

## کاربرد تصاویر نوری با قدرت تفکیک مکانی بالا در بررسی گسله‌های فعال: مطالعه موردی گسله شمال زنجان

فرزانه عابدی<sup>۱\*</sup>، زهره معصومی<sup>۲</sup>، اسماعیل شبانیان<sup>۲</sup>، استفانو سالوی<sup>۳</sup> و استفانو پوچی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دکتری تخصصی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

<sup>۳</sup>استاد، موسسه ملی ژئوفیزیک و آتشفشان، رم، ایتالیا

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۷)

### چکیده

گستره زنجان ناحیه‌ای در فلات ایران است که بخشی از دگرریختی فعال ناشی از هم‌گرایی عربی - اوراسیا را در میان دو کوهزاد البرز و زاگرس در خود جای می‌دهد. گسله شمال زنجان با بریدن کوه‌های طارم، گسترش رو به غرب کوهستان البرز را محدود کرده، با درازای نزدیک به ۶۰ کیلومتر از کوه‌های سلطانیه در جنوب زنجان‌رود تا شمال شهر زنجان ادامه دارد. نبود لرزه‌خیزی تاریخی مستند و زمین‌لرزه‌های دستگامی با بزرگای بیش از ۴/۵ از ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی این گسله با آثار فعالیت زمین‌شناسی انکارناپذیر است. ما در این پژوهش تلاش داریم با تلفیق روش‌های ریخت‌زمین‌ساختی و داده‌های سنجش‌ازدور در کنار بازبازدیدهای میدانی، شواهد مربوط به فعالیت لرزه‌ای این گسله را در گذشته چند هزار ساله بررسی کنیم. نقشه ریخت‌زمین‌ساختی گسلش کواترنری بر مبنای تحلیل تصاویر ماهواره‌ای آرشیوی گوگل ارث، SASPlanet، تصاویر ماهواره‌ای KH9 دهه‌های ۷۰ و ۸۰ میلادی (پیش از گسترش شهر زنجان) و مدل‌های رقومی زمینی ۱۲/۵۰ متری ALOSPALSAR و ۳۰ متری SRTM بررسی شده و پس از انتخاب محل‌های مناسب، تصاویر ارتوگرافیک و مدل رقومی ارتفاعی پهنابند برای بررسی آثار زمین‌لرزه‌های دیرینه و کهن به کار گرفته شده است. این گسله با یک الگوی ساختاری پیچیده از سه بخش جنوبی، میانی و شمالی تشکیل شده و سازوکار اصلی آن فشاری راست‌بر است. جابه‌جایی‌های میانگین ۱/۱ متری (ترکیبی از جابه‌جایی‌های افقی و شاقولی) تکرررودادی، رویداد زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۶/۷ تا ۷/۰ را در تاریخچه فعالیت هولوسن این گسله نشان می‌دهد. این پژوهش نمونه‌ای از کارایی روش‌های فتوگرامتری نوین در بررسی رفتار زمین‌لرزه‌ای گسله‌ها در نواحی قاره‌ای با آهنگ دگرریختی آرام است.

**واژگان کلیدی:** تکتونیک فعال، نبود لرزه‌ای زنجان-بیجار، گسله شمال زنجان، پهپاد، سنجش از راه دور

## ۱ مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل در ارزیابی خطر زمین‌لرزه و تهیه نقشه پهنه‌بندی زمین‌لرزه‌ها، تعیین موقعیت و رفتار لرزه‌زایی گسله‌های فعال است. شناسایی گسله‌های فعال زمین‌لرزه‌زا در کشور ما به دلیل آهنگ به نسبت آرام دگرریختی و لغزش گسله‌ها، و در پی آن، دوره‌بازگشت طولانی (چند هزار ساله) زمین‌لرزه‌های قاره‌ای، با چالش بزرگی روبه‌رو است. روش‌های با بازه مشاهدات کوتاه‌مدت، مانند زلزله‌شناسی و ژئودزی (زمینی و فضایی) در چنین شرایطی برای شناسایی گسله‌های فعال و تعیین رفتار لرزه‌زایی آن‌ها جامع نیستند (برای نمونه، امبراسیس و جکسون، ۱۹۹۸؛ مک‌گیل و سیاوه، ۱۹۹۱؛ فروتن، ۲۰۱۳)، زیرا بازه صدساله مشاهدات زلزله‌شناسی و چندده‌ساله مشاهدات ژئودزی نمی‌تواند گویای رفتار گسله‌ای باشد که دوران میان‌لرزه‌ای هزار تا سه هزار ساله دارد. برای نمونه، دوره بازگشت میانگین زمین‌لرزه‌ای به بزرگای ۷ روی یک گسله فعال با آهنگ لغزش کمتر از ۱/۵ میلی‌متر بر سال، در صورت منظم بودن رفتار لرزه‌ای و نبود خوشه‌بندی زمانی، دست‌کم هزار سال یا حتی بیش‌تر خواهد بود. از سوی دیگر، آرایش اتفاقی و توزیع پراکنده ایستگاه‌های لرزه‌نگاری منجر به کاهش درستی و دقت کانون تعیین شده زمین‌لرزه‌ها، و در پی آن، ایجاد خطا در شناسایی چشمه‌های لرزه‌ای می‌شود (ثبوتی و همکاران، ۱۳۹۲). در شرح کاستی این نوع مشاهدات همین بس که بسیاری از زمین‌لرزه‌های بزرگ روی گسله‌هایی رخ می‌دهند که تا پیش از رویداد آن زمین‌لرزه، ناشناخته بوده‌اند و نشانی از آن‌ها روی نقشه لرزه‌خیزی و گسلش فعال دیده نمی‌شود (هاکسون، ۲۰۰۲).

زمین‌لرزه‌های ۱۳۵۷ طبس، ۱۳۹۱ اهر - ورزقان و ۱۳۹۶ کرمانشاه نمونه‌های بارزی از این دسته هستند. از سوی دیگر، دگرشکلی فعال روی برخی از گسله‌ها به صورت حرکت پیوسته و به صورت خزش نمود می‌یابد و با جلوگیری از انباشت کرنش، جایی برای رویداد

زمین‌لرزه‌های بزرگ نمی‌گذارد. با تحلیل داده‌های شبکه‌های GNSS نیز می‌توان به مدل‌سازی عمق قفل‌شدگی و میزان لغزش در سطح گسله دست یافت (برای نمونه، موسوی، ۲۰۱۰)؛ اما این امکان منوط به وجود پروفیل یا شبکه‌ای ایده‌آل با بازه مشاهدات طولانی در عرض گسله‌های فعال است به شرطی که بتوان شرایط محیط کشسان یک‌پارچه را با فاصله عرضی از گسله (در فاصله دست کم دو برابر عمق قفل‌شدگی) برقرار کرد. چنین کاری نه تنها پرهزینه و زمان‌بر خواهد بود، بلکه در بسیاری موارد، به دلیل تراکم زیاد شکستگی‌های پوسته‌ای در یک منطقه معتبر نخواهد بود. بنابراین، شناسایی گسله‌های زمین‌لرزه‌زا و تعیین ویژگی رفتاری آن‌ها از مهم‌ترین مسائل امروز در پژوهش‌های لرزه‌زمین‌ساختی است که رسیدگی به آن، به تنهایی با اتکا به روش‌های معمول زلزله‌شناسی و ژئودزی، اگر ناممکن نباشد، بسیار دشوار و ناقص است.

یک نکته کلیدی در بررسی رفتار این نوع گسله‌ها این است که الگوی رفتاری لرزه‌زا یا بی‌لرزه گسله‌ها در طول زمان در هندسه و الگوی زمین‌ریخت‌های کواترنری نگاشته می‌شود و اندازه‌گیری، پردازش و تفسیر آن‌ها به شناسایی رفتار لرزه‌زمین‌ساختی گسله (دیرینه‌لرزه‌شناسی) در درازای زمان چندین هزارساله کمک می‌کند. پس، افزایش بازه مشاهدات با دقت هندسی و مکانی متناسب با مقیاس مشاهده، بازسازی جابه‌جایی‌های زمین‌لرزه‌ای و انباشتی مرتبط با زمین‌لرزه در راستای گسله‌ها را ممکن کرده (مک‌گیل و سیه، ۱۹۹۱)، محدودیت‌های معمول در مشاهدات کوتاه‌مدت را تا اندازه زیادی برطرف می‌کند. انجام این بخش از کار نیز راه را برای انجام بررسی‌های تکمیلی دیرینه‌لرزه‌شناختی (مک‌کالپین، ۲۰۱۲) فراهم می‌کند.

