

شناسایی گسل‌های لرزه‌زا در گستره زهان (خاور ایران)؛ با استفاده از تحلیل داده‌های مغناطیس‌هوایی، توپوگرافی و مشاهدات صحرایی

محمد امیر علیمی^{۱*}، محمد مهدی خطیب^۲، محمود رضا هیهات^۳، خالد حسامی آذر^۴

*^۱. دکتری زمین‌شناسی گرایش زمین‌ساخت، دانشگاه بیرجند، malimi@birjand.ac.ir تلفن تماس: ۰۹۱۵۵۶۱۷۱۱۸

^۲. استاد گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند

^۳. استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند

^۴. استادیار پژوهشکده بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

چکیده

شناسایی گسل لرزه‌زای شاج در زمین‌لرزه ۲۰۱۲ باختر زهان (خاور ایران) نشان داد که در گستره زهان علاوه بر سامانه گسلی فعال آبیژ - گزیک - آواز گسل‌های دیگری نیز می‌تواند مستعد ایجاد زمین‌لرزه بزرگ باشد. اگرچه داده‌های لرزه‌ای در سراسر گستره یکسان توزیع نشده‌اند اما چین‌خوردگی و بریدگی نهشته‌های کواترنر بیانگر این است که بایستی این منطقه از لحاظ زمین‌ساختی فعال و خطر لرزه‌ای آن بالا باشد. پردازش نقشه‌های بی‌هنجاری مغناطیسی وجود خطواره‌های مغناطیسی با جهت‌گیری شمال‌شمال باختری (شاج، جان‌احمد و تخته‌جان) و خاوری - باختری (زهان، ساقدر و قهستان) را نشان می‌دهد. انطباق مکانی خطواره‌های مغناطیسی زهان و قهستان با نتایج به‌دست آمده از داده‌های GPS، فعالیت گسل‌های پی‌سنگی خاوری - باختری در شمال و جنوب منطقه را تأیید می‌کند. بارزسازی خطواره‌های توپوگرافی و مقایسه آن با خطواره‌های مغناطیسی و گسل‌های لرزه‌زا ایجاد بلوک‌های لوزی شکل از روندهای شمال‌شمال باختری و خاوری - باختری را نمایان می‌سازد.

کلمات کلیدی: گستره زهان، خاور ایران، گسل‌های لرزه‌زا، خطواره مغناطیسی، خطواره توپوگرافی.

Identification of the seismogenic faults in the Zohan region (E-Iran) using topographic, aeromagnetic data and field observations

Mohammad Amir Alimi^{*1}, Mohammad Mahdi Khatib², Mahmoud Reza Heyhat³, Khaled Hessami Azar⁴

¹Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran.
malimi@birjand.ac.ir

²Professor, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran.
mkhatib@birjand.ac.ir

³Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran.
mhayhat@birjand.ac.ir

⁴ Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran.
hessami@iiees.ac.ir

Abstract

Identification of the shaj seismogenic fault in the eastern Zohan 2012 earthquake (E-Iran) show that there are high-potentials of strong earthquake another faults in addition to the Abiz-Gazik-Avaz active fault system. Although seismic data are not distributed uniform across region however folding and cutting the Quaternary sediments is indicate this region should be considered as the places bearing active tectonic

and high seismic risk. The process magnetic anomaly maps show magnetic lineaments with NNW (Shaj, Janahmad and Takhtejon) and E-W (Zohan, Saghdar and Qohestan) orientations. Spatial correlation of the Zohan and Qohestan magnetic lineaments with results of obtained from GPS data confirm the activity of E-W basement faults in the north and south region. This is suggested that rhomboid blocks from NNW and E-W trending resulted by the detection of topography lineaments and there are comparison with magnetic lineaments and seismogenic faults.

Keywords: Zohan region, East of Iran, Seismogenic faults, Magnetic lineament, Topography lineament.

مقدمه

گستره زهان در بخش شمال خاوری پهنه زمین درز⁷ سیستان در خاور ایران واقع است. مطالعه گسل‌های فعال خاور ایران نشان می‌دهد که از لحاظ ساختاری به صورت سامانه‌ای از گسل‌های راست‌الغز با آرایش نردبانی⁸ می‌باشند. فعالیت گسل‌های اصلی منطقه نظیر سامانه گسلی آیز - گزیک - آواز با نمود خطی افزای گسلی و جابه‌جایی رسوبات مخروط‌افکنه‌ای کواترنر آشکار است به علاوه اطلاعات زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی سابقه لرزه‌خیزی این گسل‌ها را تأیید می‌کند (Berberian et al., 1999) (شکل ۱). در دسامبر ۲۰۱۲، زمین‌لرزه مخرب زهان با بزرگی ($M_w = 5.6$; ⁹) Ref: IGUT در باختر منطقه رخ می‌دهد، در حالی که پیش از این به علت نبود اطلاعات لرزه‌ای کافی و عبور اثر گسل فعال در کوهستان، گسل مسبب زمین‌لرزه ناشناخته بود. این مسئله پژوهشگران را با دو چالش مواجه می‌کند: الف) نبود شواهد صحرائی و اطلاعات لرزه‌ای کافی و یا عدم انطباق توزیع لرزه‌خیزی با دیگر گسل‌های منطقه باعث طبقه‌بندی این مناطق به عنوان نواحی بی‌لرزه با خطر لرزه‌ای پایین می‌شود در حالی که احتمال تجمع انرژی در محل تنشگاه¹⁰‌ها و نیز آزادسازی تدریجی انرژی به صورت خزش¹¹ در امتداد گسل‌های فعال وجود دارد. ب) در مواردی بخش‌هایی از طول گسل در زیر پلایاهای نمکی و سرزمین‌های گدازه‌ای پوشیده شده و یا در مناطق کوهستانی با گسل‌های قدیمی‌تر تداخل یافته و محاسبه طول کل این گسل‌ها با محدودیت‌هایی همراه است با این وجود شناخت طول گسل اهمیت دارد چرا که با جابه‌جایی حداکثر در صفحه گسل مرتبط بوده و هر دو در درک الگوهای رشد گسل‌ها، پیش‌بینی بزرگی رویدادهای لرزه‌ای و تغییرات هندسه گسل در مقیاس طولی کاربرد دارد (Walsh et al., 2002; Kim and Sanderson, 2005). هدف از این تحقیق معرفی گسل‌های لرزه‌زای جدید در گستره زهان و تعیین طول آنها می‌باشد. در این مطالعه نتایج حاصل از بررسی‌های لرزه‌زمین‌ساخت، تفسیر نقشه‌های مغناطیسی هوایی، تحلیل‌های توپوگرافی و GPS تلفیق و معرفی شده است. این تحلیل‌ها بر پایه آشکارسازی خطواره‌های مغناطیسی و انطباق آنها با گسل‌های لرزه‌زای شناخته شده به وسیله مشاهدات صحرائی و GPS بنا نهاده شده‌اند.

