

شناسایی الگوی خوشه‌ای رخداد زمین لرزه‌های پارینه روی گسل گلباف، جنوب خاوری کرمان

مجتبی بصیری^۱، حمید نظری^۲، محمد فروتن^۳، شهریار سلیمانی آزاد^۴، محمدعلی شکری^۵، مرتضی طالبیان^۲، منوچهر قرشی^۶، بهنام اویسی^۴، محمدجواد بلورچی^۵ و علی رشیدی^۷

^۱ کارشناس ارشد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۲ استادیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۳ دانشجوی دکتری، دانشگاه پاریس VI، پاریس، فرانسه

^۴ دکتری، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۵ کارشناس ارشد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۶ دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال؛ پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۷ کارشناس ارشد، مدیریت زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی جنوب خاوری، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۶/۰۱

چکیده

گستره گلباف در استان کرمان (جنوب خاوری ایران) در سال‌های ۱۳۶۰ تا ۱۳۷۶ خورشیدی شاهد رویداد پنج زمین لرزه با بزرگای میان ۵.۴-۷.۱ M_w بوده است. رویداد این زمین لرزه‌ها در بازه زمانی هفده سال نشان‌گر الگوی خوشه‌ای رخداد زمین لرزه‌ها روی سامانه گسلی گلباف (گوک) است. در این بخش با بهره‌گیری از رهیافت‌های موجود در دانش‌های ریخت‌زمین‌ساخت و پارینه‌لرزه‌شناسی نشان داده شده که در گذشته نیز رفتار لرزه‌ای این گسل در برخی از بازه‌های زمانی الگوی خوشه‌ای داشته است. بدین منظور ابتدا بررسی‌های دقیق ریخت‌زمین‌ساختی به روش نزدیک میدان انجام گرفت و با انجام پیمایش به روش RTK توسط دستگاه GPS کینماتیک، مدل ارتفاعی رقمی و نقشه توپوگرافی رقمی با دقت بالا از سطح گسیختگی‌های ایجاد شده در زمین لرزه‌های پیشین تهیه شد. با انجام بررسی‌های دقیق روی این مدل‌ها، زاویه ریک گسل گلباف نزدیک به ۱۰ درجه برآورد شد که این نشان‌دهنده چیرگی سازوکار راستالغزی آن است و با نتایج به دست آمده از روش‌های لرزه‌شناسی و مشاهدات خطوط خش‌لغز شکل گرفته بر روی سطح گسیختگی‌ها نیز همخوانی دارد. بر پایه انجام پژوهش‌های پارینه‌لرزه‌شناسی با حفر ترانشه عمود بر راستای گسل گلباف، چهار زمین لرزه پارینه با بزرگای بیش از ۶.۶ M_w شناسایی شد. با استفاده از برخی روابط تجربی موجود، بیشینه بزرگای کهن‌ترین زمین لرزه پارینه تا ۸.۲ M_w به دست آمد که این به دور از انتظار است و نشان می‌دهد همان‌گونه که امروزه در بازه زمانی کوتاهی پنج زمین لرزه روی این گسل رخ داده، در گذشته نیز رخداد زمین لرزه‌ها در برخی از بازه‌های زمانی الگوی خوشه‌ای داشته و در مدت زمانی کوتاه چندین زمین لرزه بزرگ روی داده به گونه‌ای که فرصت کافی برای نهشته‌گذاری و ثبت جداگانه شواهد آنها وجود نداشته است.

کلید واژه‌ها: سامانه گسلی گلباف، الگوی خوشه‌ای، پارینه‌لرزه‌شناسی، ریخت‌زمین‌ساخت، زمین لرزه پارینه.

*نویسنده مسئول: مجتبی بصیری

Email: mojtaba.basiri@gmail.com

۱- مقدمه

در پژوهش پیش رو خواهیم دید که به احتمال زیاد در درازنای زمانی طولانی‌تر نیز رخداد زمین لرزه‌های پارینه روی گسل گلباف در برخی از بازه‌های زمانی الگوی خوشه‌ای داشته است. برای دست‌یابی به این هدف نخست بررسی‌های دقیق ریخت‌زمین‌ساختی انجام گرفت تا برآورد قابل قبولی از مقدار زاویه ریک گسل گلباف صورت پذیرد. در ادامه به منظور انجام پژوهش‌های پارینه‌لرزه‌شناسی، ترانشه‌ای عمود بر گسل گلباف حفر و بررسی‌های انجام شده روی پهنه گسلی در دیواره این ترانشه، موجب شناسایی رخداد چهار زمین لرزه پارینه شد.

گسل گلباف نخستین بار در سال ۱۹۷۲ میلادی توسط زمین‌شناسان یوگسلاوی به نقشه درآمد و با نام گسل سروس‌تان معرفی شد (Berberian, 1976). از آن زمان تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای روی این گسل صورت گرفته و چندین مقاله بین‌المللی در رابطه با آن منتشر شده است. یکی از دلایل اصلی گستردگی این پژوهش‌ها، رخداد زمین لرزه‌های پایایی روی این گسل است (Berberian et al., 1984; Berberian & Qorashi, 1994; Berberian et al., 2001).

۲- جایگاه زمین‌ساختی سامانه گسلی گلباف

سامانه گسلی ناینند-گلباف-سبزواران از ساختارهای بنیادی ایران است و با سازوکار چیره راستالغز راست بر، حاشیه باختری بیابان لوت را تشکیل می‌دهد (شکل ۱).

رویداد زمین لرزه‌های پایایی روی یک گسل در بازه زمانی کوتاه، نشان‌گر رفتار لرزه‌ای خوشه‌ای (Clustering) آن است (McCalpin, 2009). به عنوان نمونه رویداد سه زمین لرزه با بزرگای $M_w > 8$ در گستره Gobi-Altay در مغولستان در سال‌های ۱۹۰۵ تا ۱۹۵۷ میلادی نشان‌دهنده الگوی خوشه‌ای رخداد زمین لرزه‌ها است (McCalpin, 2009). سلیمانی آزاد و همکاران (۱۳۸۸) با بررسی رویداد پنج زمین لرزه ویرانگر در سال‌های ۱۵۹۳ تا ۱۸۰۷ میلادی در گستره تبریز، به اهمیت پدیده Clustering برخی زمین لرزه‌های ناشی از جنبایی سامانه گسلی تبریز اشاره می‌کنند.

جنبایی سامانه گسلی گلباف (گوک) در جنوب خاوری کرمان، موجب رویداد پنج زمین لرزه با بزرگای ۵.۴-۷.۱ M_w در سال‌های ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۸ میلادی شده است. رویداد این زمین لرزه‌ها در بازه زمانی ۱۷ سال، نشان‌گر الگوی خوشه‌ای رخداد زمین لرزه‌ها روی گسل گلباف است. پژوهش‌های اخیر (Saboor et al., 2011) روی زمین لرزه‌های دستگاهی گسل گلباف نیز نشان می‌دهد این گسل از دیدگاه لرزه‌شناسی و رسیدگی ساختاری (Structural maturity) یک گسل رسیده (Mature) بوده و میزان جنبش زمین (Ground motion) در زمین لرزه‌های آن پایین است، به همین دلیل در رویدادهای چندگانه (Multiple events) با بزرگای گوناگون گسیخته شده و در مقیاس زمانی دراز مدت، به صورت خوشه‌ای (Clustering) رفتار می‌کند.

که در بررسی‌هایی که روی دیواره ترانشه‌های عمود بر گسل‌های راستالغز صورت می‌گیرد، تنها می‌توان مؤلفه عمودی جابه‌جایی را مشاهده و اندازه‌گیری کرد و این در حالیتی که بیشتر جابه‌جایی در این گونه گسل‌ها به صورت افقی است. با این وجود، با داشتن زاویه ریک گسل می‌توان مقدار جابه‌جایی عمودی را به مقادیر جابه‌جایی خالص و افقی گسل تبدیل کرد.

در این پژوهش با بهره‌گیری از روش‌های نزدیک میدان (Near-field technique) تلاش شده تا زاویه ریک گسل گلباف اندازه‌گیری شود. از آنجایی که این بررسی‌ها روی گسیختگی‌های سطحی ناشی از رویداد ۱۴ مارس ۱۹۹۸ فندق‌انجام شده، اعداد به دست آمده نیز مربوط به ریک گسل در همین زمین‌لرزه است. با این وجود در پایان تلاش شده تا با مقایسه اعداد به دست آمده از روش‌های مختلف، بهترین عدد برای زاویه ریک گسل گلباف پیشنهاد شود (بصیری و همکاران، ۱۳۸۹).