امروزه استفاده از تصاویر نوری با قدرت تفکیک مکانی بالا و نیز مدل رقومی ارتفاعی در شناسایی و بررسی عوارض زمین‌ریختی کاربرد زیادی پیدا کرده است (گروتزر و همکاران، ۲۰۱۷). فناوری سنجش‌ازدور نیز به

زمین لرزه تاریخی یا دستگامی بزرگی گزارش نشده و این گستره به همراه ناحیه جنوبی آن به عنوان پهنه‌ای با نبود زمین لرزه (زنجان - بیجار) معرفی شده است (سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱). در این میان، گسله شمال زنجان به‌عنوان مرز باختری کوهزاد البرز به‌شمار می‌آید که با درازای نزدیک به ۶۰ کیلومتر از شمال شهر زنجان آغاز شده، از محدوده غربی شهر عبور می‌کند و تا جنوب آن در غرب کوه‌های سلطانیه ادامه دارد. این گسله در طی زمان کواترنری از تغییر میدان تنش متاثر شده و از یک پهنه گسلی راست‌الغز راست‌بر، به فشاری (واژگون با مولفه راست‌بر) تغییر سازوکار داده‌است (سلمانلو، ۱۳۹۴؛ بدوزاده، ۱۳۹۷). میراث این تغییر، وجود هر دو نوع جابه‌جایی افقی و شاقولی در زمین‌ریخت کواترنری است که در صورت بی‌توجهی به آن، همه مشاهدات و تحلیل‌ها در رفتارسنجی آن به اشتباه خواهد انجامید. به همین دلیل، تنها اندازه‌گیری‌های سه‌بعدی دقیق در زمین‌ریخت‌های کواترنری با سن‌های نسبی مختلف می‌تواند به حل این پیچیدگی کمک کرده، ما را به شناخت رفتار لرزه‌زایی آن نزدیک کند. این پژوهش با بهره‌گیری از تصاویر ارتوگرافیک و مدل رقومی ارتفاعی ماهواره‌ای و پهنادبنا به بررسی آثار زمین‌لرزه‌های دیرینه و کهن روی داده در راستای گسله شمال زنجان خواهد پرداخت. بخش اول این پژوهش بر تهیه، پردازش و به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی برداشت شده با پهپاد متمرکز است و بخش دوم به بازسازی، اندازه‌گیری و پردازش جابه‌جایی‌های زمین‌لرزه‌ای در راستای گسله شمال زنجان و نتیجه‌گیری از آن‌ها خواهد پرداخت. روش پیشنهادی یک راه‌کار مشخص برای شناسایی رفتار زمین‌لرزه‌ای گسله‌ها در نواحی قاره‌ای ارائه می‌دهد که از این پس برای مطالعه گسله‌های فعال در نواحی با آهنگ دگرریختی آرام می‌تواند به کار گرفته شود.

ابزاری قدرتمند تبدیل شده که مکمل روش‌های مرسوم تکتونیک فعال است. در دهه گذشته، پژوهش‌های متعددی برای پتانسیل‌سنجی استفاده از تصاویر نوری با قدرت تفکیک مکانی بالا در مطالعات رفتارشناسی گسله‌ها انجام شده است (جیاو و همکاران، ۲۰۱۶؛ سانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ دلونه و همکاران، ۲۰۲۲). این نتایج برای بهبود قوانین مقیاس‌گذاری درباره گسله‌های درون قاره‌ای و نیز کمک به بهینه‌سازی روش‌های برآورد خطر احتمالاتی کاربرد دارد. از جمله کارهای مشابه می‌توان به مطالعات متنوعی اشاره کرد که با تحلیل جابه‌جایی‌های زمین‌ریختی مرتبط با گسلش زمین‌لرزه‌ای توانسته‌اند آهنگ لغزش گسله، تعداد، بزرگا و در مواردی (سن‌سنجی نهشته‌های کواترنری)، زمان رویداد زمین‌لرزه‌های تاریخی و دیرینه را به‌دست آورند (روا و همکاران، ۲۰۱۸، دفونیتیز و همکاران، ۲۰۱۷).

در نواحی با آهنگ آرام دگرشکلی و متأثر از زمین‌لرزه‌های با دوره بازگشت طولانی (مانند گستره زنجان)، فرسایش طولانی زمین‌ریخت‌های مرتبط با گسلش زمین‌لرزه‌ای سبب می‌شود بخش مهمی از شواهد جابه‌جایی ناپدید شود. گسترش نواحی شهری و فعالیت کشاورزی صنعتی در دهه‌های اخیر نیز به این ناپودی سرعت بخشیده است. از این رو، پژوهشگران نیازمند ابزار دقیقی مانند تصاویر نوری با قدرت تفکیک مکانی بالا (برای مثال داده‌های پهپادبنا و یا تصاویر ماهواره‌ای بارزولوشن مکانی بالا) هستند (برای نمونه، گوا و همکاران، ۲۰۱۷) که هر چه قدیمی‌تر باشند، اطلاعات بیشتر و کامل‌تری از شواهد فعالیت گسله در گذشته را مشخص خواهند کرد.

گستره زنجان در مرز ایران مرکزی با کوهستان البرز یک نمونه کامل از ناحیه میان قاره‌ای است که آهنگ دگرریختی فعال در آن از ۲ میلی‌متر برسال کمتر است (شکل ۱؛ با استناد به مطالعه خرمی و همکاران، ۲۰۱۹). با وجود فعالیت تکتونیک بارز گسله‌های این گستره، هیچ

## ۲ جایگاه زمین‌شناختی و معرفی منطقه

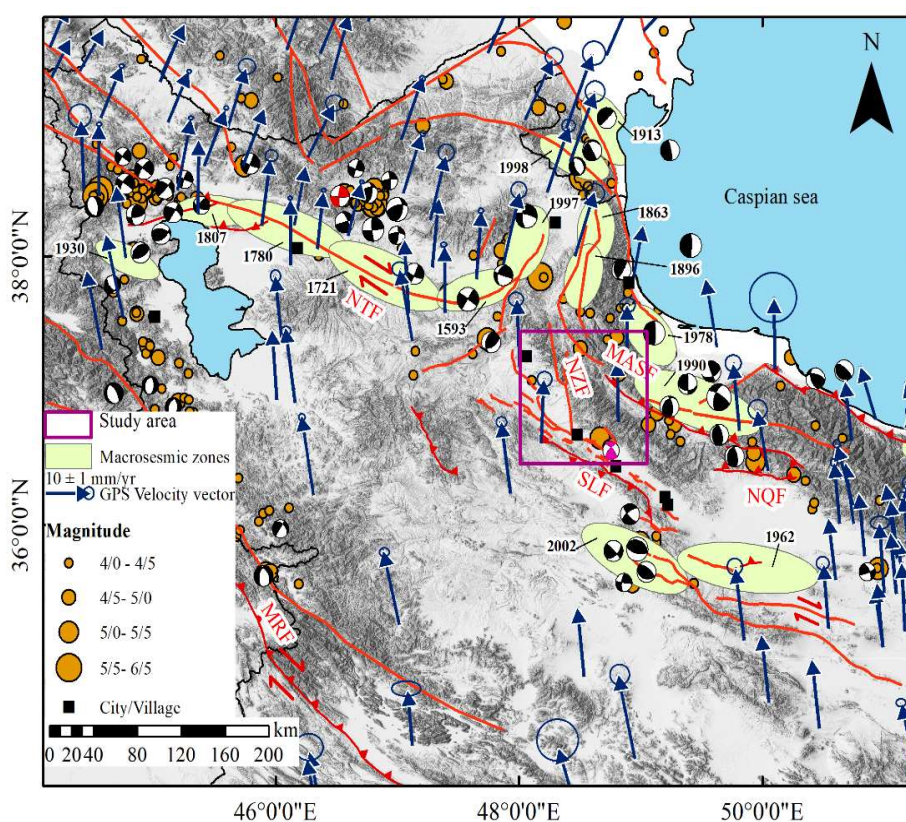
گستره زنجان در بخش شمالی پهنه همگرایی عربی-اوراسیا جای دارد. آهنگ این همگرایی فعال که مسبب مجموعه دگربرخی‌های امروزی در فلات ایران و نواحی کوهستانی پیرامون است، متناسب با فاصله از قطب اوپلر ورقه عربی، از ۱۷ میلی‌متر بر سال در شمال غرب به ۲۲ میلی‌متر بر سال در طول جغرافیایی بحرین و سپس، به ۲۶ میلی‌متر بر سال در طول جغرافیایی مسقط تغییر می‌کند (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴، ریلینگر و همکاران، ۲۰۰۶). نتیجه این همگرایی کوتاه‌شدگی و گسلش راستالغز در فلات ایران (مایر و لودورتز، ۲۰۰۷؛ فرید و همکاران، ۲۰۱۶) و به ویژه، در پهنه‌های دگرشکلی پیرامون آن مانند زاگرس، البرز و شمال غربی ایران است (جمور و همکاران، ۲۰۱۰؛ افلاکی و همکاران، ۲۰۲۱؛ نیاسری‌فرد و همکاران، ۲۰۲۱). گستره زنجان (شامل بخش‌های مرکزی، جنوبی و جنوب غربی استان زنجان) در لبه شمال غربی فلات ایران و بلافصل کوهزاد البرز قرار گرفته است. بر اساس بردارهای GPS موجود (شکل ۱)، برآیند دگربرخی فعال در این گستره کمتر از ۲ میلی‌متر بر سال است. گسله‌های فعال استان زنجان، برای نخستین‌بار در مطالعه ثبوتی و همکاران (۱۳۸۶) بررسی شد. نتایج تحقیق مذکور در قالب مطالعه لرزه‌خیزی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه برای شهر زنجان، منطقه طارم و استان زنجان به شکل نقشه گسله‌های فعال به استانداری زنجان ارائه شد. نسخه دوم این کار نیز در سال ۱۳۹۲ تهیه و بازنگری شد (ثبوتی و همکاران، ۱۳۹۲). طبق نتایج حاصل از این مطالعات گسله‌های سلطانیه و شمال زنجان از جمله مهم‌ترین گسله‌های فعال شناخته شده در منطقه هستند. گسله سلطانیه از جنوب شهر زنجان تا شهر ابهر ادامه یافته است. بیشترین خطر این گسله متوجه شهرهای ابهر، سلطانیه و خرمدره است. گسله شمال زنجان نیز از انتهای غربی گسله سلطانیه آغاز شده، تا شمال روستای مشکین (شکل ۱) امتداد می‌یابد (بدوزاده، ۱۳۹۷).

