ۳ کیلومتری از جنوب شهر خرم‌آباد عبور می‌کند؛ بنابراین تحلیل نقشه‌های مغناطیس هوایی و شواهد ژئومورفیک می‌تواند در شناسایی گسل‌های پنهان و مناطق مستعد زمین‌لرزه‌های بزرگ کارآمد باشد.

واژه‌های کلیدی: ژئوفیزیک هوایی، شواهد ژئومورفیک، خرم‌آباد، گسل پنهان.

sharafi.si@lu.ac.ir
habib.sakvand@yahoo.com

۱- استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران*
۲- دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

مقدمه

برای شناسایی کامل این‌گونه از گسل‌ها می‌توان از روش‌های ژئوفیزیکی (Carvalho et al, 2006: 567-584; Liberty et al, 2003: 89-103) اندازه‌گیری CO₂ و رادون خاک (Bonforte et al, 2013: 251-274) بازتاب‌لرزه و تصویربرداری الکتریکی (Saetanga et al, 2014: 436-443)، لیدار^۱ و رادار زمینی نافذ (Guiang, 2014: 1-13) یا ژئوفیزیک هوایی (Rajaram & Anand, 2003: 1-4) استفاده کرد.

مطالعات ژئومورفولوژیک انجام‌شده نشان می‌دهد جنبش‌ها و فعالیت‌های ناشی از این نوع گسل‌ها می‌تواند باعث تغییرات ریخت‌زمین‌ساختی از قبیل افزایش ناهمواری‌ها و تغییر سرعت فرایندهای زمین‌ریختی شده و در نتیجه تغییر شکل لندفرم‌های ژئومورفیک را به دنبال داشته‌باشد؛ به‌عنوان مثال، فعالیت زمین‌ساختی در امتداد گسل‌های مدفون در رسوبات کواترنری در منطقه اوتا-ویلا فرانکا^۲ در کشور پرتغال موجب بالآمدگی و تغییر سطح اساس محلی در رودخانه تاگوس^۳ شده‌است که این خود عمیق‌شدن کانال، انحراف رودخانه و فرسایش در منطقه بالادست را در پی داشته‌است (Carvalho et al, 2006: 567-584; Liberty et al, 2003: 89-103)

در منطقه کومروچ^۴ در شبه‌جزیره کامچاتکا در روسیه نیز فعالیت گسل‌های پنهان به‌عنوان عامل توسعه عرضی و عمیق‌شدگی در نیمرخ طولی رودخانه شناخته شده‌است (Sarah & Cervera, 2013: 209-223).

همچنین مطالعه لرزه‌زمین‌ساختی زمین‌لرزه‌های مخربی از جمله زمین‌لرزه سال ۱۹۵۹ در یونان و غرب ترکیه با بزرگی ۶/۵ ریشتر با ۲۸۰۰ نفر تلفات (Bertrand et al, 2002: 246-255).

رشته‌کوه‌های زاگرس به‌دلیل دارا بودن ساختارهای متنوعی از گسل‌ها و چین‌ها همراه با لرزه‌خیزی شدید در میان پهنه‌های ساختاری ایران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. مطالعات گسترده‌ای از اوایل قرن بیستم تاکنون در زمینه‌های مختلف، به‌ویژه در ارتباط با ساختارهای زمین‌شناسی موجود در این کمربند انجام گرفته‌است؛ ولی هنوز اطلاعات کافی و کاملی درباره‌ی بسیاری از ساختارهای آن در دسترس نیست. به‌طور کلی ساختارهای زمین‌شناسی ایجادشده در زاگرس از جمله گسل‌ها، در نتیجه حرکات همگرایی صفحه عربستان و ایران مرکزی از زمان کرتاسه‌ی زیرین ایجاد شده‌اند (Falkon, 1974: 199-211; Farahpour & Hessami, 2012: 733-743).

در مواردی که اثر گسلش حاصل از همگرایی این دو صفحه به سطح زمین رسیده‌باشد، این ساختارها را می‌توان علاوه بر مطالعات زمین‌شناسی از طریق زمین‌ریخت‌شناسی و دورسنجی به کمک عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای یا داده‌های راداری نیز شناسایی و مطالعه کرد

(Aboyeji et al, 2012: 43-54; Koike et al, 1995: 1091-1104; Suzen & Toprak, 1998: 1101-1114; Richetti, 2002: 2011-2013; Kamali et al, 2012: 1; Koike et al, 1998: 573-583)

در مواردی که رخمون گسل‌ها به سطح زمین نرسیده باشد یا رسوبات نشانه‌های این نوع ساختارها را مدفون کرده‌باشد، ساختارهای پنهان نامیده می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر، گسل‌های پنهان به گسل‌هایی گفته می‌شود که گسیختگی آن‌ها به‌طور کامل به سطح زمین نرسیده یا برخی عوامل طبیعی همانند آبرفت‌های کواترنری این گسل‌ها و خطواره‌ها را پوشانده باشند؛ در نتیجه شناسایی کامل آن‌ها با استفاده از دورسنجی و بررسی‌های صحرائی میسر نیست (Bonforte et al., 2013; 251-274).

1-LIDAR
2-Ota-Vilafranka
3-Tagos
4-Komoroch

کوهستان، بین دشت و کوه پدید آمده است (کمالی و کاظمی، ۱۳۹۳: ۱۵) که از آن به‌عنوان یک گسل پنهان یاد شده است (Bernierian, 1995: 193-224).

نام این گسل به دلیل نزدیکی به شهر خرم‌آباد، از نام این شهر گرفته شده است و در فاصله ۱۲ کیلومتری از جنوب غربی شهر خرم‌آباد جای گرفته است. گسل خرم‌آباد دارای شیبی به سمت شمال شرق است و حرکت غالب آن به صورت رانندگی همراه با مقداری مؤلفه راستالغز راستگرد است (Vernant et al, 2004: 381-398).

رخمون‌های سطحی این گسل در جنوب دامنه کوه‌های یافته و سفیدکوه در غرب خرم‌آباد قابل مشاهده است. ادامه گسل خرم‌آباد در پیمایش به سوی جنوب شرقی در دشت خرم‌آباد ناپدید می‌شود (شکل ۱). براساس مطالعه مفاخریان و پورکرمانی (۱۳۸۶: ۹۰-۸۱)، فعالیت این گسل باعث آشفستگی در رودخانه خرم‌آباد نیز شده است. بررسی کلی نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که سطح این دشت با رسوبات Qt_1 و Qt_2 و رسوبات عهد حاضر پوشیده شده است. این عامل می‌تواند باعث پنهان شدن ساختارهای زمین‌ساختی در منطقه شده و امکان مطالعه چنین ساختارهایی را از طریق مشاهدات مبتنی بر رخمون‌های سطحی غیرممکن سازد. هر چند در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خرم‌آباد، وجود گسل رانده خرم‌آباد را در این منطقه نشان نداده است؛ با این وجود ثبت تحرکات زمین‌ساختی از قبیل زمین‌لرزه ۱۹۸۰/۰۳/۳۱ با بزرگی ۴/۶ ریشتر در مرکز داده‌های زلزله‌نگاری آمریکا^۱، رخداد مجموعه زمین‌لرزه‌های ۴ و ۵ فروردین سال ۱۳۹۳ با حداکثر بزرگی ۳/۳ ریشتر و زمین‌لرزه‌های ۳۰ و ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۴ با حداکثر بزرگی ۴/۹ ریشتری در یک کیلومتری جنوب خرم‌آباد در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی^۲ و عدم تطابق بین کانون سطحی زمین‌لرزه‌های منطقه خرم‌آباد با گسل‌های شناخته