گستره مورد بررسی، در حدود ۱۷ کیلومتری شمال باختری شهر گلباف و در پلایای آبادی فندق‌انجام قرار گرفته است (شکل ۲). در این مکان افراز (Scarp) گسل گلباف و بریده شدن آبرفت‌های کواترنری توسط این گسل به خوبی قابل مشاهده است (شکل ۳).

به منظور برآورد زاویه ریک گسل گلباف، برداشت سطح توپوگرافی به روش RTK توسط دستگاه Kinematics GPS انجام شد. با استفاده از داده‌های این دستگاه، مدل ارتفاعی رقمی (DEM) و نقشه توپوگرافی رقمی از عوارض ریخت‌زمین ساختی جابه‌جا شده در زمین‌لرزه ۱۴ مارس ۱۹۹۸ فندق‌انجام تهیه شد. با بررسی‌های میدانی انجام‌شده در گستره‌ای که با مستطیل سرخ رنگ روی شکل ۲ نشان داده شده است، کرت‌های کشاورزی جابه‌جا شده در این زمین‌لرزه برای انجام محاسبات مربوط به برآورد زاویه ریک انتخاب شد (شکل ۴).

از آنجایی که در گستره این کرت‌ها، شیب سطح توپوگرافی نزدیک به افقی و شیب سطح گسل نزدیک به قائم است، استفاده از روابط ساده مثلثاتی برای برآورد زاویه ریک ممکن است نتیجه قابل قبولی داشته باشد. این روش روی مدل ارتفاعی رقمی این کرت‌ها که توسط GPS کینماتیک تهیه شده است انجام شد و زاویه ریک گسل حدود ۸/۵ درجه به دست آمد (شکل ۵).

با این وجود، با توجه به داده‌های موجود، از دقیق‌ترین روش ممکن برای به دست آوردن زاویه ریک استفاده شد (Nazari et al., 2009, Nazari, 2006) و در پایان مقدار ریک گسل در حدود ۶ درجه اندازه‌گیری شد. این محاسبات با استفاده از مدل ارتفاعی رقمی و نقشه توپوگرافی رقمی تهیه شده توسط GPS کینماتیک انجام شده و مراحل آن در شکل‌های ۶ تا ۸ آمده است.

در ادامه این پژوهش با مشاهده خطوط خش‌لغز شکل گرفته روی صفحه گسیختگی ناشی از زمین‌لرزه ۱۴ مارس ۱۹۹۸ فندق‌انجام، مقدار زاویه ریک به این روش نیز اندازه‌گیری شد که حدود ۱۰ درجه به دست آمد (شکل ۹).

محاسبه مقادیر ۸/۵ و ۱۰ درجه برای زاویه ریک گسل گلباف همگی نشان از چیرگی مؤلفه راستالغزی این گسل دارد و این نتیجه با آنچه که در دانش لرزه‌شناسی و با بهره‌گیری از روش Harvard CMT برای پنج زمین‌لرزه اخیر گسل گلباف به دست آمده (جدول ۱)، همخوانی دارد. در پایان با مقایسه این اعداد، مقدار ۱۰ درجه برای زاویه ریک گسل گلباف در نظر گرفته و در محاسبات پارینه‌لرزه‌شناسی نیز از همین عدد استفاده شد.

۵- بررسی‌های پارینه‌لرزه‌شناسی بر روی گسل گلباف

گستره‌ای که در شکل ۲ با مستطیل سرخ مشخص شده، جایگاه انجام پژوهش‌های پارینه‌لرزه‌شناسی بر روی گسل گلباف است. از مهم‌ترین دلایل انتخاب این مکان برای حفر ترانشه‌های پارینه‌لرزه‌شناسی عبارتند از وجود رسوبات سست

بخش مرکزی این ساختار را سامانه گسلی گلباف (گوک) تشکیل می‌دهد که با راستای کلی NNW-SSE و درازای نزدیک به ۱۶۰ کیلومتر، از جنوب سامانه گسلی نایبند در شمال تا بلندی‌های جبال‌بارز در جنوب امتداد یافته است (Berberian et al., 2001).

بر پایه بررسی‌های انجام گرفته توسط Walker & Jackson (2002) حدود ۱۲ کیلومتر جابه‌جایی تجمعی راست‌بر برای گسل گلباف پیشنهاد و با انجام سن‌یابی به روش K-Ar روی بازالت‌های جابه‌جاشده توسط این گسل، نرخ لغزش آن در حدود ۱/۵ تا ۲/۴ میلی‌متر در سال برآورد شده است. همچنین Walker et al. (2010) با بررسی رسوبات دریاچه‌ای در حوضه کششی جنوب گلباف، حدود 5 ± 30 متر جابه‌جایی راست‌بر مشاهده و با انجام سن‌یابی به روش کربن ۱۴، نرخ لغزش گسل گلباف در بازه زمانی هولوسن را حدود $0.7 \pm 3/8$ میلی‌متر در سال پیشنهاد کرده‌اند.

۳- پیشینه لرزه‌خیزی سامانه گسلی گلباف

با وجود بالا بودن شمار زمین‌لرزه‌های دستگاهی مرتبط با جنبایی گسل گلباف، از دیدگاه تاریخی تنها زمین‌لرزه‌ای که به احتمال زیاد در نتیجه جنبایی این گسل روی داده، زمین‌لرزه ۱۲۵۵ هجری سیرج است (Ambrasey & Melville, 1982)؛ یغمایی، ۱۳۷۱؛ عباس‌نژاد و داستان‌پور، ۱۳۷۸). از میان زمین‌لرزه‌های دستگاهی، پنج زمین‌لرزه اهمیت بیشتری دارند چرا که افزون بر ایجاد خسارات جانی و مالی گسترده در گستره گلباف، کوتاهی بازه زمانی رخداد آنها، نشان از رفتار لرزه‌ای خوشه‌ای گسل گلباف دارد (شکل ۱-ب).

در ۲۱ خرداد ۱۳۶۰ (۱۱ ژوئن ۱۹۸۱) زمین‌لرزه‌ای با بزرگای $M_w 6.6$ در گستره گلباف روی داد که به موجب آن حدود ۱۴۰۰ نفر کشته و ۴۰۰۰ نفر مجروح شدند و نزدیک به ۱۵ کیلومتر گسیختگی سطحی در راستای گسل گلباف ایجاد شد (Berberian et al., 1984). حدود ۴۷ روز پس از این رویداد، زمین‌لرزه دیگری با بزرگای $M_w 7.1$ در تاریخ ۶ مرداد ۱۳۶۰ (۲۸ جولای ۱۹۸۱) گستره گلباف و سیرج را به شدت تکان داد و حدود ۱۳۰۰ کشته و هزاران مجروح بر جای گذاشت. این زمین‌لرزه موجب ایجاد حدود ۶۵ کیلومتر گسیختگی سطحی ناپیوسته در دو سوی دره گلباف و در گستره میان زمان آباد تا شمال چهار فرسخ شد (Berberian et al., 1984).

حدود هشت سال بعد در ۲۹ آبان ۱۳۶۸ (۲۰ نوامبر ۱۹۸۹) زمین‌لرزه‌ای با بزرگای $M_w 5.8$ در جنوب گلباف رخ داد و به موجب آن حدود ۱۱ کیلومتر گسیختگی سطحی در نهشته‌های پلایای جنوب گلباف ایجاد شد که از افراز (Scarp) گسلی ایجادشده در رویداد ۱۱ ژوئن ۱۹۸۱ پیروی می‌کرد. از آنجا که در ناحیه رومرکز این زمین‌لرزه تعداد زیادی ساکن نبودند، تنها چهار نفر کشته و ۴۵ نفر مجروح شدند (Berberian & Qorashi, 1994).

