

بررسی لرزه‌خیز بودن حرکات عهد حاضر در پهنه ساختاری سنندج - سیرجان با استفاده از فناوری‌های سنجش از دور و GIS

حجت‌اله صفری^{۱*}، محمدرضا قاسمی^۲ و محمود بهرامی^۳

^۱ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران
^۲ دانشیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران
^۳ کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۰۸

چکیده

این باور وجود دارد که پی‌سنگ پهنه ساختاری سنندج-سیرجان طی فازهای کوهزایی سیمیرین و لارامید سخت شده و به همین دلیل به عنوان پهنه‌ای غیرلرزه‌زا (یا با لرزه‌خیزی پایین) مطرح شده است. گستره شهرضا در بخش مرکزی این پهنه ساختاری، به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شد تا صحت لرزه‌خیز بودن حرکات عهد حاضر این پهنه ساختاری و در نتیجه لرزه‌خیز بودن، در آن مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش با استفاده از فناوری‌های زمینی (Geoinformatics) مانند سنجش از دور، GIS و بررسی‌های صحرایی، سعی در شناسایی ساختارها، بررسی سازوکار حرکتی آنها، وضعیت کانون‌های زمین‌لرزه رخ داده، اثرات نوزمین‌ساختی عملکرد گسل‌های فعال گستره و علت بالا بودن فعالیت لرزه‌خیزی در این گستره شده است. نتایج نشان می‌دهد که گسل شهرضا (و گسل دهقان در جنوب‌باختر گستره) با روند N۱۴۰ و سازوکار راستالغز راست بر با مقدار قابل توجهی مؤلفه معکوس عمده‌ترین روند ساختاری در گستره می‌باشد. این پهنه گسل‌خورده توسط گسل نصرآباد (با روند ۷۰-۷۰) و سازوکار راستالغز چپ بر با کمی مؤلفه کششی، بریده و گاهی جابه‌جا شده است. در محل برخورد این دو گسل اصلی، تعداد زیادی کانون زمین‌لرزه با حل سازوکار کانونی راستالغز قرار گرفته است. افزون بر تعداد زیاد زمین‌لرزه‌ها در گستره شهرضا، اثرات حرکات نوزمین‌ساختی مربوط به فعالیت‌های عهد حاضر این گسل‌ها نیز قابل مشاهده می‌باشد.

کلید واژه‌ها: فناوری‌های سنجش از دور و GIS، سنندج-سیرجان، شهرضا، لرزه‌خیزی.

* نویسنده مسئول: حجت‌اله صفری

E-mail: Safari.ho@gmail.com

۱- پیش‌نوشتار

این گسل‌ها غیرلرزه‌زا بوده و به همین دلیل این پهنه ساختاری با وجود قرارگیری در مجاورت بلافاصل کمر بند کوهزاد جوان زاگرس به عنوان پهنه‌ای غیرلرزه‌زا مطرح می‌شود. این درحالی است که وقتی به آمار تاریخی مراجعه می‌نماییم مشخص می‌شود که زمین‌لرزه‌های با بزرگای کم تا متوسط در مناطقی همچون اصفهان، شهرضا و مانند آن رخ داده است. به همین دلیل گستره شهرضا به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شد تا صحت فعال بودن پهنه ساختاری سنندج-سیرجان (در این گستره) مورد بررسی قرار گیرد.

گستره شهرضا در ۷۵ کیلومتری جنوب‌باختر شهرستان اصفهان بین عرض‌های شمالی ۳۱° ۴۵' ۰۰" تا ۳۲° ۳۰' ۰۰" و طول‌های خاوری ۵۱° ۳۰' ۰۰" تا ۵۲° ۱۵' ۰۰" واقع شده است (شکل ۱). از نظر زمین‌شناسی، شهرضا در پهنه ساختاری سنندج - سیرجان و در مجاورت بلافاصل شمال خاوری راندگی اصلی زاگرس قرار گرفته است. با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه یاد شده، شهرضا بر روی دشت آبرفتی مربوط به دوره کواترنری قرار گرفته است و گسل شهرضا با درازای بیش از ۱۴۵ کیلومتر و راستای N۱۵۰ از درون این گستره عبور نموده است (صفایی، ۱۳۸۳). براساس شواهد لرزه‌ای موجود، این گسل سبب بریدگی آبرفت‌های جدید و آبراه‌ها شده و به همین دلیل گسلی فعال به شمار می‌رود (Nadimi, 2010; Nadimi & Nadimi, 2006). نرخ لغزش در راستای گسل شهرضا حدود ۱/۱ میلی‌متر در سال محاسبه شده است (Nadimi, 2010). همچنین در این گستره گسل‌های دیگری مانند گسل شمال شهرضا (با نام گسل نصرآباد در این پژوهش) با درازای ۱۳۰ کیلومتر و روند N۸۰ شناسایی و معرفی گردیده‌اند. به این ترتیب فعال بودن گستره از نظر لرزه‌زایی تأییدی بر این مدعا خواهد بود که ساختارهای اصلی آن کاملاً فعال بوده و دارای شواهد نوزمین‌ساختی آشکاری می‌باشند.

در این پژوهش با استفاده از فناوری‌های زمینی مانند سنجش از دور، GIS و بررسی‌های صحرایی، سعی در شناسایی ساختارها و بررسی سازوکار حرکتی آن

پهنه ساختاری سنندج-سیرجان باریکه‌ای از جنوب‌باختری ایران میانی است که در حدفاصل خردقاره ایران مرکزی و کمر بند کوهزاد زاگرس قرار گرفته است به گونه‌ای که بسیاری بر این باورند که پهنه زمین‌درز بین خردقاره ایران مرکزی و صفحه عربی در این پهنه ساختاری قرار گرفته است (Berberian, 1976; Stocklin, 1968). ویژگی‌های سنگی و ساختاری سنندج - سیرجان معرفی یک گودی ژرف و یا کافت میان‌بلوکی در سپر پرکامبرین ایران و عربستان است. به همین رو ویژگی‌های زمین‌شناختی آن با پهنه‌های مجاور تفاوت‌های آشکاری دارد (آقاباتی، ۱۳۸۳). این پهنه ساختاری، درازایی حدود ۱۵۰۰ کیلومتر و پهنایی بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر دارد و از باختر دریاچه ارومیه آغاز و تا شمال بندرعباس ادامه می‌یابد. تفاوت‌های ویژه این پهنه سبب شده است تا از گذشته‌های دور مورد توجه و مطالعه زمین‌شناسان باشد و به همین دلیل نام‌های ناهمسانی برای این پهنه برگزیده‌اند که از میان آنها سنندج-سیرجان شناخته شده‌تر است (آقاباتی، ۱۳۸۳; Stocklin, 1968). راستای مستقیم این پهنه در حد فاصل میان دریاچه ارومیه و اسفندقه به طور محلی نمایانگر سامانه‌های راستالغز است که حکایت از چیرگی رژیم زمین‌ساختی برشی (راست‌بر) در محل برخورد دو صفحه زمین‌ساختی عربی-ایرانی می‌باشد (Sheikholeslami et al., 2003). از دیرباز این باور بوده است که پی‌سنگ این گستره طی فازهای کوهزایی سیمیرین و لارامید سخت شده است و به همین دلیل به عنوان گستره‌ای غیرلرزه‌زا مطرح شده است (Berberian, 1976). به همین دلیل براساس زمین‌لرزه‌های کمی که در پهنه سنندج-سیرجان رخ می‌دهد، تصور می‌شود که سنندج-سیرجان همانند یک بلوک سخت‌شده عمل می‌کند (Jackson & McKenzie, 1984) و این در حالی است که در بخش‌هایی از این پهنه ساختاری، گسل‌های مستقیمی مانند آباد، دهشیر، شهربابک و بافت مشخص شده‌اند که بعضی از آنها نشانگر جابه‌جایی راستالغز راست بر در رسوبات کواترنری می‌باشند (Sheikholeslami et al. 2003). برخی بر این باورند که حرکت عهد حاضر

شده است. در نهایت الگوی دگرشکلی و علت بالا بودن فعالیت لرزه‌خیزی آنها ارائه گردیده است.