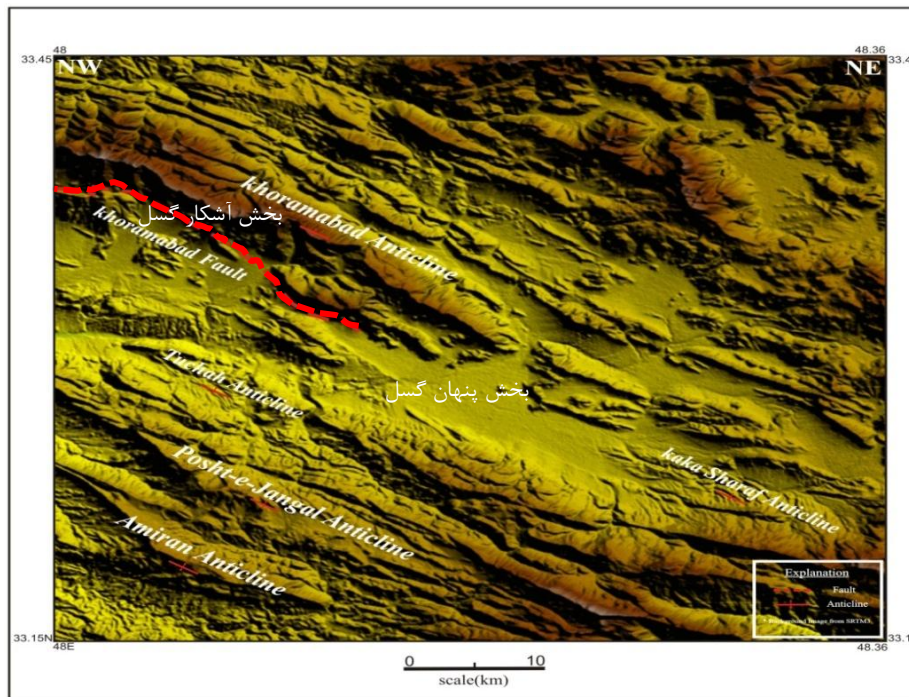
زمین‌لرزه سال ۱۹۸۰ در شمال آفریقا با بزرگی ۷/۳ ریشتر و ۳۵۰۰ نفر تلفات و زمین‌لرزه‌های سال‌های ۱۹۸۳ و ۱۹۸۵ با بزرگی ۶/۳ و ۶/۵ در کالیفرنیا (Stein & Yeats, 1989: 48-57) بر اثر فعالیت مجدد ساختارهای پنهان، اهمیت مطالعه این گونه ساختارها را خاطرنشان می‌کند؛ از این رو ترسیم نقشه گسل‌های منطقه‌ای، هشدارهای اولیه را درباره مناطقی که در آن گسل‌های مدفون احتمالاً به صورت پنهان فعالیت می‌کنند، در اختیار برنامه‌ریزان قرار می‌دهد.

امروزه سازمان‌های زمین‌شناسی و شرکت ملی نفت ایران با ترسیم نقشه‌های زمین‌شناسی، ساختارهای کلی زمین‌ساختی در عموم مناطق کشور را به نمایش گذاشته‌اند. با این وجود، با توجه به مبتنی بودن روش ترسیم این نقشه‌ها بر تشخیص رخمون‌های سطحی، بعضی از ساختارهای موجود ممکن است ناشناخته باقی‌مانده باشند؛ از این رو با شناسایی موقعیت دقیق و ویژگی‌های رفتاری این ساختارها در رابطه با ویژگی‌های محل تشکیل آن‌ها در منطقه با استفاده از روش‌های مبتنی بر عمق‌سنجی، می‌توان رفتار آن‌ها را پیش‌بینی و از بروز بسیاری از مشکلات تا حدی جلوگیری کرد، یا حداقل تدابیری را در جهت کاهش مخاطرات احتمالی اتخاذ کرد.

منطقه خرم‌آباد در پهنه ساختاری لرستان واقع در کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس جای گرفته است. روند غالب ساختارهای شکل گرفته در این منطقه شمال غرب-جنوب شرقی است. بر پایه مطالعات میدانی، ویژگی‌های هندسی و جنبشی تعدادی از گسل‌های بزرگ و اصلی در محدوده ۳۰ کیلومتری پیرامون شهر خرم‌آباد بررسی شده است که در این میان گسل خرم‌آباد، نزدیک‌ترین و اصلی‌ترین گسل پویا به شهر خرم‌آباد، با راستای شمال غرب-جنوب شرق در دامنه جنوب غربی تاق‌دیس پرتکاپوی خرم‌آباد و در پیشانی

مغناطیس هوایی در کنار شواهد ژئومورفیک می‌تواند کمک بسزایی در شناسایی و مطالعه گسل‌های پی‌سنگی منطقه داشته‌باشد؛ از این‌رو، هدف این تحقیق بررسی احتمال گذر گسل پنهان خرم‌آباد از دشت خرم‌آباد با استفاده از داده‌های مغناطیس هوایی و شواهد ژئومورفیک است.

شده آن، پرسش‌های فراوانی را در زمینه احتمال وجود امتداد گسل خرم‌آباد به‌صورت پنهان در دشت خرم‌آباد مطرح می‌سازد که ضرورت پژوهش بیشتر در این منطقه را ایجاب می‌کند. مطالعه تحرکات زمین‌ساختی و لرزه‌ای گسل‌های پنهان دشوار است؛ چراکه آثار ریخت‌زایی در سطح زمین ندارند یا آنکه توسط آبرفت‌ها مدفون شده‌اند؛ اما استفاده از داده‌های



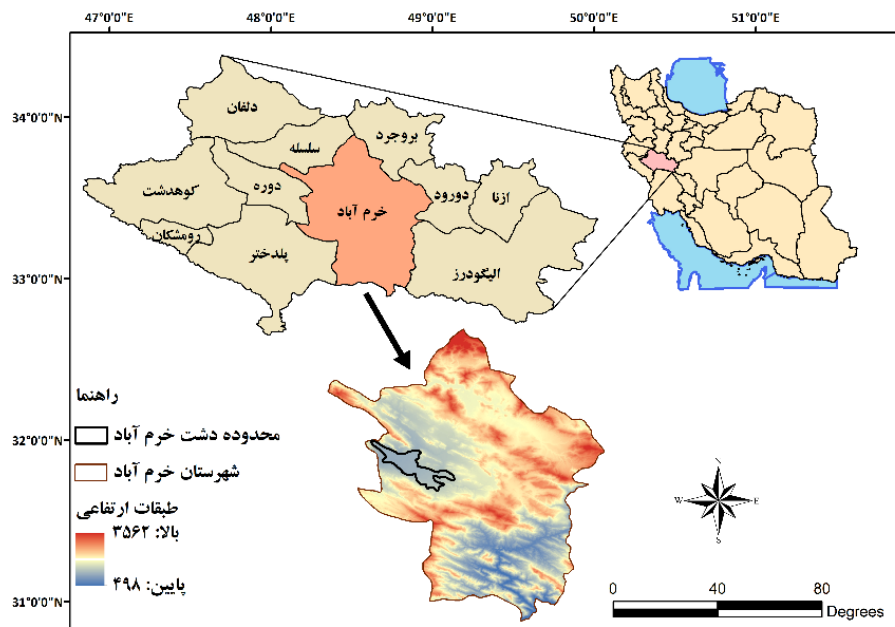
شکل ۱: تصویر SRTM موقعیت بخش آشکار گسل خرم‌آباد در دامنه‌کوه‌های یافته و سفیدکوه بخش پنهان گسل در دشت خرم‌آباد در زیر رسوبات کواترنری قرار دارد.

تهیه و ترسیم: کمالی و کاظمی، ۱۳۹۲

از نظر زمین‌شناسی دشت خرم‌آباد بر روی رسوبات آبرفتی و در زون زاگرس چین‌خورده واقع شده‌است (شکل ۲). اطراف دشت توسط کوه‌های مرتفع احاطه شده‌است و رودخانه خرم‌آباد از وسط دشت عبور می‌کند. از نظر توپوگرافی دارای شیب کم، حداقل ارتفاع دشت ۱۱۳۵ متر و حداکثر ارتفاع آن ۱۴۳۶ متر است.

محدوده مورد مطالعه

دشت خرم‌آباد با موقعیت جغرافیایی 19° تا 33° عرض شمالی و 48° تا 48° طول شرقی در مرکز استان لرستان و غرب ایران واقع شده‌است. این دشت با طول حدود ۴۰ و حداکثر عرض ۱۰ کیلومتر به موازات تقادیس خرم‌آباد با روند شمال غرب- جنوب شرق کشیده شده‌است (Sharafi et al, 2016: 208).