حدود ۹ سال بعد در ۲۳ اسفند ۱۳۷۶ (۱۴ مارس ۱۹۹۸) زمین‌لرزه‌ای با بزرگای $M_w 6.6$ در گستره آبادی فندق‌انجام رخ داد و به موجب آن پنج نفر کشته و ۱۵ نفر مجروح شدند و حدود ۲۳/۵ کیلومتر گسیختگی سطحی ایجاد شد (Berberian et al., 2001). چند ماه بعد، زمین‌لرزه‌ای با بزرگای $M_w 5.4$ در ۲۸ آبان ۱۳۷۷ (۱۸ نوامبر ۱۹۹۸) در نزدیکی آبادی چهارفرسخ رخ داد که موجب شکل‌گیری شکاف‌های سطحی در اطراف پایانه شمالی سامانه گسلی گلباف شد ولی تلفاتی نداشت (Berberian et al., 2001).

۴- بررسی‌های ریخت‌زمین‌ساختی روی گسل گلباف به منظور برآورد زاویه ریک

اهمیت محاسبه زاویه ریک در پژوهش‌های پارینه‌لرزه‌شناسی به این خاطر است

برآمده از چندین زمین لرزه پارینه‌ای باشد که در بازه زمانی کوتاهی رخ داده‌اند به گونه‌ای که زمان کافی برای نهشته‌گذاری و ثبت جداگانه شواهد این زمین لرزه‌ها وجود نداشته است.

۲) زاویه ریک ۱۰ درجه که در محاسبات منظور شده است نشان از چیرگی مؤلفه راستالغزی گسل دارد، ولی ممکن است در زمان رویداد زمین لرزه پارینه چهارم به خاطر زاویه ریک بیشتر گسل، مؤلفه راستالغزی آن کوچک تر بوده باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بهره‌گیری از رهیافت‌های موجود در دانش‌های ریخت‌زمین ساخت و پارینه‌لرزه‌شناسی، تعداد چهار زمین لرزه پارینه با بزرگای ۶/۶ تا ۸/۲ در مقیاس بزرگای گشتاوری (M_w) بر حسب ریشتر روی گسل گلباف شناسایی شد. به دست آمدن عدد ۸/۲ برای بیشینه بزرگای کهن‌ترین زمین لرزه شناسایی شده در ترانسه گسل گلباف، نشان می‌دهد همان‌گونه که امروزه در یک بازه زمانی کمتر از بیست سال، پنج زمین لرزه متوسط تا بزرگ روی این گسل رخ داده، در گذشته نیز رخداد زمین لرزه‌ها روی این گسل در برخی از بازه‌های زمانی از یک مدل خوشه‌ای (Clustering) پیروی کرده و در مدت زمانی کوتاه، چندین زمین لرزه بزرگ روی داده است. به بیان دیگر، مقدار جابه‌جایی‌هایی که با بهره‌گیری از روش‌های ممکن کنونی به رخداد زمین لرزه پارینه شماره چهار نسبت داده می‌شود، حاصل چندین زمین لرزه پارینه‌ای است که در بازه زمانی کوتاهی رخ داده به طوری که فرصت کافی برای نهشته‌گذاری و ثبت جداگانه شواهد این زمین لرزه‌ها وجود نداشته است.

سپاسگزاری

این پژوهش با پشتیبانی گسترده مالی، اجرایی و پژوهشی پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به‌ویژه مدیریت زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی جنوب خاوری (مرکز کرمان) به پایان رسیده و در انتخاب ساختگاه مناسب برای حفر ترانسه‌های پارینه‌لرزه‌شناسی روی گسل گلباف، از همکاری علمی آقایان پروفیسور Michel Sebrier + Bertrand Meyer و دکتر Kristell Le Dortz از دانشگاه پاریس VI فرانسه بهره گرفته شده است که بدین وسیله از ایشان سپاسگزاری می‌شود.

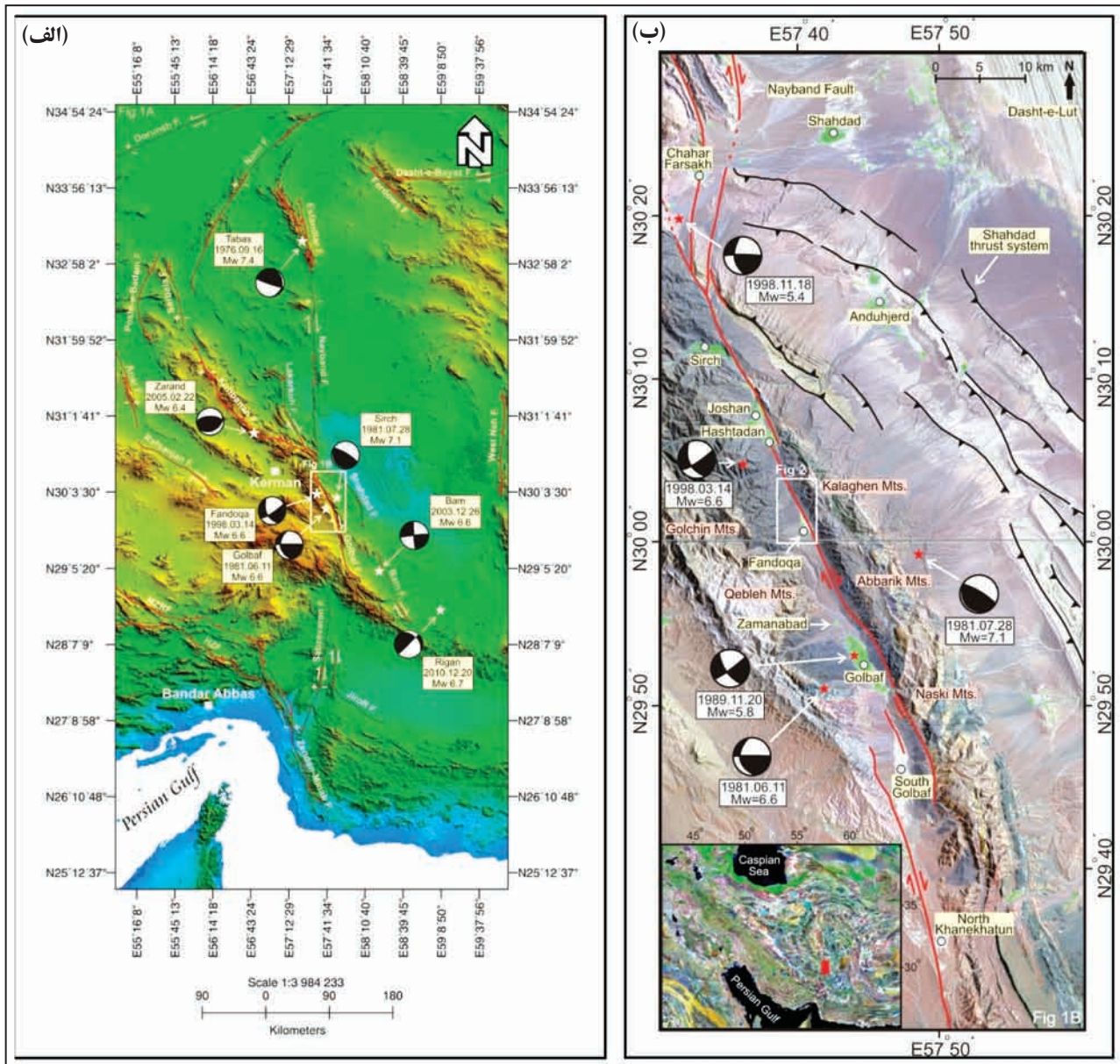
و ریزدانه که افزون بر ثبت شواهد مربوط به زمین لرزه‌های پارینه، یافتن مواد مناسب برای سن‌یابی نیز در آنها راحت‌تر است؛ وجود نهشته‌های جوانی که در اثر گسلش بریده شده‌اند و نیز کمتر بودن ارتفاع افراز گسل که نشان‌دهنده جوان‌تر بودن آن است؛ در این مکان رد گسل (Fault trace) با دقت خوبی قابل شناسایی است؛ برای محفوظ ماندن آثار حاصل از زمین لرزه‌های پارینه، رسوب‌گذاری باید به طور پیوسته و همزمان با گسلش صورت گرفته و نرخ آشفستگی در توالی چینه‌ای و از بین رفتن آثار زمین لرزه‌های پارینه می‌شود. نرخ بالای رسوب‌گذاری موجب دفن آثار زمین لرزه‌های پارینه در ژرفای زیاد و دسترسی نداشتن به آنها خواهد شد (شکل ۱۰).