۲- روش انجام کار

۲-۱. استخراج عناصر ساختاری: برای استخراج عوامل ساختاری مانند انواع رده‌های گسلش و تعیین ارتباط آنها، از تصاویر ماهواره‌ای گستره استفاده شد. ابتدا ترکیب باند (۱-۴-۷) بر روی تصویر ماهواره‌ای ETM+ اعمال شده و در ادامه از فیلترهای بالاگذر (High pass) و تیزکننده لبه (Sharpen Edges) برای بارزسازی تصویر استفاده گردید (شکل ۱). سپس با استفاده از امتزاج (Fusion) و با تلفیق باند پانکروماتیک با تصویر چند بانده در روش وضوح طیفی (Spectral Sharpening)، قدرت تفکیک مکانی تصویر بالا برده شد (Welch & Ahlers, 1981) (شکل ۲).

در نهایت، با اعمال فیلترهای جهت‌دار در جهات ۴۵، ۶۰، ۹۰ و ۱۸۰ درجه بر روی باند R تصویر ماهواره‌ای گستره (در محیط نرم افزار ENVI 4.3)، شکستگی‌های موجود در گستره شناسایی شدند (شکل ۳) (Safari et al., 2011). برای شناسایی خطواره‌ها (شکستگی‌های پیمایش نشده) از پدیده‌هایی مانند: قطع‌شدگی امتداد عوارض ساختمانی، کنار هم قرار گرفتن لیتولوژی‌های متفاوت، گودی‌هایی که به صورت خطی قرار دارند، الگوی مستقیم رودخانه‌ها، حالت خطی پوشش گیاهی و تغییر رنگ خاک‌ها استفاده گردید (Lillesand & Kiefer, 2000). به این ترتیب پدیده‌های خطی موجود در گستره در قالب خطواره شناسایی شدند. در ادامه از طریق کنترل‌های میدانی و اندازه‌گیری‌های صحرائی در ۲۰ ایستگاه در سطح گستره، گسل‌های اصلی، فرعی و همچنین گسله‌های کواترنری (که به طور واضحی آبرفت‌های کواترنری را قطع نموده بودند) از هم تفکیک گردیدند. به این ترتیب مواد خام برای تهیه لایه شکستگی‌ها فراهم شد. در ادامه با استفاده از محیط نرم‌افزاری GIS (با استفاده از نرم‌افزار Arcview 3.2)، رقوم نمودن شکستگی‌های استخراج‌شده انجام گرفت. در پایان اطلاعات ساختاری تحلیلی مانند نمودارهای گل سرخی و محورهای سینماتیکی (محورهای فشارش) (شکل ۴) نیز به نقشه یادشده افزوده و نقشه ساختاری نهایی گستره آماده شد (شکل ۵).

۲-۲. تحلیل ساختاری گسل‌ها: به علت گستردگی منطقه مورد مطالعه، کل گستره (شامل ۲۰ ایستگاه اندازه‌گیری) به پنج بخش شمال‌باختری، خاوری، باختری، مرکزی و جنوب‌خاوری تقسیم شد (شکل‌های ۴ و ۵). سپس با استفاده از مشخصات اندازه‌گیری‌شده شکستگی‌ها، بر اساس روش بسامد - امتداد (Ramsay & Hubber, 1987)، نمودار گل سرخی از شکستگی‌های این بخش‌ها ترسیم شده و نتایج به دست آمده بر روی نقشه ساختاری (شکل ۴-الف) آورده شد. در ادامه جهت تحلیل محورهای جنبشی (حرکتی) در گستره، با استفاده از مشخصات شکستگی‌ها (شامل امتداد، شیب و جهت شیب گسل‌ها، ریک خش لغز و جهت حرکت بلوک مقابل) در ایستگاه‌های مختلف و با کمک روش تحلیلی (Marrett & Allmendinger, 1990)، محورهای کوتاه‌شدگی محاسبه شد. برای محاسبه محورهای حرکتی (به ویژه محور فشارش)، ابتدا گسل‌ها همراه با قطب و خش لغز آنها رسم شده و سپس صفحه حرکتی آنها محاسبه گردید. در ادامه، بر روی صفحه حرکتی ۴۵ درجه در جهت و خلاف جهت بردار لغزش حرکت نموده و به این ترتیب محورهای فشارش و کشش محاسبه شد (۴-ب).

در این پژوهش برای تحلیل سینماتیکی فقط از محور فشارش استفاده شد و برای آسانی قرانت‌ها، نمودار هم‌واحد از محورهای فشارش برای هر گستره تهیه و در مرحله بعدی بردارهای این محورها بر روی نقشه ساختاری آورده شد (شکل ۵). برای محاسبه صفحات اصلی گسلش، ابتدا شکستگی‌های مرتبط با چین‌خوردگی حذف گردید و سپس با توجه به این که قطب شکستگی‌های مرتبط با گسل، عمود بر روند

گسل اصلی می‌باشند، ابتدا صفحه در برگیرنده قطب شکستگی‌ها ترسیم و سپس صفحه عمود بر آن رسم شده و به این ترتیب صفحه (و یا صفحات) اصلی گسلش در گستره محاسبه گردید (۴-ج).

۲-۳. رسم کانون‌های زمین‌لرزه و محاسبه حل سازوکار کانونی

آنها: ابتدا اقدام به گردآوری مشخصات زمین‌لرزه‌های رخ داده در گستره (http://irsc.ut.ac.ir و www.iiees.ac.ir; Ambreyseys & Melville, 1982) نموده و به صورت فایل DBF در محیط نرم‌افزاری Excel ذخیره گردید. در ادامه، فایل یاد شده در محیط نرم‌افزاری Arc view 3.2 بازخوانی شده و به لایه برداری نوع نقطه‌ای تبدیل گردید. برای بررسی وضعیت کانون زمین‌لرزه‌ها نسبت به ساختارهای اصلی، این لایه بر روی نقشه ساختاری انداخته شده و خروجی تهیه شد (شکل ۵). برای بررسی سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها از روش حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها استفاده گردیده و به صورت نمودار توپ ساحلی (Beach ball Diagram) نمایش داده شد (شکل ۶-ج).

۲-۴. تهیه شمای سه بعدی: با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ (با فرمت DGN) و با استفاده از درون‌یابی به روش IDW به دلیل دقت بیشتر نسبت به روش‌های دیگر (Aronoff, 1989) اقدام به تهیه DEM از گستره مورد بررسی گردید. DEM تهیه شده را با استفاده از محیط GIS (در محیط نرم‌افزار ENVI 4.3) بر روی تصویر ماهواره‌ای (لندست TM) گستره قرار داده و به این ترتیب تصویر ماهواره‌ای برجسته (دارای بعد Z) تهیه گردید (شکل ۶-الف). بر روی این شمای برجسته، لایه‌های برداری مانند لایه برداری خطی مربوط به گسل‌های پیمایش شده و لایه برداری نقطه‌ای محل کانون زمین‌لرزه‌ها قرار داده شد. به این ترتیب شمایی سه‌بعدی از گستره تهیه گردید. سپس بر روی این شمای سه‌بعدی، نمودارهای حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها نیز قرار داده شد (شکل ۶-ج). با استفاده از قابلیت‌های محیط GIS اقدام به چرخش این شمای سه بعدی و انتخاب زاویه دید مناسب برای تجزیه و تحلیل چشمی آن شد (شکل ۶-ج).