شکل ۲: موقعیت محدوده مورد مطالعه

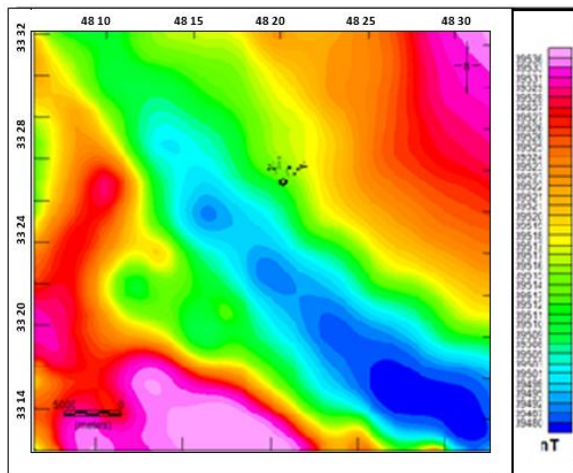
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

تا ۱۰۰۰ متری از سطح زمین با فاصله میان خطوط پرواز ۷/۵ کیلومتر و فاصله میان خطوط کنترل عمود پرواز ۴۰ کیلومتر انجام گرفته‌است. هواپیمای به‌کار گرفته‌شده برای ثبت این داده‌ها، هواپیمایی دوموتوره بود که یک مغناطیس‌سنج بخار سزیم با حساسیت ثبت 0.02 نانوتسلا بر روی آن نصب شده‌بود (Friedberg & Yousefi, 1987: 1).

در این مقاله این داده‌ها پس از تصحیح، هم‌ترازی و ریزهم‌ترازی و اعمال فیلترهای متداول در نرم‌افزار

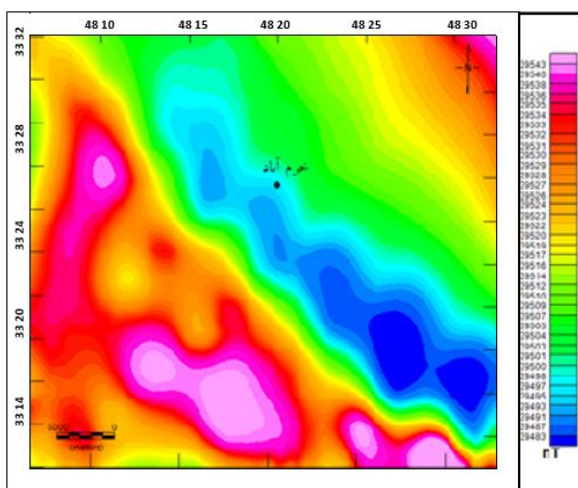
مواد و روش‌ها

در این مطالعه به‌منظور بررسی احتمال گذر گسل پنهان خرم‌آباد از دشت خرم‌آباد از داده‌های مغناطیس‌سنج هوایی استفاده شده‌است. داده‌های مورد استفاده، برداشت‌های مغناطیس‌سنج هواپرد ایران است که بین سال‌های ۱۳۵۳ تا ۱۳۵۵ (۱۹۷۷ تا ۱۹۷۵) به سفارش سازمان زمین‌شناسی کشور توسط شرکت آئروسرویس^۱ آمریکا با سطح پرواز بارومتریک ثابت در محدوده ۱۰۰۰ تا ۳۶۰۰ متری یا در ارتفاع پرواز ۵۰۰



شکل ۳: گرید شدت کل میدان مغناطیسی منطقه خرم آباد
این نقشه نشان دهنده چگونگی وضعیت مغناطیس پوسته در
منطقه است (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶)

سپس برای منطقه خرم آباد صافی برگردان به قطب مغناطیس^۲ با استفاده از زاویه^۲ میل ۴۹/۶ درجه و انحراف مغناطیسی ۲/۸ درجه صورت گرفت. این صافی میدان مغناطیسی را از یک عرض مغناطیسی که در آن بردار میدان زمین مایل و شیب دار است، به قطب مغناطیسی یعنی جایی که میدان القایی قائم است، منتقل می کند (شکل ۴).



شکل ۴: نقشه برگردان به قطب مغناطیس منطقه خرم آباد
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

اوسیسی مونتاژ^۱ ۶.۴.۲ شرکت ژئوسافت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند که در یافته های تحقیق مورد بررسی قرار گرفته اند. همچنین با استفاده از مطالعات میدانی، شواهد ژئومورفیک ناشی از گسل پنهان خرم آباد در محدوده دشت خرم آباد منطبق با مسیر شناسایی شده گسل خرم آباد با استفاده از داده های ژئوفیزیک، شناسایی و تحلیل شد. در این مرحله به منظور بررسی دقیق تغییرات ارتفاعی اشکال ناشی از گسل مورد مطالعه نسبت به محیط اطراف، با استفاده از دستگاه GPS دو فرکانسه مدل Stonex، مقاطع طولی و عرضی از پشته های ایجاد شده در محدوده دشت و همچنین مخروط افکنه دامنه کوه یافته که تحت تأثیر گسل پنهان خرم آباد قرار گرفته اند، برداشت و تحلیل شد.

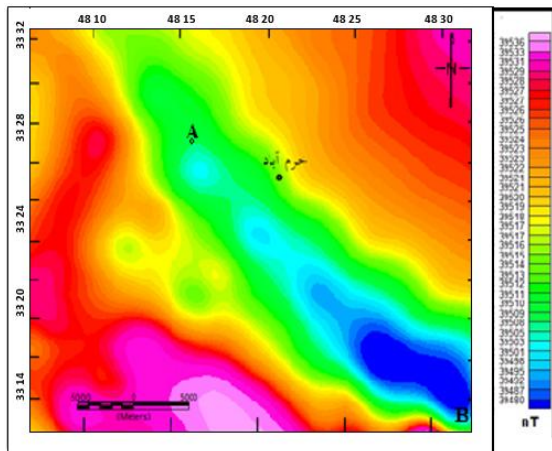
یافته های تحقیق

بررسی داده های مغناطیس سنجی

ابتدا با ورود اطلاعات منطقه از قبیل سال ثبت داده ها، طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا به نرم افزار اوسیسی مونتاژ، تصحیحات منطقه ای از قبیل تغییرات روزانه و تغییرات قرن^۱ میدان مغناطیس زمین بر روی داده ها اعمال شد. بدین منظور تا حد امکان اثر مغناطیسی میدان مرجع وابسته به میدان جاذبه زمین حذف شده که فقط میدان ثانویه حاصل از ناهنجاری ها باقی بماند تا بتوان فیلترهای مختلف را در مراحل بعدی تفسیر داده ها بر آن اعمال کرد. پس از ایجاد یک پایگاه داده ای واحد برای داده های شدت کل میدان مغناطیسی، این داده ها به صورت پایگاه داده در نرم افزار اوسیسی مونتاژ ذخیره شد. سپس از این داده ها گرید گرفته شد تا مبنای همه مراحل فیلتر کردن و تفسیر داده های منطقه مطالعاتی شود (شکل ۳).

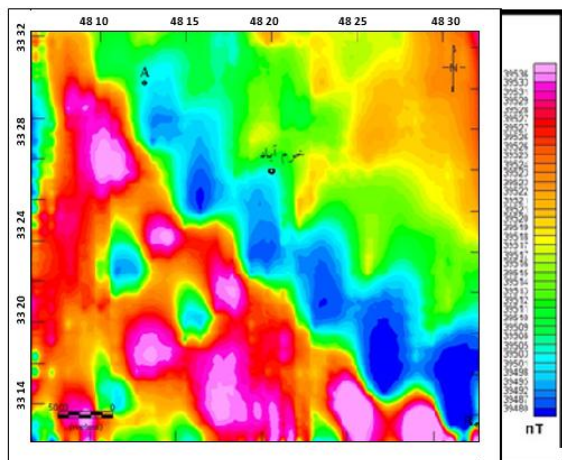
1-Oasis montaj

2-Reduce to Magnetic Pole



شکل ۵: نقشه ادامه فراسو منطقه خرم آباد برای عمق ۵۰۰ متر تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

با اعمال صافی مشتق قائم مرتبه اول، ناهنجاری‌های بزرگ به ناهنجاری‌های کوچک که کماکان شدت بالایی دارند، تجزیه می‌شوند. ناهنجاری‌های با روند خطی نیز خود را نشان می‌دهند که بیانگر وجود خطواره در همان راستا هستند. در کل این نقشه در تحلیل‌های تکتونیکی و پیداکردن خطواره کاربرد بسیار زیادی دارد؛ چون با جداسدن و تجزیه‌شدن ناهنجاری تا حدود زیادی می‌توان آن را به عملکرد گسل نسبت داد. در شکل (۶) در راستای محدوده A و B تغییر زیاد را در میزان آنومالی داریم که مناطق احتمالی برای وجود خطواره مغناطیسی است.



