



برآورد آهنگ لغزش پلیستوسن پایانی و هولوسن در امتداد گسل پایین دست دره تاگوس، پرتغال مرکزی

محمد فروتن (نویسنده مسئول)^۱، محدثه ترکمنی^۲

^۱ استادیار، دانشکده زمین شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران foroutan.md@ut.ac.ir

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده زمین شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران m.torkamani@ut.ac.ir

چکیده

برآورد کمیت و الگوی دگرشکلی پویا در نواحی درون قاره‌ای با آهنگ دگرشکلی اندک همواره با چالش‌هایی روبرو است. پهنه پرتغال مرکزی، یکی از مناطق درون قاره‌ای است که دگرشکلی پویای آن با آهنگ دگرشکلی اندک، متأثر از همگرایی ورقه‌های اوراسیا و نوبیا است. یکی از مهمترین ساختارهای پویا در پهنه پرتغال مرکزی، در امتداد پایین دست دره تاگوس با راستای کلی شمال خاوری - جنوب باختری جای دارد. این گستره که به‌عنوان یکی از مراکز جمعیتی اصلی جنوب باختری ایبریا به‌شمار می‌رود، میزبان رخداد چندین زمین‌لرزه دستگاهی و تاریخی با بزرگای متوسط و بزرگ بوده است. هر دو حاشیه خاوری و باختری این دره با گسل‌های راست‌الغز چپ‌بر پویا کنترل می‌شوند. هدف این مطالعه، بررسی ویژگی‌های ریخت‌زمین‌ساختی و برآورد آهنگ لغزش زمین‌شناختی سامانه گسلی خاوری در بازه زمانی کواترنری پایانی است. در این راستا، از داده‌های لایدار با قدرت تفکیک مکانی ۰/۵ متر، تصاویر orthophoto با اندازه پیکسل برابر با ۲۰ سانتی‌متر، تصاویر و مدل توپوگرافی حاصل از برداشت پهپاد با اندازه پیکسل برابر با ۵ سانتی‌متر، برداشت‌های میدانی، و سن‌یابی به روش لومینسانس نوری استفاده شده است. نتایج سن‌یابی و اندازه‌گیری جابه‌جایی چپ‌بر نشانگرهای ریخت‌زمین‌ساختی در امتداد بخش مرکزی گسل، کمینه آهنگ لغزش را برابر با ۰/۱۷ میلی‌متر در سال پیشنهاد می‌دهد. از سوی دیگر، بررسی مقدار و الگوی جابه‌جایی جانبی نشانگرهای ریخت‌زمین‌ساختی دلالت بر رخداد زمین‌لرزه‌های پارینه با بزرگای حدود ۷ Mw دارد. بنابراین، گرچه این سامانه گسلی آهنگ لغزش بسیار اندکی را تجربه می‌کند، اما توانایی تولید زمین‌لرزه‌های بزرگ با میانگین دوره بازگشت بسیار طولانی (بیش از ۱۴ هزار سال) را داراست. سامانه گسلی پایین دست دره تاگوس، نمونه دیگری از ساختارهای پویا با آهنگ لغزش بسیار اندک است که ضرورت توجه جامعه متخصص و سیاست‌گذاران به حوزه خطر و خطرپذیری لرزه‌ای در گستره‌های درون قاره‌ای، همچون پهنه ایران زمین را بیش از پیش نمایان می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: آهنگ لغزش، پهنه درون قاره‌ای، گسل راست‌الغز، زمین‌لرزه پارینه، لایدار



۱. مقدمه

در بسیاری از پهنه‌های درون‌قاره‌ای، به‌ویژه در گستره‌های به دور از مرزهای بین‌ورقه‌ای، با توجه به آهنگ دگرشکلی اندک تا متوسط و پراکنش گسترده دگرشکلی روی ساختارهای پویا انتظار می‌رود تا زمین‌لرزه‌های بزرگ با میانگین دوره بازگشت‌های درازمدت (چند هزار سال) ایجاد شوند. یکی از گستره‌های درون‌قاره‌ای با دگرشکلی پویا، شبه‌جزیره ایبریا (Iberia) در جنوب باختر قاره اروپا است که تحت تاثیر تنش‌های حاصل از برهم‌کنش دو ورقه اوراسیا و آفریقای شمالی (Nubia Plate) قرار دارد. جایی که داده‌های ژئودتیک نشان از همگرایی امروزی ورقه‌های آفریقای شمالی و اوراسیا با آهنگی برابر با 1 ± 5 میلی‌متر در سال دارند [6, 10, 12]. ورقه ایبریا در حاشیه جنوب باختری ورقه اوراسیا، و در شمال ورقه آفریقای شمالی جای دارد. گستره ایبریا-مغرب شامل پرتغال، اسپانیا، بخش‌های شمالی مراکش، و الجزایر است که در مجاورت همگرایی بین ورقه‌های اوراسیا و آفریقا جای گرفته است. با استفاده از داده‌های GPS مقدار دگرشکلی امروزی در جنوب باختر ایبریا به مقدار ۲ میلی‌متر در سال و بین ۳۰ تا ۵۰ درصد از کل حرکت نسبی دو ورقه اوراسیا و آفریقای شمالی برآورد شده است [13]. میانگین آهنگ لغزش بلندمدت گسل‌های جنوب باختر ایبریا (دربرگیرنده پرتغال، جنوب باختر اسپانیا، و مراکش) با استفاده از مدلسازی نوزمین‌ساختی بین ۱-۲ میلی‌متر در سال گزارش شده است [5]. به بیان دیگر، کمتر از ۵۰٪ حرکت نسبی بین دو ورقه اوراسیا و آفریقای شمالی با این گسل‌ها جبران می‌شود. تحلیل داده‌های GPS برداشت شده در گذر ۱۵ سال نشان از حرکت بخش‌های مرکزی و شمال پرتغال (نسبت به اوراسیا) با آهنگی نزدیک به ۱ میلی‌متر در سال به سوی شمال دارد [11].

گستره پایین‌دست دره تاگوس (Lower Tagus Valley; LTV) یکی از پرجمعیت‌ترین گستره‌های جنوب باختری ایبریا به‌شمار می‌آید [16]. این دره با راستای کلی NE-SW در حاشیه خاوری اقیانوس اطلس در شمال خاور پایتخت پرتغال (لیسبون) جای دارد (شکل ۱). رودخانه تاگوس با درازای ۱۰۴۰ کیلومتر، دهمین رودخانه بزرگ اروپا و طولانی‌ترین رودخانه شبه‌جزیره ایبریا است [8, 17]. LTV با درازای نزدیک به ۱۰۰ کیلومتر و پهنای ۱۰ کیلومتر دربرگیرنده نهشته‌های رودخانه‌ای و جزرومدی است [17]. حاشیه‌های خاوری و باختری بخش‌های پایین‌دست دره تاگوس با گسل‌های راستالغز چپ‌بر کنترل می‌شوند. پهنه گسلی گستره پایین‌دست دره تاگوس (Lower Tagus Valley Fault Zone; LTVFZ) یکی از پهنه‌های ساختاری اصلی درون‌ورقه‌ای گستره پرتغال است که با درازای ۸۰ کیلومتر [1] و راستای NNE-SSW در کرانه‌های دره تاگوس جای دارد [2, 4]. تا به امروز، چندین زمین‌لرزه تاریخی و دستگاهی با بزرگای متوسط و بزرگ در گستره LTV گزارش شده است. گرچه در بسیاری موارد، گسل مسبب رخداد زمین‌لرزه‌ها شناخته شده نیست و همچنان با ابهام روبرو است [16]. رخداد این زمین‌لرزه‌ها نشان از پویایی لرزه‌ای و وجود چشمه‌های لرزه‌زا در این گستره دارد. گستره LTVFZ دربرگیرنده قطعه‌گسل‌های گوناگونی است که به سبب (۱) پوشش ستبر نهشته‌های کواترنری پایانی، (۲) پوشش گیاهی گسترده و انبوه، و (۳) دست‌خوردگی توپوگرافی با فعالیت‌های کشاورزی، ویژگی‌های هندسی، جنبشی، و لرزه‌ای آنها با ابهام روبرو است.