۳- نتایج تحلیل‌های ساختاری

۳-۱. تحلیل نمودارهای گل سرخی: نمودارهای گل سرخی در ۲۰ ایستگاه در سطح گستره (رجوع شود به نقشه ساختاری در شکل ۵) در قالب پنج بخش محاسبه و تهیه گردید (شکل ۴-الف). با توجه به این نمودارها می‌توان اذعان نمود که وضعیت شکستگی‌ها در بخش‌های مختلف گستره به شرح زیر می‌باشد:

الف) بخش شمال‌باختری (گستره مهبیار): شکستگی‌های عمده در این گستره دارای روندهای ۱۷۰-۱۶۰، ۱۰۰-۹۰ و ۷۰-۶۰ N است.

ب- بخش باختری: شکستگی‌های عمده در این بخش دارای روندهای ۱۰-۱۰۰، ۱۱۰-۹۰ و ۱۶۰-۱۵۰ N است.

ج) بخش خاوری: شکستگی‌های عمده در این گستره دارای روندهای ۵۰-۱۴۰، ۱۰۰-۹۰ و ۱۳۰-۱۲۰ N هستند.

د) بخش مرکزی (اطراف شهرضا): شکستگی‌های عمده در بخش مرکزی دارای روندهای ۱۴۰-۱۳۰، ۱۰۰-۹۰ و ۱۰-۲۰۰ N هستند.

ه) بخش جنوب‌خاوری: شکستگی‌های عمده در این بخش از گستره مورد مطالعه دارای روندهای ۱۴۰-۱۳۰، ۷۰-۶۰ و ۱۲۰-۱۱۰ N است.

۳-۲. تحلیل محورهای سینماتیکی: بررسی محورهای سینماتیکی در بخش‌های

مختلف گستره شهرضا نشان از شباهت‌های زیادی در بخش‌های مختلف دارد (شکل ۴-ب). وضعیت این محورها در بخش‌های مختلف به شرح زیر می‌باشد:

الف) بخش شمال‌باختری (گستره مهبیار): در این بخش محور ۳۴۵ عمده‌ترین محور فشارش بوده و می‌تواند در ارتباط با فعالیت پهنه اصلی گسلش با روند ۱۶۰-۱۴۰ و سازوکار راست‌الغز راست‌بر (با مقدار قابل توجهی مؤلفه معکوس) آن باشد.

الف) گسل شهرضا: این گسل با درازای بیش از ۱۶۵ کیلومتر و عرض پهنه گسله ۱۰ کیلومتر دارای راستای ۱۵۰-۱۱۴۰ N (که گاه تا ۱۱۶۰ N نیز دیده می‌شود) می‌باشد. سازوکار این گسل راستالغز راست‌بر با مقداری مؤلفه شیب‌لغز معکوس است. این گسل از شمال خاور شهرستان مبارکه شروع (شکل ۷-الف) و با گذر از شهرستان شهرضا تا خاور روستای امین‌آباد (در مرز استان‌های فارس و اصفهان) کشیده شده است. بخش شمال‌باختری این گسل به صورت بریدگی خطی و دره‌ای کاملاً مستقیم در مرکز پهنه گسله دیده می‌شود (شکل ۳ و ۵) و روند خطی ارتفاعات گستره را رقم زده است. این پهنه گسل‌خورده پس از عبور از شهرضا مرز بین کوه و دشت را مشخص نموده است. در مجاورت این گسل ۱۰ کانون کهلرزه‌ای غالباً در انتهای شمال‌باختری آن ثبت گردیده است (صفایی، ۱۳۸۳). اثرات نوزمین‌ساختی این گسل را می‌توان در اطراف شهرستان شهرضا (به‌ویژه در خاور شهرستان) و پادگانه‌های آبرفتی رودخانه شهرضا مشاهده نمود (شکل ۸-ب، ج، د).

ب) گسل نصرآباد: این گسل با نزدیک به ۷۰ کیلومتر درازا و عرض پهنه گسله ۱۰ کیلومتر در شمال گستره مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل ۷-ب). این گسل دارای راستای ۵۰-۶۰ N بوده و عمدتاً به صورت خطواره‌هایی بر روی رسوبات آبرفتی دیده می‌شود (۸-الف) و در محل برخورد با گسل شهرضا (در بخش مرکزی شهرضا) سبب بریده و جابه‌جا شدن گسل شهرضا شده است (شکل ۵). انتهای جنوب‌باختری این گسل در شهر گندمان به گسل دهقان می‌رسد. بخش جنوب‌باختری این گسل روند کلی ارتفاعات گستره را قطع کرده و دره گسلی بین همگین و دهقان را ایجاد نموده است. در اثر عملکرد این گسل روند کلی ارتفاعات باختر دهقان و همچنین گسل‌های موازی با ارتفاعات دچار تغییر راستا شده‌اند. در مجاورت این گسل ۸ کانون کهلرزه‌ای ثبت گردیده است (صفایی، ۱۳۸۳). اثرات نوزمین‌ساختی این گسل را می‌توان در مخروط افکنه خاور روستای مهیار (خاور منطقه مورد مطالعه) مشاهده نمود (شکل ۸-الف).

ج) گسل دهقان: این گسل با درازای بیش از ۱۶۰ کیلومتر و عرض پهنه گسله ۶ کیلومتر و راستای ۱۴۰ N در جنوب باختر گستره مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل‌های ۷-ج و ۵). این پهنه گسل‌خورده دارای سازوکار راستالغز راست‌بر با کمی مؤلفه معکوس می‌باشد (هم‌روند با گسل شهرضا). بیش از ۱۰۰ کیلومتر از درازای این گسل در خارج از محدوده مورد مطالعه قرار گرفته و تا نواحی جنوب آباده قابل تشخیص است. در محدوده مورد مطالعه این گسل آهک‌های کرتاسه را در مجاورت آبرفت‌های دشت قرار داده و غالباً مرز بین کوه و دشت را می‌سازد. در بخش شمال‌باختری این گسل در نزدیکی قمیشلو یک کانون لرزه‌ای با بزرگای بیش از ۴ ریشتر توسط شبکه لرزه‌نگاری سازمان انرژی اتمی ثبت گردیده است (صفایی، ۱۳۸۳).

۴- بررسی نتایج حاصل از مطالعات لرزه‌زمین‌ساختی

با رسم کانون زمین‌لرزه‌های ثبت شده (<http://irsc.ut.ac.ir> و www.iiees.ac.ir) بر روی نقشه ساختاری مشخص گردید که در سده اخیر تعداد ۲۰ زمین‌لرزه با بزرگای بیش از ۳ Mb (از ۶۰۳ زمین‌لرزه رخ داده) در گستره شهرضا رخ داده است (شکل ۵). بزرگ‌ترین زمین‌لرزه رخ داده، مورخ ۱۹۷۷/۱۰/۲۹ با بزرگای ۴/۶ ریشتر بوده و در حوالی شمال‌خاور شهرضا روی داده است. زمین‌لرزه‌های رخ داده دارای ژرفای کانونی ۲ تا ۵۱ کیلومتر بوده و ژرف‌ترین زمین‌لرزه، زمین‌لرزه مورخ ۲۰۰۴/۰۱/۱۸ در بخش جنوب‌خاور شهرضا به ژرفای ۵۱ کیلومتر رخ داده است (<http://irsc.ut.ac.ir> و www.iiees.ac.ir).