شکل ۶: نقشه به دست آمده از اعمال صافی مشتق قائم مرتبه اول براساس این شکل در امتداد محور A-B خطواره مغناطیسی وجود دارد.

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

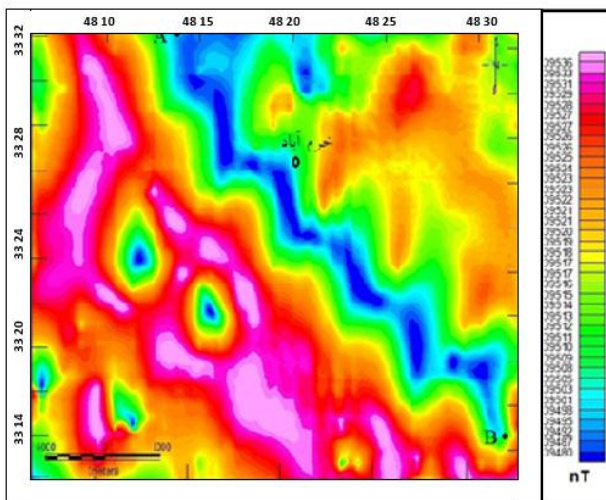
بر روی داده‌های برگردان به قطب شده، صافی ادامه فراسو^۱ اعمال شد. ادامه فراسو، شدت کل میدان مربوط به همه منشأهایی را که در یک سطح اندازه‌گیری شده‌است، به شدت میدانی تبدیل می‌کند که در یک سطح بالاتر اندازه‌گیری شده‌باشد؛ بنابراین این تبدیل، ناهنجاری‌ها را متناسب با طول موج‌شان تضعیف می‌کند؛ یعنی هر قدر که طول موج کوچک‌تر باشد، مقدار تضعیف آن بیشتر است. بدین ترتیب ناهنجاری‌های ایجادشده در اثر منشأهای کم عمق بیشتر از ناهنجاری‌های عمیق تضعیف می‌شوند

(Bonilla et al, 1984: 2379-2411).

با اعمال این فیلتر منشأهای عمیق‌تر با وضوح بهتری دیده می‌شود و ناهنجاری کم عمق و سطحی در آن از بین می‌روند. در این تحقیق نقشه ادامه فراسو برای اعماق مختلف (۱۰۰، ۲۰۰، و ۵۰۰ متر) تهیه شده‌است. از آنجا که تفاوت قابل توجهی بین نقشه‌های حاصل از اعماق مختلف وجود ندارد، این می‌تواند نشانگر وجود آنومالی با منشأ عمیق و ریشه‌دار در منطقه مطالعاتی باشد. آنومالی‌ها در این نقشه‌ها نسبت به تصویر برگردان به قطب همان روند را نشان می‌دهند و تنها حالت ملایم‌تری دارند. در شکل ۵، ادامه فراسو در عمق ۵۰۰ متر آورده شده‌است.

در تحلیل مغناطیسی یک منطقه از مشتق قائم مرتبه اول استفاده می‌شود. به اعتقاد Bonilla et al, 1984: 2379-2411، با استفاده از این صافی می‌توان منشأهای سطحی‌تر و کم عمق‌تر را تقویت کرده و با تفکیک بهتری مشاهده کرد. در واقع صافی مشتق قائم باعث می‌شود که عرض ناهنجاری‌ها باریک‌تر و موقعیت آن‌ها دقیق‌تر و مشخص‌تر نمایش داده شود (Cown & Cooper, 2004: 455-459).

شدید است. مرز تند با گرادیان تیز در نقشه‌های ادامه فراسو در ترازهای بالا نیز مشاهده می‌شود که حکایت از عمقی بودن و پی‌سنگی بودن گسل‌های شناسایی شده در منطقه دارد. در شکل ۶، تغییر آنومالی در مسیر A تا B مشاهده می‌شود که بیانگر وجود خطواره مغناطیسی در این روندهاست.



شکل ۷: نقشه به‌دست‌آمده از اعمال صافی سیگنال تحلیلی^۲ در این نقشه گسل خرم‌آباد در امتداد محور A-B قابل تشخیص است. تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق قائم بر روی این نقشه باعث شده که عرض ناهنجاری‌ها در منطقه باریک‌تر و موقعیت آن‌ها با دقت نسبتاً بهتری نشان داده‌شود. این فیلتر در شناسایی خطواره‌های مغناطیسی منطقه نقش بسزایی داشته‌است (شکل ۷). روندهای خطی دیده‌شده در نقشه مشتق قائم، مربوط به عملکرد گسل است. در نهایت نقشه حاصل از اعمال صافی سیگنال تحلیلی با مشخص کردن لبه ناهنجاری‌ها در منطقه، موقعیت دقیق ناهنجاری‌ها را در منطقه نشان می‌دهد؛ بنابراین براساس نتایج به‌دست‌آمده از تفسیر نقشه‌های مغناطیسی در منطقه خرم‌آباد، یک خطواره مغناطیسی شناسایی شده‌است.

در ادامه صافی زاویه کجی^۱ اعمال شد. یکی از روش‌هایی که در آن مشتقات مختلف میدان مغناطیسی در جهت تعیین ویژگی‌ها و موقعیت ناهنجاری استفاده می‌شود، استفاده از تابع تیلت بوده‌است که در آن از مشتقات مختلف مرتبه اول میدان استفاده می‌شود.

این تابع نخستین بار توسط میلر و سینگ (۱۹۹۴) معرفی شد (Miller & Singh, 1994: 213-217). در واقع این تابع مکان لبه‌های ناهنجاری‌ها را به خوبی مشخص می‌کند (شکل ۷).

کورهونن و همکاران (۲۰۰۴) معتقدند که در نقشه‌های مغناطیسی هوایی یک منطقه که دارای وضعیت میدان مغناطیسی عادی است، یک سری عوارض موجب تشخیص خطواره‌های مغناطیسی هستند؛ این عوارض عبارت‌اند از:

- نواحی خطی و باریک دارای مغناطیس پایین با رنگ آبی که معرف مناطق دارای دگرشکلی شکننده است. وجود این عارضه در نقشه شدت کل میدان مغناطیسی یک منطقه ناشی از وجود یک پهنه مغناطیسی باریک خطی با شدت پایین است که به دلیل هوازگی در طول سطح گسلش به وجود آمده و در اثر اکسیداسیون کانی‌های مغناطیسی به کانی غیرمغناطیس تبدیل شده‌اند.

- نواحی خطی و باریک دارای مغناطیس بالا با رنگ بنفش که می‌تواند مربوط به کانی‌های مغناطیسی رسوب‌کرده در سطح گسل باشد.

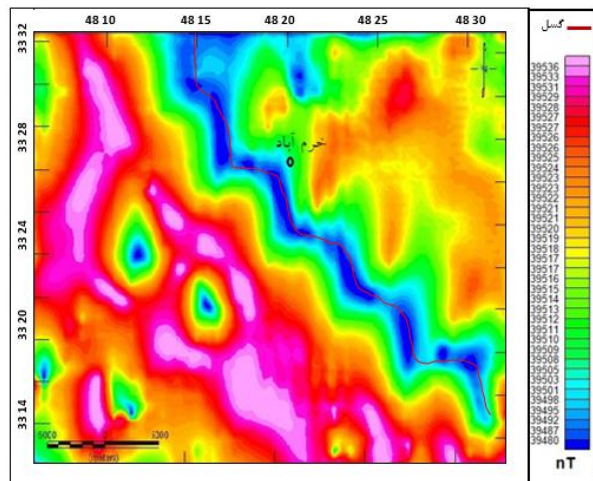
(Korhonen et al, 2004:1-241)

بررسی نقشه‌های ترسیم‌شده براساس داده‌های مغناطیس هواگرد بیانگر این مطلب است که براساس نقشه به‌دست‌آمده از اعمال فیلتر فراسو در درجات مختلف، منشأ آنومالی در منطقه خرم‌آباد عمیق و

کند. در صورتی که منطقه سرچشمه زمین‌لرزه پوشیده و فاقد رخنمون سطحی مربوط به آثار گسل باشد، برای آگاهی از الگوی ساختاری کنترل‌کننده آن باید به جمع‌آوری اطلاعات غیرمستقیمی همچون الگوی زمین‌لرزه‌ای گذشته و سازوکار آن‌ها پرداخت. این تئوری در منطقه خرم‌آباد به باور مبدل گشت؛ زیرا با توجه به نبود رخنمون سطحی ساختار گسله، احتمال پیش‌بینی گسل بالقوه فعال را برای وقوع زمین‌لرزه در منطقه مبهم می‌کند.