نقشه‌های زمین‌شناختی تهیه شده در گستره LTV تا پیش از آغاز سده بیست و یکم (Serviços Geológicos de Portugal, 1952, 1977, 1999) نشان از وجود ساختار گسلی پیوسته در LTV ندارد. تنها، قطعه‌گسل‌هایی با راستای NE-SW به نقشه درآمده‌اند که واحدهای زمین‌شناختی به سن ژوراسیک و میوسن را در باختر LTV (شامل شهرهای Vila Franca de Xira, Santarem, و Azambuja) بریده‌اند. از سوی دیگر، نشانه‌های زمین‌ریخت‌شناختی نشان از گسلش در LTV دارد [1, 2]. موقعیت مکانی برخی قطعه‌های گسلی در گستره LTV با داده‌های لرزه‌بازتابی (seismic reflection) و برخی دیگر با انجام بررسی‌های پارینه‌لرزه‌شناختی به‌دست آمده است [7]. نخستین نقشه تهیه شده از گسله‌های پویا پیرامون بخش‌های پایین‌دست کرانه شمال باختری رودخانه تاگوس نشان از جای‌گیری و پویایی شاخه باختری پهنه گسلی LTVFZ به درازای ۸۰ کیلومتر در نهشته‌های کواترنری پایانی دارد [1]. همچنین، نشانه‌های زمین‌ریخت‌شناختی در نهشته‌های رودخانه‌ای کواترنری نشانگر جابه‌جایی راستالغز چپ‌بر است [4]. داده‌های به‌دست آمده از نیمرخ‌های لرزه‌بازتابی در کرانه شمال باختری LTV، در ۲۵ کیلومتری لیسبون روی قطعه‌گسل Vila Franca de Xira کارکرد سازوکار ترفشارشی برای این پهنه گسلی را پیشنهاد می‌دهند [16].



با وجود همه این کوشش‌ها، همچنان مکان دقیق، سازوکار، آهنگ لغزش، و شیوه جنبایی ساختارهای گسلی اصلی در پهنه LTV با پرسش‌هایی روبرو است. در پژوهش حاضر با تمرکز روی شاخه خاوری پهنه گسلی LTVFZ تلاش شده است تا با بهره‌گیری از داده‌های دورسنجی با قدرت تفکیک مکانی بالا و بسیار بالا، جایگاه و رد گسل شناسایی و ترسیم شود. به دلیل وجود پوشش گیاهی در گستره LTV استفاده از فناوری لایدار (Light Detection and Ranging; LiDAR) بسیار کلیدی است. با استفاده از این داده‌ها و حذف پوشش گیاهی، مدل سطح توپوگرافی با دقت مسطحاتی و ارتفاعی بسیار بالایی تهیه شده است. از این رو، شناسایی پدیده‌های ریخت‌زمین-ساختی جوان با اثر سطحی اندک در امتداد گسل امکان‌پذیر شده است. با بهره‌گیری از داده‌های ابر نقطه (point cloud) حاصل از برداشت لایدار در گستره‌ای با پهنای نزدیک به یک کیلومتر در امتداد ELTVF، به شناسایی و اندازه‌گیری پدیده‌های ریخت‌زمین‌ساختی جوان (پلیستوسن پایانی و هولوسن) پرداخته شده است. از این رو، الگوی پراکنش و مقدار جابه‌جایی‌های جوان در امتداد ELTVF تهیه و پیشنهاد شده است. با استفاده از نتایج سن‌یابی بادزن آبرفتی متروکه به روش لومینسانس نوری و جابه‌جایی چپ‌بر نشانگرهای ریخت-زمین‌ساختی، آهنگ لغزش زمین‌شناختی در گذر ۴۴ هزار سال گذشته برآورد شده است.

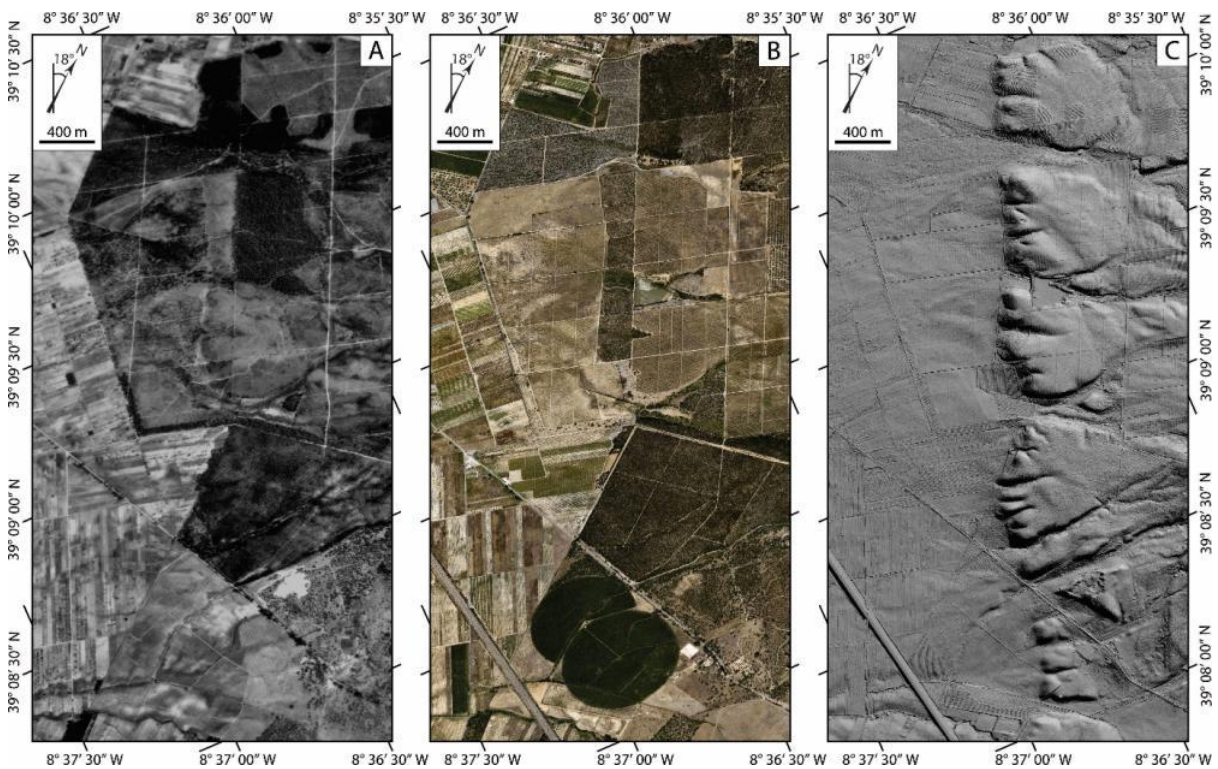


شکل ۱) جایگاه سرزمین پرتغال از دیدگاه زمین‌ساختی و لرزه‌زمین‌ساختی. زمین‌لرزه‌های دستگاهی با بزرگای بیش از ۶ با دایره‌های سرخ‌رنگ (برگرفته از کاتالوگ NEIC؛ <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>)، و زردرنگ (برگرفته از کاتالوگ ISC؛ <http://isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>)، و زمین‌لرزه‌های تاریخی با بزرگای بیش از ۶ با دایره‌های صورتی‌رنگ [14] نشان داده شده‌اند. خط‌های سرخ‌رنگ ممتد [15] و خط‌چین [10] نشانگر مرز ورقه‌های اوراسیا - نوبیا، و پیکان‌های زردرنگ نشانگر بردارهای سرعت GPS برگرفته از [3] هستند. چهار گوش سرخ‌رنگ نشان‌دهنده گستره مورد بررسی در پژوهش حاضر است.