⁷ Suture

⁸ En echelon

⁹ Institute of Geophysics, University of Tehran

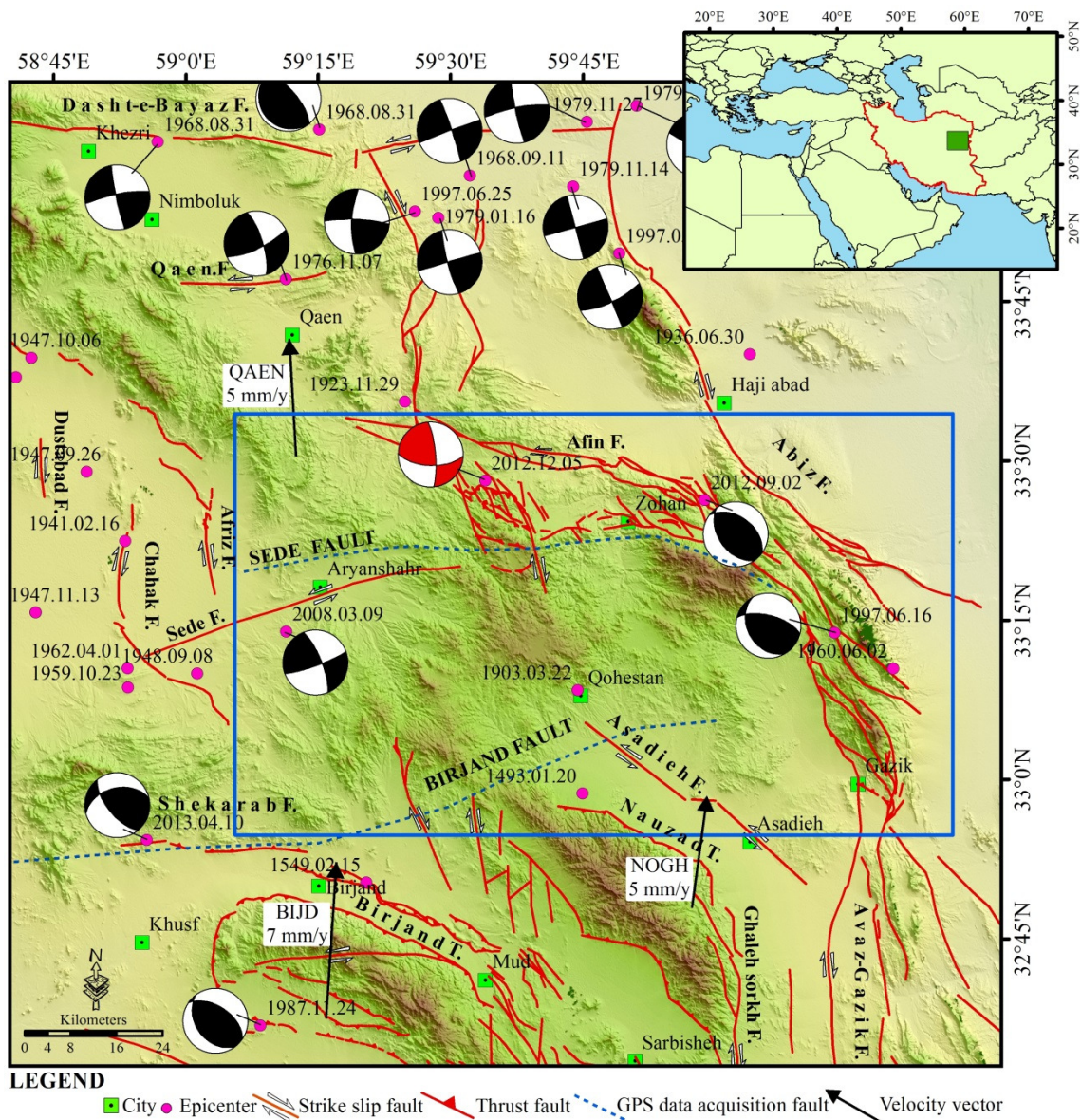
¹⁰ Asperity

¹¹ Creep

گسل‌های لرزه‌زا و لرزه‌خیزی گستره زهان

گسلش در خاور ایران شامل گسل‌های لرزه‌زای راست‌بر شمالی - جنوبی تا شمال - شمال باختری و نیز گسل‌های معکوس شمال باختر - جنوب خاور و تعدادی گسل‌های راست‌الغز چپ‌بر خاوری - باختری می‌باشد به طوری که این روندها به‌عنوان شاخص‌های اصلی زمین‌ساخت منطقه معرفی شده‌اند (Berberian and Yeats, 1999). سامانه گسلی راست‌الغز آبیژ - گزیک - آواز با روند شمالی - جنوبی در خاور منطقه مورد مطالعه واقع است که به‌عنوان قطعاتی از گسل سیستان (گسل لوت خاوری) در نظر گرفته می‌شوند (Walker and Jackson, 2004). این سامانه گسلی با طول بیش از ۱۰۰ کیلومتر و نرخ لغزش و کرنش بالا، گسل‌های اصلی^{۱۲} منطقه معرفی شده‌اند (Walpersdorf et al., 2014). در شمال باختری منطقه گسل راست‌الغز چپ‌بر افین به طول ۵۰ کیلومتر با راستای خاوری - باختری واحدهای قدیمی کرتاسه تا رسوبات کواترنری را بریده است. در جنوب منطقه گسل راست‌الغز چپ‌بر اسدیه به طول ۴۷ کیلومتر با روند باختر شمال - باختری - خاور جنوب خاوری قرار دارد. در محدوده آرایه گسلی افین - اسدیه واحدهای سنگی بازالتی، آندزیتی و رسوبات نئوژن و کواترنری دیده می‌شود. در واقع گسل‌های چپ‌بر خاوری - باختری به‌عنوان انتقال دهنده‌های برش راست‌بر بین ایران مرکزی و افغانستان محسوب می‌شوند (Walker and Khatib, 2006). منطقه در باختر به گسل راست‌الغز شاج محدود شده است (شکل ۱). ذکر این نکته ضروری است که اکثر زمین‌لرزه‌های مخرب قرن بیستم در خاور ایران، نتیجه فعالیت گسل‌هایی هستند که نسبت به گسل‌های اصلی منطقه طول و نرخ لغزش پایین‌تری دارند مانند زمین‌لرزه‌های محمدآباد (۱۹۴۱)، دوست‌آباد (۱۹۴۷)، آراین‌شهر (۲۰۰۸) و زهان (۲۰۱۲) (شکل ۱).

¹² Major faults



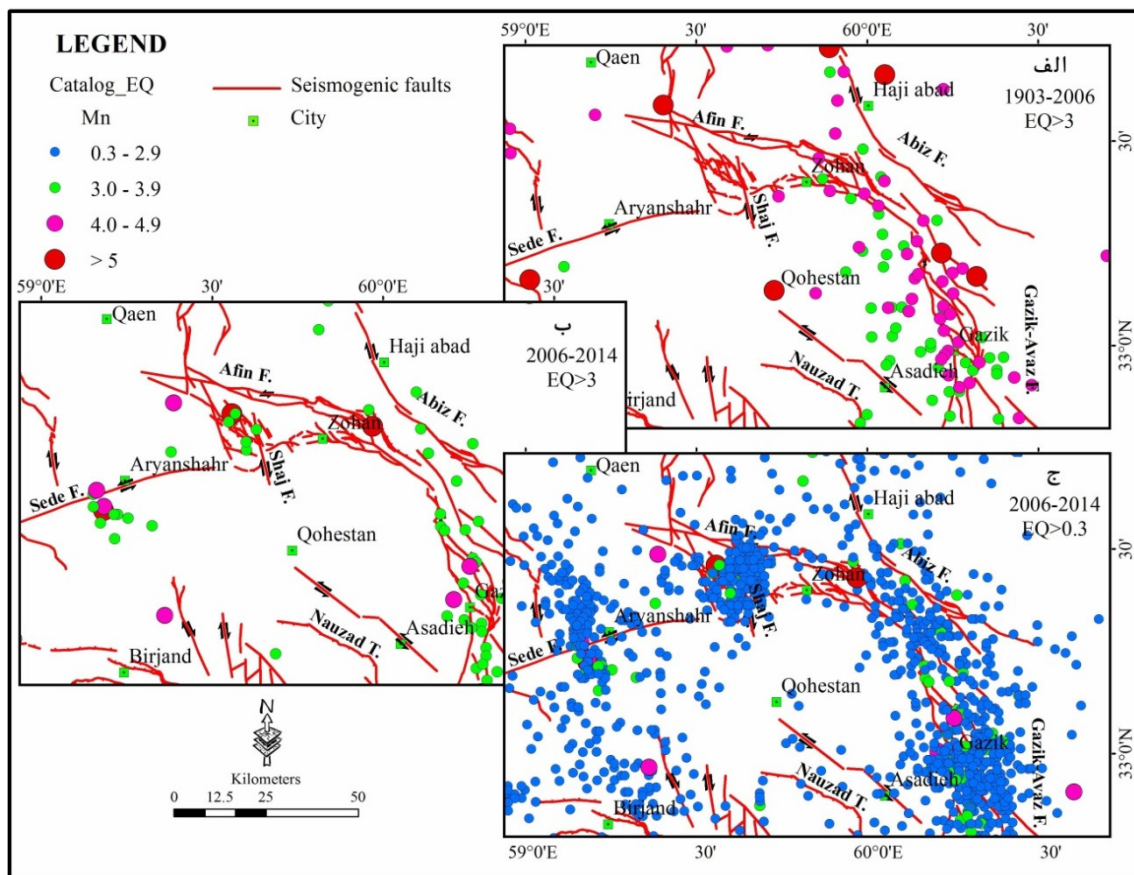
شکل ۱. نقشه توپوگرافی SRTM 90 بخشی از خاور ایران که در آن گسل‌های لرزه‌زای شناخته شده، کانون سطحی (Ref: Engdahl et al., 1998, 2006) سازوکار کانونی تعدادی از زمین‌لرزه‌های مخرب (Ref: HRVD; IGUT) و بردارهای سرعتی ایستگاه‌های GPS (Ref: IPGN; Walpersdorf et al., 2014) آمده است. گستره زهان با کادر آبی، دو خطواره منتج شده از داده‌های GPS (Walpersdorf et al., 2014) با خط چین آبی و سازوکار کانونی زمین‌لرزه زهان با رنگ قرمز نمایش داده شده است.