تلفیق اطلاعات زمین‌لرزه‌های دستگاهی ثبت‌شده منطقه خرم‌آباد با اطلاعات زمین مغناطیس، بیانگر همخوانی نزدیک خطواره مغناطیسی خرم‌آباد به‌ویژه قطعات پنهان آن با زمین‌لرزه‌های به‌وقوع‌پیوسته در منطقه دارد. از زمین‌لرزه‌های دستگاهی ثبت‌شده در منطقه خرم‌آباد در طول دوره زمانی ۱۹۷۶ تا ۲۰۱۶ با بزرگی ۲/۶ تا ۵، ۱۰ رخداد را با توجه به فاصله کم آن‌ها با گسل خرم‌آباد می‌توان مربوط به این گسل دانست. به‌طور کلی زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه در امتداد شمال‌غرب- جنوب‌شرق و هم‌جهت با گسل خرم‌آباد به‌ویژه بخش پنهان آن از تمرکز بیشتری برخوردار هستند (شکل ۹). این هم‌پوشانی بین زمین‌لرزه‌ها و گسل نمایانگر ارتباط این زمین‌لرزه‌ها با گسل پنهان خرم‌آباد است. بر این اساس، نقش دگرریختی‌های زیرسطحی در وقوع زمین‌لرزه‌ها در منطقه به‌وضوح قابل‌استنباط است.

این خطواره دارای روند شمال‌غرب- جنوب‌شرقی و در بخش مرکزی منطقه مورد مطالعاتی قرار گرفته‌است. طول این خطواره حدود ۳۸ کیلومتر است و از فاصله حدود ۳ کیلومتری جنوب شهر خرم‌آباد عبور می‌کند (شکل ۸).

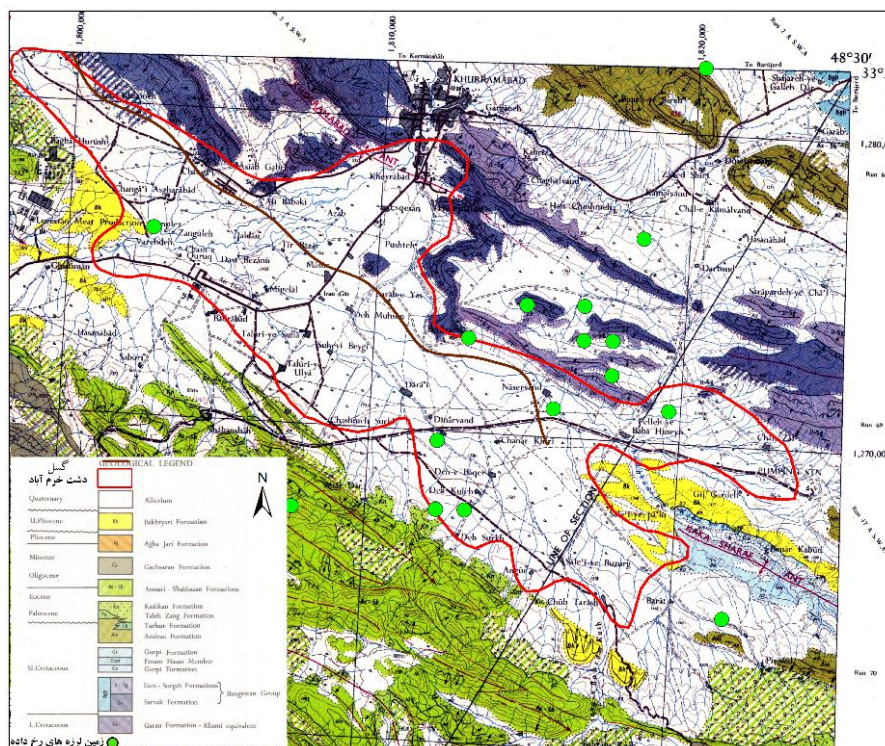


شکل ۸: خطواره استخراج‌شده از نقشه‌های مغناطیس‌سنجی تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

بررسی ویژگی‌های ساختاری و کانون

زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه

مطالعه زمین‌لرزه اصلی، پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها که ناشی از آزاد شدن تنش لرزه‌ای انباشته‌شده بعد از لرزه اصلی هستند، می‌تواند روشن‌تر طرح هندسی گسله‌ها و سازوکار آن‌ها در عمق باشد؛ بنابراین تعیین محل دقیق‌رو مرکز و ژرفای زمین‌لرزه‌های محلی و پس‌لرزه‌ها می‌تواند اطلاعات زیادی از موقعیت و چگونگی حرکت آبی گسله‌ها و زمین‌ساخت جوان ارائه



شکل ۹: نقشه زمین شناسی و ساختاری منطقه مورد مطالعه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ و هم پوشانی

گسل استخراج شده از نقشه های مغناطیس سنجی بر روی آن

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

شواهد ژئومورفیک و تغییرات

ارتفاعی ناشی از گسل پنهان خرم آباد

پشته های ایجاد شده و تغییرات ارتفاعی آنها - همان گونه که پیش از این گفته شد، ادامه گسل خرم آباد در پیمایش به سوی جنوب شرق در دشت خرم آباد ناپدید می شود (شکل ۱۰). با وجودی که عملیات های مختلف کشاورزی تا حدود زیادی باعث از بین رفتن و تسطیح رخنمون های این گسل در این دشت شده است، اما مشاهدات میدانی وجود پشته توپوگرافی ملایمی را در رسوبات Qt_2 اطراف روستای چغاهروشی واقع در جنوب غرب خرم آباد نشان می دهد. این پشته با ارتفاع بیش از ۲ متر و طول حدود ۱۳۰ متر با جهت شمال غرب - جنوب شرق امتداد یافته است. بخشی از این پشته در غرب و شرق روستای چغاهروشی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این پشته در واقع نوعی پشته مرتبط با گسلش است و

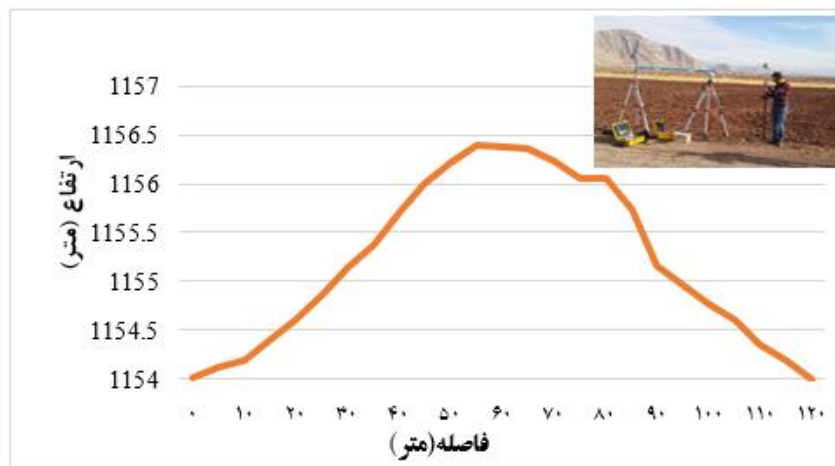
احتمال وجود گسل پنهان در این منطقه را قوت می بخشد. به منظور تعیین دقیق خط اثر قطعه گسلی پنهان خرم آباد با استفاده از GPS دو فرکانسه مدل STONEX، نیمرخ طولی و عرضی پشته ایجاد شده برداشت و ترسیم شد (شکل های ۱۲ و ۱۳). این مقطع که در عرض پشته و با عبور از امتداد اثر گسل رسم شده است، به طور مستقیم تغییرات ارتفاعی پشته نسبت به محیط اطراف را نشان می دهد. این تغییرات در نزدیکی گسل با ایجاد آشفستگی و تغییرات ارتفاعی در مقطع توپوگرافی مشهود است که با رسم آنها محل دقیق اثر گسلی قابل شناسایی می شود (شکل ۱۴). در این مقاطع برخاستگی بخش فرادیواره گسل آشکار است و نشان از فعالیت گسل خرم آباد در منطقه دارد که با توجه به هم راستا بودن با بخش آشکار گسل خرم آباد، ادامه این گسل را خاطر نشان می کند.