در این پژوهش به منظور انجام بررسی‌های پارینه‌لرزه‌شناسی روی گسل گلباف، پهنه‌گسلی در ترانسه شماره یک انتخاب شد. شکل ۱۱ نمایی از این ترانسه و موقعیت گسیختگی‌های سطحی ناشی از رویداد ۱۴ مارس ۱۹۹۸ فندقاع را نشان می‌دهد. برای تهیه عکسی یک پارچه از پهنه‌گسلی در ترانسه، از هر متر مربع چهار عکس گرفته و در پایان این عکس‌ها پانوراما شدند (شکل ۱۲).

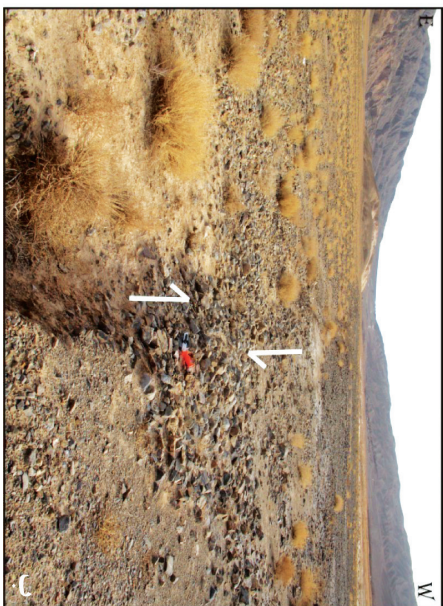
به منظور شناسایی افق‌های رخدادی (Event horizon) زمین لرزه‌های پارینه، نهشته‌های موجود در دیواره جنوبی ترانسه به روش پرچم کوبی جدا و لوگ آنها با مقیاس ۱:۲۰ رسم شد (شکل ۱۳). در ادامه با انجام بررسی‌های تکمیلی روی لوگ، چهار افق رخدادی شناسایی شد که نشان از رخداد چهار زمین لرزه پارینه است (جدول ۲). به منظور محاسبه مقدار جابه‌جایی عمودی روی صفحه گسل در هر رویداد (V_f)، عملیات بازسازی لوگ انجام شد (شکل ۱۴). با در اختیار داشتن مقدار V_f در هر رویداد زمین لرزه پارینه و با توجه به ریک ۱۰ درجه گسل گلباف، از رابطه $Net\ Slip = V_f / \sin\ Rake$ استفاده شد و مقادیر جابه‌جایی خالص در هر زمین لرزه به دست آمد (جدول ۳). در پایان با داشتن مقادیر جابه‌جایی خالص و با استفاده از روابط Wells & Coppersmith (1994) مقدار بزرگای زمین لرزه‌های پارینه محاسبه شد (جدول ۳).

با نگاهی به داده‌های جدول ۳ متوجه می‌شویم که مقادیر جابه‌جایی افقی (H) و خالص ($Net\ Slip$) و همچنین بزرگای رویداد زمین لرزه پارینه چهارم زیاد و به دور از انتظار است. برای توجیه این مقادیر می‌توان دو دلیل ارائه کرد:

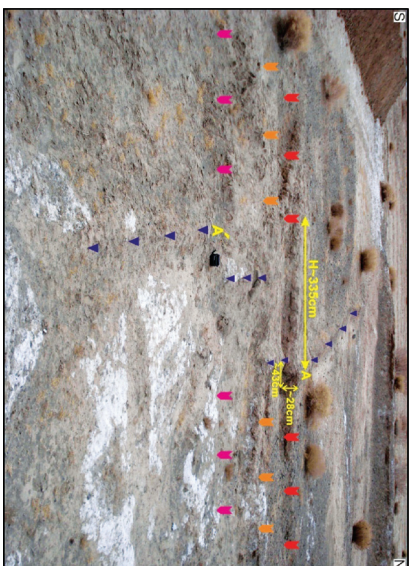
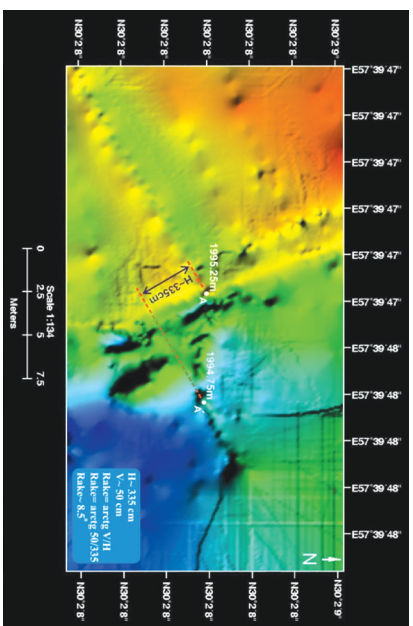
۱) همان‌گونه که امروزه در بازه زمانی کمتر از بیست سال، پنج زمین لرزه بزرگ روی سامانه گسلی گلباف روی داده است مقادیر جابه‌جایی رویداد چهارم نیز می‌تواند



شکل ۱- الف) نمایش هفت زمین‌لرزه با بزرگای $M_w > 6$ مرتبط با جنبش دهه‌های اخیر سامانه گسلی نایبند- گلباف- سبزواران روی نقشه لرزه‌زمین ساخت ساده شده این سامانه گسلی. برای تهیه این نقشه از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) حاصل از داده‌های SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر استفاده شده است. سازوکار کانونی، رومرکز و بزرگای زمین‌لرزه طیس از Harvard CMT، زمین‌لرزه‌های گلباف، سیرچ و فندق از Walker & Jackson (2002)، زمین‌لرزه بم از Jackson et al. (2006)، زمین‌لرزه زرنند از Talebian et al. (2006) و زمین‌لرزه ریگان از USGS گرفته شده است. برای رسم برخی گسل‌ها از نقشه گسل‌های فعال ایران (Hessami et al., 2003) استفاده شده است. ب) نقشه لرزه‌زمین ساخت سامانه گسلی گلباف که از تلفیق تصویر ماهواره‌ای لندست ETM+ (با ترکیب باندی RGB 742 و قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر) با مدل ارتفاعی رقومی (DEM) برگرفته از داده‌های SRTM (با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر) و نمایش رومرکز زمین‌لرزه‌های ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۸ میلادی (سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها از Walker & Jackson (2002) حاصل شده است. جایگاه این گستره روی نقشه ایران با مستطیل سرخ و روی شکل ۱-الف با مستطیل سفید نشان داده شده است. ساختگاه انتخاب شده برای انجام بررسی‌های پارینه‌لرزه‌شناسی و ریخت‌زمین‌ساختی، با مستطیل سفید مشخص و در شکل ۲ با بزرگنمایی بیشتر روی تصویر ماهواره‌ای IRS نمایش داده شده است.

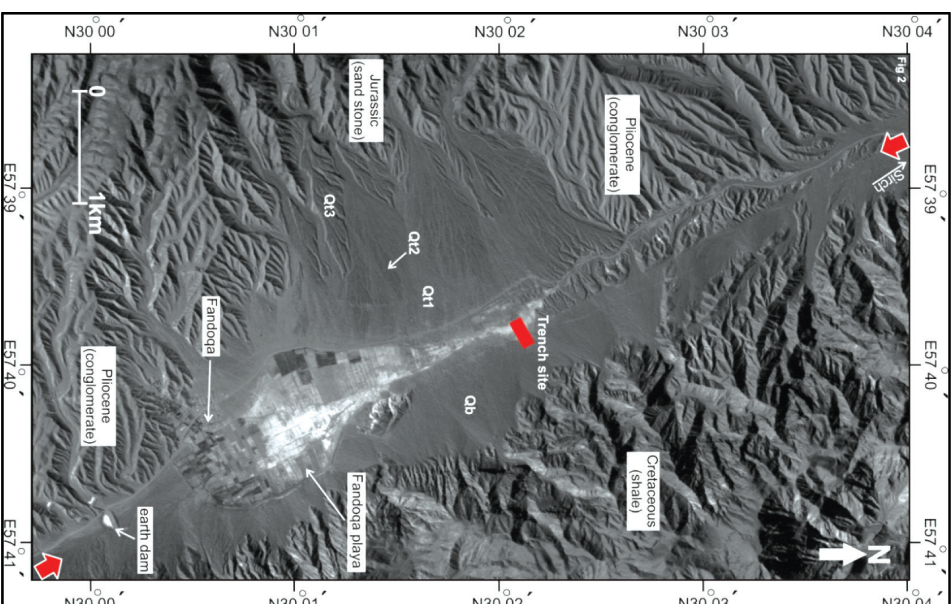


شکل ۳- الف) نمای از افراز گسل گلف در گستره حاشیه پلایای آبدی فنداق در ۱۷ کیلومتری شمال باختری شهر گلف، ب) آثار بر جای مانده از جابه‌جایی‌های ایجاد شده در زمین‌لرزه ۱۴ مارس ۱۹۹۸ فنداق، در این مکان سنگ‌بزرگ‌ها نزدیک به ۳ متر دچار جابه‌جایی راست‌بر شده‌اند.