گستره زهان شاهد زمین‌لرزه‌های مخرب تاریخی و دستگاهی بوده است که از میان آنها می‌توان زمین‌لرزه‌های نوزاد ۱۴۹۳ و قهستان ۱۹۰۳ میلادی را نام برد. توزیع این زمین‌لرزه‌ها، الگوی دگرریختی فعال را در امتداد گسل‌های لرزه‌زای منطقه نشان می‌دهد (شکل ۱). مشخصات این زمین‌لرزه‌ها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مشخصات زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی مخرب در گستره زهان.

منابع: (1) Ambraseys and Melville, 1982; (2) Engdahl et al., 1998, 2006; (3) IGUT, (4) HRVD.

تاریخ	زمان	عرض شمالی	طول خاوری	عمق	مرجع رومرکز	بزرگی M_w	امتداد	شیب	ریک	مرجع CMT	گسل
۱۴۹۳/۰۱/۲۰	؟				۱						نوزاد
۱۹۰۳/۰۳/۲۲	۱۴:۳۵	۳۳/۱۶	۵۹/۷۱		۱	۶/۲					؟
۱۹۶۰/۰۶/۰۲	۰۷:۲۲	۳۳/۱۸	۶۰/۳۰		۱	۵/۳					آبیز
۱۹۹۷/۰۶/۱۶	۰۳:۰۰	۳۳/۲۴	۶۰/۱۹	۱۳	۱	۵	۱۵۱	۳۶	۱۳۱	۴	آبیز
۲۰۰۸/۰۳/۰۹	۰۳:۵۱	۳۳/۲۶	۵۹/۱۷	۳/۹	۲	۵	۰۷۰	۸۲	۱۵	۴	سده
۲۰۱۲/۰۹/۰۲	۰۵:۰۰	۳۳/۴۵	۵۹/۹۶	۱۱	۳	۴/۹	۱۴۴	۴۷	۱۰۳	۳	آبیز
۲۰۱۲/۱۲/۰۵	۱۷:۰۸	۳۳/۵	۵۹/۵۴	۷/۸	۳	۵/۶	۳۵۵	۷۸	۱۵۱	۳	شاج



شکل ۲. الف و ب- نقشه گسل‌های لرزه‌زا و توزیع زمین‌لرزه‌های با بزرگی بالای ۳ ریشتر در گستره زهان در دوره زمانی ۱۹۰۳-۲۰۱۴. ج- نقشه گسل‌های لرزه‌زا و توزیع خردلرزه‌ها در دوره زمانی ۲۰۰۶-۲۰۱۴ که توسط شبکه لرزه‌نگاری محلی ثبت شده است.

به‌منظور مقایسه لرزه‌خیزی بین گسل‌های منطقه، توزیع زمین‌لرزه‌های دستگاهی بزرگتر از ۳ ریشتر در دو دوره زمانی ۱۹۰۳-۲۰۰۶ (مراجع زمین‌لرزه‌ها از فهرست اطلاعاتی^{۱۳} ISC و^{۱۴} IIEES) و ۲۰۰۶-۱۴۰۶ (مراجع زمین‌لرزه‌ها از فهرست

¹³ International Seismological Centre

¹⁴ International Institute of Earthquake Engineering and Seismology

اطلاعاتی (IGUT) تفکیک شده و به نمایش درآمده‌اند (اشکال ۲ الف و ب). کانون سطحی زمین لرزه‌ها در دوره اول با سامانه گسلی اصلی آبیژ - گزیک - آواز انطباق خوبی دارد و در اطراف گسل‌های دیگر، از پراکندگی کمتری برخوردار است. در دوره دوم توزیع زمین لرزه‌ها علاوه بر پیرامون گسل‌های اصلی، در امتداد گسل پنهان قیصار (بزدان پناه و همکاران، ۱۳۸۸) و پایانه گسل شاج نمود دارد که بیانگر دو رخداد لرزه‌ای آراین شهر (۲۰۰۸) و زهان (۲۰۱۲) می‌باشد. توزیع خردلرزه‌ها در فاصله زمانی ۲۰۰۶-۲۰۱۴ که توسط شبکه لرزه‌نگاری محلی ثبت شده در شکل ۲ ج آمده است. این نقشه بیانگر انطباق رومرکز خردلرزه‌ها با گسل‌های لرزه‌زای شناخته شده منطقه می‌باشد. با وجود نبود رخداد لرزه‌ای بزرگ در این فاصله زمانی انطباق رومرکز خردلرزه‌ها با سامانه گسلی آبیژ - گزیک - آواز مشهود است که نشان می‌دهد همچنان مقدار کوچکی از کل کرنش با خردلرزه‌ها آزاد می‌شود. در امتداد گسل پنهان قیصار و شاج نیز تمرکز پس لرزه‌های دو رخداد لرزه‌ای آراین شهر ($m_b = 5$) و زهان را داریم. اما در مرکز گستره زهان، نبود رخداد لرزه‌ای وجود دارد. نبود رخداد لرزه‌ای این مفهوم را دارد که به شرط وجود گسل فعال در منطقه باید به دنبال خزش یا تنش‌گاہ بود، چرا که انرژی انباشته شده یا به تدریج آزاد می‌شود و یا در طول گسل تجمع می‌یابد و در این دوره زمانی (دوره بین لرزه‌ای) نشانی از وقوع زمین لرزه مشاهده نمی‌شود. برای درک این موضوع یا باید داده‌های مربوط به اندازه‌گیری‌های مکرر زمین‌پیمایی^{۱۵} در طول یک دوره زمانی چند ساله در دسترس باشد، و یا اینکه بتوان با استناد به شواهد صحرایی الگوی رفتاری گسل را مشخص کرد.

پردازش داده‌های مغناطیس‌هوایی

داده‌های مغناطیس‌هوایی پردازش شده دارای اطلاعات با ارزشی جهت تفسیر عارضه‌های زیرسطحی هستند (Neawsuparp et al., 2005) و برای تعیین محل گسل‌های بزرگ پی‌سنگی، مناطق خرد شده و شکسته به کار می‌روند. اهمیت شناخت پی‌سنگ و نحوه فعالیت آن در درک فرگشت ساختاری یک منطقه مؤثر است. در این مطالعه از داده‌های مغناطیس‌هوایی سازمان زمین‌شناسی کشور با فاصله بین خطوط پرواز ۷/۵ کیلومتر و فاصله بین خطوط کنترل عمود بر پرواز ۴۰ کیلومتر استفاده شده است که پس از تصحیح منطقه‌ای و اعمال صافی‌های لازم در نرم افزار Oasis montaj شرکت Geosoft مورد تفسیر قرار گرفته‌اند.