شکل ۱ زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی ثبت شده در سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۳ میلادی با بزرگای گشتاوری بیش از ۴ و سازوکار معکوس و امتدادلغز را برای گسله‌های شمال غرب ایران نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است زمین‌لرزه تاریخی و دستگاهی (با بزرگای گشتاوری بیش از ۴) برای گسله شمال زنجان مستند نشده است. بردارهای GPS نیز آهنگ لغزش پایینی را در ناحیه زنجان نشان می‌دهند. با وجود اینکه زمین‌لرزه‌های تاریخی بزرگی در شمال غرب ایران روی گسله شمال تبریز روی داده است، اما مستندات تاریخی مبنی بر وقوع زمین‌لرزه روی گسله شمال زنجان یا حتی در نزدیکی آن در دسترس نیست (سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۵؛ مرادی و همکاران، ۲۰۱۱). نبود لرزه‌خیزی دستگاهی تا حدی است که شبکه‌های محلی دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان نیز که در نزدیکی گسله زنجان مستقر بودند، لرزه‌خیزی قابل ملاحظه‌ای روی آن ثبت نکردند (جوزی، ۱۳۹۳).

برای نخستین بار، اشتوکلین و افتخارنژاد (۱۹۶۹) در اولین گزارش نقشه‌های زمین‌شناسی ایران، با استناد به بریده شدن ناگهانی ادامه غربی کوهستان البرز و مجموعه ساختارهای آن به طور خطی در برابر دشت زنجان - میانه در شمال زنجان و در راستای نزدیک به شمالی - جنوبی، وجود یک روند مهم پی‌سنگی را احتمال دادند. آن‌ها روند گسله شمال زنجان را در دید منطقه‌ای با ادامه سامانه‌ی گسلی شمالی - جنوبی شرق آتشفشان سبلان مرتبط دانسته‌اند. پس از آن، این ساختار در فرهنگ زمین‌شناسی ایران نادیده گرفته شد تا اینکه ثبوتی و همکاران (۱۳۸۶) در مطالعه لرزه‌زمین‌ساختی که در گستره زنجان انجام دادند، شواهد فعالیت کواترنری این گسله را گزارش کرده، آن را به عنوان گسله فعال شمال زنجان معرفی کردند. اشاره به این نکته لازم است که در آن زمان، سلیمانی آزاد نیز در قالب رساله دکتری خود در حال مطالعه مشابهی در منطقه

سلیمانی و همکاران (۲۰۱۱) با معرفی یک رخمون در راستای این گسله، و تلفیق آن با مشاهدات زمین‌ریخت‌شناسی، آن را یک پهنه گسلی پیچیده عنوان کردند که در لبه کوهستان پرشیب و راستالغز است و در دشت کواترنری کم‌شیب و راندگی است. ثبوتی و همکاران (۱۳۹۲) ۱۱۹ رخداد لرزه‌ای را دوباره مکان‌یابی کرده، نقشه گسله‌های فعال استان زنجان را نیز به‌روزرسانی کردند. در سال‌های بعد، سلمانلو (۱۳۹۴) در پایان نامه کارشناسی ارشد خود به مطالعه تغییرات تنش در گستره زنجان پرداخت و نشان داد

بود و برخی یافته‌ها، به‌ویژه روی گسله شمال زنجان و کناوند را در اختیار این گروه قرار داد. نتایج این رساله دکتری در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ میلادی منتشر شد (سلیمانی آزاد، ۲۰۰۹؛ سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱). از آن پس، گسله شمال زنجان به صورت گسله راست‌بر فشاری در نقشه‌ها وارد شد. این گسله در مطالعات بعدی (آلن و همکاران، ۲۰۱۱؛ طوری و سیتاغللو، ۲۰۱۴) به‌عنوان یکی از شالوده‌های ساختاری گستره زنجان منظور شد و اطلاعات بیشتری درباره آن منتشر شد.



شکل ۱. نقشه لرزه‌زمین‌ساخت شمال غرب ایران؛ خط‌های قرمز گسله‌های فعال برگرفته شده از حسامی و همکاران (۲۰۰۳) است. در چهارگوش بنفش، گسله‌ها بر مبنای نقشه ثبوتی و همکاران (۱۳۹۲) اصلاح شده‌اند. حروف اختصاری نام گسله‌های شاخص شمال غرب ایران است: NTF, North Tabriz Fault; MRF, Main Recent Fault; NZF, North Zanzan Fault; SLF, Soltanieh Fault; MASF, Masuleh Fault; NQF, North Qazvin fault نشان داده شده برای زمین‌لرزه‌های سال‌های (۲۰۲۳-۱۹۹۶) با بزرگای گشتاوری بیشتر از ۴ است که عمق آن‌ها ۱۵-۱۰ کیلومتر برآورد شده است (<https://www.globalcmt.org/>). زمین‌لرزه اهر-ورزقان که در ۲۰۱۲/۰۸/۱۱ رخ داده است به رنگ قرمز و زمین‌لرزه‌ای (با بزرگای  $M_s$  ۵/۱ و عمق ۱۲ کیلومتر) که در تاریخ ۲۰۰۸/۰۵/۲۷ در فاصله‌ی ۳۲ کیلومتری جنوب شرق زنجان رخ داده است به رنگ صورتی نمایش داده شده است. زمین‌لرزه‌های رخ داده از سال ۲۰۲۳-۱۹۹۶ با بزرگای  $M_n$  بزرگتر از ۴ است که از سایت موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (<http://irsc.ut.ac.ir/>) تهیه شده است. مربع بنفش رنگ محدوده پژوهش را نشان می‌دهد. پهنه‌های مه‌لرزه‌ای که با بیضی‌های سبز روشن نمایش داده شده‌اند عدم وقوع زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی بزرگ روی گسله شمال زنجان را نشان می‌دهد (سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۵). نقشه بردار سرعت GPS از خرمی و همکاران (۲۰۱۹) استخراج شده است. تفاضل بردارهای سرعت نزدیک به محدوده زنجان دگرشکلی اندکی کمتر از ۱ میلی‌متر را برای این ناحیه به‌دست می‌دهد.

کناره زنجان رود می توان دید. تغییرات سطح اساس محلی و منطقه‌ای که برخی به دلیل تغییرات اقلیمی و برخی ناشی از حرکات تکتونیکی شاقولی است سبب شده نهشته‌های کواترنری از لبه کوه تا کف دشت به صورت پلکانی در دل هم قرار گیرند و پادگانه‌های مخروط‌افکنه‌ای یا رودخانه‌ای متعددی، از کهن به جوان، ایجاد کنند. مخروط‌افکنه‌های جوان تر در پائین‌دست، قدیمی‌ترین نهشته‌های مخروط‌افکنه‌ای را پوشانده، دانه‌بندی ریزتر و منظم‌تری داشته، درجات بالاتری از هوازدگی نشان می‌دهند، که بیشتر فرسایش یافته مخروط‌افکنه‌های بالادست هستند و با توجه به رس کمتر، جورشدگی بیشتر و رنگ تیره‌تری که دارند، گمان می‌رود در دوران آب و هوایی گرم‌تری نهشته شده باشند. این مجموعه تفاوت‌ها به همراه جایگاه زمین‌ریختی پلکانی آنها امکان تعیین سن نسبی آنها را به طور دقیق، از پیشانی کوهستان تا پای رودخانه زنجان رود فراهم کرده‌است. بدوزاده در سال ۱۳۹۷ نقشه کواترنری محدوده مورد پژوهش را ارائه داد (شکل ۲).