۲. رد سطحی گسل‌های پویا در گستره پایین دست دره تاگوس

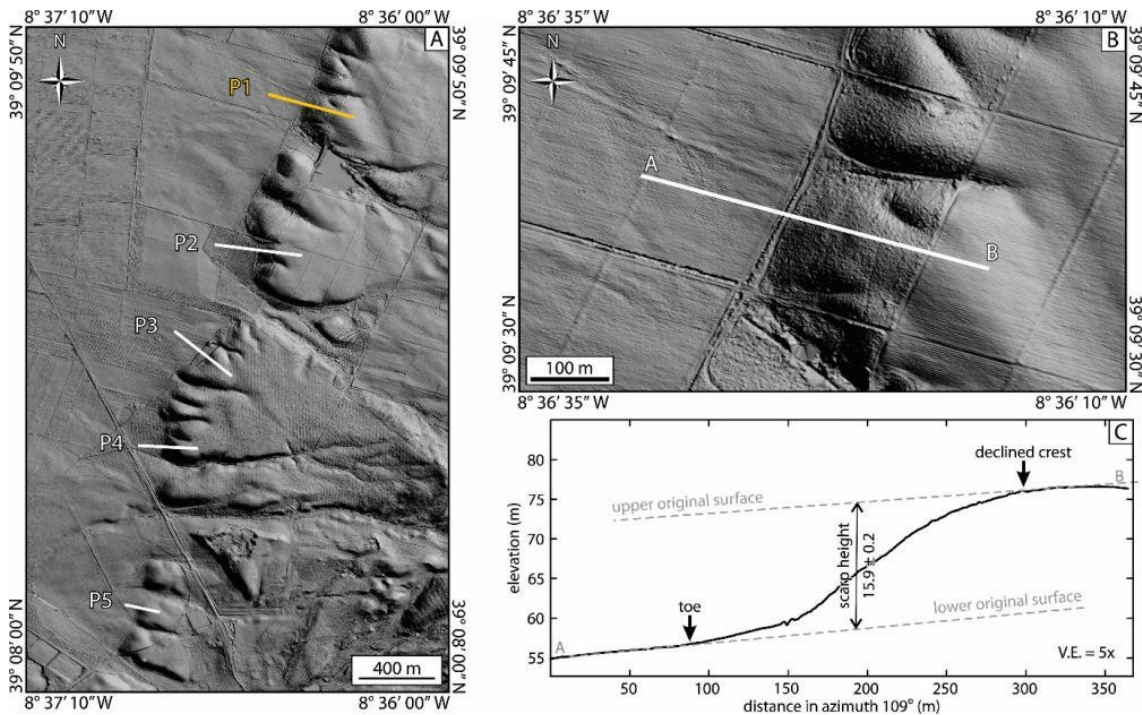
در گام نخست تلاش شده است تا با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی موجود (مقیاس ۱:۵۰۰۰۰) و نگاره‌های هوایی با مقیاس ۱:۳۰۰۰۰ تهیه شده بین سال‌های ۱۹۴۶ تا ۱۹۵۰ جایگاه تقریبی پهنه گسلی ELTV شناسایی شود. گرچه در نقشه زمین‌شناسی موجود، رد گسل ترسیم نشده و مقیاس آن نیز کوچکتر از حد مورد نظر برای شناسایی و ترسیم نشانگرهای ریخت‌زمین‌ساختی است، اما در شناسایی ویژگی‌های سنگ‌شناختی و بخش‌بندی نهشته‌های آبرفتی بسیار کارآمد بود. با استفاده از نگاره هوایی محل دقیق تر گسل در پای بادزن‌های آبرفتی مشخص شد. اما در بسیاری از بخش‌های نگاره هوایی به دلیل وجود زمین‌های کشاورزی، واحدهای آبرفتی به خوبی دیده نمی‌شوند و نیازمند دسترسی به داده‌های با کیفیت بهتر برای مشاهده سطح دست نخورده زمین و شناسایی نشانگرهای حاصل از کارکرد گسل است. در این مرحله، از داده‌های لایدار برای رفع مشکلات یاد شده استفاده شده است. از این‌رو، استفاده از داده‌های توپوگرافی با قدرت تفکیک مکانی ۰/۵ متر (حاصل از برداشت لایدار) کاربردی‌ترین ابزار برای شناسایی جایگاه رد سطحی گسل در گستره پژوهش است. استفاده از این نوع داده به دلیل برتری آن در دقت مسطحاتی و ارتفاعی و نمایش سطح زمین بدون وجود پوشش گیاهی و سایر سازه‌ها از اهمیت بالایی در شناسایی جایگاه شاخه‌های گسلی جوان و نشانگرهای ریخت‌زمین‌ساختی دارد. از این‌رو، ابتدا با حذف پوشش گیاهی بلند و کم ارتفاع و سایر نقاط مرتبط به ساختمان‌ها و سایر سازه‌ها، پالس‌های دریافت شده از سطح زمین، شناسایی و حفظ شده‌اند. بدین ترتیب، مدل رقومی زمین (Digital Terrain Model; DTM) عاری از پوشش گیاهی و سایر عوارض مصنوعی با دقت مکانی ۵۰ سانتی‌متر تهیه شده است. به دلیل وجود پوشش گیاهی، شناسایی گسل روی نگاره هوایی و تصویر ارتوفتو به سادگی امکان‌پذیر نیست. این در حالی است که پرتگاه گسلی با استفاده از داده‌های توپوگرافی برآمده از لایدار به روشنی نمایان است (شکل ۲).



شکل ۲ (A) نگاره هوایی بخشی از گستره ELTVFZ با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ در جنوب شهر Almeirim (شکل ۱ دیده شود). (B) تصویر ارتوفتو برگرفته از داده‌های لایدار با قدرت تفکیک مکانی ۲۰ سانتی‌متر از گستره شکل (A). (C) تصویر DTM برگرفته از داده‌های لایدار با قدرت تفکیک مکانی ۵۰ سانتی‌متر از گستره شکل (A).



با رسم نیمرخ‌های توپوگرافی و افزایش افراق شاقولی (vertical exaggeration)، جایگاه دقیق گسل در راستای پرتگاه‌های گسلی شناسایی شده‌اند (شکل ۳). در مرحله بعد، راستای گسل در لبه پرتگاه اندازه‌گیری شده و سپس عمود بر آن، نیمرخ توپوگرافی ترسیم شده است. درازای نیمرخ توپوگرافی به‌گونه‌ای ترسیم شده است که دربرگیرنده تمامی اجزای اصلی یک پرتگاه گسلی باشد. جایی که شیب نیمرخ در خاور پنجه پرتگاه تغییر می‌کند به‌عنوان محل گسل انتخاب شده است. برای اندازه‌گیری بلندای پرتگاه، ابتدا خطوطی در راستای سطوح مبنای بالایی و پایینی پرتگاه ترسیم شده است. سپس، بلندای پرتگاه در سه نقطه تاج، میانه، و پنجه پرتگاه اندازه‌گیری شده و میانگین عددی آن به‌عنوان مقدار بلندای پرتگاه انتخاب شده است (شکل ۳).