برای شناسایی گسل‌های پی‌سنگی گستره زهان از داده‌های مغناطیس‌هوایی پردازش شده استفاده گردید. ابتدا تصحیح منطقه‌ای داده‌ها با حذف اثر مغناطیسی میدان مرجع وابسته به میدان جاذبه زمین^{۱۶} انجام شد سپس صافی برگردان به قطب^{۱۷} برای این منطقه با استفاده از زاویه میل^{۱۸} ۷۳/۳۴ درجه و انحراف مغناطیسی^{۱۹} ۱۰/۵۲ درجه و میانگین IGRF برابر ۵۲۵۵۷ نانوتسلا صورت گرفت (شکل ۳ الف). این صافی میدان مغناطیسی را از یک عرض مغناطیسی که در آن بردار میدان زمین

¹⁵ Geodetic

¹⁶ International Geomagnetic References Field: IGRF

¹⁷ Reduction to pole

¹⁸ Inclination

¹⁹ Declination

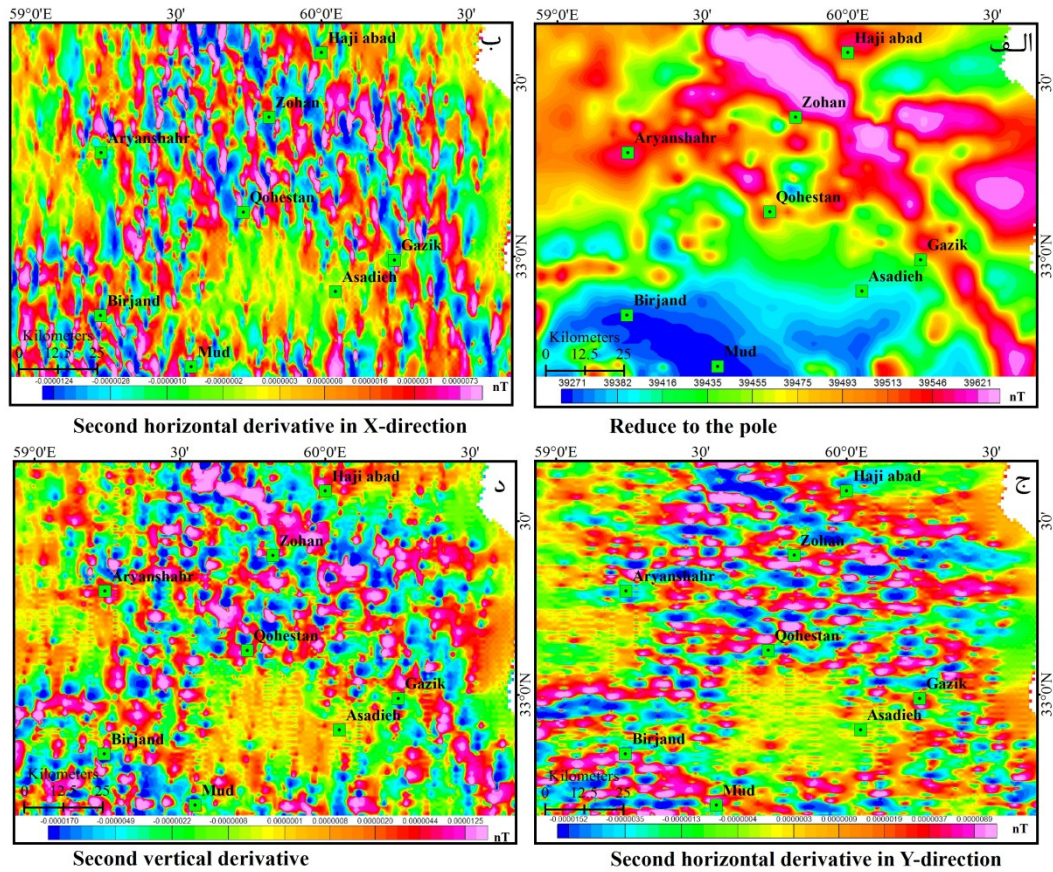
مایل و شیب‌دار است به قطب مغناطیسی یعنی جایی که میدان القایی قائم است منتقل می‌کند. بر روی داده‌هایی که برگردان به قطب شده‌اند، مشتقات افقی مرتبه اول و دوم^{۲۰} در راستای X (برای شناسایی خطواره‌های مغناطیسی شمالی – جنوبی) و راستای Y (برای شناسایی خطواره‌های مغناطیسی خاوری – باختری) اعمال شد (اشکال ۳ ب و ج). در ادامه صافی بالاگذر^{۲۱} مشتق اول و دوم قائم^{۲۲} اعمال شده تا اثرات ناحیه ای با طول موج بلند و تداخل بین بی‌هنجاری‌های مجاور حذف و برجسته‌سازی عوامل کم عمق و سطحی صورت گیرد (امامعلی‌پور و همکاران، ۱۳۹۰) (شکل ۳ د). در واقع مشتق قائم اثر بی‌هنجاری‌های بزرگ (بی‌هنجاری‌های دارای طول موج بلند و بسامد پایین) که مربوط به منابع ژرف هستند را بر روی بی‌هنجاری‌های کوچک از بین برده و بی‌هنجاری‌های کوچک و محلی به خوبی نمایان می‌شوند (Silva et al., 2005; Neawsuparp et al., 2003; کاویانی صدر و همکاران، ۱۳۹۲). در عمل مشتق قائم عرض بی‌هنجاری‌ها را باریک‌تر و موقعیت آنها را با دقت بیشتری مشخص می‌کند (Cooper and Cowan, 2004). خطواره‌های مغناطیسی را می‌توان با جستجوی نواحی خطی و باریک دارای مغناطیس پایین (رنگ آبی) یا بالا (رنگ بنفش)، قطع ناگهانی در عمق منابع مغناطیسی، پله‌های مغناطیسی، ناپوستگی یا جابه‌جایی واضح و تند در نقشه‌های مغناطیس‌هوایی مشخص کرد (Korhonen et al., 2004). در نهایت خطواره‌های استخراجی به صورت لایه بُرداری در محیط GIS^{۲۳} ترسیم شد تا با تلفیق اطلاعات لرزه‌زمین‌ساختی، دورسنجی و زمین‌پیمایی منطقه، مورد تعبیر و تفسیر قرار گیرد. ذکر این نکته ضروری است که در ترسیم خطواره‌های مغناطیسی منطقه زهان از آوردن خطواره‌هایی که گسل‌های لرزه‌زای آنها مشخص است (نظیر گسل آبیز) خودداری شده است.

²⁰ First and second horizontal derivative

²¹ High pass

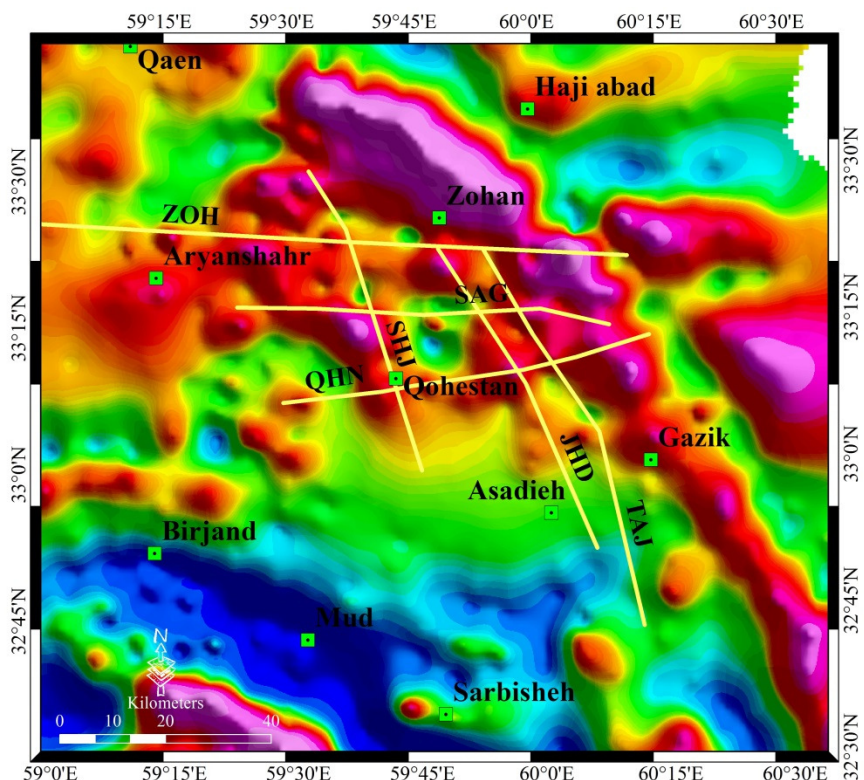
²² First and second vertical derivative

²³ Geography Information System: GIS



شکل ۳. الف- د- نقشه‌های مغناطیس‌هوایی گستره زهان و پیرامون آن پس از تصحیح منطقه‌ای و اعمال صافی‌های لازم جهت آشکارسازی خطواره‌های مغناطیسی نشان داده شده است. این صافی‌ها عبارتند از: الف- برگردان به قطب، ب- مشتق افقی مرتبه دوم در جهت X، ج- مشتق افقی مرتبه دوم در جهت Y، د- مشتق قائم مرتبه دوم (جهت توضیح بیشتر به متن رجوع شود).