### ۳ روش پژوهش

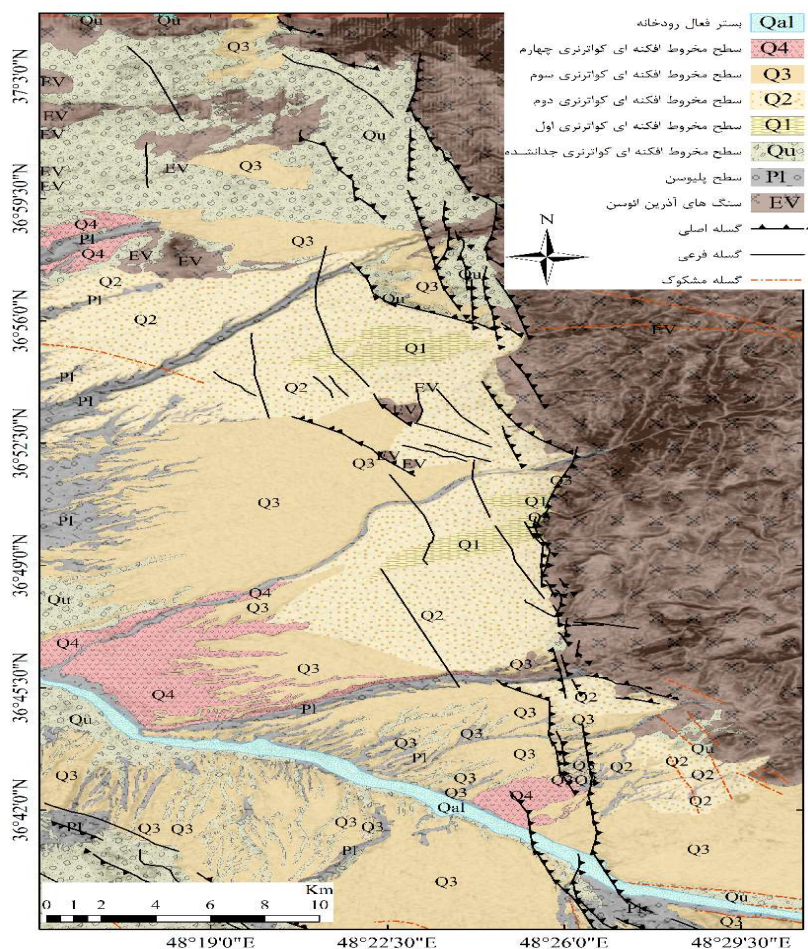
اندازه‌گیری کمی میزان تغییر شکل رخ داده در فرآیندهای تکتونیکی برای تعیین رفتار لرزه‌ای یک گسله نیازمند وجود زمین‌ریخت‌هایی است که بتوان موقعیت یا شکل نخستین آنها را بازسازی کرد (برای نمونه، فان-در-وورد و همکاران، ۲۰۰۲؛ شبانیان و همکاران، ۲۰۰۹؛ کلینگر و همکاران، ۲۰۱۱). آبراهه‌ها از جمله زمین‌ریخت‌های خطی هستند که می‌توانند فعالیت مربوط به زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش از ۵/۵ (در حالت بهینه) را به صورت جابه‌جایی در قالب خمیدگی یا بریدگی در راستای گسله و تغییر در عمق فروکند ثبت کنند. با بررسی آبراهه‌های جابه‌جا شده در مقیاس‌های گوناگون، نه تنها می‌توان بردار لغزش گسله یا دست‌کم، مولفه افقی آن را اندازه گرفت، بلکه از تحلیل جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده به محاسبه

که گسله شمال زنجان از زمان میوسن به بعد سه نسل تنش را تجربه کرده است. سازوکار گسله شمال زنجان نیز در گذر از هر رژیم تنش، تغییر کرده است. با توجه با اینکه دو رژیم تنش آخر در کواترنری برقرار بوده‌اند، نتیجه تغییر در میدان تنش روی زمین‌ریخت‌های مرتبط با گسله نیز رونوشت شده است و تنوع ریخت‌زمین‌ساختی کواترنری در پهنه گسله نباید به عنوان پیچیدگی رفتاری آن تفسیر شود. پس از آن، بدوزاده (۱۳۹۷) با تهیه نقشه دقیق‌تری از واحدهای آبرفتی کواترنری بریده شده با گسله شمال زنجان و تعیین سن نسبی آنها، به بررسی سازوکار امروزی گسله و تغییرات آن در زمان پرداخت و نشان داد رد سطحی گسله از جنوب زنجان تا روستای آفکند قابل پیگیری است (شکل ۱). وی نشان داد که گسله شمال زنجان در زمان نئوژن تا به امروز دو بار تغییر سازوکار داده است، به‌طوری‌که از یک گسله راست‌الغز چپ‌بر به یک گسله راست‌الغز راست‌بر، و سپس به یک گسله مورب‌لغز واژگون (با مولفه راست‌بر) تبدیل شده است. تحلیل جابه‌جایی‌های انباشتی گسله در زمین‌ریخت‌های کواترنری نیز نشان داد که بخش اصلی جابه‌جایی‌های راست‌الغز راست‌بر در راستای گسله، مربوط به زمانی در پلیستوسن بالایی است که این گسله سازوکار راست‌الغز راست‌بر داشته است. این پژوهش مثال خوبی برای نشان دادن این است که بررسی جابه‌جایی عوارض زمین‌ریختی به تنهایی و بدون در نظر گرفتن داده‌های لغزش گسله و تحلیل دینامیکی نمی‌تواند در تشریح رفتار لرزه‌ای موثر واقع شود. امروزه می‌دانیم که سازوکار فعال گسله شمال زنجان بیشتر سبب ایجاد جابه‌جایی‌های شاقولی شده است (شبانیان، ۲۰۱۹).

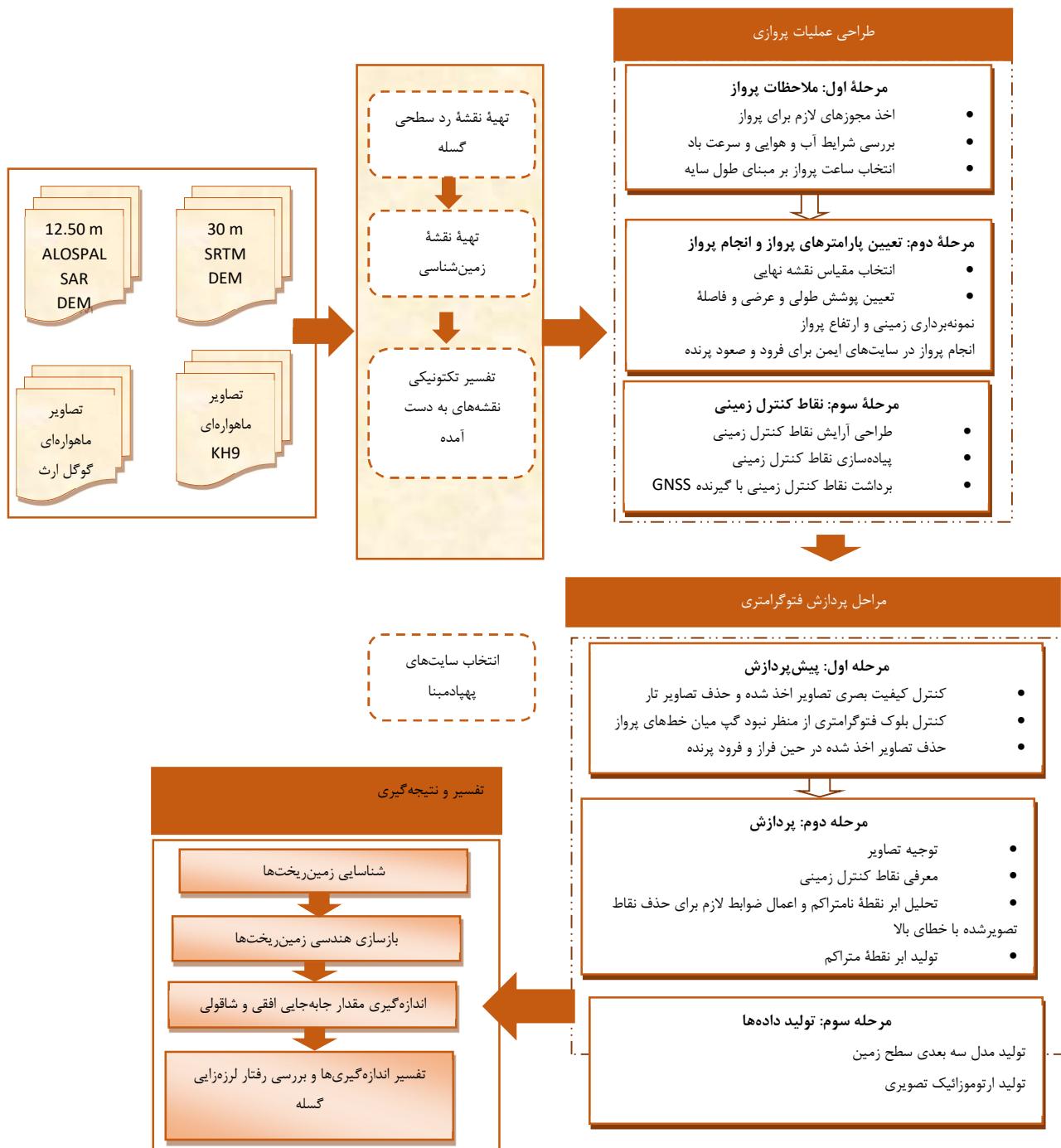
گسله شمال زنجان، سنگ‌های آذرآواری و آتشفشانی ائوسن را از نهشته‌های کواترنری که به شکل پوششی ضخیم، لایه‌های افقی مارن، کنگلومرا و گل‌سنگی پلیوسن را پوشانده‌اند، جدا می‌کند. رخنمون لایه‌های پلیوسن را در دیواره‌های فرسایشی آبراهه‌ها و رودهای بزرگ، به‌ویژه در