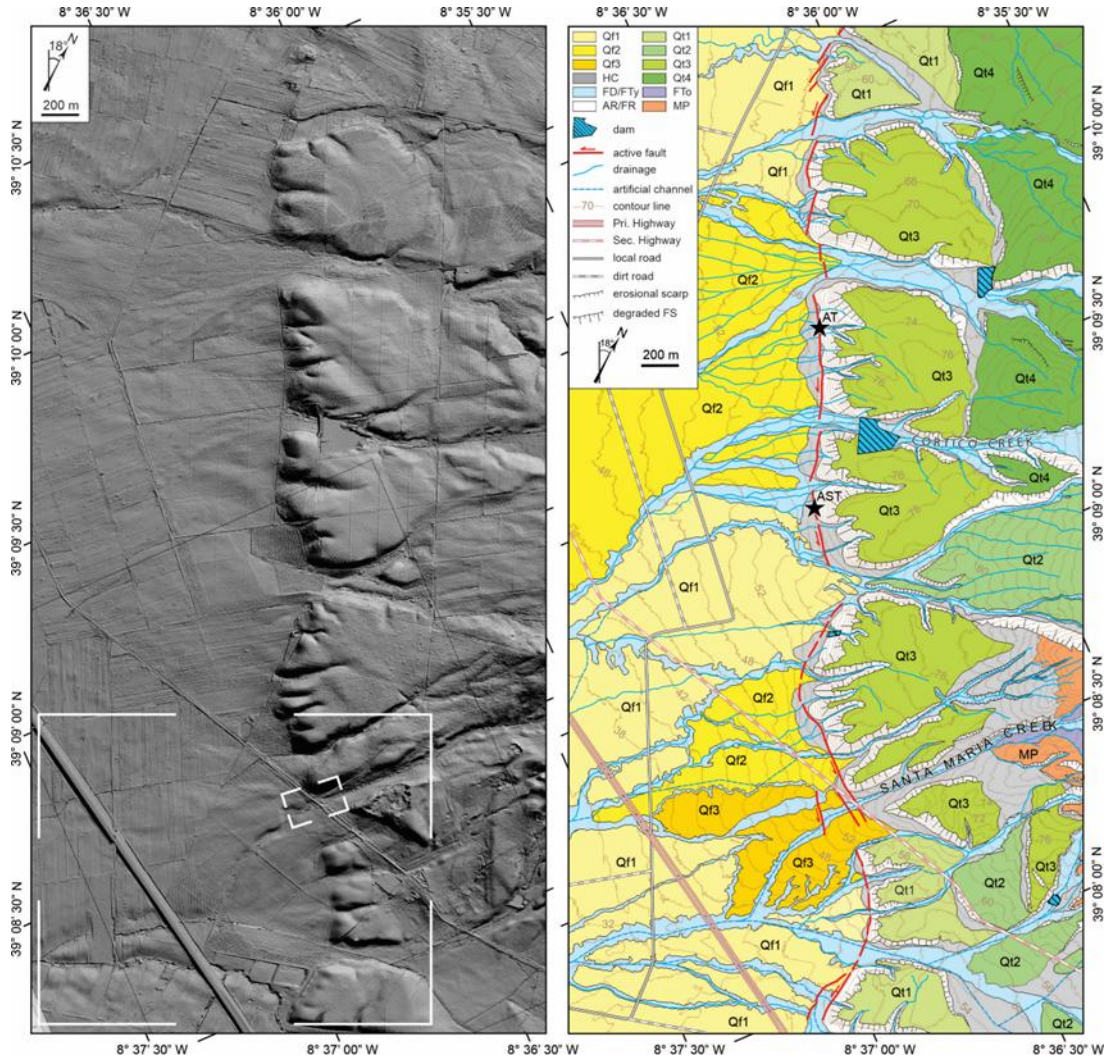


شکل ۳ (A) تصویر DTM برگرفته از داده‌های لایدار با قدرت تفکیک مکانی ۵۰ سانتی‌متر از گستره پرتگاه گسلی در ۷/۵ کیلومتری جنوب شهر Almeirim (شکل ۲ دیده شود). خط‌های P1 تا P5 نشانگر جایگاه نیمرخ‌های توپوگرافی رسم شده عمود بر راستای پرتگاه گسلی هستند. خط زرد رنگ، جایگاه نیمرخ ترسیم شده در شکل B را نمایش می‌دهد. (B) تصویر DTM بزرگنمایی شده پیرامون نیمرخ AB. (C) نیمرخ توپوگرافی P1 ترسیم شده در امتداد خط AB با افراق شاقولی پنج برابر، نشان از بلندای پرتگاه گسلی برابر با 15.9 ± 0.2 متر دارد. خط‌چین‌های خاکستری نشانگر سطوح مبنای بالایی و پایینی پرتگاه گسلی هستند. جایگاه گسل در حد باختری پرتگاه انتخاب شده است. توجه شود که تاج پرتگاه در گذر زمان و توسط فرسایش کمی گرد شده و به سوی خاور مهاجرت کرده است.

با بهره‌گیری از داده‌های لایدار، نگاره‌های هوایی، تصاویر ارتوفتو، و بازدیدهای میدانی نقشه ریخت‌زمین‌ساختی در امتداد بخش مرکزی سامانه ELTVF در جنوب شهر Almeirim تهیه شده است (شکل ۴). واحدهای ترسیم شده شامل چهار نسل پادگانه آبرفتی (Qt1 تا Qt4)، سه نسل بادزن آبرفتی (Qf1 تا Qf3)، نهشته‌های کوهرفتی (HC; hill slope colluviums)، نهشته‌های رودخانه‌ای جوان (young fluvial deposits/terraces; FD/FTy)، پرتگاه‌های آبرفتی/رودخانه‌ای (alluvial/fluvial riser; AR/FR)، پادگانه‌های رودخانه‌ای قدیمی (old fluvial terraces; FTo)، و واحد سنگی میوسن-پلیوسن (MP) است. ارتباط سن نسبی میان پادگانه‌های آبرفتی بدین صورت است که واحد Qt1 جوانترین و واحد Qt4 قدیمی‌ترین پادگانه است. به‌همین شیوه، واحد Qf1 جوانترین نسل بادزن‌های آبرفتی را تشکیل می‌دهد. پادگانه‌های آبرفتی در خاور گسل و بادزن‌های آبرفتی در باختر آن گسترش دارند. راستای کلی رد سطحی گسل پویای ترسیم شده برابر با $N018^\circ$ بوده و در بخش‌های مختلف این راستا متغیر است. در بخش‌های دست خورده، وجود گسل به صورت استنباطی (inferred) ترسیم شده است. در بخش‌های شمالی رد گسل به‌صورت پلکانی با آرایش چپ‌پله دیده می‌شود.



دو ترانسه پارینه لرزه‌شناختی (Alorna-South و Alorna) پیرامون پنجه پرتگاه گسلی، پیشتر حفر و مطالعه شده است [4] (ستاره‌های سیاه‌رنگ در شکل ۴).

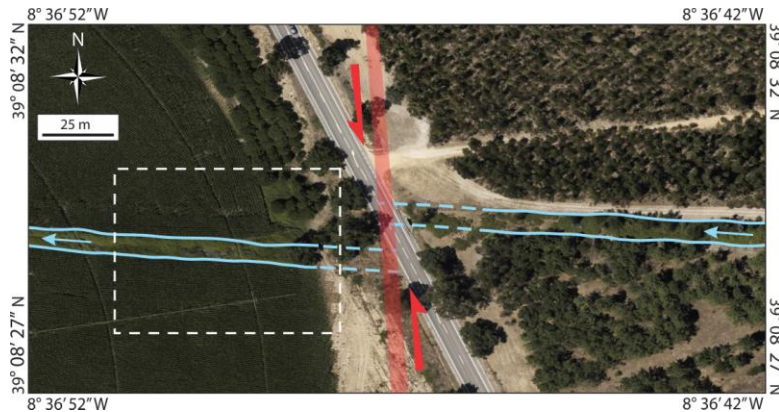


شکل ۴) نقشه ریخت‌زمین‌ساختی بخش‌های میانی گسل ELTV در ۷/۵ کیلومتری جنوب شهر Almeirim. (چپ) تصویر DTM تهیه شده با استفاده از داده‌های لایدار. قاب سفیدرنگ بزرگ گستره شکل ۹ و قاب سفیدرنگ کوچک گستره شکل ۵ را نشان می‌دهد. (راست) نقشه ریخت‌زمین‌ساختی گستره هدف. خطوط سرخ نشانگر شاخه‌های گسلی پویا، خطوط آبی نشانگر آبراهه‌ها، خط‌چین‌های آبی نشانگر کانال‌های مصنوعی، و منحنی‌های قهوه‌ای نشانگر منحنی‌های تراز با فاصله ۲ متر از سطح دریا هستند. ستاره‌های سیاه‌رنگ جایگاه ترانسه‌های پارینه‌لرزه‌شناختی حفر شده در مطالعات پیشین [4] را نشان می‌دهند.

با بهره‌گیری از داده‌های توپوگرافی برآمده از لایدار در گستره‌ای با پهنای نزدیک به یک کیلومتر، نشانگرهای ریخت‌زمین‌ساختی جوان، شناسایی و جابه‌جایی‌های انباشتی افقی آنها در امتداد گسل اندازه‌گیری شده است. بدین ترتیب، نشانگرهای ریخت‌زمین‌ساختی با کمینه جابه‌جایی چپ‌بر برابر با 0.7 ± 2.9 متر تا بیشینه جابه‌جایی انباشتی نزدیک به ۲۰۰ متر شناسایی و اندازه‌گیری شده‌اند. برای نمونه، مقدار جابه‌جایی آبراهه سانتا ماریا (Santa Maria creek) با استفاده از تصاویر ارتوفوتو، داده‌های لایدار، تصاویر پهپاد، مدل رقومی سطح زمین (DSM) برگرفته از پهپاد اندازه‌گیری شده است (شکل ۵). وجود جاده آسفالتی و دست‌خوردگی‌های موجود سبب شده تا مشاهده و ردگیری بستر آبراهه در ۲۰ تا ۳۰ متری پهنه گسلی امکان‌پذیر نباشد. برای حل این مشکل، ابتدا با استفاده از جایگاه شاخه-