بررسی سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها گویای آن است که عمده زمین‌لرزه‌ها سازوکار راستالغز دارند به گونه‌ای که حل سازوکار کانونی دو روند گسلش (ندیمی و همکاران، ۱۳۸۹) را با مشخصات زیر به نمایش می‌گذارند:

ب) بخش باختری: در این بخش دو محور فشارش با امتدادهای N۱۸ و N۵۴ دیده می‌شود. به نظر می‌رسد که حدود ۳۳ درجه چرخش محور سینماتیکی بین بخش شمال‌باختری و باختری (N۱۸ و N۳۴۵) رخ داده باشد. محور N۵۴ محوری محلی بوده و می‌تواند در ارتباط با عملکرد گسل چپ‌بر با روند ۷۰-۷۵ در گستره باشد. ج) بخش خاوری: در این بخش دو محور فشارش با امتدادهای N۷۰ و N۴۰ دیده می‌شود. محور N۴۰ با ۱۴ درجه چرخش، مشابه محور N۵۴ در بخش باختری می‌باشد که متحمل چرخشی چپ‌گرد (حاصل از عملکرد گسل چپ‌بر با روند ۷۰-۷۵) در گستره می‌باشد. اما محور N۷۰ مربوط به نسل بعدی حرکت در این گستره می‌باشد. د) بخش مرکزی (اطراف شهرضا): در این بخش دو محور فشارش با امتداد N۳۳۰ و N۴۰ دیده می‌شود. محور N۴۰ مشابه با بخش‌های خاوری و باختری می‌باشد. در صورتی که محور N۳۳۰ خمشی ۱۵ درجه‌ای نسبت به محور N۳۴۵ در بخش شمال‌باختری دارد.

ه) بخش جنوب‌خاوری: در این بخش محور N۳۴۵ عمده‌ترین محور فشارش می‌باشد و مشابه با بخش شمال‌باختری می‌تواند در ارتباط با فعالیت پهنه اصلی گسلش با روند ۱۶۰-۱۱۴۰ N و سازوکار راستالغز راست‌بر باشد.

۳-۳. محاسبه صفحات اصلی گسلش: برای انطباق شکستگی‌های برداشت شده با گسل‌های شناسایی شده توسط فناوری‌های سنجش از دور و بررسی‌های صحرایی گسل‌ها، اقدام به محاسبه صفحات اصلی گسلش در بخش‌های مختلف گستره شهرضا گردید (شکل ۴-ج) که نتایج زیر حاصل شد:

الف) بخش شمال‌باختری (گستره مهیار): صفحات اصلی گسلش محاسبه شده در این بخش دارای مشخصات N۱۵۰/۷۵-NE و N۷۵/۵۵-NW می‌باشند. صفحه محاسبه شده N۱۵۰/۷۵-NE قابل انطباق با پهنه اصلی گسلش در گستره (با روند ۱۶۰-۱۱۵۰ N) بوده و صفحه محاسبه شده N۷۵/۵۵-NW تقریباً قابل انطباق با گسله‌هایی با روند ۷۰-۶۰ N می‌باشد که در گستره موجود می‌باشند.

ب) بخش باختری: صفحات اصلی گسلش محاسبه شده این بخش دارای مشخصات N۱۵۵/۶۰-SW و N۷۰/۵۳-NW می‌باشند. صفحه محاسبه شده N۱۵۵/۶۰-SW قابل انطباق با پهنه اصلی گسلش در گستره (با روند ۱۶۰-۱۱۵۰ N) بوده و صفحه محاسبه شده N۷۰/۵۳-NW قابل انطباق با گسل‌هایی با روند ۷۰-۶۰ N می‌باشد که در گستره موجود می‌باشند.

ج) بخش خاوری: صفحات اصلی گسلش محاسبه شده این بخش دارای مشخصات N۱۵۰/۴۰-SW و N۶۵/۷۰-NW می‌باشند. صفحه محاسبه شده N۱۵۰/۴۰-SW قابل انطباق با پهنه اصلی گسلش در گستره (با روند ۱۶۰-۱۱۵۰ N) بوده و صفحه محاسبه شده N۶۵/۷۰-NW قابل انطباق با گسل‌هایی با روند ۷۰-۶۰ N می‌باشد که در گستره موجود می‌باشند.

د) بخش مرکزی (اطراف شهرضا): صفحات اصلی گسلش محاسبه شده این بخش دارای مشخصات N۱۰/۶۵-NW و N۷۰/۶۵-SE می‌باشند. صفحه محاسبه شده N۱۰/۶۵-NW حدود ۳۰ درجه چرخش نسبت به روند اصلی ۱۶۰-۱۱۵۰ داشته، در صورتی که صفحه محاسبه شده N۷۰/۶۵-SE قابل انطباق با گسل‌هایی با روند ۷۰-۶۰ N می‌باشد که در گستره موجود می‌باشند.

ه) بخش جنوب‌خاوری: صفحات اصلی گسلش محاسبه شده در بخش جنوب‌خاوری دارای مشخصات N۱۶۰/۷۰-NE و N۱۶۰/۴۵-SE می‌باشند. صفحه محاسبه شده N۱۶۰/۷۰-NE قابل انطباق با پهنه اصلی گسلش در گستره (با روند ۱۶۰-۱۱۵۰ N) بوده و صفحه محاسبه شده N۱۶۰/۴۵-SE تقریباً قابل انطباق با گسل‌هایی با روند ۷۰-۶۰ N می‌باشد که در گستره موجود می‌باشند.

۳-۴. گسل‌های اصلی گستره: در گستره مورد مطالعه سه گسل اصلی شهرضا، نصرآباد و دهقان مورد بررسی و شناسایی قرار گرفتند. وضعیت این گسل‌ها به شرح زیر می‌باشد:

و عملکرد آنها وضعیت ساختاری و سیمای ریخت‌زمین ساختی گستره را رقم زده است. ویژگی‌های عمومی این گسل‌ها به شرح زیر می‌باشد:

- گسل شهرضا: این گسل با درازای بیش از ۱۶۵ کیلومتر و عرض پهنه گسله ۱۰ کیلومتر دارای راستای ۱۵۰-۱۱۴۰ (که گاه تا ۱۱۶۰ نیز دیده می‌شود) می‌باشد. سازوکار این گسل راستالغز راست بر با مقداری مؤلفه شیب‌لغز معکوس است.

- گسل نصرآباد: این گسل با نزدیک به ۷۰ کیلومتر درازا و عرض پهنه گسله ۱۰ کیلومتر در شمال گستره مورد مطالعه قرار گرفته است. این گسل دارای راستای ۶۰-۵۰ N بوده و عمدتاً به صورت خطواره‌هایی بر روی رسوبات آبرفتی دیده می‌شود و در محل برخورد با گسل شهرضا (در بخش مرکزی شهرضا)، سبب بریده و جابه‌جا شدن گسل شهرضا شده است.

- گسل دهقان: این گسل با درازای بیش از ۱۶۰ کیلومتر و عرض پهنه گسله ۶ کیلومتر و راستای ۱۱۴۰ در جنوب باختر گستره مورد مطالعه قرار گرفته است. این پهنه گسل‌خورده دارای سازوکار راستالغز راست بر با کمی مؤلفه معکوس می‌باشد (هم‌روند با گسل شهرضا).