عوارض زمین ریختی تندتر از فعالیت تکتونیکی است؛ به این ترتیب، میان دو زمین لرزه پی در پی زمین ریخت‌هایی تشکیل می‌شوند که ویژگی فعالیت‌های تکتونیکی بعدی را آشکار کنند (زیلک و همکاران، ۲۰۱۵). از چالش‌های پیش روی این روش این است که باید تعداد کافی از زمین ریخت‌های مرتبط، با قابلیت اعتمادپذیری بالا برای تفسیر نتایج شناسایی شود. در این میان روش‌های سنجش‌ازدور (ماهواره‌ای و پهپاد مینا) با سطح پوشش و جزئیات متفاوت اطلاعات جامعی از روند فعالیت تکتونیکی منطقه در اختیار قرار می‌دهند و پژوهشگران را از مراجعات متعدد به منطقه و هزینه‌های وابسته

مقدار و الگوی توزیع تغییر شکل در بازه‌های زمانی مختلف رسید. حتی با تحلیل آماری دقیق جابه‌جایی این زمین ریخت‌ها می‌توان دریافت آیا ویژگی‌های فعالیت گسله (سازوکار، آهنگ لغزش و ...) در یک بازه زمانی تکرار شده است یا خیر؟ تعامل میان حرکات تکتونیکی و فرآیندهای سطحی (فرسایش و رسوب گذاری) می‌تواند بر هندسه عوارض زمین ریختی اثر بگذارد. در بررسی‌های ریخت‌زمین‌ساختی روی گسله‌ها، فرض اساسی این است که آهنگ فرسایش کمتر از آهنگ لغزش گسله است و فرسایش موفق به محو کامل شواهد گسلش ثبت شده در سیماهای زمین ریختی نمی‌شود. از سوی دیگر، آهنگ ایجاد



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد پژوهش (بدوزاده، ۱۳۹۷). قدیمی‌ترین واحد سنگ‌شناسی در شرق منطقه سنگ‌های آتشفشانی ائوسن است. جوان‌ترین رسوبات در بستر فعال رودخانه تهنشین می‌شوند. رسوبات کواترنری از پیشانی کوهستان تا پای زنجان‌رود روی رسوبات پلیوسن کشیده شده‌اند. سطوح مخروط‌افکنه‌های Q1 و Q2 رسوبات قدیمی‌ترین هستند که در بالادست قرار دارند و رسوبات جوان‌تر Q3 و Q4 در پایین‌دست آن‌ها شکل گرفته‌اند.



**شکل ۳.** روند کاری پژوهش به اختصار نشان داده شده است. نخست، بررسی‌های تکنیک فعال طبق داده‌های ورودی شامل مدل رقمی ۱۲/۵۰ متری ALOSPALSAR و ۳۰ متری SRTM و تصاویر ماهواره‌ای اخیر و آرشویی KH9 در مقیاس کوچک انجام می‌شود. سپس، با انتخاب سایت‌های پهباد مینا امکان تحلیل در مقیاس بزرگتر فراهم می‌شود. پس از تکمیل طراحی پرواز و انجام آن، مراحل پردازش فتوگرامتری صورت می‌گیرد. در پایان، یافته‌هایی از رفتار لرزه‌زایی گسله شمال زنجان با شناسایی زمین ریخت‌ها و بازسازی جابه‌جایی آنها ارائه می‌شود.

وجود رسوبات جوان متأثر با گسله و احتمال بیشتر مشاهده جابجایی های زمین لرزه ای انتخاب شدند

### ۳-۱-۲ سایت های پهپادمبنا

در بخش ۳-۱-۱، نقشه رد سطحی عمومی گسله و سطوح زمین ریختی متناسب با سن نسبی تشکیل شان از بررسی داده های متوسط مقیاس مطرح شده، ترسیم شد. برای بررسی رفتار لرزه زایی گسله شمال زنجان جاهایی انتخاب شد که با توجه به جایگاه ساختاری، شرایط فرسایش و رسوب گذاری و نیز سن نسبی جوان زمین ریخت های بریده شده با گسله، دارای شرایط ثبت جابه جایی های کوچک مرتبط با جوان ترین فعالیت های زمین لرزه ای باشند. دو سایت کردکنندی و اورتابلاغ در جنوب رودخانه ارمغانخانه، به عنوان محل های برگزیده، با استفاده از تصاویر پهپادمبنا با مقیاس تصویربرداری بزرگتر بررسی شده اند.

سایت اورتابلاغ در جنوب غرب روستای اورتابلاغ و ۳۲ کیلومتری شمال شهر زنجان قرار دارد. برداشت تصاویر پهپادمبنا در پاییز ۱۴۰۰ انجام گرفته است. جدول ویژگی های داده برداشت شده در سایت اورتابلاغ را نشان می دهد.

داده های مدل رقومی زمین (۱ متری) و تصویر ارتوموزاییک (۸ سانتی متری) سایت کردکنندی را پیمان کار معدن آهن کردکنندی در اختیار ما قرار داده است.

می رهاند. روش پیشنهادی این پژوهش مطابق شکل ۳ از مزایای تصاویر ماهواره ای با قدرت تفکیک مکانی بالا (اخیر و آرشویی) و تصاویر پهپادمبنا برای شناسایی، اندازه گیری و بازسازی زمین ریخت ها (مانند لبه پادگانه های رودخانه ای، آبراهه ها، مخروط افکنه ها، پشته ها، شیارها و آبراهه های جوان) بهره می برد. از این رو ابتدا به معرفی داده های ورودی پرداخته و سپس، روش پردازش تصاویر پهپادمبنا ارائه می شود. شناسایی، بازسازی هندسه نخستین زمین ریخت های گسلیده و اندازه گیری جابه جایی (شاقولی و افقی) آنها بخش دیگر مطالعه است. در پایان بر مبنای نتایج اندازه گیری ها رفتار گسله شمال زنجان بررسی می شود.