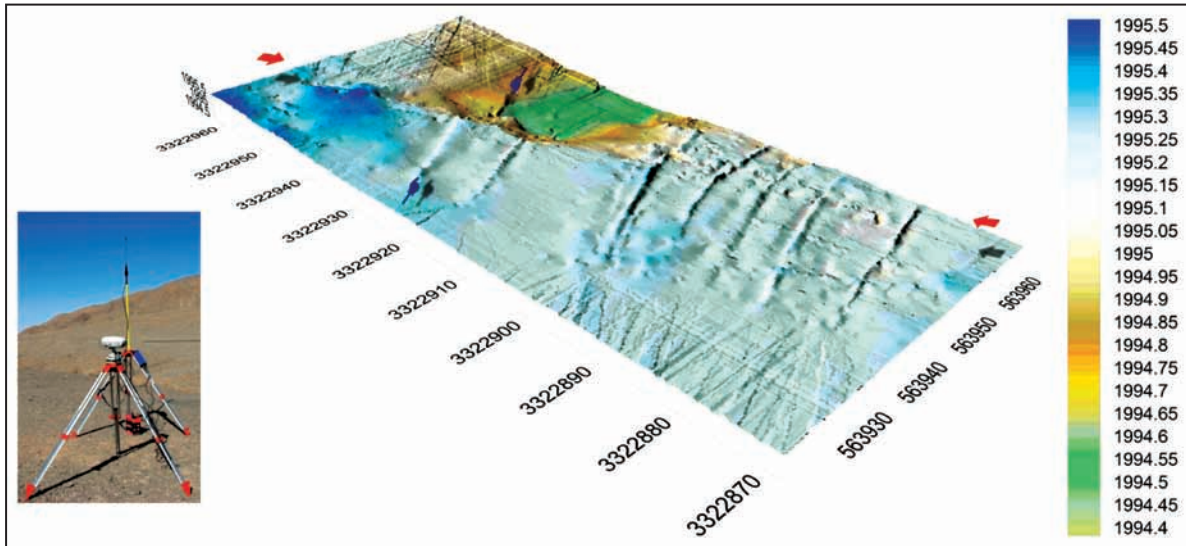


شکل ۵- اندازه‌گیری زاویه ریگ به روش مثلثاتی و با بهره‌گیری از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) کرت‌های کشاورزی شکل ۴ که با استفاده از داده‌های حاصل از برداشت سطح توپوگرافی با دستگاه GPS کینماتیک تهیه شده است. دقت بالای این مدل موجب شده است تا تغییرات طول و عرض جغرافیایی تصویر در گستره کمتر از یک ثانیه قرار گیرد.

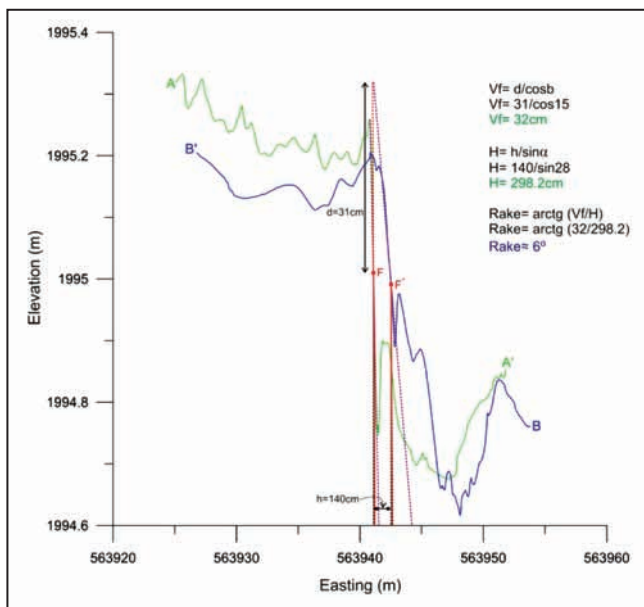
شکل ۴- کرت‌های کشاورزی در پلایای فنداق که در کل به میزان ۳۳۵ سانی‌متر و توسط سه گسیختگی هم‌زمان با زمین‌لرزه دچار بریدگی راست‌بر شده‌اند. محاسبه جابه‌جایی روی مدل ارتفاعی رقومی حاصل از پیمایش با دستگاه GPS کینماتیک، انجام شده است (شکل ۵).



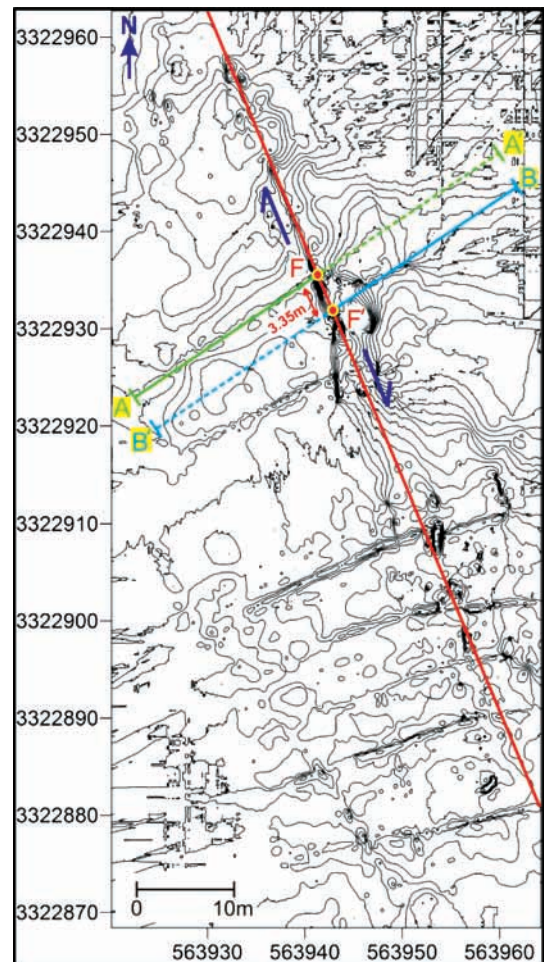
شکل ۲- تصویر ماهواره‌ای IRS با قدرت تفکیک مکانی ۵/۸ متر از گستره انتخاب‌شده برای بررسی‌های ریخت‌زمین‌شناختی و پاریزه‌شناختی بر روی گسل گلف. جایگاه این گستره بر روی شکل ۱- ب با مستطیل سفید مشخص شده است. مستطیل سرخ جایگاه حفر ترانشه‌ها و پیکان‌های سرخ رنگ ریگ گسل گلف را نشان می‌دهند. سه نسل بازن آبرفتی پلیستوسن به ترتیب از جدید به قدیم با Q1، Q2 و Q3 و نشست‌های bathida کوتاه‌تری با Q4 مشخص شده است. سد خاکی پانزده در جنوب فنداق در رویداد زمین‌لرزه ۱۴ مارس ۱۹۹۸، جابه‌جایی راست‌بر نشان داده است.



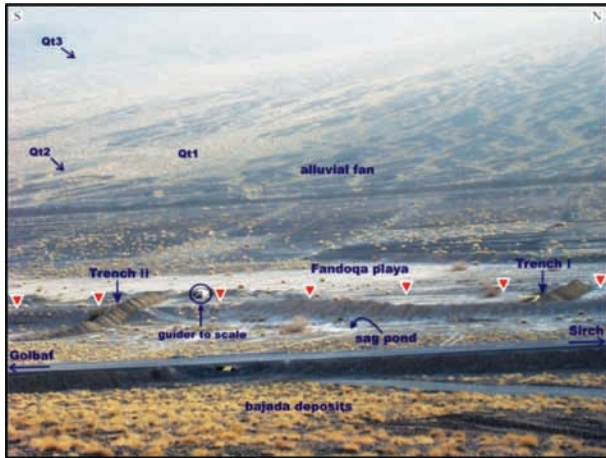
شکل ۶- نمایش سه بعدی مدل ارتفاعی رقومی (DEM) تهیه شده به روش RTK توسط دستگاه GPS کینماتیک. پیکان‌ها راستای کلی گسل گلباف و دست‌ها کرت‌های کشاورزی شکل ۴ را نشان می‌دهند. اعداد ارتفاع بر حسب متر و اعداد مختصات در سامانه UTM هستند. دستگاه GPS کینماتیکی که از آن برای تهیه این مدل استفاده شده، در گوشه تصویر نشان داده شده است.