ب) نتایج حاصل از تحلیل نمودارهای گل‌سرخ (که نشان از شناسایی روندهای عمده ساختاری دارد) نشان می‌دهد که شکستگی‌هایی با امتداد ۱۶۰-۱۴۰ N عمده‌ترین روند ساختاری در گستره است. دومین دسته شکستگی‌های عمده گستره، روند ساختاری ۷۰-۵۰ N دارند. روندهای دیگر ساختاری مانند روند ۱۰۰-۹۰ N نیز در تمامی بخش‌های گستره قابل مشاهده می‌باشند. شایان توجه است که شکستگی‌هایی با روند تقریباً شمالی-جنوبی (۱۱۷۰ تا ۱۱۰ N) نیز در بخش‌های مرکزی، باختری و شمال‌باختری بعضاً دیده می‌شوند.

ج) بررسی محورهای فشار در گستره نشان می‌دهد که محور فشار اصلی ۳۴۵ N می‌باشد که در دو بخش شمال‌باختری و جنوب‌خاوری دیده می‌شود. این محور در بخش‌های مرکزی، خاوری و باختری دچار چرخش گردیده که حاصل بریده شدن گسل‌های اصلی گستره (با روند ۱۶۰-۱۴۰ N) توسط روند ۷۰-۵۰ N می‌باشد. به همین دلیل در این سه بخش محورهای سینماتیکی مانند: ۴۰ N (تا ۵۴ N) و ۷۰ N که مربوط به نسل‌های حرکتی در طول گسل‌هایی با روند ۷۰-۵۰ N (با سازوکار راستالغز چپ بر با کمی مؤلفه کششی) می‌باشند؛ دیده می‌شوند.

د) نتایج حاصل از محاسبه صفحات اصلی گسلش در بخش‌های مختلف دو روند اصلی گسلش با امتدادهای ۱۶۰-۱۵۰ N (گسل‌هایی که روند ارتفاعات گستره را نیز رقم زده) و ۷۰-۶۰ N (گسل‌های به نسبت جوان‌تری که روند اصلی را قطع نموده‌اند) هستند که انطباق اندازه‌گیری‌های صحرائی را با گسل‌های رسم شده در نقشه به نمایش می‌گذارد. به نظر می‌رسد که سایر روندهای گسلش حاصل عملکرد این دو روند اصلی باشند.

ه) در سده اخیر تعداد ۲۰ زمین‌لرزه با بزرگای بیش از ۳ ریشتر (از ۶.۳ زمین‌لرزه رخ داده) در گستره شهرضا روی داده است. با کنترل موقعیت جغرافیایی کانون‌های زمین‌لرزه درمی‌یابیم که بیشتر زمین‌لرزه‌های بزرگ در بخش‌های مرکزی، خاوری و جنوب‌خاوری در حوالی دو روند ساختاری ۱۶۰-۱۴۰ N و ۷۰-۵۰ N رخ داده و به نوعی کانون زمین‌لرزه‌ها در یک امتداد با این گسل‌ها قرار گرفته‌اند. اما عمده تراکم زمین‌لرزه‌ها، مربوط به زمین‌لرزه‌های ۲ تا ۳ ریشتر بوده که در بخش شمال‌باختری (شمال روستای مهیار) واقع شده‌اند. بررسی سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها گویای آن است که حل سازوکار کانونی دو روند گسلش با سازوکار راستالغز (با روندهای ۱۶۰-۱۴۰ N و ۷۰-۵۰ N) را به نمایش می‌گذارند.

و) مهم‌ترین شواهد نوزمین ساختی در گستره عبارتند از: بریده شدن آبرفت‌های عهد حاضر، اثر بر روی رژیم رسوب‌گذاری رودخانه‌ها، ایجاد گسلش در پادگانه‌های آبرفتی عهد حاضر و ایجاد دگرریختی در رسوبات می‌باشد.

ز) بررسی شمای سه بعدی نشان می‌دهد که روند اصلی ساختاری گستره، پهنه

الف) روند ۱۶۰-۱۱۴۰ N با سازوکار راستالغز راست بر با مقداری مؤلفه معکوس که می‌تواند در ارتباط با گسل شهرضا باشد.

ب) روند ۷۰-۵۰ N با سازوکار راستالغز چپ بر با کمی مؤلفه کششی که می‌تواند در ارتباط با گسل‌های جدیدی با این روند باشد که در بخش‌های مرکزی، خاوری و جنوب‌خاوری مشاهده می‌شوند. اثرات نوزمین ساختی این گسل‌ها را می‌توان در تصویر ماهواره‌ای بارزسازی شده (شکل ۱)، پادگانه‌های آبرفتی رودخانه شهرضا، مخروط‌افکنه‌های بخش خاوری و رسوبات کف دشت در بخش جنوب‌خاوری (شکل ۶-الف) مشاهده نمود.

۵- بررسی‌های نوزمین ساختی

با استفاده از فناوری‌های سنجش از دور، اقدام به شناسایی اثرات حرکات نوزمین ساختی بر روی تصویر ماهواره‌ای گردیده (شکل ۳) و سپس کنترل‌های صحرائی این اثرات صورت پذیرفت. مهم‌ترین شواهد نوزمین ساختی در گستره به شرح زیر می‌باشد:

الف) بریده شدن آبرفت‌های عهد حاضر: رسوبات بادزن آبرفتی در بخش شمال‌باختری شهرضا توسط گسل‌های با امتداد ۹۰ N (رده دوم گسلش مربوط به پهنه گسل نصرآباد) بریده که به صورت بریدگی‌هایی (به صورت خطواره) بر روی رسوبات آبرفتی قابل مشاهده است (شکل ۸-الف).

ب) اثر بر روی رژیم رسوب‌گذاری رودخانه‌ها: این پدیده به صورت گوه‌شدگی رسوبات رودخانه‌ای در بخش مرکزی (گستره شهری شهرضا) قابل مشاهده بوده و نشان از آشفتگی رژیم رودخانه ناشی از حرکات عهد حاضر زمین ساختی دارد (شکل ۸-ب).

ج) ایجاد گسلش در پادگانه‌های آبرفتی عهد حاضر: گسلش فعال در بخش مرکزی سبب بریده و جابه‌جا شدن رسوبات آبرفتی دو سوی رودخانه (پادگانه‌های آبرفتی) شده است. به عنوان نمونه می‌توان به صفحه گسلش اندازه‌گیری شده در رودخانه شهرضا (بخش مرکزی) اشاره نمود که دارای مشخصات ۶۵-NE / ۱۱۲ N است (شکل ۸-ج).

د) ایجاد دگرریختی در رسوبات: این پدیده نیز در بخش‌های مختلف به ویژه در بخش مرکزی قابل مشاهده بوده و حرکات نوزمین ساختی سبب تغییر شیب لایه‌های رسوبی (Dragging) شده است (شکل ۸-د).

۶- بررسی نتایج حاصل از مطالعه شمای سه بعدی

بررسی شمای سه بعدی تهیه شده از لایه‌های اطلاعاتی تصویر ماهواره‌ای، DEM، گسل‌ها، کانون زمین‌لرزه‌ها به همراه حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها (ندیمی و همکاران، ۱۳۸۹) و راه‌ها نشان می‌دهد که روند اصلی ساختاری گستره، پهنه گسل شهرضا می‌باشد که با امتداد ۱۶۰-۱۴۰ N از بخش شمال‌باختری تا انتهای جنوب‌خاوری گستره مورد مطالعه کشیده شده و روند ارتفاعات را رقم زده است (شکل ۳). این روند در بخش‌های مرکزی، خاوری و جنوب‌خاوری توسط پهنه گسل‌خورده با روند ۷۰-۵۰ N بریده و جابه‌جا شده است. بیشتر زمین‌لرزه‌های بزرگ در محل برخورد این دو روند اصلی ساختاری رخ داده‌اند. حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های اصلی مبین وجود گسلش راستالغز با سازوکارهای راست بر (مربوط به پهنه گسل شهرضا) و چپ بر (مربوط به پهنه گسل نصرآباد) می‌باشد (شکل ۶).