در گستره زهان خطواره‌های مغناطیسی دو روند غالب دارند. خطواره‌های تخته‌جان (TAJ)، جان‌احمد (JHD) و شاج (SHJ) با روند شمال باختر- جنوب خاور به طول‌های ۷۹، ۶۴ و ۶۱ کیلومتر و خطواره‌های زهان (ZOH)، ساقدر (SAG) و قهستان (QHN)، با روند خاوری - باختری به طول‌های ۱۱۳، ۷۱ و ۷۱ کیلومتر آرایش یافته‌اند (شکل ۴).



شکل ۴. نقشه سایه‌دار شدت کل میدان مغناطیسی زمین در گستره زهان و پیرامون آن. خطوط‌های مغناطیسی عبارتند از: تخته‌جان (TAJ)، جان‌احمد (JHD)، شاج (SHJ)، زهان (ZOH)، ساقدر (SAG) و قهستان (QHN) (جهت توضیح بیشتر به متن رجوع شود).

شواهد ریخت‌زمین‌ساختی

تحلیل ریخت‌شناسی اشکال توپوگرافی به‌ویژه خطوط‌ها، در مطالعات ساختاری و زمین‌ساختی منطقه می‌تواند کارآمد باشد. پایه و اساس تحلیل‌های ریخت‌شناسی برای این‌گونه مطالعات استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای است که با استخراج خطوط‌ها می‌توان مستقیماً دگرشکلی‌های سطح زمین را شناسایی نمود. در این تحقیق از روش خودکار و با واحد خطی^{۲۴} در نرم‌افزار PCI Geomatica جهت استخراج خطوط‌ها استفاده شده است. واحد خطی اشکال خطی را با استفاده از فرانسج‌های تعریف شده، از تصاویر رقومی استخراج و به‌صورت لایه برداری^{۲۵} در می‌آورد. این روش مزیت‌هایی مانند کمک در استخراج خطوط‌ها، کاهش تصورات ذهنی، امکان ایجاد سریع لایه برداری را دارد (فروودی و همکاران، ۱۳۸۶).

در الگوریتم خطی متعلق به نرم‌افزار PCI بایستی فرانسج‌های شش‌گانه را جهت استخراج خطوط‌ها تعیین کرد. این فرانسج‌ها در مراحل بارزسازی لبه^{۲۶}، ایجاد تصویر دوتایی لبه^{۲۷} و استخراج انحنا^{۲۸} با استفاده از مقادیر آستانه تعریف می‌-

²⁴ Line module

²⁵ Vector

²⁶ Edge detection

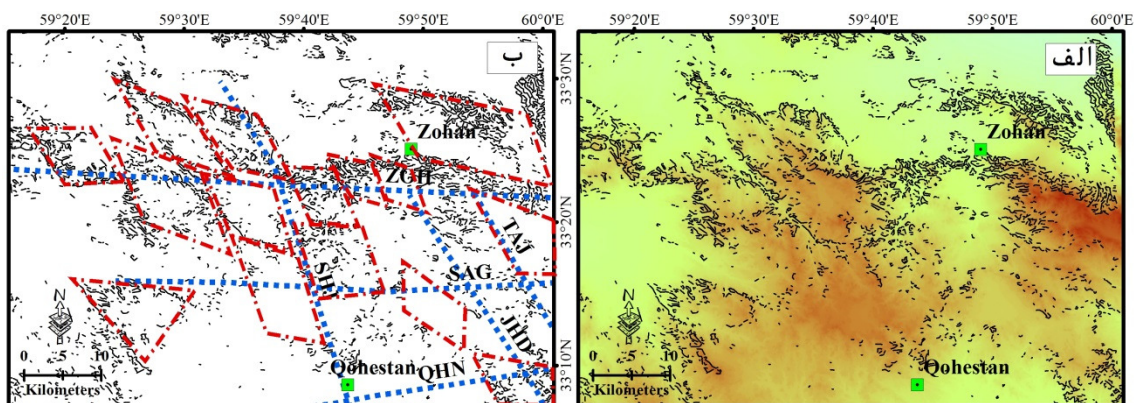
²⁷ Binary edge image

²⁸ Curve extraction

شود. در این تحقیق جهت استخراج خطواره‌های کوچک، از داده‌های SRTM ۳۰ متر و انتخاب فراسنج‌ها به صورت زیر استفاده شده است.

Radius of filter in pixels, $RADI=8$, Threshold for edge gradient, $GTHR=5$
 Threshold for curve length, $LTHR=0$, Threshold for line fitting error, $FTHR=2$
 Threshold for angular difference, $ATHR=1$, Threshold for linking distance, $DTHR=15$

بدین ترتیب خطواره‌های توپوگرافی گستره زهان به صورت یک لایه برداری استخراج و لایه‌ای در سیستم اطلاعات جغرافیایی ایجاد شد (شکل ۵) که به آسانی قابل مقایسه با سایر لایه‌ها (خطواره‌های مغناطیسی، گسل‌های لرزه‌زا) می‌باشد. با استفاده از تفسیر چشمی در مدل ارتفاعی رقومی منطقه می‌توان بلوک‌های لوزی شکل مجزای بالا آمده با توپوگرافی‌های مرتفع را دید که در جهت شمال باختری طویل و کشیده شده‌اند (شکل ۵ الف). ارزیابی چگونگی توزیع خطواره‌ها نیز این الگو را با جزئیات بیشتر تأیید می‌کند (شکل ۵ ب).



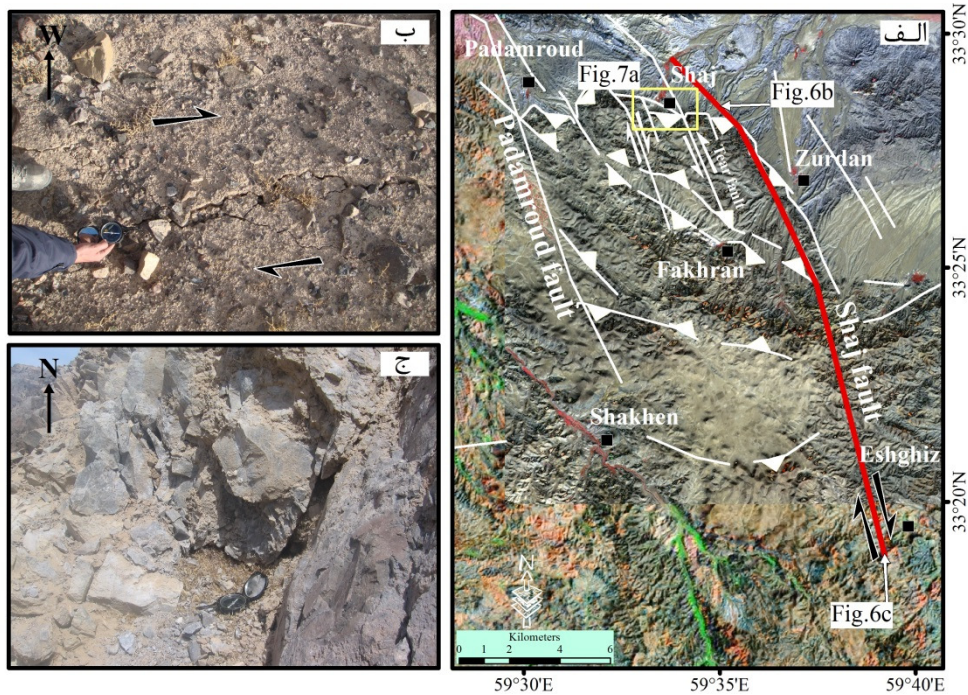
شکل ۵. الف- خطواره‌های توپوگرافی استخراج شده از داده‌های ارتفاعی رقومی SRTM ۳۰ متر در گستره زهان. ب- آشکار شدن بلوک‌های لوزی شکل در خطواره‌های توپوگرافی نشان داده شده است. در نقشه فوق حاشیه بلوک‌های لوزی شکل بالا آمده (خط چین قرمز) با اعمال تصحیحاتی با گسل‌های پی‌سنگی شاج (SHJ)، زهان (ZOH)، جان‌احمد (JHD)، تخته‌جان (TAJ)، ساقدر (SAG) که با خط چین آبی نمایش داده شده‌اند منطبق هستند.