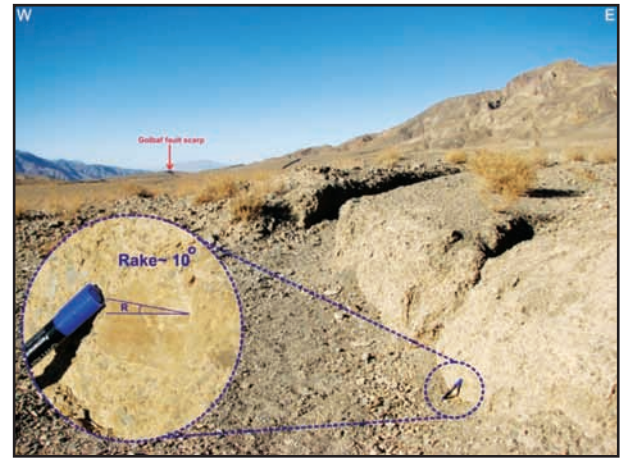
شکل ۸- محاسبه زاویه ریک گسل گلباف در زمین‌لرزه ۱۴ مارس ۱۹۹۸ با استفاده از نیمرخ‌های توپوگرافی رسم‌شده روی نقشه توپوگرافی رقومی شکل ۷. در این پژوهش راستای کلی گسل گلباف برابر با $N152^0$ و در بررسی‌های پارینه‌لرزه‌شناسی مقدار شیب شاخه اصلی گسل برابر با 75^0 درجه اندازه‌گیری شد و با توجه به این مقادیر، زاویه‌های $\alpha = 28^0$ و $b = 15^0$ به دست آمد. Vf : مقدار جابه‌جایی قائم بر روی صفحه گسل، d : مقدار جابه‌جایی قائم بر روی سطح زمین، H : مقدار جابه‌جایی افقی در راستای گسل، h : مقدار جابه‌جایی افقی در راستای طول یا عرض جغرافیایی (در اینجا بیشترین گسترش عارضه مورد بررسی در راستای طول جغرافیایی بوده است)، b : متمم زاویه شیب گسل ($b + \delta = 90^0$) و α زاویه تند میان راستای گسل و امتداد شمال جغرافیایی.



شکل ۷- نقشه توپوگرافی رقومی مدل ارائه شده در شکل ۶ حاصل از داده‌های GPS کینماتیک و نمایش مسیرهای نیمرخ‌های توپوگرافی رسم‌شده به منظور محاسبه دقیق مقادیر جابه‌جایی کرت‌های کشاورزی شکل ۴.



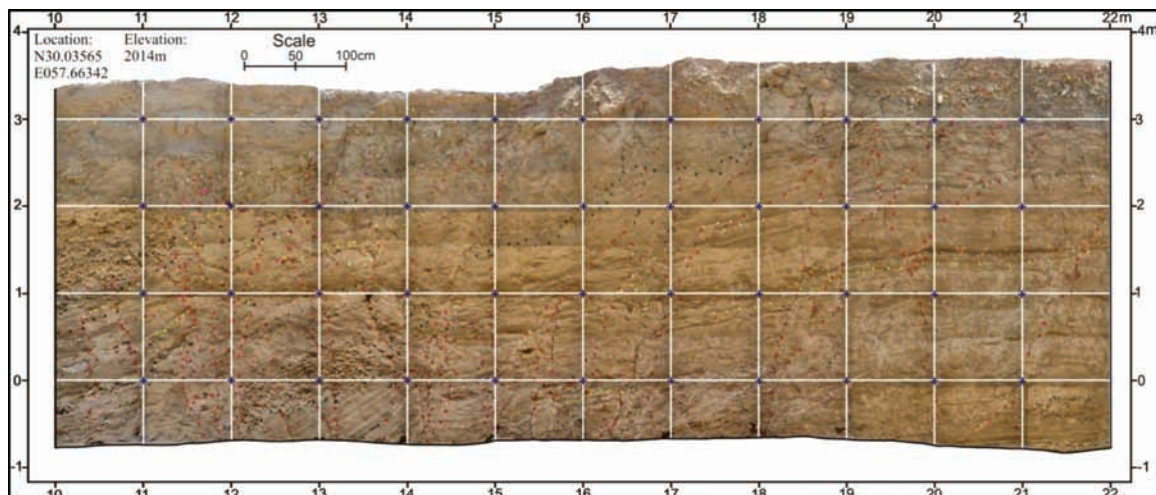
شکل ۱۰- جایگاه حفر ترانشه‌های پارینه‌لرزه‌شناسی روی گسل گلباف. راستای افراز گسل با مثلث‌های سرخ و سه نسل بادزن آبرفتی پلیستوسن از جدید به قدیم به ترتیب با Qt_1 ، Qt_2 و Qt_3 مشخص شده است. راستای کلی گسل $N152^0$ است و ترانشه‌ها با راستای $N062^0$ به صورت عمود بر گسل حفر شده‌اند.



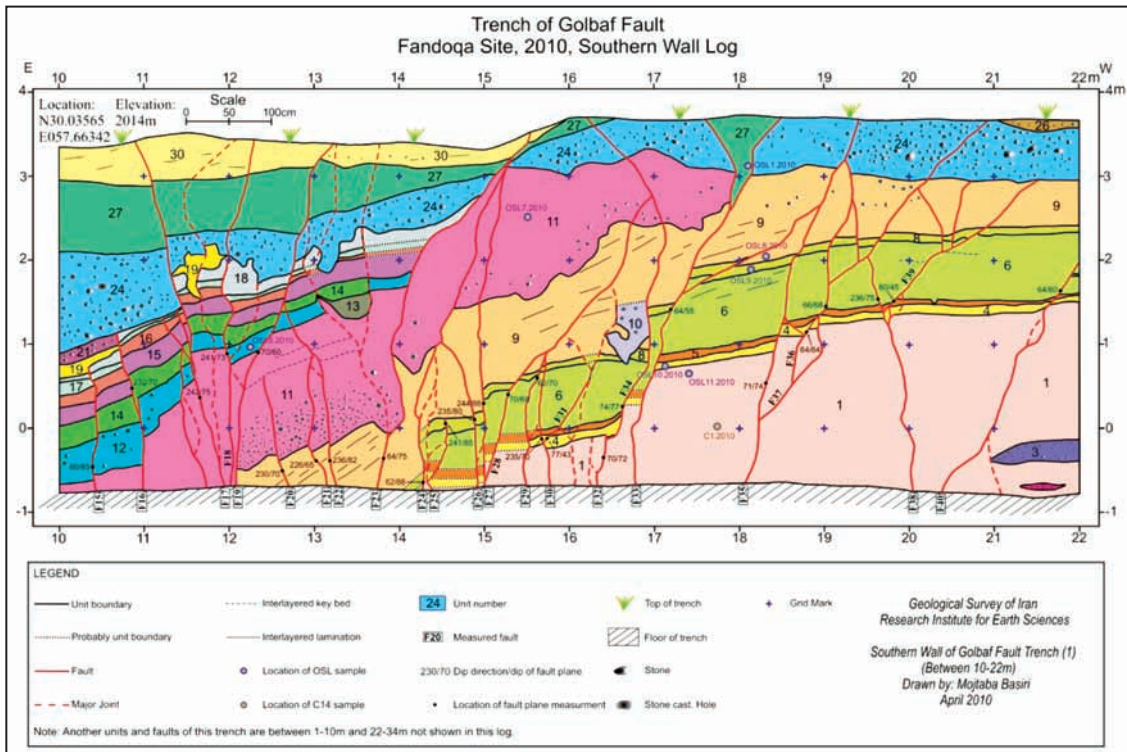
شکل ۹- اندازه‌گیری زاویه ریک گسل گلباف در رویداد زمین‌لرزه ۱۴ مارس ۱۹۹۸ فندق‌اق با بهره‌گیری از خطوط خش‌لغز شکل گرفته روی صفحه گسیختگی ناشی از این رویداد.