۷- بحث و نتیجه گیری

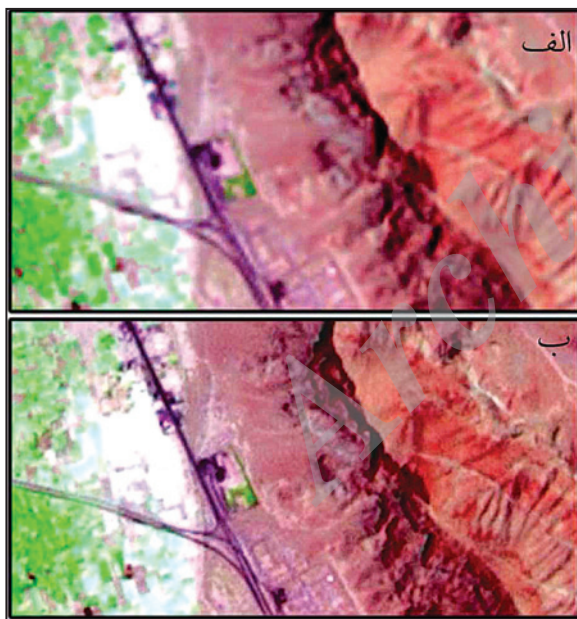
نتایج حاصل از مطالعات ساختاری، لرزه‌زمین ساختی و نوزمین ساختی گویای آن است که:

الف) در گستره شهرضا سه گسل اصلی شهرضا، نصرآباد و دهقان قرار گرفته‌اند

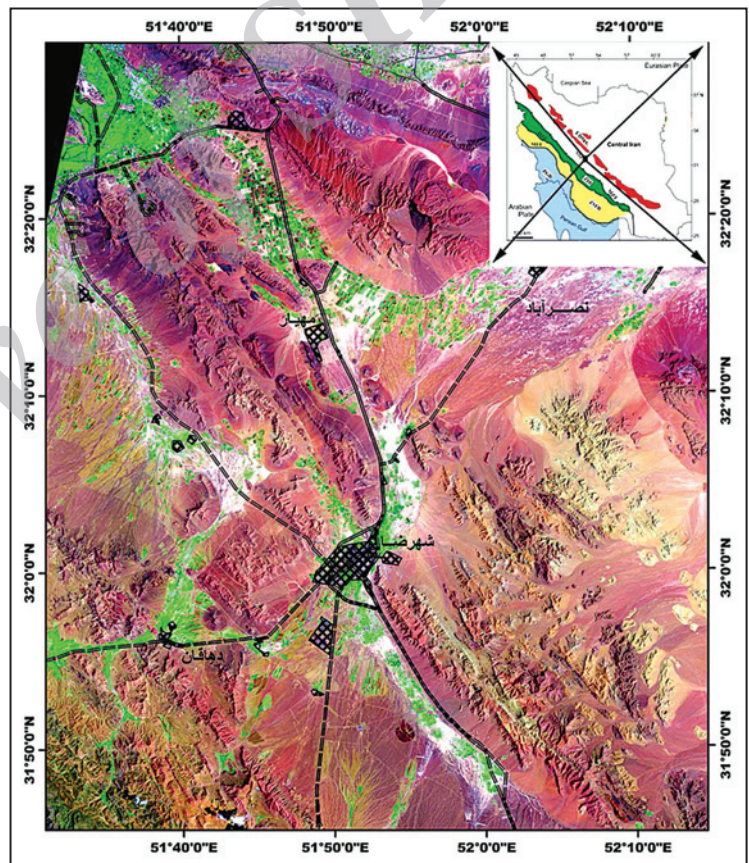
پهنه گسل خورده توسط روند ساختاری بسیار جوان ۷۰-۷۵۰ (گسل نصرآباد) با سازوکار راستالغز چپ‌بر با کمی مؤلفه کششی، بریده و بعضاً جابه‌جا شده است. در محل برخورد این دو گسل اصلی تعداد زیادی کانون زمین‌لرزه (بیش از ۱۲۲ کانون زمین‌لرزه بزرگ‌تر از ۲ ریشتر) واقع شده است. حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها نیز دو روند گسلش با سازوکار راستالغز با روندهای ۱۶۰-۱۴۰ و ۷۰-۵۰ را به نمایش می‌گذارند. افزون بر تعداد زیاد زمین‌لرزه‌ها در گستره شهرضا، اثرات حرکات نوزمین ساختی مربوط به فعالیت‌های عهد حاضر این گسل‌ها نیز قابل مشاهده می‌باشد. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که این گستره از پهنه ساختاری سندج-سیرجان کاملاً فعال و لرزه‌خیز بوده و ایده لرزه‌خیز نبودن این پهنه ساختاری مردود می‌باشد.

گسل شهرضا می‌باشد که با امتداد ۱۶۰-۱۴۰ N از بخش شمال‌باختری تا انتهای جنوب‌خاوری گستره مورد مطالعه کشیده شده و روند ارتفاعات گستره را رقم زده است (شکل ۷). این روند در بخش‌های مرکزی، خاوری و جنوب‌خاوری توسط پهنه گسل خورده با روند ۷۰-۵۰ بریده و جابه‌جا شده است.

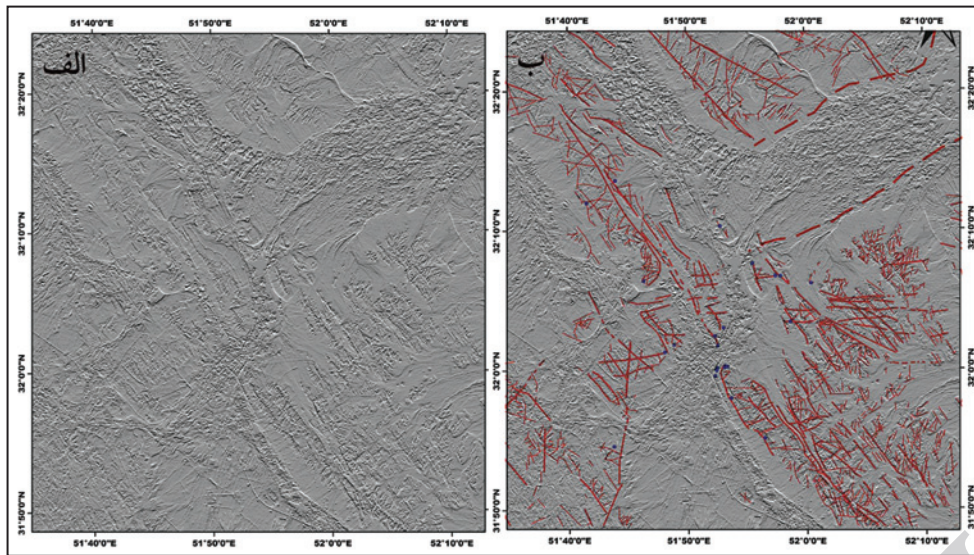
به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که ساختارهای استخراج شده توسط فناوری‌های سنجش از دور و کنترل‌های صحرایی نشان می‌دهد که روند ساختاری ۱۶۰-۱۴۰ N مربوط به گسل شهرضا (و در جنوب‌باختر گستره گسل دهاقان) با سازوکار راستالغز راست‌بر با مقدار قابل توجهی مؤلفه معکوس عمده‌ترین روند ساختاری در گستره بوده و حتی روند ارتفاعات گستره را نیز رقم زده است. این