گسل شاج در رخداد لرزه‌ای زهان در دسامبر ۲۰۱۲ به صورت گسیخت‌هایی راست‌بر با روند شمال‌شمال باختری به طول ۲۲ کیلومتر آشکار شد و واحدهای آندزیت تا بازالت آندزیتی (Om^{an2}) نئوژن در کوهستان کم‌قاسم و رسوبات سخت نشده (Qt_2) در دشت شاج را برید (شکل ۶ ب و ج). انتهای گسل شاج به راندگی‌هایی با روند خاوری - باختری ختم می‌شود که پیشانی کوهستان کم‌قاسم را تشکیل می‌دهد. راندگی‌های پایانه‌ای به وسیله مجموعه‌ای از گسل‌های پارگی^{۲۹} با روند شمال‌شمال باختری (هم‌روند با گسل شاج) بریده شده‌اند که سازوکار راست‌بر و چپ‌بر دارند (شکل ۶ الف). حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه زهان حرکت مایل لغز را نشان می‌دهد (شکل ۱) و مشاهدات صحرائی شکستگی در امتداد صفحه شمالی - جنوبی را تأیید می‌کند (جدول ۱). بردارهای لغزشی روی صفحه گسلی حاکی از حرکت منطقه به سمت شمال خاوری است که با مشاهدات GPS همخوانی دارد. بردارهای سرعتی در نزدیک‌ترین ایستگاه‌های GPS به گستره

²⁹ Tear fault

زهان، بیرجند (BIJD)، قاین (QAEN) (مأخذ: شبکه ژئودینامیک سراسری ایران^{۳۰}) و نوغاب اسدیه (NOGH) (Ref: Walpersdorf et al., 2014)، راستای ۹ تا ۱۱ درجه نسبت به شمال را نشان می‌دهد (شکل ۱).

این روند نسبت به گسل‌های راست‌الغز راست‌بر شمال‌شمال باختری منطقه انحراف دارد. این امر باعث همراهی مؤلفه جانبی^{۳۱} لغزش با فشارشی محض شده که در راستای رانده‌گی‌های پایانه‌ای مصرف می‌شود. بدین ترتیب گسل‌های رانده‌گی و چین‌ها در پایانه گسل‌های شمالی - جنوبی اصلی در پاسخ به لغزش راست‌بر توسعه یافته‌اند.

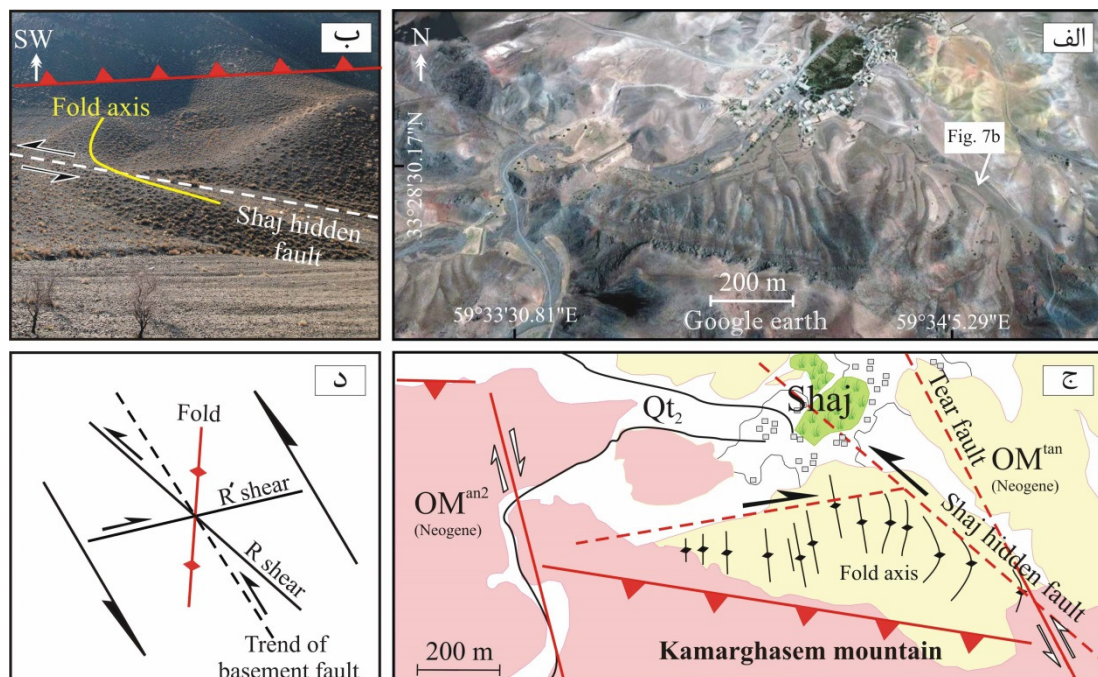


شکل ۶. الف- تصویر ماهواره‌ای Aster از کوهستان کمرقاسم. گسیخت‌های هم‌لرز زمین‌لرزه زهان با خط قرمز نشان داده شده است. ب- شکست سطحی زمین‌لرزه زهان در واحدهای کوترنو درخاور روستای شاج (GPS: 33°28'38.20"N, 59°35'13.20"E). ج- فعالیت مجدد گسل‌های از قبل موجود در رویداد لرزه‌ای زهان در واحدهای آندزیتی نتوژن در باختر روستای عشقیز (GPS: 33°19'35.60"N, 59°39'11.60"E).

شاهدی از فعالیت نتوژن و کوترنری گسل‌های پارگی در پیشانی کوهستان کمرقاسم با شکل‌گیری یک میدان کرنش محلی مشهود می‌باشد که با خم‌شدگی محور چین‌ها، باعث کرنش تدریجی شده است (شکل ۷). در این منطقه حرکت آرام گسل، با ایجاد ساختارهای فشارشی و انحنای محور چین ادامه داشته است. با استفاده از این شاهد ریخت‌زمین‌ساختی و با در نظر گرفتن الگوی تشکیل ساختارها در دگرریختی پیشرونده برشی چپ‌بر (شکل ۷ د) می‌توان به گسل پنهان شاج پی‌برد که با روند N48W و به طول ۲/۳ کیلومتر به صورت چپ‌بر عمل کرده و از روستای شاج می‌گذرد (شکل ۷ ج).