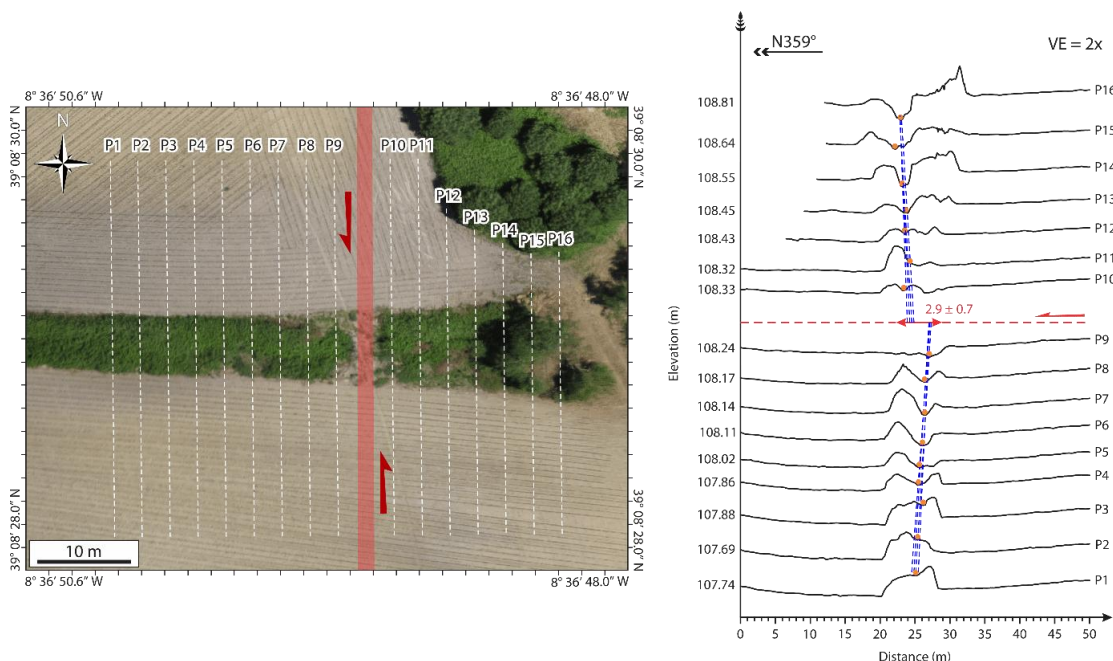


های گسلی در دیواره‌های دو ترانشه پارینه‌لرزه‌شناختی حفر شده عمود بر گسل [8]، جایگاه و راستای پهنه گسلی به پهنای ۷ متر و راستای $N356^\circ$ اندازه‌گیری شده است. سپس خطوط راهنما (piercing lines) و نقاط راهنما (piercing points) در امتداد کرانه‌های راست (شمالی) و چپ (جنوبی) آبراهه، در بالادست و پایین‌دست گسل ترسیم شده است. بدین ترتیب، مقدار جابه‌جایی راستالغز چپ‌بر در امتداد گسل برابر با $3/3 \pm 10/8$ متر به‌دست آمده است (شکل ۵).



شکل ۵) آبراهه جابه‌جا شده به‌صورت چپ‌بر در امتداد آبراهه سانتا ماریا، با $7/5$ کیلومتری جنوب شهر Almeirim (شکل ۴ دیده شود). پس‌زمینه شکل، تصویر ارتوفتو برگرفته از داده‌های لاپدار با قدرت تفکیک مکانی ۲۰ سانتی‌متر است. خطوط آبی نشانگر حد شمالی و جنوبی آبراهه، خطوط خط‌چین آبی نشانگر جایگاه احتمالی حد شمالی و جنوبی آبراهه، و پهنه سرخ‌رنگ نشانگر پهنه گسلی با راستای $N356^\circ$ و پهنای ۷ متر است. قاب خط‌چین سفیدرنگ گستره شکل ۶ را نشان می‌دهد.

افزون بر جابه‌جایی انباشتی آبراهه سانتا ماریا برابر با $3/3 \pm 10/8$ متر، جابه‌جایی‌های کوچک‌تری به‌صورت چپ‌بر در راستای گسل با استفاده از تصاویر حاصل از برداشت پهپاد (با اندازه پیکسل ۵ سانتی‌متر) شناسایی و اندازه‌گیری شده است. برای نمونه، در پایین‌دست آبراهه سانتا ماریا، بستر کانال آبراهه به‌صورت چپ‌بر جابه‌جا شده است. برای اندازه‌گیری مقدار این جابه‌جایی، با بهره‌گیری از داده‌های توپوگرافی برداشت شده توسط پهپاد، ۱۶ نیم‌رخ توپوگرافی با فاصله ۳ متر از یکدیگر، عمود بر راستای کانال آبراهه و هم‌سو با راستای گسل ($N359^\circ$) ترسیم شده است. با ردیابی کمینه بلندای پوشش گیاهی به عنوان تالوگ آبراهه و رسم خطوط و نقاط راهنما در بالادست و پایین‌دست گسل، مقدار جابه‌جایی چپ‌بر برابر با $0/7 \pm 2/9$ متر اندازه‌گیری شده است (شکل ۶).





شکل ۶) کمینه جابه‌جایی چپ‌بر شناسایی شده در امتداد آبراهه سانتا ماریا (شکل ۵ دیده شود). (چپ) تصویر ارتوفتو تهیه شده با پهپاد و اندازه پیکسل برابر با ۵ سانتی‌متر. خط‌چین‌های سفید نشانگر جایگاه نیم‌رخ‌های ترسیم شده در شکل سمت راست (P1 تا P16) و پهنه سرخ نشانگر جایگاه گسل است. (راست) شیوه اندازه‌گیری جابه‌جایی روی نیم‌رخ‌ها را نشان می‌دهد. منحنی‌های سیاه، نشانگر نیم‌رخ‌های توپوگرافی با اغراق شاقولی ۲ برابر، نقاط نارنجی نشانگر کمینه بلند در پهنه بستر آبراهه و خط‌چین‌های آبی نشانگر خطوط راهنما هستند. مقدار جابه‌جایی چپ‌بر آبراهه توسط گسل برابر با 0.7 ± 2.9 متر اندازه‌گیری شده است.

۳. بازسازی آبراهه‌های جابه‌جا شده

در جنوبی‌ترین بخش گستره پژوهش، مجموعه‌ای از آبراهه‌های جوان به‌گونه‌ای سامان‌مند در امتداد گسل به‌صورت چپ‌بر جابه‌جا شده‌اند. این گستره برای انجام بازسازی جابه‌جایی آبراهه‌ها انتخاب شده است (شکل ۷). همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود این بازسازی طی ۶ مرحله صورت گرفته است. در هر مرحله تلاش شده است تا با بازسازی حرکت چپ‌بر گسل، آبراهه یا آبراهه‌های با کمترین مقدار جابه‌جایی انباشتی روبروی یکدیگر قرار گیرند. در هر مرحله، مقدار جابه‌جایی آبراهه‌ها همراه با مقدار بازه خطا اندازه‌گیری شده است. مقدار بازه خطا، در نتیجه وجود چندین خط راهنما در اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی به‌وجود می‌آید. خطوط راهنمای متفاوت، به شکل‌گیری نقاط راهنمای متفاوت می‌انجامد که در نهایت سبب ایجاد مقادیر متفاوتی از جابه‌جایی برای یک آبراهه می‌شود. در مرحله (۱) با حرکت چپ‌بر گسل به اندازه کوچکترین مقدار جابه‌جایی، آبراهه‌های ۱ تا ۵ به‌ترتیب در برابر آبراهه‌های a تا e قرار می‌گیرند. میانگین تمام اندازه‌گیری‌ها 2.9 متر و اختلاف مقادیر بیشینه و کمینه از میانگین $1/3$ متر برآورد شده است. در نتیجه، در مرحله نخست به اندازه $1/3 \pm 2.9$ متر جابه‌جایی چپ‌بر جبران شده است. در مرحله (۲) با حرکت چپ‌بر گسل به اندازه کم‌ترین مقدار جابه‌جایی ممکن، آبراهه‌های ۶ تا ۱۲ به‌ترتیب در برابر آبراهه‌های f تا l قرار می‌گیرند و مقدار جابه‌جایی به اندازه $1/6 \pm 8/2$ متر است. با همین روند، در مرحله (۳) آبراهه‌های ۱۳ تا ۱۷، با مقدار جابه‌جایی $11/4 \pm 2.7$ در برابر آبراهه‌های m تا q؛ در مرحله (۴) آبراهه‌های ۱۸ تا ۲۰، با مقدار جابه‌جایی $3/9 \pm 19/7$ متر در برابر آبراهه‌های r تا t؛ در مرحله (۵) آبراهه ۲۱، با مقدار جابه‌جایی $1/3 \pm 26/8$ متر در برابر آبراهه u؛ و در مرحله (۶) آبراهه ۲۲ با مقدار جابه‌جایی $2 \pm 37/2$ در برابر آبراهه v قرار می‌گیرد. در مجموع ۲۲ آبراهه دچار جابه‌جایی شده و فراوانی آن‌ها در مراحل پایانی به دلیل فرسایش و عدم حفظ‌شدگی نشانگرها کاهش یافته است. کمینه جابه‌جایی‌های چپ‌بر برابر با $1/3 \pm 2.9$ متر می‌تواند در پی رخداد جوان‌ترین زمین‌لرزه ایجاد شده باشد.