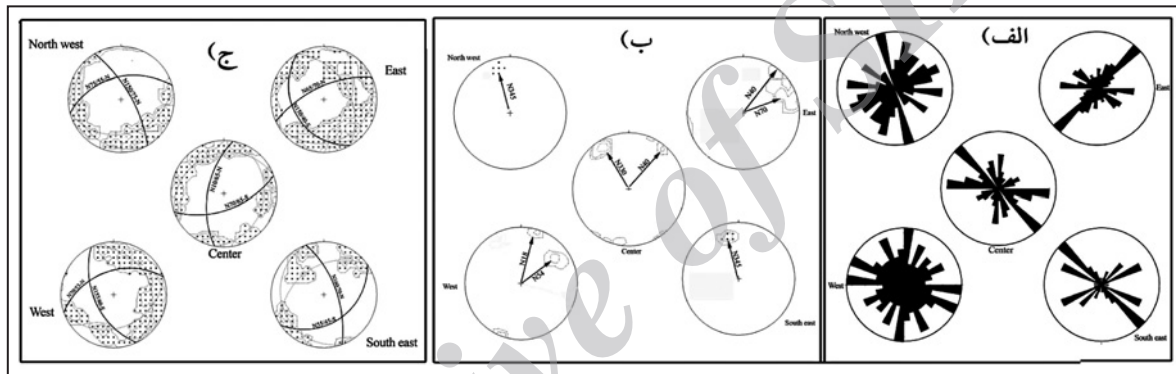
شکل ۲- اثر امتزاج برای بارزسازی تصویر، الف) تصویر معمولی؛ ب) تصویر امتزاج شده.



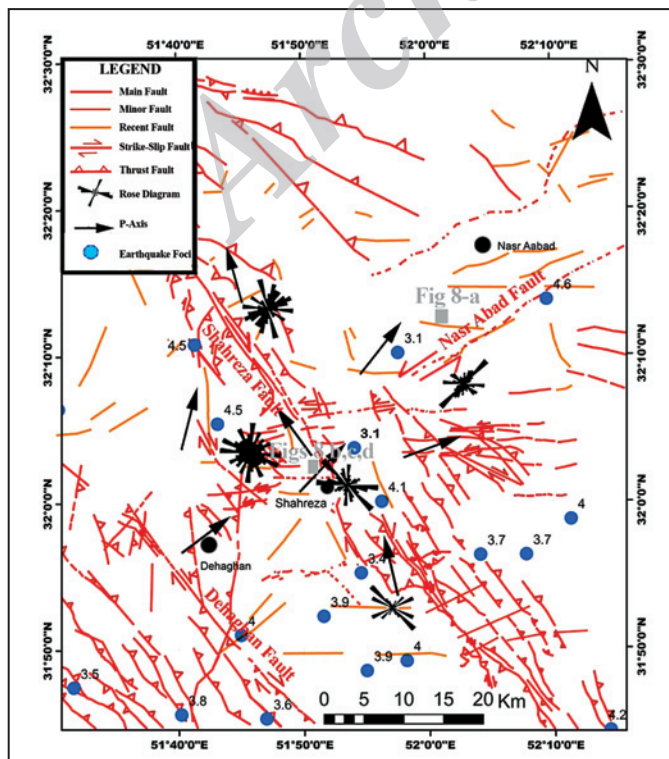
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به گستره مورد بررسی.



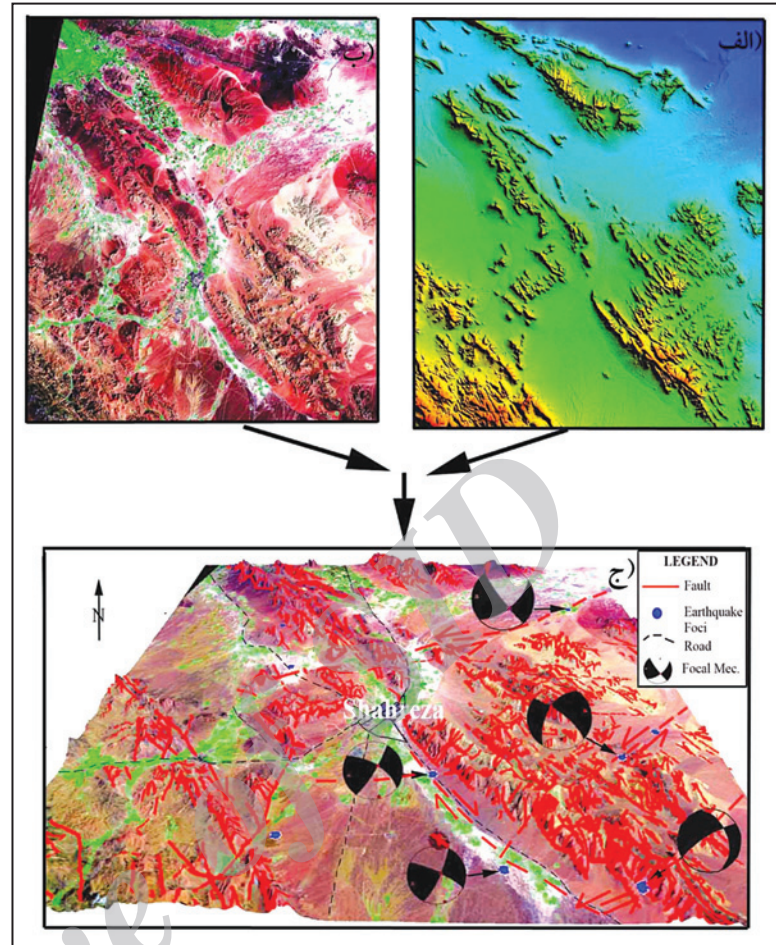
شکل ۳- الف) اعمال فیلتر جهت دار ۹۰ درجه بر روی باند R از ترکیب باندهای ۷۴۱ تصویر شده (محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری بر روی شکل با دایره آبی رنگ مشخص شده است).



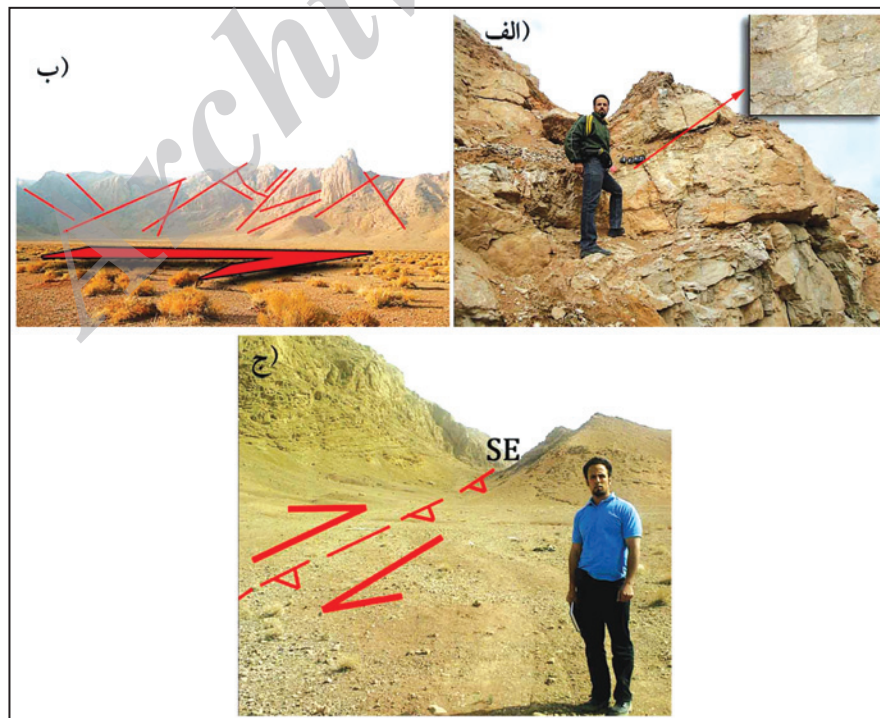
شکل ۴- تحلیل‌های هندسی و سینماتیکی در ۵ بخش شمال باختر، مرکز، خاور، باختر و جنوب خاور گستره شهرضا؛ الف) نمودارهای گل سرخی؛ ب) محاسبه محورهای فشار؛ ج) محاسبات صفحات اصلی گسلش.