³⁰ Iranian Permanent GPS Network: IPGN

³¹ Lateral component

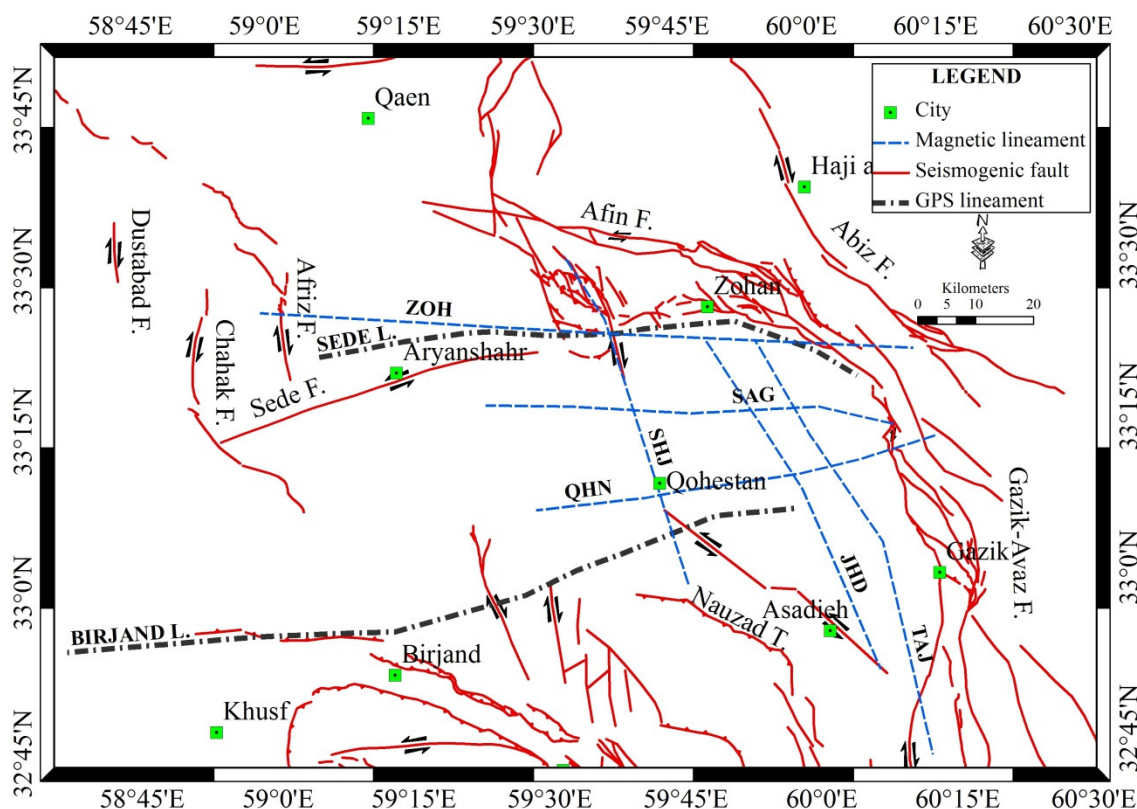


شکل ۷. الف- تصویر ماهواره‌ای Google earth چین خوردگی واحدهای نئوژن و کواترنری را در پیشانی کوهستان کمرفاسم نشان می‌دهد. ب- خم‌شدگی محور چین در اثر فعالیت گسل پنهان شاج با سازوکار چپ‌بر. ج- نقشه زمین‌شناسی و ساختاری منطقه شاج. د- الگوی تشکیل ساختارها در دگرریختی پیشرونده برشی چپ‌بر (Dooley and Schreurs, 2012).

تطبیق اطلاعات لرزه‌ای، ریخت‌زمین‌ساختی، مغناطیسی و GPS

مقایسه بین ویژگی دگرریختی‌های زمین‌شناسی و زمین‌لرزه‌های امروزی نشان می‌دهد که الگوهای زمین‌ساختی به طور معمول در ترشیری پسین، کواترنری پیشین و عهد حاضر تغییر نمی‌کند (Tchalenko and Berberian, 1975). در خاور ایران نیز فعال شدن مجدد گسل‌های از قبل موجود محتمل است و می‌تواند منجر به توسعه گسل‌های جوان‌تر با همان روندهای غالب شود. در منطقه مورد مطالعه درک ارتباط کلیه گسستگی‌های خطی اعم از گسل‌های لرزه‌زای معرفی شده با کمک داده‌های لرزه‌زمین‌ساختی یا مشاهدات GPS و گسل‌های پی‌سنگی حائز اهمیت بوده و به تفسیر الگوی گسلش فعال کمک می‌کند.

مقایسه گسل‌های لرزه‌زای شناخته شده با خطواره‌های مغناطیسی انطباق بخش شمالی خطواره مغناطیسی شاج با قطعه فعال شده گسل شاج در زمین‌لرزه ۲۰۱۲ زهان را نشان می‌دهد. این بخش شامل گسیخت‌های سطحی هم‌لرزه با زمین‌لرزه زهان به طول ۲۲ کیلومتر بوده که با در نظر گرفتن خطواره مغناطیسی، می‌توان طول گسل را به ۶۱ کیلومتر افزایش داد. به‌علاوه رومرکز زمین‌لرزه ۱۹۰۳ قهستان با بزرگی ۶/۲ در مقیاس امواج سطحی بر روی بخش جنوبی خطواره مغناطیسی شاج قرار گرفته است که فعال شدن بخش جنوبی گسل در اوایل قرن بیستم را محتمل می‌کند اما به علت نبود سازوکار کانونی زمین‌لرزه و گزارش‌های صحرائی کافی نسبت دادن زمین‌لرزه به این گسل قطعی نیست.

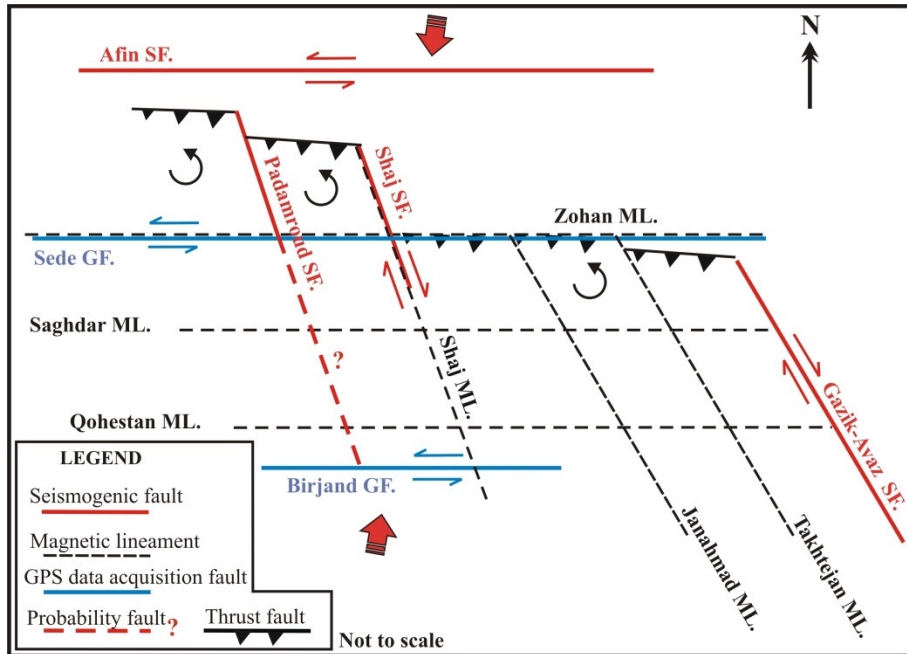


شکل ۸. نقشه ساده شده از گسل‌های لرزه‌زا در گستره زهان و پیرامون آن به همراه خطواره‌های مغناطیسی شناسایی شده (خط چین آبی) و گسل‌های حاصل از داده‌های GPS (خط چین مشکی) ارائه شده است.

تفسیر چشمی خطواره‌های توپوگرافی، بلوک‌های لوزی شکل بالاآمده‌ای را آشکار می‌کند که حاشیه تعدادی از آنها با گسل‌های پی‌سنگی شاج و خطواره‌های مغناطیسی جان‌احمد، تخته‌جان و ساقدار انطباق دارد (شکل ۵ ب). در این تحقیق اگرچه نتوانسته‌ایم شواهد لرزه‌ای و زمین‌پیمایی برای خطواره‌های مغناطیسی اخیر ارائه دهیم اما با تحلیل ریخت‌شناسی خطواره‌های توپوگرافی وجود چنین گسل‌های پی‌سنگی محتمل است چرا که به نظر می‌رسد تقاطع روندهای خاوری – باختری و شمال باختر – جنوب خاور ایجاد چنین اشکال لوزی شکلی کرده باشد.

۱۱ سال مشاهدات GPS در خاور ایران وجود دو گسل سده و بیرجند با روند خاوری – باختری را بارز می‌کند که حرکت چپ‌بر و نرخ لغزش 1.7 ± 0.2 میلی‌متر در سال داشته و با یک مؤلفه فشارشی به سمت شمال 0.9 ± 0.6 میلی‌متر در سال) همراهی می‌شود (Walpersdorf et al., 2014) (اشکال ۱ و ۸). گسل سده منطبق بر خطواره مغناطیسی زهان با روند خاوری – باختری و طول ۱۱۳ کیلومتر است و لرزه‌خیزی فعال به‌خصوص در بخش خاوری آن تأیید می‌شود (شکل ۳). بنابراین می‌توان خطواره مغناطیسی زهان را به‌عنوان گسل پی‌سنگی فعال در منطقه معرفی کرد اگرچه برای اطمینان از این موضوع نیاز به شواهد ریخت‌زمین‌ساختی در امتداد این گسل داریم که جای بررسی دارد. در جنوب منطقه بخشی از گسل بیرجند با خطواره مغناطیسی قهستان هم‌روند بوده و می‌تواند با احتمال قابل انطباق با آن باشد. از این‌رو فعالیت خطواره

مغناطیسی مذکور محتمل است. دگرریختی در گستره زهان تحت برش منطقه‌ای راست‌بر سامانه گسلی آبیژ - گزیک - آواز در خاور و سامانه گسلی دوست‌آباد - چاهک - آفریز در باختر قرار دارد علاوه بر این شکل‌گیری پهنه‌های برشی چپ‌بر خاوری - باختری به صورت محلی ایجاد می‌شود که نتیجه آن چرخش بلوکی در خلاف جهت عقربه‌های ساعت خواهد بود (شکل ۹).