### ۳-۱ معرفی داده های ورودی

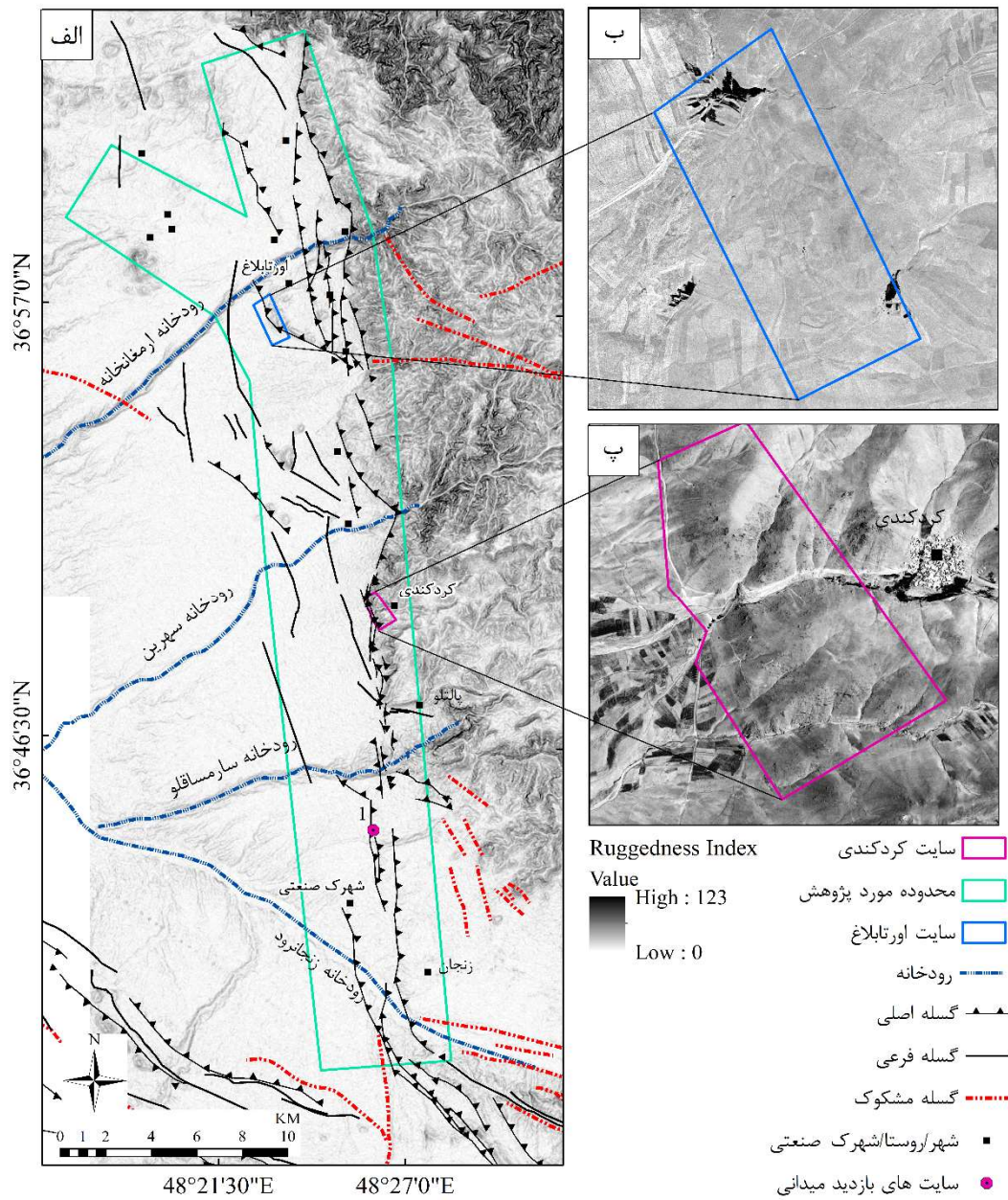
#### ۳-۱-۱ مدل رقومی زمین و تصاویر ماهواره ای

نقشه زمین شناسی پایه منطقه با استفاده از تصویرهای ماهواره ای گوگل ارث و آرشویی KH9، داده های رقومی توپوگرافی (با اندازه پیکسل ۳۰ و ۱۲/۵۰ متر) تهیه می شود. در این پژوهش از چهار تصویر KH9 در بازه دهه ۷۰ تا ۸۰ میلادی استفاده شده است. این تصاویر برای کاربرد در مراحل بعدی باید بر مبنای راهنمای بلوک تصویری مطابق با گوگل ارث زمین مرجع شوند.

شکل ۳ محدوده پژوهش و سایت های پهپادی را نشان می دهد. دو سایت پهپادی بر مبنای پیچیدگی ساختاری،

جدول ۱. ویژگی های داده نوری پهپادمبنا سایت اورتابلاغ.

Aerial photogrammetric camera	Mavic II pro-PPK
Focal length (mm)	10
Flight height (m)	100
Number of photographs	4305
Number of missions	11
Overlap	85% (in length)-75% (in width)
Ground spatial distance (GSD) (cm)	2.5
Covered area (ha)	158



شکل ۳. منطقه مطالعاتی و سایت‌های پهبادی انتخاب شده: الف) منطقه مورد مطالعه در قالب یک چندضلعی فیروزه‌ای نشان داده شده است. شاخص خشن بودن (Ruggedness Index) بر مبنای مدل رقومی زمینی ۱۲/۵۰ متری ALOSPALSAR تهیه شده در سال ۲۰۰۷ به عنوان پس‌زمینه انتخاب شده که به خوبی پستی و بلندی‌های زمین را نشان می‌دهد. گسله‌های اصلی فشاری به رنگ مشکی با دندان‌های رو به شیب گسله، گسله‌های فرعی با خط مشکی ساده، و گسله های مشکوک به رنگ قرمز خط‌چین نشان داده شده‌اند (بدوزاده، ۱۳۹۷). ب) محدوده سایت پهباد اورتابلاغ با پس‌زمینه تصویر ماهواره‌ای KH9 تهیه شده در سال ۱۹۸۴ نشان داده شده است. پ) محدوده سایت پهباد کردکندی با پس‌زمینه تصویر ماهواره‌ای KH9 تهیه شده در سال ۱۹۷۲ نشان داده شده است.

## ۳-۲ روش انجام کار

### ۳-۲-۱ تهیه داده پهبادمبنا

امروزه با پیشرفت تکنولوژی و الگوریتم‌های پردازش

تصویر، استفاده از دوربین‌های آماتور برای مدل‌سازی سه‌بعدی منظر بسیار متداول است، چرا که در مقایسه با روش‌های معمول فتوگرامتری ارزان‌تر است و قابلیت تکرار

پیاده شده و به کمک سامانه شمیم اداره ثبت به روش RTK برداشت می شوند. موقعیت نقاط کنترل در فضای تصویر و سیستم مختصات زمینی معلوم است که برای تبدیل مختصات مدل تهیه شده به مختصات واقعی اعمال می شوند (هنکنی و کلایتون، ۲۰۱۵). برای اعتبارسنجی مدل رقومی سطح به دست آمده، از نقاط چک استفاده می شود. این نقاط در تعیین پارامترهای تبدیل فضا به کار نمی روند و تنها پس از دست یابی به نتیجه، دقت نهایی را کنترل می کنند (یوسال و همکاران، ۲۰۱۵).

دارد. پژوهشگران با قرار دادن دوربین روی سکوی پروازی با ارتفاع کم نسبت به سطح زمین (۸۰ تا ۲۰۰ متر) تصویربرداری با پوشش مشترک می کنند؛ طوری که پس از پردازش های لازم، مدل رقومی زمین و ارتوموزائیک با قدرت تفکیک مکانی بالا تولید می شود. بالا بودن قدرت تفکیک مکانی به افزایش تعداد مشاهدات جابه جایی های جوان در طول گسله منجر می شود که امکان تحلیل و تفسیر هندسه گسله را در مقیاس بالا فراهم می آورد.

### ۱-۲-۳ طراحی عملیات پروازی

یک عملیات پروازی موفق شامل مراحل زیر است:

#### ملاحظات پرواز

در آغاز کار لازم است مجوزهای لازم برای پرواز از استانداری تهیه شود. در بازه زمانی پرواز (۱۰ صبح تا ۲ بعد از ظهر) باید میزان ابرناکی آسمان حداکثر ۱۰ درصد و سرعت باد کمتر از ۳۰ کیلومتر بر ساعت باشد (تزیاو و همکاران، ۲۰۱۷).

#### تعیین پارامترهای پرواز و انجام پرواز

برای بررسی موفق تغییرات رخ داده در طول گسله انتخاب مقیاس تصویربرداری مناسب مهم است (هودگ و همکاران، ۲۰۱۹). میان ارتفاع پرواز و حداقل فاصله نمونه برداری زمینی تناسبی برقرار است که با توجه به ویژگی های عدسی دوربین (فاصله کانونی، حسگر اندازه، PSF عدسی) برقرار می شود. پارامتر طراحی بعدی، پوشش طولی (در راستای خط پرواز) و پوشش عرضی (عمود بر خط پرواز) است که معمولاً به ترتیب بیش از ۸۰ درصد و ۷۰ درصد انتخاب می شوند.