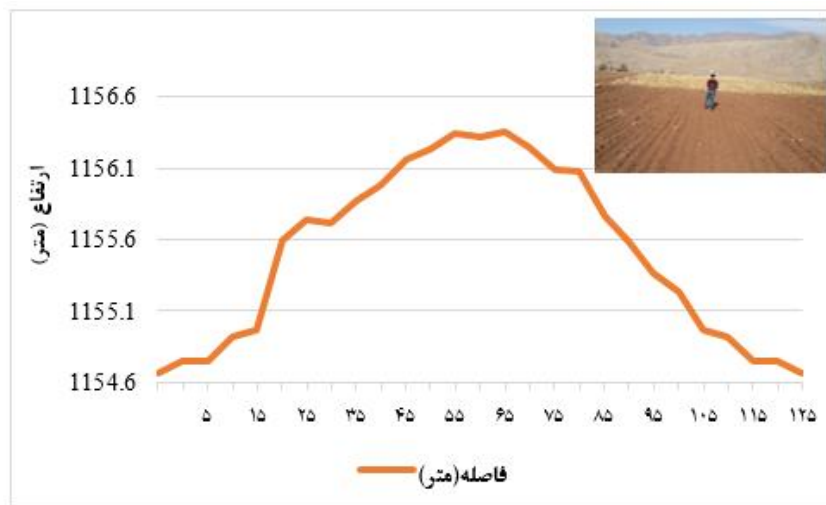
شکل ۱۰: رخنمون‌های گسل خرم‌آباد در دامنه کوه یافته و سپس ناپدید شدن گسل خرم‌آباد در دشت خرم‌آباد (دید به سمت شمال) (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶)



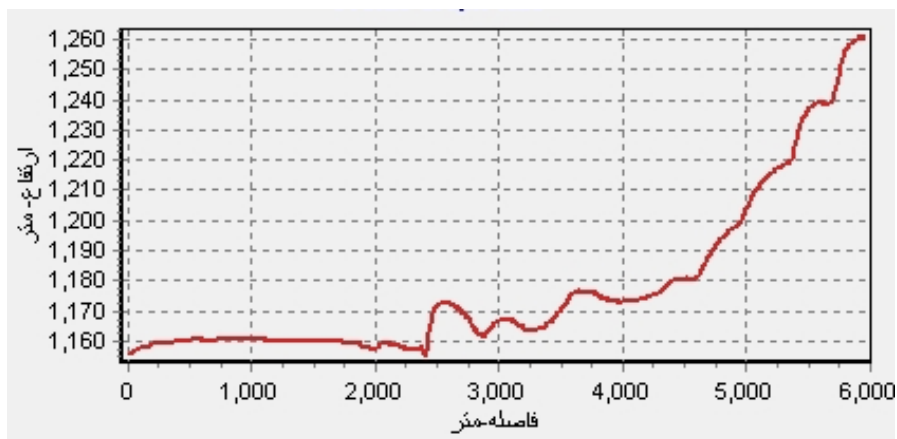
شکل ۱۱: در این شکل بخشی از پشته ایجاد شده در نتیجه عملکرد گسل پنهان خرم‌آباد نشان داده شده است. در این عکس پشته‌ای با ارتفاع بیش از ۲ متر در رسوبات کواترنر مشاهده می‌شود (دید به سمت جنوب شرقی) (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶)



شکل ۱۲: نیمرخ عرضی پشته کنار روستای چغاوشی با جهت غربی - شرقی (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶)



شکل ۱۳: نیمرخ طولی پشته کنار روستای چغاهروشی با جهت شمالی - جنوبی
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۱۴: تغییرات ارتفاعی پروفیل طولی گسل پنهان دشت خرم‌آباد براساس داده‌های ارتفاعی با قدرت تفکیک ۱۰ متر (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶)

مخروط‌افکنه دامنه کوه یافته و اختلاف ارتفاع آن با محیط اطراف

مخروط‌افکنه‌ها از اشکال آبرفتی مثلثی شکلی هستند که در محل ورود رودخانه‌ها به داخل سطوح تقریباً هموار دشت شکل می‌گیرند (Huget, 2003: 458). این اشکال تحت تأثیر عوامل زمین‌ساختی و اقلیمی شکل می‌گیرند، به تغییرات تکتونیکی بسیار حساس بوده و آثار آن را در خود ثبت می‌کنند.

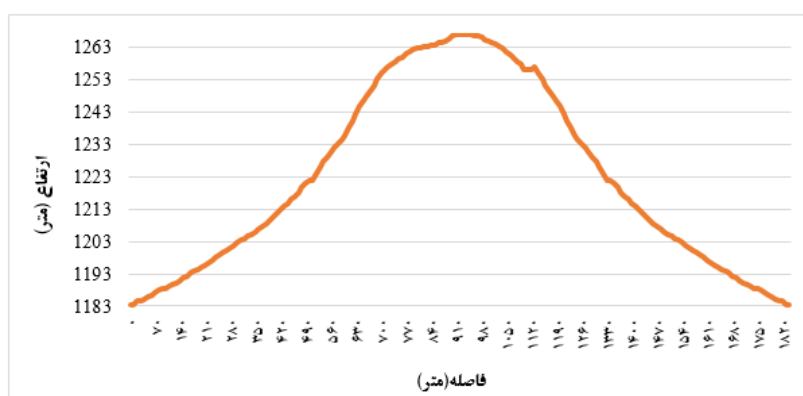
همچنین هم‌پوشانی گسل پنهان خرم‌آباد بر روی مدل رقومی با قدرت تفکیک ۱۰ متر در محدوده دشت خرم‌آباد و ترسیم نیمرخ طولی آن، بیانگر این است که اختلاف ارتفاع بیش از ۱۰۰ متر از ابتدا تا انتهای محل عبور گسل در دشت وجود دارد (شکل ۱۴). این تغییرات ارتفاعی عمدتاً به دلیل عبور گسل پنهان از دشت خرم‌آباد است که نمونه‌ای از این تغییرات ارتفاعی، پشته‌های ایجادشده در نتیجه گسل هستند که در بالا به آن‌ها اشاره شد.

متر از دو سمت با محیط دشت اختلاف ارتفاع دارد. از طرف دیگر، نبود رسوبگذاری در دو طرف دشت با وجود اختلاف ارتفاع و شیب زیاد و شکل‌گیری دیواره‌هایی در دو طرف که جداکننده محدوده مخروطافکنه از دشت است، بیانگر تأثیر احتمالی گسل پنهان خرم‌آباد بر افزایش ارتفاع مخروطافکنه نسبت به دشت است.

در دامنه کوه یافته، مخروطافکنه بزرگی تشکیل شده است که تغییرات ارتفاعی و شیب آن نسبت به محیط اطراف (دشت خرم‌آباد) حاکی از تأثیر احتمالی گسل پنهان دشت خرم‌آباد بر روی این مخروطافکنه است (شکل ۱۵). براساس نیمرخ عرضی برداشت شده از بخش میانی مخروطافکنه در جهت شرق به غرب و با استفاده از GPS دوفرکانسه (شکل ۱۶)، بیش از ۸۰



شکل ۱۵: موقعیت مخروطافکنه دامنه کوه یافته و نیمرخ برداشت شده با استفاده از GPS با جهت شرق به غرب در جهت بررسی تغییرات ارتفاعی مخروطافکنه نسبت به محیط دشت (دید به سمت شمال غرب) تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۱۶: نیمرخ عرضی مخروطافکنه دامنه کوه یافته با جهت شمال شرق - جنوب غرب که تغییرات ارتفاعی مخروطافکنه نسبت به محیط دشت را نشان می‌دهد تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

شواهد ناشی از تأثیر گسل بر رودخانه‌های دشت خرم‌آباد

بررسی رودخانه‌ها و مورفولوژی بستری که در آن جریان دارند، از دیگر شواهد ژئومورفیک تغییر شکل در محدوده دشت خرم‌آباد هستند. در این راستا مطالعات میدانی در مسیر رودخانه دائمی خرم‌آباد در محدوده دشت که گسل پنهان خرم‌آباد در یک نقطه از آن عبور می‌کند و رودخانه‌های فصلی زردآبه و پل باباحسین در شرق دشت انجام‌گرفت و شواهدی از وجود گسل و تأثیرات آن بر روی رودخانه‌ها شناسایی شد. این شواهد شامل حفر عمیق بستر رودخانه‌ها در محدوده دشت و شناسایی مسیر عبور گسل از رودخانه خرم‌آباد هستند.