شکل ۹. طرح ساده شده‌ای از گسل‌های گستره زهان که تحت تأثیر تنش فشاری شمال‌شمال باختری قرار دارند. عملکرد گسلش در دو روند غالب (شمال‌شمال باختری و خاوری - باختری)، بلوک‌های لوزی شکل منسجمی را شکل داده است که به علت قرارگیری در پهنه‌های برشی چپ‌بر، احتمال چرخش حول محور قائم در خلاف جهت عقربه‌های ساعت در آنها وجود دارد.

نتیجه‌گیری

لرزه‌خیزی در گستره زهان در راستای گسل‌های شمالی - جنوبی آبیژ - گزیک - آواز در خاور و گسل شاج در باختر محرز است. گسل پی‌سنگی شاج نیز منطبق با گسل لرزه‌زای شاج می‌باشد. خطواره‌های مغناطیسی زهان و قهستان با گسل‌های سده و بیرجند، بارز شده توسط داده‌های GPS، انطباق خوبی دارند این موضوع می‌تواند نشانه فعالیت روندهای خاوری - باختری در منطقه باشد. انطباق خطواره‌های توپوگرافی با خطواره‌های مغناطیسی شمال‌شمال باختری و خاوری - باختری احتمال تأثیر گسل‌های پی‌سنگی در الگوی زمین‌ساختی منطقه را قوت می‌بخشد. دوباره فعال شدن این گسل‌های پی‌سنگی می‌تواند به توسعه گسل‌های جوان‌تر با همان روندهای عمومی غالب و شکل‌گیری بلوک‌های گسلی لوزی شکل منجر شود. اگرچه در بخش‌های مرکزی گستره زهان نبود رخداد‌های لرزه‌ای وجود دارد با وجود این تأثیر فعالیت سامانه‌ای از گسل‌های شمالی - جنوبی و خاوری - باختری می‌تواند این منطقه را مستعد ایجاد زمین‌لرزه‌های بزرگ با خطر لرزه‌ای بالا نماید.

سپاسگزاری

بدین وسیله از گروه زمین‌شناسی دانشگاه بیرجند در خصوص فراهم آوردن امکانات این پژوهش و نیز از جناب دکتر غلامرضا نوروزی استادیار گروه معدن دانشگاه بیرجند که نهایت همکاری را در تفسیر داده‌های مغناطیس‌هوایی داشته‌اند و آقای رضا پیلهور به خاطر همراهی در مطالعات صحرایی صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

امامعلی‌پور، ع.، خاتمان، م.ا.، اسکویی، ر.، عبدالمهی شریف، ج.، ۱۳۹۰. الگوی زمین‌شناسی، دگرسانی و بی‌هنجاری مغناطیسی کانسار مس پورفیری مسجدداغی (شرق جلفا)، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره ۲، ص ۷۷-۸۹
فرهودی، ق.ا.، رهنماد، ج.، طیبی، م.ح.، ۱۳۸۶. استخراج خطواره‌های البرز به کمک داده‌های اس آر تی ام نود متر و سیستم اطلاعات جغرافیایی، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی دانشگاه آزاد اسلامی، شماره ۱(۳)، ص ۴۴-۵۱.
کاوایانی‌صدر، خ.، خطیب، م.م.، زرین‌کوب، م.ح.، ۱۳۹۲. ارتباط وضعیت ساختاری با کانه‌زایی بر اساس داده‌های مغناطیس‌هوایی، ماهواره‌ای و مطالعات صحرایی محدوده معدنی چشمه‌خوری (شمال‌باختر بیرجند)، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره ۹، ص ۵۴-۶۲.

وبگاه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله قابل دسترس در: <http://www.iiies.ac.ir>

وبگاه مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IGUT) قابل دسترس در: <http://irsc.ut.ac.ir>

یزدان‌پناه، ح.، خطیب، م.م.، احمدی‌زاده، س.س.، نوروزی، غ.ر.، علیمی، م.ا.، ۱۳۸۸. شناسایی گسل‌های پنهان لرزه‌زا به کمک شواهد ریخت‌زمین‌ساختی و مغناطیسی در منطقه آراین‌شهر (شرق ایران). فصلنامه زمین‌شناسی ایران، شماره ۱۱، ص ۵۷-۶۶.

Ambraseys, N. N., Melville, C. P., 1982. A History of Persian Earthquakes, Cambridge Univ. Press, New York.

Berberian, M., Jackson, J. A., Qorashi, M., Khatib, M. M., Priestley, K., Talebian, M., Ghafari-Ashtiani, M., 1999. The 10 May 1997 Zirkuh (Qa'emat) earthquake (Ms 7.1): faulting along the Sistan suture zone of eastern Iran, *Geophysical Journal International* 136, 671- 694.

Berberian, M., Yeats, R. S., 1999. Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian plateau, *Bulletin of the Seismological Society of America* 89, 120- 139.

Cooper, G. R. J., Cowan, D. R., 2004. Filtering using variable order vertical derivatives, *Computer and Geosciences* 30, 455- 459.

Dooley, T. P., Schreurs, G., 2012. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results, *Tectonophysics* 574- 575, 1-71.

Engdahl, E. R., Jackson, J. A., Myers, S. C., Bergman, E. A. & Priestley, K., 2006. Relocation and assessment of seismicity in the Iran region, *Geophys. J. Int.*, 167, 761-778.

Engdahl, E. R., van der Hilst, R., Buland, R., 1998. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bulletin of the Seismological Society of America* 88, 722- 743.

HRVD, Centroid moment tensor catalogue. Harvard University, Department of Geological Sciences, Cambridge, MA 02138, USA. globalcmt.org.

ISC, International Seismological Centre, Pipers Lane, Thatcham, Berkshire RG19-4NS, UK. <http://www.isc.ac.uk>.

Kim, Y. S., Sanderson, D. J., 2005. The relationship between displacement and length of faults: a review, *Earth-Science Reviews* 68, 317- 334.

- Korhonen, K., Paanaaen, M., Paulamaki, S., 2004. Interpretation of lineaments from airborne geophysical and topographic data, Geological Survey of Finland.
- Neawsuparp, K., Charusiri, P., Meyers, J., 2005. New processing of airborne magnetic and electromagnetic data and interpretation for subsurface structures in the Loei area, Northeastern Thailand, *Science Asia* 31, 283- 298.
- Silva, A. M., Pires, A. C., McCaffery, A., 2003. Application of airborne geophysical data to mineral exploration in the uneven exposed terrains of the Rio Das Velhas greenstone belt, *Revista Brasileira de Geociencias* 33, 17-28.
- Tchalenko, J. S., Berberian, M., 1975. Dasht-e-Bayaz fault, Iran: earthquake and related structures in bedrock, *Geol. Soc. Am. Bull* 86, 703- 709.
- Walker, R., Jackson, J., 2004. Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran, *Tectonics* 23, TC5010.
- Walker, R., Khatib, M. M., 2006. Active faulting in the Birjand region of NE Iran, *Tectonics* 25, TC4016.
- Walpersdorf, A., Manighetti, I., Mousavi, Z., Tavakoli, F., Vergnolle, M., Jadidi, A., Hatzfeld, D., Aghamohammadi, A., Bigot, A., Djamour, Y., Nankali, H., Sedighi, M., 2014. Present-day kinematics and fault slip rates in eastern Iran, derived from 11 years of GPS data, *J. Geophys. Res. Solid Earth* 119, 1- 25.
- Walsh, J. J., Nicol, A., Childs, C., 2002. An alternative model for the growth of faults. *Journal of Structural Geology* 24, 1669– 1675.