#### نقاط کنترل زمینی

پیش از پرواز، نقاط کنترل و چک در دفتر کار در محیط گوگل ارث با در نظر گرفتن تعداد، تراکم و آرایش مناسب طراحی می شوند. سپس در طی عملیات میدانی در محل

### ۲-۱-۳ پردازش های فتوگرامتری

#### پیش پردازش

از آنجایی که تصاویر پهپاد از لحظه شروع صعود تهیه و ذخیره می شوند، لازم است تصاویری که خارج از خط پروازی تهیه شده اند، حذف شوند (جیمز و همکاران، ۲۰۱۷). در صورت لزوم، تصاویری که تفاوت درخشندگی زیادی دارند بررسی و نوردهی آنها با سایر تصاویر تطبیق داده شده، یا حذف می شوند. همه مراحل پردازش فتوگرامتری در نرم افزار Agisoft Metashape Professional انجام شده است.

#### پردازش

در گام نخست، بلوک تصویری با شناسایی نقاط کلیدی (گوشه ها) در تصاویر و یافتن نظیرشان در تصاویر دیگر تشکیل می شود. در واقع محاسبه موقعیت نسبی دوربین ها در لحظه تصویربرداری و پارامترهای توجیه داخلی دوربین (فاصله کانونی، موقعیت نقطه اصلی و اعوجاج عدسی)، در این مرحله و با تولید ابر نقطه نامتراکم انجام می شود (اسنولی و همکاران، ۲۰۰۸). سپس، تبدیل سیستم مختصات مدل به سیستم مختصات زمینی با معرفی نقاط کنترل انجام می شود (اورتوسکی و همکاران، ۲۰۱۹). ابر نقطه اولیه طبق ضوابط خطای تصویرسازی مجدد، عدم قطعیت در بازسازی، دقت تصویرکردن و خطای

تصویرسازی مجدد خالص سازی می شود (پترسون و همکاران، ۲۰۱۵). در پایان، ابر نقطه متراکم با قید هندسی اپی پولار میان پیکسل های زوج تصاویر، نقاط متناظر را جست و جو می کند (ژنگ و همکاران، ۱۹۹۵) که به تولید ابر نقطه سه بعدی با تراکم بالا منجر می شود. تولید داده ها

بر مبنای ابر نقطه متراکم، مدل رقومی سطح در قالب فایل رستر با روش های درون یابی قابل استخراج است. هر چه تراکم نقاط بالاتر باشد، قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی سطح نیز بالاتر است. در گام آخر از مدل رقومی سطح برای حذف خطای جابه جایی ارتفاعی و کج شدگی استفاده می شود که ارتوموزائیک تصویرری را به دست می دهد.

### ۲-۲-۳ بازسازی جابه جایی های زمین ریختی

در زمان رخداد زمین لرزه، با آزاد شدن انرژی کشسان انباشتی در سطح گسله، دو بلوک گسله نسبت به هم جابه جا می شوند. در این حالت، زمین ریخت هایی مانند پادگانه های رودخانه ای، مخروط افکنه ها و آبراهه ها که در مسیر گذر گسله هستند و با فعالیت آن بریده و گسلیده می شوند، بهترین نشان گره های الگوی گسیختگی سطحی آن زمین لرزه به شمار می روند (دوال و همکاران، ۲۰۲۰). از این رو، بسته به مقیاس زمین ریخت جابه جا شده و دقت مدل سه بعدی زمین، هندسه پیش از جابه جایی را می توان بازسازی کرد و مقدار جابه جایی آن و لغزش گسله را اندازه گرفت (بوربانک و اندرسون، ۲۰۱۱). از آن جا که زمین ریخت ها در اندرکنش با فرسایش قرار دارند، دقت این گونه بازسازی های ریخت زمین ساختی به میزان تغییر در شکل نخستین زمین ریخت ها در اثر فرسایش بستگی دارد. هر چه شکل اولیه فرسوده تر باشد، بازسازی دشوارتر و نامطمئن تر خواهد بود. پس، در نظر داشتن آهنگ فرسایش در هر منطقه و میزان حفظ شدگی شکل نخستین زمین ریخت ها اهمیت بالایی دارد. در واقع مقدار

حفظ شدگی هندسه نخستین زمین ریخت و امکان بازسازی آن، هندسه گسله در تعامل با زمین ریخت و ستبرای پهنه گسلی می تواند بر کیفیت بازسازی هندسی موثر باشند (زیلک و همکاران، ۲۰۱۵). بر اساس موارد ذکر شده می توان به هر زمین ریخت عددی در بازه ۱ تا ۵ نسبت داد (کلینگر و همکاران، ۲۰۱۱). عدد ۱ بیشترین عدم قطعیت کیفی و عدد ۵ کمترین عدم قطعیت کیفی را نشان می دهد. خوشبختانه، گسله شمال زنجان در منطقه نسبتاً خشک قرار دارد، از این رو می توان به حفظ زمین ریخت ها اطمینان داشت. زمین ریخت بازسازی شده در این پژوهش طوری برگزیده شده اند که شاخص ترین سرنخ های فعالیت های تکتونیکی در سرتاسر گسله باشند. آبراهه ها در حالت نزدیک به عمود بر راستای گسله هستند، عرض پهنه گسله حداقل انتخاب شده و تعداد شاخه های گسلی در هر بخش محدود است. از سوی دیگر، با بهره گیری از تصاویر ارتوموزائیک و مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک بالا چالش های پیش روی بازسازی هندسی ساده تر شده است. از این رو می توان وزن ۳ تا ۵ را به بازسازی های ارائه شده تخصیص داد.

نکته مهم دیگر در بازسازی های ریخت زمین ساختی، تاریخچه فعالیت گسله در دوران کواترنری است. در برخی مناطق، رژیم تکتونیکی تغییرات زیادی در گذر زمان نداشته است و انتظار نمی رود که سازوکار یا آهنگ لغزش گسله در زمان کواترنری تغییری کرده باشد. در این حالت، جابه جایی های انباشتی با سن های نسبی و اندازه های مختلف، به صرف حفظ شدن در سطوح کواترنری، قابل استفاده برای ارزیابی الگوی لغزش و سازوکار گسله هستند. اما در برخی مناطق، آهنگ تغییرات تکتونیکی به اندازه ای زیاد بوده است که رژیم تکتونیکی و رژیم تنش در زمان کوتاه کواترنری تغییر کرده است. در چنین حالتی، شناسایی و تحلیل نسل های مختلف جابه جایی های زمین ریختی چالشی قابل توجه خواهد بود و بازسازی آنها نیازمند دقت

و اطلاعات جامع تری است. برای نمونه، در بخش مهمی از شمال، شمال شرق و شمال غرب فلات ایران، رژیم تنش پلیوسن - کواترنری دو بار تغییر ناگهانی داشته است که طی آن سازوکار یک گسله خاص می توانسته از فشاری محض به راستالغز محض، یا وارونه آن، تغییر کند (برای نمونه، فرید و همکاران، ۲۰۱۶). در این شرایط ویژه، جابه‌جایی‌های انباشتی بزرگ ممکن است برآیندی از مجموع جابه‌جایی‌های شاقولی و افقی مرتبط به زمان‌های مختلف باشند و بدون جداسازی، نمی‌توانند نماینده الگوی لغزش زمین لرزه‌ای یک گسله فعال باشند.

اندازه‌گیری جابه‌جایی افقی عوارض زمین‌ریختی

جابه‌جایی‌های زمین‌ریختی افقی دوبعدی هستند و اندازه‌گیری آنها بیشتر به کمک تصاویر ارتو شده و یا مدل رقومی ارتفاعی انجام می‌گیرد. برای برآورد دقیق‌تر مقدار جابه‌جایی، مقادیر جابه‌جایی در بخش‌های مختلف یک زمین‌ریخت اندازه‌گیری می‌شود. برای نمونه، ممکن است در یک سیمای زمین‌ریختی رودخانه‌ای چندین جابه‌جایی با بازسازی کف بستر آبراهه، دیواره‌های چپ و راست آبراهه و حتی لبه پادگانه‌های پلکانی پیرامون آبراهه اندازه‌گیری شود (برای مثال، زیانگ و لی، ۲۰۲۰). اما باید دقت کرد که هر جابه‌جایی با چه سن نسبی اندازه‌گیری و تحلیل می‌شود. در جریان این بازسازی، کف بستر فعال آبراهه را به کمک داده‌های جریان می‌توان تعیین کرد. لبه پادگانه‌های جابه‌جاشده را نیز به کمک منحنی‌تراز توپوگرافی می‌توان به طور دقیق تعیین کرد. هرچند، یکی از بهترین راه‌کارها، استفاده از تکنیک سایه-نشیب است که بدون وابستگی زاویه تابش نور این اطلاعات را تامین می‌کند. پس از شناسایی این عناصر زمین‌ریختی، خط‌های مرجعی بر یک عنصر هم‌ارز (لبه‌های پادگانه یا کف بستر و ...) در دو سوی گسله برازش داده شده، به خط گسله تصویر می‌شود و جابه‌جایی آنها در راستای گسله در قالب کران‌های بالا و پایین اندازه‌گیری می‌شود (برای نمونه،

سالیسبوری و همکاران، ۲۰۱۵).