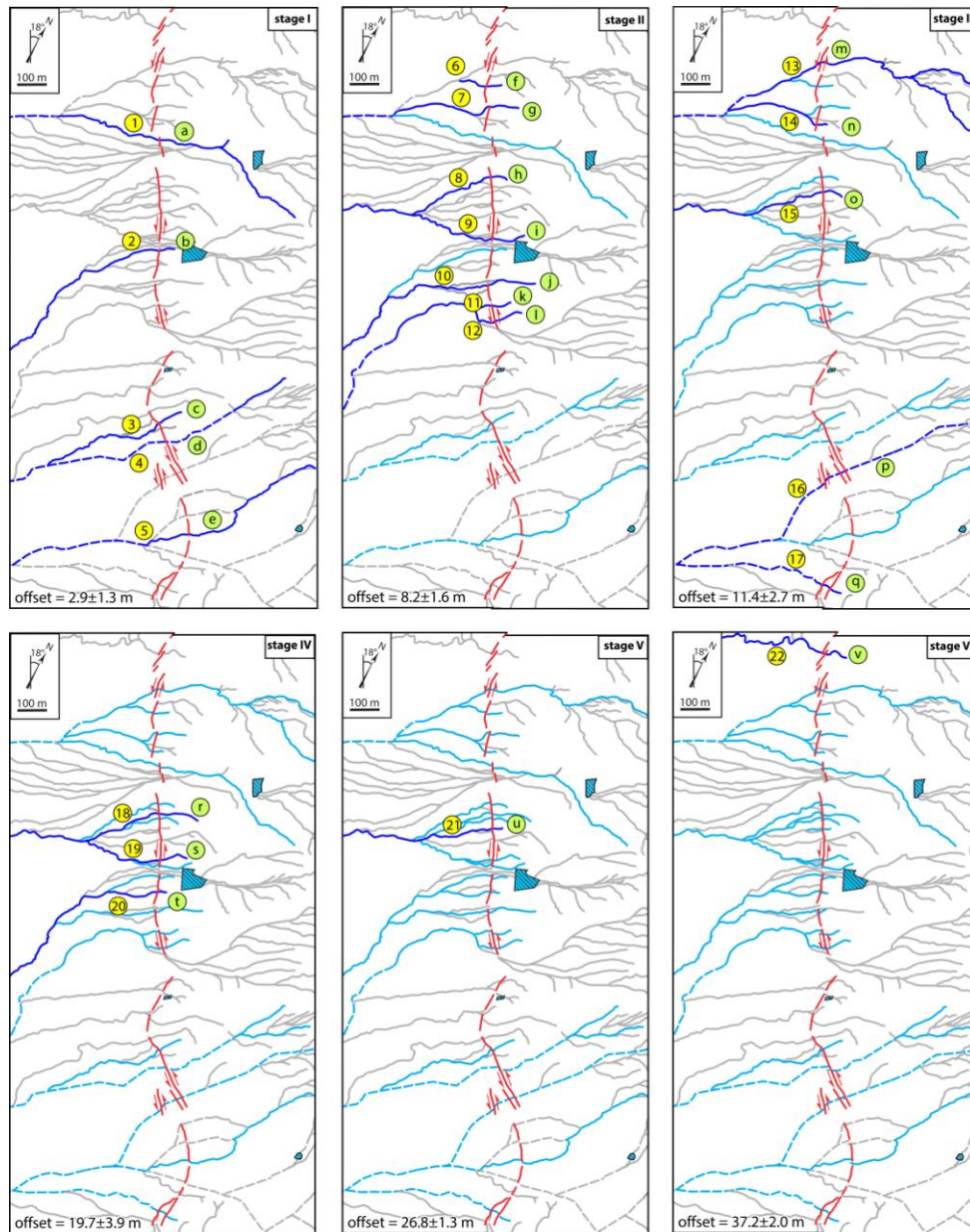
در مجموع، با استفاده از ۴۵ نشانگر ریخت‌زمین‌ساختی جابه‌جا شده در درازای ۱۶ کیلومتر از گسل ELTV، الگوی جابه‌جایی‌های چپ‌بر در راستای گسل مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی نمودار تابع توزیع چگالی احتمال تجمعی جابه‌جایی (Cumulative Offset Probability Density function; COPD) می‌توان به احتمال رخداد زمین‌لرزه‌های پارینه در امتداد گسل پرداخت (شکل ۸). محور افقی نمودار، مقدار جابه‌جایی چپ‌بر و محور عمودی توزیع احتمال مجموع (sum) جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. اگر تعداد زیادی جابه‌جایی به صورت سامان‌مند با بازه عددی مشابهی در راستای گسل تکرار شود، می‌تواند نشانگر حرکت ناگهانی گسل باشد که به‌عنوان رخداد زمین‌لرزه در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب هر قله (peak) نمودار می‌تواند نشان از یک رخداد زمین‌لرزه پارینه داشته باشد. با توجه به نمودار، احتمال رخداد ۵ تا ۸ زمین‌لرزه بر پایه داده‌های ریخت‌زمین‌ساختی وجود دارد.

۴. بازسازی بادزن آبرفتی جابه‌جا شده

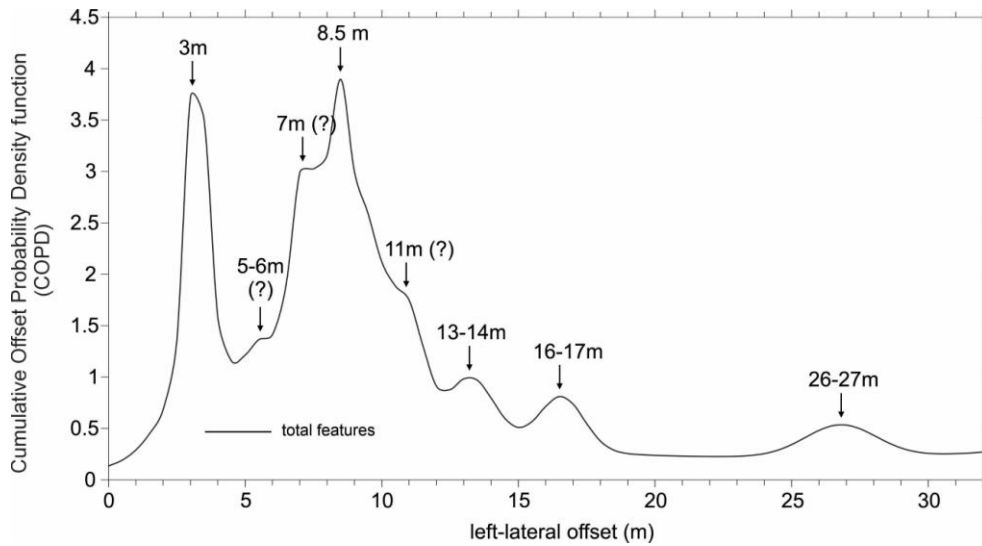
همانگونه که در شکل ۴ دیده شد، سه نسل بادزن آبرفتی Qf1، Qf2، و Qf3 در گستره پژوهش وجود دارد که تلاش شد تا مقدار جابه‌جایی چپ‌بر هر یک نسبت به رودخانه تغذیه‌کننده مربوطه اندازه‌گیری شود. بدین صورت که با قرارگیری محور میانی بادزن (fan apex) روبروی رودخانه تغذیه‌کننده در بالادست گسل، مقدار جابه‌جایی چپ‌بر اندازه‌گیری شده است. با مقایسه خط‌های راهنمای دربرگیرنده محور میانی هر بادزن آبرفتی با خط‌های راهنمای مرتبط با رودخانه‌های تغذیه‌کننده، مقدار جابه‌جایی بادزن آبرفتی قابل اندازه‌گیری است. به‌دلیل فرسایش زیاد بادزن‌های آبرفتی، ابتدا جایگاه محور میانی بادزن‌ها بازسازی شده‌اند. بدین منظور، ابتدا نیم‌رخ‌های توپوگرافی در پهنه بادزن آبرفتی هدف (برای نمونه، بادزن آبرفتی Qf3) ترسیم شده‌اند. سپس، با رسم خطوط مماس بر بخش‌های باقی‌مانده بدنه شمالی و جنوبی بادزن آبرفتی، نقاطی از تلاقی این خطوط به‌عنوان جایگاه احتمالی محور میانی بادزن آبرفتی در راستای هر نیم‌رخ توپوگرافی به‌دست آمده است. پس از آن، نقاط مرتبط به محور میانی بادزن آبرفتی روی نقشه ریخت‌زمین‌ساختی ترسیم شده و با