حفر عمیق بستر رودخانه‌ها

عمق‌کنی و حفر بستر رودخانه خرم‌آباد در محدوده دشت که دارای شیب بسیار کمی است و جریان یافتن رودخانه در بستری عمیق، از اثرات فاز کششی و واگرایی ناشی از گسل پنهان خرم‌آباد در محدوده دشت است. به‌علت غلبه فاز کششی بر جابه‌جایی‌های قائم، رودخانه در بستر عمیقی جریان یافته که فاقد شیب لازم برای عمل حفر است. شیب محل عبور رودخانه از دشت در حدود ۲ تا ۳ درصد است، اما همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده‌است، رودخانه خرم‌آباد در بستری عمیق جریان دارد که ارتفاع ساحل چپ و راست آن بیش از ۵ متر است.



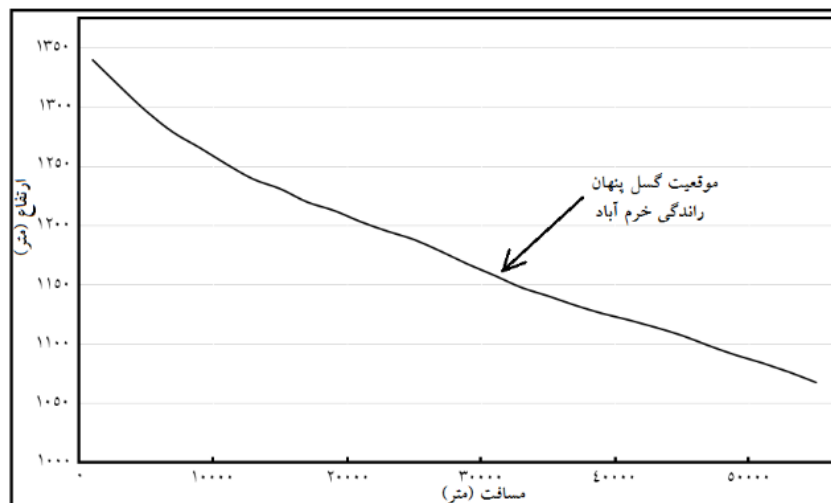
شکل ۱۷: بستر عمیق رودخانه خرم‌آباد در محدوده دشت در طول $48^{\circ} 17'$ شرقی و عرض $33^{\circ} 27'$

شمالی که اختلاف ارتفاع سطح دشت با بستر رودخانه بیش از ۵ متر است (دید به سمت شمال)

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۷

نشانه‌گر ناهمگنی در ویژگی‌های بستر رودخانه است و از آنجایی که در سراسر مسیر رودخانه چنین شرایطی برقرار نیست، آن را باید در ارتباط با تغییر مسیر رودخانه از حالت طولی به عرضی و گذر از گسل خرم‌آباد دانست. به‌طوری که فرسایش بخش مرکزی تاقدیس سبب برهم‌خوردن تعادل فرازگیری فرسایش شده و پروفیل بستر رود از حالت کاو به کوژ تبدیل شده‌است (شکل ۱۸).

بررسی نیمرخ طولی رودخانه خرم‌آباد نشان می‌دهد که نیمرخ عمومی بستر رودخانه حالت کاوگونه دارد. تغییر حالتی که به‌طور ناهنجار در کیلومتر ۱۸ تا ۲۹ مسیر رودخانه دیده می‌شود، گویای رویداد آشفتگی در بستر رودخانه است. از آنجایی که ترکیب سنگ‌شناسی بستر رود در این فاصله تغییری در جهت افزایش مقاومت فرسایشی ندارد؛ بنابراین می‌توان آن را ناشی از پویایی زمین‌ساختی تاقدیس خرم‌آباد و گسل‌های پیرامون آن دانست. به‌عبارت دیگر، چنین تغییری



شکل ۱۸: نیمرخ طولی رودخانه خرم‌آباد

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۷

قطع‌شدگی لایه‌های رسوبی در ساحل رودخانه

از دیگر شواهد نشان‌دهنده وجود گسل پنهان خرم‌آباد در محدوده دشت، قطع‌شدگی لایه‌های رسوبی ساحل چپ رودخانه خرم‌آباد است. پس از بررسی میدانی مسیر عبور رودخانه در محدوده دشت، در یک نقطه قطع‌شدگی لایه‌های رسوبی آبرفتی در فاصله چند متر و جابه‌جایی لایه‌ها مشاهده شد (شکل ۲۰). ارتفاع محل جابه‌جایی لایه‌ها حدود ۱ متر است و محل قطع‌شدگی لایه‌های رسوبی بر مسیر عبور گسل از رودخانه از روی تصاویر گوگل‌ارث منطبق است. از طرف دیگر، تنها نقطه‌ای که رنگ رسوبات پادگانه رودخانه متفاوت با رسوبات اطراف است، در محل عبور گسل مشاهده می‌شود.

همچنین در شرق دشت خرم‌آباد، دو رودخانه فصلی زردآبه و پل باباحسین وجود دارد که پس از به هم پیوستن، به رودخانه خرم‌آباد متصل می‌شوند. رودخانه زردآبه در بستری عمیق با اختلاف ارتفاع حدود ۱۰ متر و رودخانه پل باباحسین در بستری با بیش از ۵ متر نسبت به سطح دشت جریان دارد که جریان رودخانه‌ها در چنین بستری عمیق می‌تواند ناشی از فعالیت گسل خرم‌آباد در محدوده دشت باشد. از شواهد حفر شدید این رودخانه‌ها می‌توان به احداث سازه بتونی برای جلوگیری از حفر بیشتر در مسیر رودخانه زردآبه و تخریب یک پل در نتیجه حفر رودخانه پل باباحسین اشاره کرد (شکل ۱۹).



شکل ۱۹: حفر شدید بستر رودخانه فصلی زردآبه در طول $48^{\circ}24'$ شرقی و عرض $33^{\circ}23'$ شمالی با عمق حدود ۱۰ متر و رودخانه پل باباحسین در طول $48^{\circ}25'$ شرقی و عرض $33^{\circ}23'$ شمالی با عمق حدود ۵ متر (دید به سمت شمال غرب) تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۷



شکل ۲۰: محل عبور گسل از رودخانه خرم‌آباد در محدوده دشت در طول $48^{\circ}17'$ شرقی و عرض $33^{\circ}27'$ شمالی. قطع شدگی لایه رسوبات رودخانه‌ای بر روی رسوبات ریزدانه و تغییر رنگ و نوع رسوبات در محل عبور گسل مشخص است (دید به سمت شرق) تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۷

پادگانه‌های رودخانه‌ای

پادگانه‌های رودخانه‌ای از دیگر شواهد ریخت-زمین‌ساختی هستند که می‌توانند در تفسیر تکتونیک یک منطقه مورد بررسی قرار گیرند. در محدوده مورد مطالعه، ۳ پادگانه رودخانه‌ای مشاهده می‌شود که تفاوت ارتفاع نسبی آن‌ها در بخش‌های مختلف، نشان‌دهنده تفاوت در حرکات بالارونده است؛ به‌طوری

که پادگانه‌ها در بخش بالادست رودخانه دارای بیشترین ارتفاع (حدود ۱۶ متر) و در بخش پایین‌دست دارای کمترین ارتفاع (حدود ۳ متر) هستند (شکل ۲۱)؛ بنابراین وجود پادگانه‌های رودخانه‌ای می‌تواند نشان‌دهنده بالآمدگی زمین در نتیجه گسل پنهان و پویایی تاقدیس خرم‌آباد باشد.