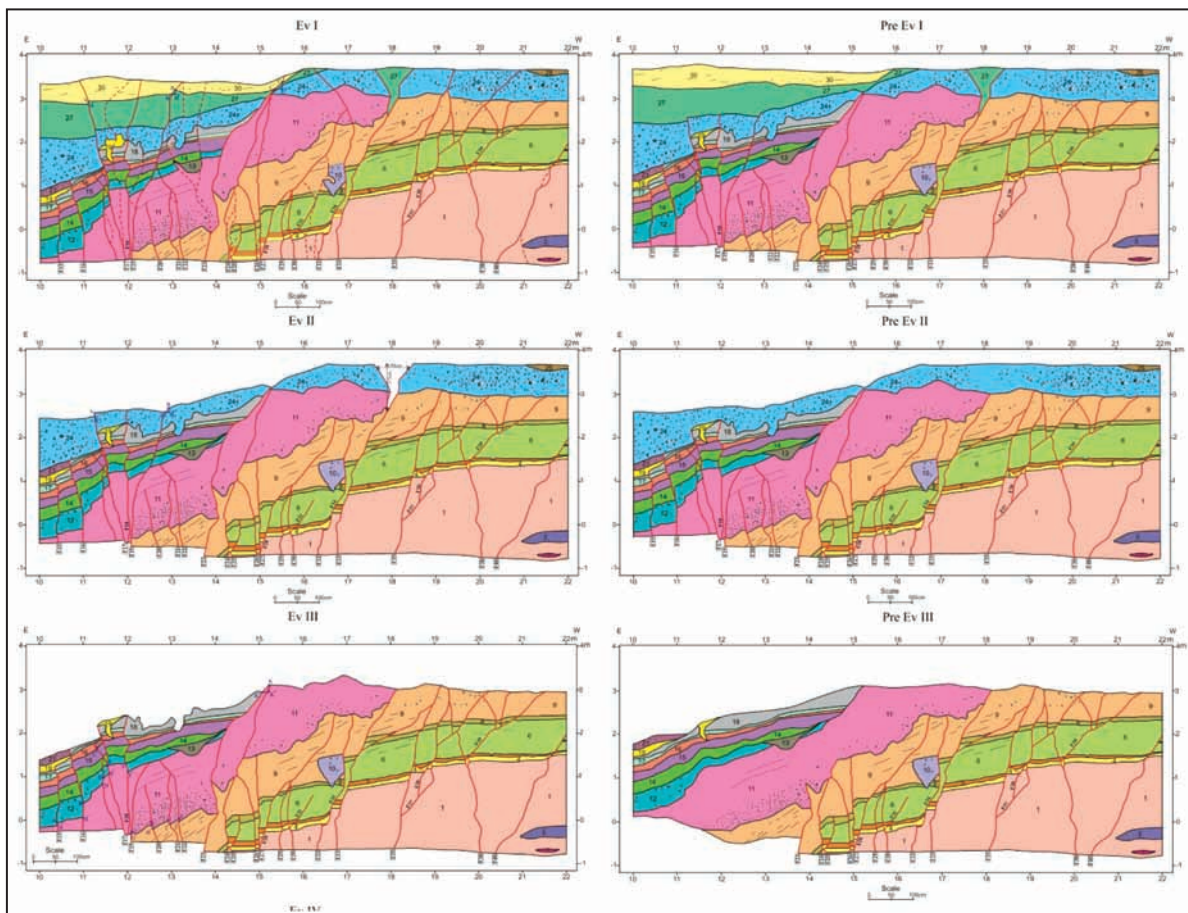
شکل ۱۱- نمایی از ترانشه شماره یک گسل گلباف. آثار گسیختگی‌های سطحی ناشی از زمین‌لرزه ۱۴ مارس ۱۹۹۸ با مثلث‌های سرخ نشان داده شده است.



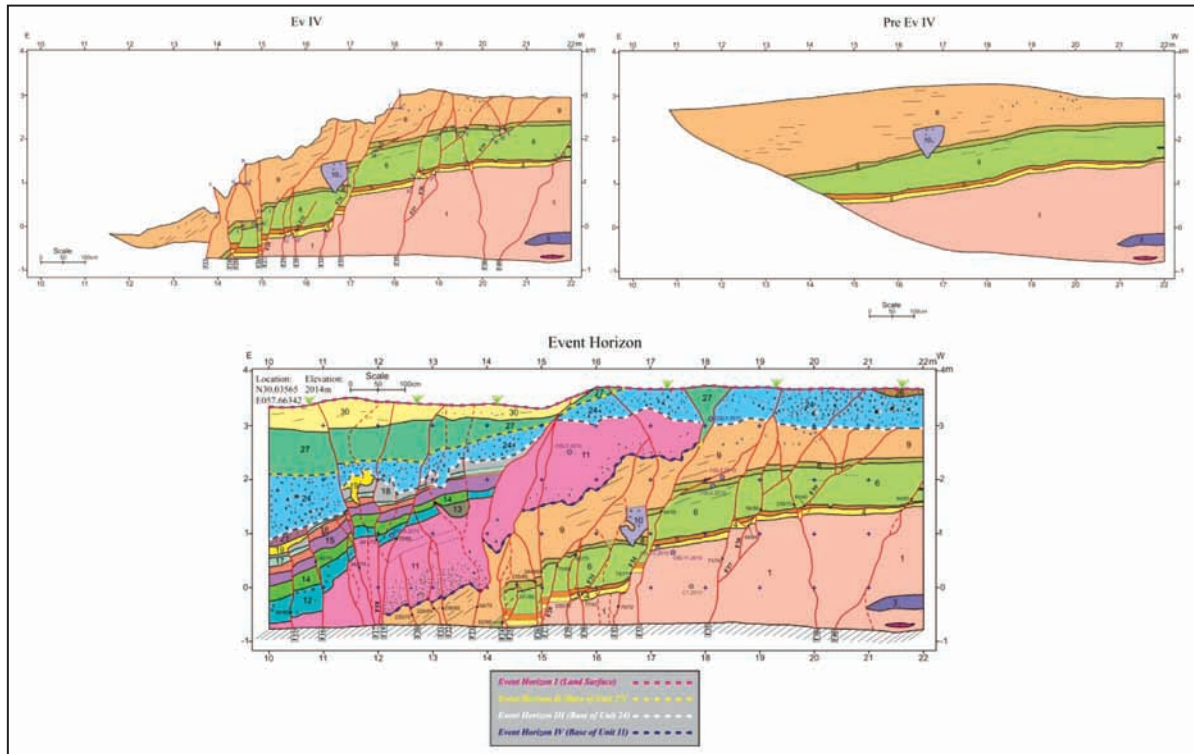
شکل ۱۲- نمای پانوراما شده از پهنه اصلی گسلی در دیواره جنوبی ترانشه شماره یک گسل گلباف. برای تهیه این تصویر حدود ۲۰۰ عکس (هر متر مربع ۴ عکس) از دیواره ترانشه گرفته و پانوراما شد.



شکل ۱۳- لوگ پارینه‌لرزه‌شناسی تهیه‌شده با مقیاس ۱:۲۰ از پهنه اصلی گسلی در دیواره جنوبی ترانسه شماره یک گسل گلباف



شکل ۱۴- نمایش مراحل بازسازی لوگ پارینه‌لرزه‌شناسی برای چهار زمین‌لرزه پارینه شناسایی شده روی گسل گلباف به همراه نمایش افق‌های رخدادی آنها.