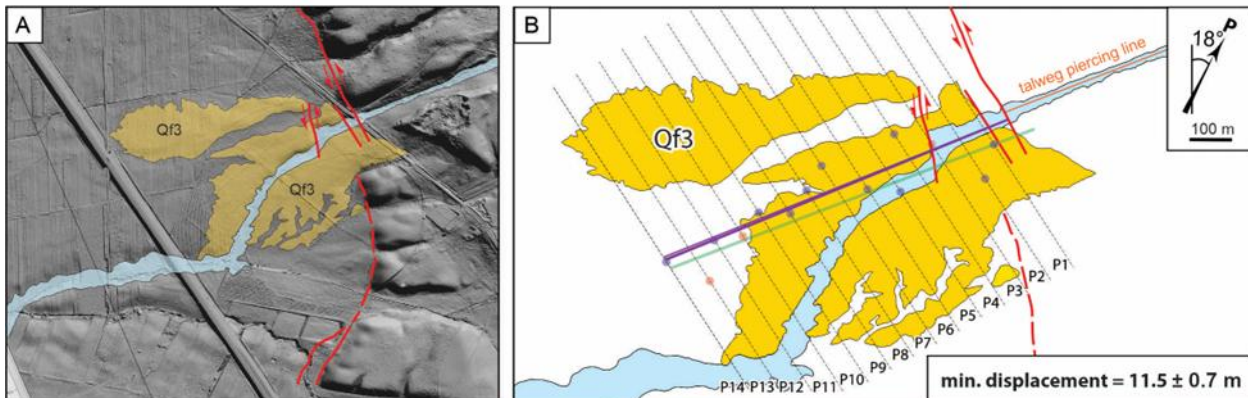
استفاده از نرم افزار Grapher بهترین خط‌هایی که از این نقاط می‌گذرد برازش شده است. از تلاقی خط‌های ترسیم شده به‌عنوان جایگاه محور احتمالی بادزن آبرفتی و رد گسل، دو نقطه راهنما، و از تلاقی خط‌های راهنما در امتداد کرانه‌ها و تالوگ رودخانه تغذیه‌کننده در بالادست گسل با رد گسل نقطه‌های راهنمای دیگری شکل می‌گیرد. با اندازه‌گیری فاصله افقی میان نقطه‌های راهنمای مربوط به شمالی-ترین محور ممکن و تالوگ رودخانه تغذیه‌کننده، کمینه مقدار جابه‌جایی چپ‌بر برابر با 0.7 ± 11.5 متر اندازه‌گیری شده است (شکل ۹). این بازه جابه‌جایی همسو با بازه جابه‌جایی چپ‌بر آبراهه سانتا ماریا برابر با $3/3 \pm 10/8$ متر است. مطالب اخیر دلالت بر آغاز انباشت جابه‌جایی چپ‌بر آبراهه سانتا ماریا پس از متروک‌شدگی سطح بادزن آبرفتی Qf3 دارد.



شکل ۷) بازسازی آبراهه‌های جابه‌جا شده به‌صورت چپ‌بر در امتداد گسل در ۷/۵ کیلومتری جنوب شهر Almeirim. منحنی‌های آبی پرنگ نماینده آبراهه‌های استفاده شده در هر مرحله بازسازی، منحنی‌های آبی کم‌رنگ نشان‌دهنده آبراهه‌های استفاده شده در مراحل پیشین، و منحنی‌های خاکستری نماینده آبراهه‌هایی است که در این بازسازی به کار گرفته نشده‌اند. آبراهه‌های خاکستری عمدتاً به دلیل سن جوان‌تر دچار جابه‌جایی چپ‌بر نشده‌اند.



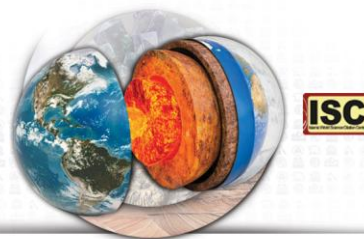
شکل ۸) نمودار تابع توزیع چگالی احتمال تجمعی جابه‌جایی‌های چپ‌بر در درازای ۱۶ کیلومتر از گسل ELTV



شکل ۹) بادزن آبرفتی Qf3 جابه‌جا شده در راستای گسل در ۷/۵ کیلومتری جنوب شهر Almeirim. (A) جایگاه بادزن آبرفتی Qf3 به همراه آبراهه تغذیه‌کننده (سانتا ماریا) به همراه رد سطحی گسل ELTV روی تصویر توپوگرافی برگرفته از داده‌های لایدار ترسیم شده است. (B) بازسازی جابه‌جایی افقی بادزن آبرفتی Qf3. خط سبز نشانگر بهترین خط برازش شده به نقاط مربوط به محور بادزن آبرفتی است. خط بنفش نشانگر خط راهنمایی است که از میان شمالی‌ترین نقاط برای اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی کمینه عبور می‌کند. خط نارنجی نشانگر خط راهنمای تالوگ در بالادست گسل است. مقدار جابه‌جایی چپ‌بر برابر با فاصله بین نقطه‌های راهنمای حاصل از تلاقی خط‌های نارنجی و بنفش و رد گسل است.

۵. برآورد آهنگ لغزش در امتداد ELTV

برای برآورد آهنگ لغزش گسل، از مقدار جابه‌جایی چپ‌بر آبراهه سانتا ماریا برابر با $3/3 \pm 10/8$ متر استفاده شده است. از آنجاکه آبراهه سانتا ماریا سطح بادزن آبرفتی Qf3 را حفر کرده، انباشتگی مقدار جابه‌جایی اندازه‌گیری شده پس از نهستگی و متروک‌شدگی بادزن آبرفتی Qf3 آغاز شده است. از این‌رو، از بخش‌های نزدیک به سطح زمین بادزن آبرفتی Q3 با هدف سن‌یابی به روش لومینسانس نوری نمونه‌برداری شده است. نهشته‌های مربوطه از ژرفای ۷۰ سانتی‌متری چاهک حفر شده در سطح بادزن آبرفتی برداشت شده است. سن لومینسانس نوری، تخمین سنی از آخرین مرتبه‌ای است که نهشته‌های هدف در معرض نور خورشید قرار داشته‌اند. بدین ترتیب، سن جوانترین نهشته‌های بادزن آبرفتی Qf3 با بهره‌گیری از روش لومینسانس نوری برابر با 3 ± 41 هزار سال اندازه‌گیری شده است. از آنجایی که آهنگ لغزش گسل، حاصل تقسیم مقدار جابه‌جایی بر مدت زمان انباشت جابه‌جایی مربوطه است، با تقسیم کمینه