شکل ۲۱: پادگانه دوم رودخانه در بخش پایین‌دست با ارتفاع حدود ۳ متر (دید به سمت شرق)

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۷

نتیجه

می‌کند. تغییرات ارتفاعی پشته‌ها که با استفاده از GPS دو فرکانسه تعیین شده‌اند، بیانگر این است که به‌صورت طولی و عرضی این پشته‌ها بیش از ۲ متر در محل عبور گسل با زمین‌های اطراف اختلاف ارتفاع دارند. همچنین تغییرات ارتفاعی در طول گسل از ابتدا تا انتهای دشت خرم‌آباد، اختلاف ارتفاع ۱۰۰ متری را نشان می‌دهد که این اختلاف ارتفاع در اثر پستی و بلندی‌های ایجاد شده در نتیجه حرکات این گسل در دوران کواترنر است. شواهد ژئومورفیک مانند مخروط‌افکنه دامنه کوه یافته که منطبق بر مسیر گسل پنهان خرم‌آباد است، اختلاف ارتفاعی در حدود ۸۰ متر از دو طرف با محیط دشت دارد. این اختلاف ارتفاع و عدم رسوب‌گذاری در محیط اطراف، احتمالاً

گسل خرم‌آباد با طول بیش از ۱۰۰ کیلومتر با راستای شمال‌غرب- جنوب‌شرق، پس از عبور از دامنه کوه‌های یافته و سفید کوه، وارد دشت خرم‌آباد می‌شود و در زیر رسوبات کواترنر این دشت در همین راستا به طول ۳۸ کیلومتر امتداد می‌یابد. وجود پشته‌های منفرد نئوژن مرتبط با گسلش و تغییرات ارتفاعی در مقاطع توپوگرافی پیمایشی در واحدهای Q_{t1} و Q_{t2} و رسوبات عهد حاضر در دشت خرم‌آباد، شواهد ژئومورفیک مانند مخروط‌افکنه‌ها، تغییر سیستم‌های رودخانه‌ای و وجود ناهنجاری‌های مغناطیسی خطی در ادامه بخش آشکار گسل خرم‌آباد، تداوم این گسل به‌صورت نهان را اثبات

- Bonforte, A., Cinzia, F., Salvatore, G., Francesco, G., Marco, L., Marco, N (2013). Soil gases and SAR measurements reveal hidden faults on the sliding flank of Mt. Etna (Italy), *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 251, 27-40.
- Bonilla, M.G., Mark. R.K., Lienkaemper, J.J (1984). Statistical relation among earthquake magnitude, surface rupture length and surface displacement, *Bull. Seism. Am.*, 74, 2379-2411.
- Carvalho, J., Taha, R., Joao, C., Fernando, C., Jorge, M. M (2006). Geophysical characterization of the Ota-Vila Franca de Xira-Lisbon-Sesimbra fault zone, Portugal, *Geophysical journal international*, 174 (2), 567-584.
- Cowan, D. R., Cooper, G. R. J (2004). Filtering using variable order vertical derivatives, *Computer and Geosciences*, 30 (5), 455-459.
- Falcon, N (1974). Southern Iran: Zagros Mountains. In A. Spencer (Ed.), *Mesozoic-Cenozoic orogenic belts*, Geological Society of London, 4, 199-211
- Farah pour, M., Hessami, K.H (2012). Cretaceous sequence of deformation in the SE Zagros fold-thrust belt, *Geological Society of London*, 169 (6), 733-743.
- Friedberg, J.L., Yousefi, E (1978). Aeromagnetic map of Iran: Quaderangle, No. D7, Based on airborne survey by aero service corporation under contract to the Geological Survey of Iran.
- Guiang, M (2014). Topographic and geophysical imaging of the structure of New Zealand's Greendale fault using LiDAR and ground-penetrating radar, *Washington University in St. Louis*, 1-13.
- Huget, R. J (2003). *Fundamental of Geomorphology*, second edition, Routledge.
- Kamali, Z., Sarkarinejad, K.H., Keshavarz, S (2012). Tectonic investigation of Dasht-e-Arjan region using satellite images and remote sensing technics. 30th meeting of Geology science, Tehran.
- Koikea, K., Naganob, S., Kawabac, K (1998). Construction & Analysis of Interpreted Fracture Planes through Combination of Satellite-Image Derived Lineaments and Digital Elevation Model Data, *Computers and Geosciences*, 24(6), 573-583.

ناشی از بالا آمدگی مخروط افکنه در نتیجه حرکات این گسل است که در مطالعات آینده به آن پرداخته خواهد شد. همچنین تغییر نیمرخ طولی رودخانه خرم آباد از حالت کاو به کوژ در محدوده مسیر عبور گسل از دشت خرم آباد، حفر شدید بستر رودخانه دائمی خرم آباد و رودخانه های فصلی زردآبه و پل باباحسین، شناسایی محل عبور گسل از رودخانه خرم آباد و شکل گیری سه پادگانه های رودخانه ای، از دیگر شواهد وجود گسل پنهان خرم آباد و به عبارتی پویایی تکتونیکی محدوده دشت هستند. به طور کلی می توان گفت که شواهد زمین ریخت شناسی ناشی از گسل های فعال به همراه نقشه های مغناطیسی هوایی می تواند در شناسایی گسل های پنهان و مناطق مستعد زمین لرزه های بزرگ کارآمد باشد.

منابع

- کمالی، زهرا؛ احسان کاظمی (۱۳۹۲). پهنه بندی لرزه ای شهرستان های خرم آباد و دوره چگنی، گروه زمین ساخت سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی استان لرستان.
- مفاخریان، سیدعلی؛ محسن پور کرمانی (۱۳۸۶). اثرات تکتونیک پویا در منطقه خرم آباد، علوم پایه (دانشگاه آزاد اسلامی)، شماره ۶۵، صفحات ۹۰-۸۱.
- Aboyeji, O.S., Mogaji, K.A., Oyinloye, R.O (2012). Structural interpretation of remotely sensed data sets, Its hydrogeological implication over ILE-IFE and environs. *Ozean Journal of Applied Science*, 5 (1), 43-54.
- Berberian, M (1995). Master "Blind" Thrust Faults Hidden under the Zagros Folds: Active Basement Tectonics and Surface Morph Tectonics, *Tectonophysics*, 241, 193-224.
- Bertrand, M., Rolando A., Dimitar, D (2002). Active faulting in SW Bulgaria: possible surface rupture of the 1904 Struma earthquakes, *Geophysical journal international*, 148(2), 246-255.

- Sarah, N., Cervera, H (2013). Spatial patterns of geomorphic surface features and fault morphology based on diffusion equation modeling of the Kumroch Fault Kamchatka Peninsula, Russia, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 263, 209-223.
- Sharafi, S., Fouladvand, S., Simpson, I., & Alvarez, J. A. B (2016). Application of pattern recognition in detection of buried archaeological sites based on analysing environmental variables, Khorramabad Plain, West Iran, *Journal of Archaeological Science: Reports*, 8, 206-215.
- Stein, R., Yeats, R.S(1989). Hidden Earthquakes: *Scientific American, Sci. Am.*, 260, 48-57.
- Süzen, M.L., Toprak, V (1998). Filtering of satellite images in geological lineament analyses: an application to a fault zone in central Turkey, *International Journal of Remote Sensing*, 19 (6), 1101-1114.
- Vernant, P.H, Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M.R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., Chery, J (2004). Present-day crustal deformation and plate kinematics in Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman, *Geophysical Journal International*, 157 (1), 381-398.
- Koikea, K., Naganob, S., Ohmi, M (1995). Lineament Analysis of Satellite Images Using A Segment Tracing Algorithm (STA), *Computers and Geosciences*, 21 (9), 1091-1104.
- Korhonen, K., Paananen, M., Paulamaki, S (2004). Interpretation of lineaments from airborne geophysical and topographic data, *Geological Survey of Finland*.
- Liberty, L. M., Mark, A.H., Ian, P. M (2003). The Portland Hills Fault: uncovering a hidden fault in Portland, Oregon using high-resolution geophysical methods, *Tectonophysics*, 368(1-4), 89-103.
- Miller, H.G., Singh, V (1994). Potential Field Tilt- a new concept for location of potential field sources, *Journal of Applied Geophysics*, 32 (2-3), 213-217.
- Rajaram, M., Anand, S.P (2003). Central Indian tectonics revisited using aeromagnetic data, *Earth, Planets and Space*, 55 (4), 1-4.
- Ricchetti, E (2002). Structural geological study of southern Apennine (Italy) using landsat 7 imagery, *IEEE*, 211-213, Toronto, Canada.
- Saetang, K., Yordkayhun, S., Wattanasen, K (2014). Detection of hidden faults beneath Khlong Marui fault zone using seismic reflection and 2-D electrical imaging, *Science Asia*, 40, 436-443.