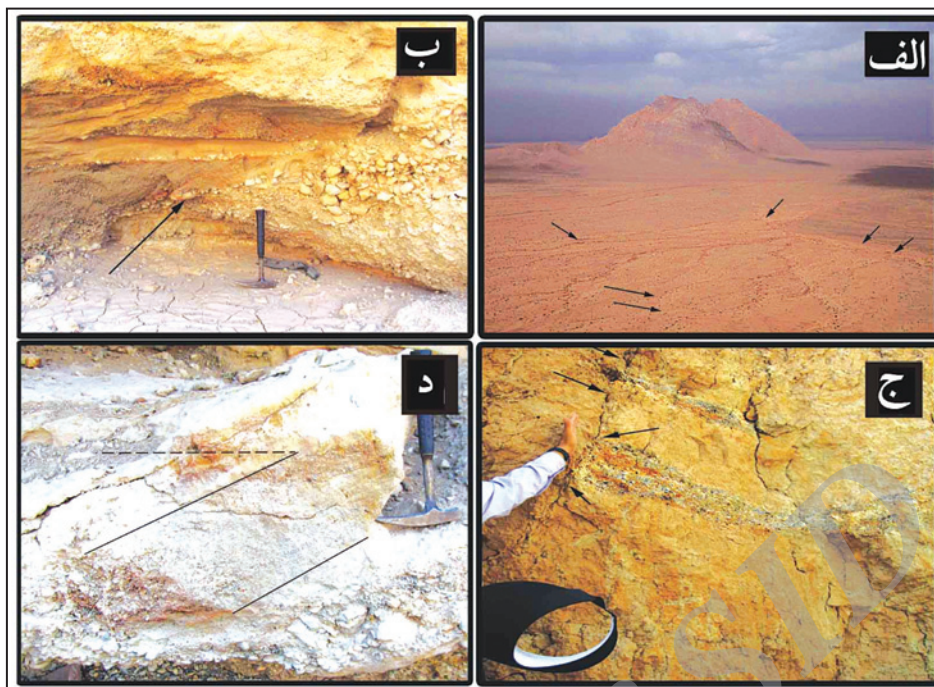
شکل ۵- نقشه ساختاری گستره شهرضا شامل محل گسل‌های اصلی، فرعی و عهد حاضر به همراه نتایج نمودارهای گل سرخی و محورهای فشارش (پراکنده‌گی روکانون زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۳ در بازه زمانی ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۲ به صورت دایره آبی رنگ مشخص شده است).



شکل ۶- تهیه شمای سه بعدی با استفاده از روی هم قرار دادن (الف) مدل رقومی ارتفاعی (DEM)؛ (ب) تصویر ماهواره‌ای اصلاح شده به همراه گسل‌ها و محل کانونی زمین‌لرزه‌های برگزیده و حل سازوکار کانونی آنها؛ (ج) چرخش شمای سه بعدی و انتخاب منظر مناسب.



شکل ۷- نماهایی از شواهد صحرایی گسلش در طول گسل‌های الف) شهرضا (اطراف پارک شمال باختری شهرضا و مجاور امامزاده شهرضا)؛ (ب) نصرآباد (در بخش آبرفتی خاور منطقه مورد مطالعه) و (ج) دهقان (جنوب شهرستان دهقان در مرز کوه و دشت)



شکل ۸- اثرات نوزمین‌ساختی حاصل از فعالیت‌های عهدحاضر گسل‌های گستره مورد مطالعه. - گسل نصرآباد: الف) بریده شدن نهشته‌های آبرفتی سطح مخروط افکنه در گستره گسل نصرآباد، - گسل شهرضا: ب) گوه‌شدگی رسوبات در نهشته‌های آبرفتی رودخانه شهرضا، ج) اثرات خمیدگی و گسلش در یادگانه‌های آبرفتی رودخانه شهرضا، د) کج‌شدگی رسوبات عهدحاضر در جنوب شهرضا.

کتابنگاری

آقانیاتی، س.، ع.، ۱۳۸۳- کتاب زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۵۸۶ صفحه.
 صفایی، ه.، ۱۳۸۳- گزارش نهایی طرح پژوهشی شناسایی و بررسی توان لرزه‌ای گسل‌های اطراف اصفهان، معاونت شهرسازی و معماری شهرداری اصفهان، ۱۱۲ صفحه.
 ندیمی، ع.، احمدی، س.، ظهوری، ف. و گل‌باغ، م.، ۱۳۸۹- ساختار گل مانند معکوس در منطقه رامشه (شمال شرق کوهزاد زاگرس)، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، شماره ۳: ۲۱۷-۲۲۴

پایگاه لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران. <http://irsc.ut.ac.ir>

پژوهشکده بین‌المللی زمین‌لرزه‌شناسی و مهندسی زمین‌لرزه. (IIEES) www.iiees.ac.ir

References

- Ambraseys, N. N. & Melville, C. P., 1982- A history of Persian earthquakes, Cambridge earth science series, 219p.
- Aronoff, S., 1989- Geographic Information System: A Management Perspective; WDL publication: Ottawa, Canada.; p. 200.
- Berberian, M., 1976- Contribution to the seismo-tectonic of Iran, Geo. Sur. Iran, Rep No: 39, 518 P.
- Jackson, J. & McKenzie, D., 1984- Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt, Between Western Turkey and Pakistan “, Geoph. J. Astr. Soci. No:77, 185-294.
- Lillesand, T.M. & Kiefer, R.W., 2000- Remote Sensing and Image Interpretation, 4th ed.; John Wiley and Sons: New York, NY, USA; pp. 20-180.
- Marrett, R. & Allmendinger, R. W., 1990- Kinematic analysis of fault-slip data, J. of structural Geology, Vol. 12, No. 8, pp. 973-986.
- Nadimi, A. & Nadimi, H., 2006- Active Tectonics of the South Shahreza, N. Zagros Mountains, Iran, 6th International Conference on the Geology of the Middle East, Al Ain, United Arab Emirates University Publication, Abstract: 272 p.
- Nadimi, A., 2010- Active strike slip faults in the central part of the Sanandaj- Sirjan Zone of Zagros Orogen (Iran), PhD thesis, Faculty of Geology, University of Warsaw, Poland, 121 p.
- Ramsay, J.G. & Hubber, M., 1987- the techniques of modern structural geology: Folds and fractures (vol. II). Academic Press: London, UK; p. 700.
- Safari, H., Pirasteh, S. & Shattri, B.M., 2011- Role of Kazerun Fault for Localizing Oil Seepage in the Zagros Mountains, Iran: an Application of GiT, International Journal of Remote sensing, Vol: 32, No: 1, 1-16.
- Sheikholeslami, R., Bellon, H., Emami, H., Sabzehei, M. & Pique, A., 2003- Nouvelles donnees structurales et datations 40K-40Ar sur les roches métamorphiques de la region de Neyriz (zone de Sanandaj-Sirjan, Iran meridional. Leurinteret dansle carde du domaine neo-Tethysien du Moyen Orient, Compates Rendus Geoscience, 335, 981-991.
- Stocklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran, a review. American Association of Petroleum geologists Bulletin, 52(7), PP. 1229- 1258.