مقدار جابه‌جایی ممکن برابر با ۷/۵ متر بر بیشینه سن امکان‌پذیر ۴۴ هزار سال، کمینه آهنگ لغزش این قطعه گسل برابر با ۰/۱۷ میلی-متر در سال برآوردپذیر است.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از سن‌یابی به روش لومینسانس نوری و اندازه‌گیری جابه‌جایی چپ‌بر در امتداد بخش مرکزی گسل ELTV، کمینه آهنگ لغزش گسل در گذر ۴۴ هزار سال گذشته (قدیمی‌ترین سن ممکن برای نمونه سن‌یابی شده از بادزن آبرفتی (Qf3) برابر با ۰/۱۷ میلی‌متر در سال پیشنهاد می‌شود. با توجه به آهنگ دگرشکلی امروزی بخش‌های مرکزی و شمال پرتغال نزدیک به ۱ میلی‌متر در سال [11]، دست‌کم نزدیک به ۱۷٪ از دگرشکلی پویا در گستره بخش‌های مرکزی پرتغال با گسل ELTV جبران می‌شود. با لحاظ بازسازی آبراهه‌های جابه‌جا شده پیرامون آبراهه سانتا ماریا (شکل ۷) به نظر می‌رسد مقدار جابه‌جایی $3/3 \pm 10/8$ متر با رخداد دست‌کم ۳ زمین‌لرزه در گذر ۴۴ هزار سال گذشته انباشته شده باشد. با فرض رخداد ۳ زمین‌لرزه در ۴۴ هزار سال گذشته، میانگین دوره بازگشت رخداد زمین‌لرزه‌های با توانایی ایجاد دگرشکلی سطحی برابر با ۱۴/۷ هزار سال برآورد می‌شود. از سوی دیگر، با پذیرش کمینه آهنگ لغزش گسل ELTV برابر با ۰/۱۷ میلی‌متر در سال، و فرض میانگین دوره بازگشت برابر با ۱۴/۷ هزار سال، این گسل توانایی ایجاد ۲/۵ متر لغزش چپ‌بر در هر زمین‌لرزه متوسط تا بزرگ را داراست. این عدد با کمینه جابه‌جایی چپ‌بر اندازه‌گیری شده در بخش‌های پایین‌دست آبراهه سانتا ماریا برابر با $2/9 \pm 0/7$ متر و کمینه جابه‌جایی چپ‌بر سامان‌مند در راستای گسل نزدیک به ۳ متر همخوان است. با استفاده از روابط تجربی موجود بین مقدار لغزش و بزرگای گشتاوری [18]، مقدار لغزش برآورد شده برای جوانترین زمین‌لرزه نشان از بزرگای گشتاوری در حدود ۷ دارد.

روش‌های به‌کار گرفته شده در این پژوهش در مناطقی با ویژگی‌های زمین‌ساختی و لرزه‌زمین‌ساختی مشابه- گستره‌هایی با گسل‌های درون‌قاره‌ای راست‌الغز با آهنگ لغزش اندک- از جمله ایران توانایی پاسخ به پرسش‌های کلیدی در شناخت الگوی دگرشکلی پویا را دارا هستند. یکی از تفاوت‌های مهم گستره این پژوهش با بخش‌های گسترده‌ای از ایران، شرایط و سرگذشت اقلیمی آن است. مقایسه نتایج مطالعات با شیوه و زمین‌ساخت مشابه و اقلیم متفاوت می‌تواند به کسب اطلاعات سودمندی پیرامون چگونگی و الگوی حفظ‌شدگی نشانگرهای ریخت‌زمین‌ساختی منجر شود. افزون بر این، استفاده از فناوری تصویربرداری لایدار در مناطق با پوشش گیاهی متراکم و بخش‌هایی از مناطق شهری با جمعیت و حساسیت بالا مانند کلان‌شهر تهران می‌تواند به شناسایی و تحلیل بهتر جایگاه و ویژگی‌های هندسی گسل‌ها، دگرشکلی‌های سطح زمین، شناسایی بهتر پهنه‌های در معرض خطر گسیخت لرزه‌ای، و روشنگری هرچه بهتر سیاست-گذاران و دستگاه‌های اجرایی نسبت به نیاز و راهبرد بهبود زیرساخت‌های شهری کمک کند.

۷. منابع

- [1] Besana-Ostman, G. M., Vilanova, S. P., Nemser, E. D., Falcao-Flor, A., Heleno, S., Ferreira, H. and J. D. Fonseca (2012). Large Holocene Earthquakes in the Lower Tagus Valley Fault Zone, Central Portugal. *Seismol. Res. Lett.*, **83**(1), 67-76.
- [2] Cabral, J., Ribeiro, P., Figueiredo, P., Pimentel, N. and A. Martins (2004). The Azambuja fault: An active structure located in an intraplate basin with significant seismicity (Lower Tagus Valley, Portugal). *J. Seismol.*, **8**, 347-362.
- [3] Cabral, J., Mendes, V.B., Figueiredo, P., Brum da Silveira, A., Pagarete, J., Ribeiro, A., Dias, R. and R. Ressurreição (2017). Active tectonics in Southern Portugal (SW Iberia) inferred from GPS data. Implications on the regional geodynamics. *J. Geodyn.*, **112**, 1-11.
- [4] Canora, C., Vilanova, S.P., Besana-Ostman, G.M., Carvalho, J., Heleno, S. and J. Fonseca (2015). The Eastern Lower Tagus Valley Fault Zone in central Portugal: Active faulting in a low-deformation region within a major river environment. *Tectonophysics*, **660**, 117-131.
- [5] Cunha, P. and D.I. Pereira (2000). Cenozoic evolution of the Longroiva-Vilariça area (NE Portugal). 1^o Congresso sobre o Cenozóico de Portugal.
- [6] DeMets, C., Gordon, R. G., and D. F. Argus (2010). Geologically current plate motions. *Geophys. J. Int.*, **181**(1), 1-80, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x>.



- [7] Fonseca, J.F.B.D., Vittorio, B., Vilanova, S.P., Bosi, V. and M. Meghraoui (2000). Investigations Unveil Holocene Thrusting for Onshore Portugal. *Eos Trans.*, **81**(36), 412-413.
- [8] Foroutan, M., Vilanova, S. Heleno, S., Murray, A., Pinto, L., Sajedifar, A., Falcão, A., Torkamani, M., Canora, C., Pina, P., Vieira, G. and J. Fonseca (2022). Surface-rupturing paleoearthquakes in a context of slow deforming continental interiors: the Lower Tagus Valley fault, Central Portugal. *EGU General Assembly*, Vienna, Austria, 23-27 May 2022, EGU22-1868, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-1868>.
- [9] Martins, A., Cabral, J., Cunha, P., Stokes, M., Borges, J., Caldeira, B. and C. Martins (2017). Tectonic controls on fluvial landscape development in central-eastern Portugal: insights from long profile tributary stream analyses. *Geomorphology*, **276**, 144–163, <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.10>.
- [10] McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D. and A. Tealeb (2003). GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions. *Geophys. J. Int.*, **155**, 126–138.
- [11] Palano, M., González, P.J. and J. Fernández (2015). The Diffuse Plate boundary of Nubia and Iberia in the Western Mediterranean: Crustal deformation evidence for viscous coupling and fragmented lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **430**, 439–447.
- [12] Serpelloni, E., Vannucci, G., Pondrelli, S., Argnani, A., Casula, G., Anzidei, M., Baldi P. and P. Gasperini (2007). Kinematics of the Western Africa-Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data. *Geophys. J. Int.*, **169**, 1180–1200, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03367.x.
- [13] Stich, D., Serpelloni, E., Mancilla, and H. Morales (2006). Kinematics of the Iberia–Maghreb plate contact from seismicmoment tensors and GPS observations. *Tectonophysics*, **426**, 295–317, doi:10.1016/j.tecto.2006.08.004.
- [14] Stucchi, M., Rovida, A., Gomez Capera, A.A., Alexandre, P., Camelbeeck, T., Demircioglu, M.B., Gasperini, P., Kouskouna, V., Musson, R.M.W., Radulian, M., Sesetyan, K., Vilanova, S., Baumont, D., Bungum, H., Fäh, D., Lenhardt, W., Makropoulos, K., Martinez Solares, J.M., Scotti, O., Živčić, M., Albini, P., Batllo, J., Papaioannou, C., Tatevossian, R., Locati M., Meletti, C., Viganò, D. and & D. Giardini (2012). The SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC)1000–1899. *J. Seismol.*, doi:10.1007/s10950-012-9335-2.
- [15] Vernant, P., Fadil, A., Mourabit, T., Ouazar, D., Koulali, A., Davila, Garate, J., McClusky, S. and R. Reilinger (2010). Geodetic constraints on active tectonics of the Western Mediterranean: Implications for the kinematics and dynamics of the Nubia-Eurasia plate boundary zone. *J. Geodyn.*, **49**, 123–129.
- [16] Vilanova, S.P. and J.F.B.D Fonseca (2004). Seismic hazard impact of the Lower Tagus Valley Fault Zone (SW Iberia). *J. Seismol.*, **8**, 331–345.
- [17] Vis, G. and C. Kasse (2009). Late Quaternary valley-fill succession of the Lower Tagus Valley, Portugal. *Sediment. Geol.*, **221**, 19-39, doi:10.1016/j.sedgeo.2009.07.010.
- [18] Wells, D. and K. Coppersmith (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **84**(4), 974-1002.