ادامه شکل ۱۴

جدول ۱- ریک های گسل گلباف در پنج لرزه بزرگ آن بر پایه کاتالوگ لرزه ای CMT

Date	Time (GMT)	Lat.	Lon.	Depth	M _w	Strike	Dip	Slip (Rake)
1981.06.11	7:24	29.69	57.36	20	6.6	172	37	171
1981.07.28	17:22	30.03	57.58	15.2	7.1	150	13	119
1989.11.20	4:19	29.89	57.8	15	5.8	148	81	165
1998.03.14	19:40	29.95	57.6	15	6.6	154	57	-174
1998.11.18	7:39	30.26	57.38	15	5.4	174	55	173

جدول ۲- شواهد افق های رخدادی شناسایی شده در پهنه اصلی گسلی در دیواره جنوبی ترانسه شماره یک گسل گلباف

شواهد	افق لرزه ای (event horizon)	رویداد (event)
شکل گیری گسل هایی همچون F17, F18, F19, F23, F33, F34 تا سطح زمین	سطح کنونی زمین	رویداد I
شکستگی پر شده با نهشته های واحد ۲۷ (بین مترهای ۱۸-۱۷ لوگ)	قاعده واحد ۲۷	رویداد II
خاتمه گسل هایی همچون F16 در قاعده واحد ۲۴	قاعده واحد ۲۴	رویداد III
خاتمه جابجایی شاقولی گسل هایی همچون F27, F28, F32 در قاعده واحد ۱۱	قاعده واحد ۱۱	رویداد IV

جدول ۳- برآورد مقادیر جابه جایی و بزرگای زمین لرزه های پارینه شناسایی شده روی گسل گلباف

Event	Event Horizon	Units	V _f (m)	H (m)	Net Slip (m)	M _w (AD) SS	M _w (MD) SS	M _w (AD) G	M _w (MD) G	M _w
I	Land Surface	30,27,24,26	0.39	2.22	2.25	7.35	7.08	7.22	6.95	7.1±0.2
II	Base of Unit 27	24,26	0.15	0.85	0.86	6.98	6.76	6.88	6.64	6.8±0.2
III	Base of Unit 24	21,18,19,11,9	1.46	8.28	8.41	7.86	7.53	7.69	7.37	7.6±0.2
IV	Base of Unit 11	9	3.68	20.87	21.19	8.22	7.84	8.02	7.67	7.9±0.3

Net Slip = V_f/Sin Rake
 Net Slip = H/Cos Rake
 Rake = 10°
 V_f: Vertical component of displacement projected along the fault
 H: Horizontal component of displacement
 M_w: Moment Magnitude

AD: Avarage Displacement
 MD: Maximum Displacement
 SS: Strike Slip
 G: General

SS: M_w = 7.04 + 0.89 log(AD)
 SS: M_w = 6.81 + 0.78 log(MD)
 G: M_w = 6.93 + 0.82 log(AD)
 G: M_w = 6.69 + 0.74 log(MD)
 Wells & Coppersmith (1994)

کتابنگاری

- بصیری، م.، نظری، ح.، فروتن، م.، شکری، م. ع.، سلیمانی‌آزاد، ش.، میر، ب.، سبیر، م.، لو دورتز، ک.، اویسی، ب. و بلورچی، م. ج.، ۱۳۸۹- شناسایی زمین‌لرزه‌های پارینه گسل گل‌باف با بهره‌گیری از بررسی‌های ریخت‌زمین‌ساختی. بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۲۶ تا ۲۷ بهمن ۸۹
- بصیری، م.، نظری، ح.، فروتن، م.، شکری، م. ع.، سلیمانی‌آزاد، ش.، میر، ب.، سبیر، م.، لو دورتز، ک.، اویسی، ب.، بلورچی، م. ج.، طالبیان، م. و قرشی، م.، ۱۳۸۹- نخستین یافته‌های پارینه‌لرزه‌شناسی بر روی گسل گل‌باف (حاشیه باختری بیابان لوت). چهاردهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران و بیست و هشتمین گردهمایی علوم زمین، دانشگاه ارومیه، ۲۵ تا ۲۷ شهریور ۸۹
- سلیمانی‌آزاد، ش.، فیلیپ، ه.، حسامی‌آذر، خ. و دومینگر، ا.، ۱۳۸۸- چگونگی رویداد گسلش زمین‌لرزه‌ای در منتهی‌الیه جنوب شرقی شبکه گسلی گیلاتو- سیاه چشمه- خوی و نقش آن در بررسی‌های برآورد خطر زمین‌لرزه در شمال غرب ایران. بیست و هفتمین گردهمایی علوم زمین و سیزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۹ تا ۲۱ بهمن ۸۸
- عباس‌نژاد، ا. و داستان‌پور، م.، ۱۳۷۸- زلزله‌ها و زلزله‌خیزی استان کرمان، سازمان مسکن و شهرسازی استان کرمان، کمیته فرعی مقابله با خطرات ناشی از زلزله و لغزش لایه‌های زمین، انتشارات خدمات فرهنگی کرمان، ۲۵۵ص.
- یغمایی، م. ع.، ۱۳۷۱- طرح مطالعه لرزه‌خیزی استان کرمان، جلد اول، وزارت معادن و فلزات، شرکت توسعه علوم زمین.

References

- Ambraseys, N. N. & Melville, C. P., 1982- A history of Persian earthquakes, Cambridge University Press, UK.
- Berberian, M. & Qorashi, M., 1994- Coseismic fault-related folding during the South Golbaf earthquake of November 20, 1989, in southeast Iran. *Geology*, 22, 531-534.
- Berberian, M., 1976- "Contribution to the Seismotectonics of Iran (Part II)", Geological survey of Iran, Report No. 39.
- Berberian, M., Jackson, J. A., Fielding, E., Parsons, B. E., Priestley, K., Qorashi, M., Talebian, M., Walker, R., Wright, T. J. & Baker, C., 2001- The 1998 March 14 Fandoqa earthquake (Mw 6.6) in Kerman province, southeast Iran: re-rupture of the 1981 Sirch earthquake fault, triggering of slip on adjacent thrusts and the active tectonics of the Gowk fault zone. *Geophys. J. Int.* (2001) 146, 371-398.
- Berberian, M., Jackson, J. A., Ghorashi, M. & Kadjar, M. H., 1984- Field and Teleseismic observations of the 1981 Golbaf-Sirch earthquakes in SE Iran, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 77, 809-838.
- Hessami, K. H., Jamali, F. & Tabassi, H., 2003- "Major active faults of Iran", International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran.
- <http://earthquake.usgs.gov>
- <http://www.globalcmt.org>
- Jackson, J., Bouchon, M., Fielding, E., Funning, G., Ghorashi, M., Hatzfeld, D., Nazari, H., Parsons, B., Priestley, K., Talebian, M., Tatar, M., Walker, R. & Wright, T., 2006- "Seismotectonic, rupture process, and earthquake-hazard aspects of the 2003 December 26 Bam, Iran, earthquake". *Geophys. J. Int.*, 166, 1270-1292.
- McCalpin, J. P., 2009- *Paleoseismology*, Academic Press Inc., Elsevier Inc., 2nd ed., 613pp.
- Nazari, H., 2006- "Analyse de la tectonique récente et active dans l'Alborz Central et la région de Téhéran : « Approche morphotectonique et paléoseismologique »". Ph.D. thesis, Univ. of Montpellier II, France.
- Nazari, H., Ritz, J. F., Salamati, R., Shafei, A., Ghassemi, A., Michelot, J. L., Massault, M. & Ghorashi, M., 2009- Morphological and Paleoseismological analysis along the Taleghan fault (Central Alborz, Iran), *Geophys. J. Int.*, 178, 1028-1041.
- Saboor, N., Ghassemi, M. R., Eskandari, M., Oveisi, B. & Talebian, M., 2011- Influence of structural maturity of active faults in eastern Iran on the strong ground motion, 6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE6), May 2011, Tehran, Iran.
- Talebian, M., Biggs, J., Bolourchi, M., Copley, A., Ghassemi, A., Ghorashi, M., Hollingsworth, J., Jackson, J., Nissen, E., Oveisi, B., Parsons, B., Priestley, K. & Saiidi, A., 2006- "The Dahuiyeh (Zarand) earthquake of 2005 February 22 in central Iran: reactivation of an intramountain reverse fault". *Geophys. J. Int.* 164, 137-148.
- Walker, R. & Jackson, J., 2002- Offset and evolution of the Gowk fault, S.E. Iran: a major intra- continental strike- slip system. *J. Struct. Geol.*, 24, 1677-1698.
- Walker, R. T., Talebian, M., Sloan, R. A., Rasheedi, A., Fattahi, M. & Bryant, C., 2010- Holocene slip- rate on the Gowk strike-slip fault and implications for the distribution of tectonic strain in eastern Iran. *Geophys. J. Int.* (2010), doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04538.x
- Wells, D. L. & Coppersmith, K. J., 1994- New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bull. Seismo. Soc. Am.* 84, 974-1002.