اندازه‌گیری جابه‌جایی شاقولی عوارض زمین‌ریختی

برای برآورد مقدار جابه‌جایی ارتفاعی، برش‌های توپوگرافی در عرض گسله و عمود بر آن، روی مدل رقومی زمین استخراج می‌شوند (پاپانیکولوا و همکاران، ۲۰۰۵؛ بلو و همکاران، ۲۰۲۱). این برش‌ها باید در فرادیواره و فرودیواره گسله از روی یک سطح زمین‌ریختی هم‌ارز بگذرند و طول آنها به گونه‌ای انتخاب شود که ضمن دوری از تاثیر توپوگرافی محلی و فرسایش، بیشینه جابه‌جایی شاقولی ناشی از گسلش آشکار شود (برای نمونه، بی و همکاران، ۲۰۱۸). اندازه‌گیری جابه‌جایی ارتفاعی در یک پرتگاه گسلی با شناسایی نشیب میانگین سطوح زمین‌ریختی دو سوی گسله و برازش یک خط بر آن نشیب صورت می‌گیرد. این خط مرجع از یک سوی گسله تا سوی دیگر آن ادامه داده شده و سپس فاصله عمودی میان دو خط برازش داده شده موازی به عنوان جابه‌جایی ارتفاعی برآورد می‌شود. گاهی بروز پیچیدگی هندسی در شکل زمین‌ریخت‌ها یا لغزش ترکیبی گسله (حرکت مورب‌لغز) کار بازسازی و اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های محض را از این حالت‌های ساده دشوارتر می‌کند و نیاز است جنبه‌های مختلف توپوگرافی، ریخت‌زمین‌ساختی و زمین‌شناختی در فرآیند بازسازی منظور شود (برای نمونه رجوع شود به شبانیان و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۰۹ نیاسری فرد و همکاران، ۲۰۲۱، فرید و همکاران، ۲۰۱۶).

#### ۴ بحث

در ابتدا به بیان نتایج به‌دست‌آمده از پردازش‌های فتوگرامتری می‌پردازیم و سپس نتایج آنالیزهای تکتونیک فعال ارائه می‌شود.

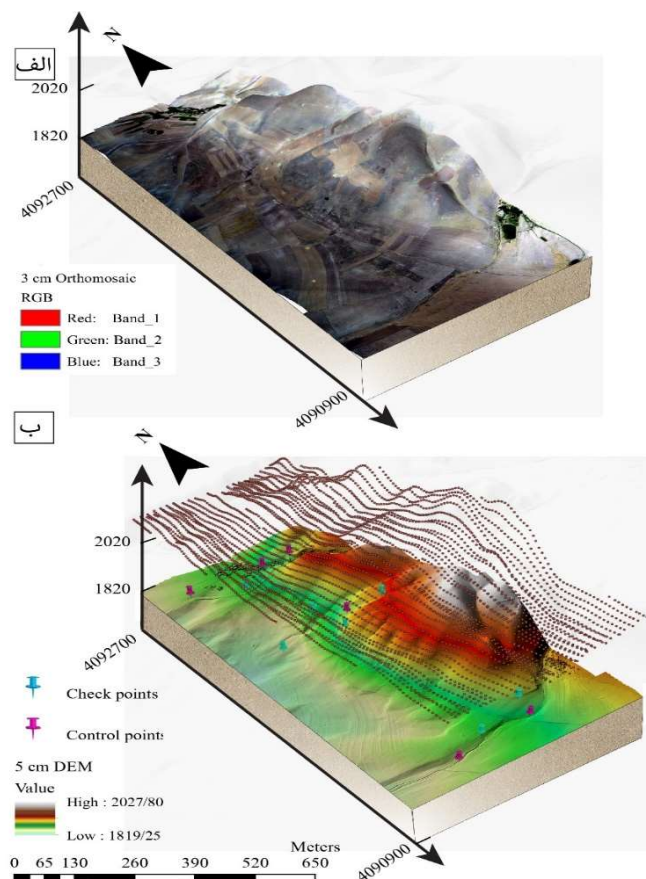
#### ۴-۱ نتایج فتوگرامتری

برای بررسی دقت مدل رقومی زمین از نقاط چک برداشت شده در هر سایت به روش RTK بهره گرفته شد. سایت

۴-۲-۱ نقشه زمین‌شناسی گسله شمال زنجان  
تأیید از این پژوهش، نقشه‌های موجود از گسله شمال  
زنجان به مقیاس‌های کوچک محدود می‌شد (یک پنجاه  
هزارم تا یک صد هزارم) که تنها هندسه عمومی گسله و  
موقع مکانی تقریبی آن (عدم قطعیت ۳۰ تا ۹۰ متر بسته به  
مجموعه داده استفاده شده) قابل استناد بود. ما با استفاده از  
مجموعه داده‌های سنجش از دور و بازدیدهای میدانی، نقشه  
رد سطحی گسله‌ها و مرز سطوح و واحدهای رسوبی -  
ریخت‌زمین‌ساختی را در مقیاسی بهتر از ۱:۱۰۰۰۰ تهیه  
کرده‌ایم.

اورتابلاغ با پهپاد مجهز به PPK بر روی مدل رقومی سطح  
در طی ۲ روز و ۱۱ ماموریت پرواز برداشت شد (شکل ۵).  
پایه‌سازی و برداشت نقاط کنترل در یک روز اجرا شد.  
دقت محصول نهایی سایت اورتابلاغ با استاندارد  
نقشه ۱:۵۰۰ مطابق است. دقت کلی (ارتفاعی و مسطحاتی)  
در نقاط چک بهتر از ۲۰ سانتی‌متر است. مقادیر خطای  
مسطحاتی و ارتفاعی برای هر نقطه کنترل و چک در سایت  
اورتابلاغ در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است.

#### ۴-۲ مشاهدات و اندازه‌گیری‌های تکتونیک فعال



شکل ۵. نتایج فتوگرامتری در سایت اورتابلاغ. الف) نقاط کنترل روی اورتوموزایک ۳ سانتی‌متری قرار گرفته‌اند. ب) مدل رقومی ۵ سانتی‌متری با نمای سه‌بعدی ارائه شده است. نقاط قرمز رنگ موقعیت دوربین در لحظه تصویربرداری را نشان می‌دهد. نقاط صورتی رنگ موقعیت نقاط کنترل را نشان می‌دهد که برای انتقال مدل به سیستم مختصات واقعی کاربرد دارد. نقاط آبی رنگ نقاط چک هستند که برای ارزیابی دقت مدل ارتفاعی استفاده می‌شوند.

جدول ۲. دقت مسطحاتی و ارتفاعی نقاط کنترل در سایت اورتابلاغ.

NO GCP	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
6	3.50	1	1.85	3.50	4

جدول ۳. دقت مسطحاتی و ارتفاعی نقاط چک در سایت اورتابلاغ.

NO Checks	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
8	4	2.30	8	4.60	9.40

دارند که تغییر شکل شکننده را از یک بخش به بخش دیگر در عرض ۲/۳۵ کیلومتر منتقل می کنند. درازای این قسمت ۳۰ کیلومتر است که ۶۰٪ طول گسله شمال زنجان را در بر می گیرد؛ ۲۰ درصد بخش میانی با بخش جنوبی هم پوشانی دارد. بخش میانی، از محدوده هم پوشانی اول تا روستای سهرین، مرز کوه و دشت را دنبال می کند. در روستای سهرین ساختاری لوزی شکل با دو روند شمال، شمال شرقی (N020° E) و شمال غرب-جنوب شرق (324°) ظاهر می شود. عرض این محدوده لوزی شکل ۲/۷ کیلومتر است. آزیموت بخش میانی از شمال روستای سهرین تا شرق روستای اورتابلاغ، در جنوب رودخانه ارمغانخانه، در حدود ۳۲۸ درجه است. دومین محدوده هم پوشانی به طول ۸/۷ کیلومتر و عرض ۱/۳ کیلومتر در شمال روستای ونق تا شمال رودخانه ارمغانخانه (36°57'30", 48°21'49") قرار گرفته است. شمالی ترین بخش گسله مرز کوه و دشت را با طول ۱۶/۲ کیلومتر دربر گرفته است. این بخش در مقایسه با دو بخش دیگر پیچیدگی ساختاری کمتری دارد. محدوده هم پوشانی بخش های شمالی و میانی ۱۲٪ طول بخش میانی است.

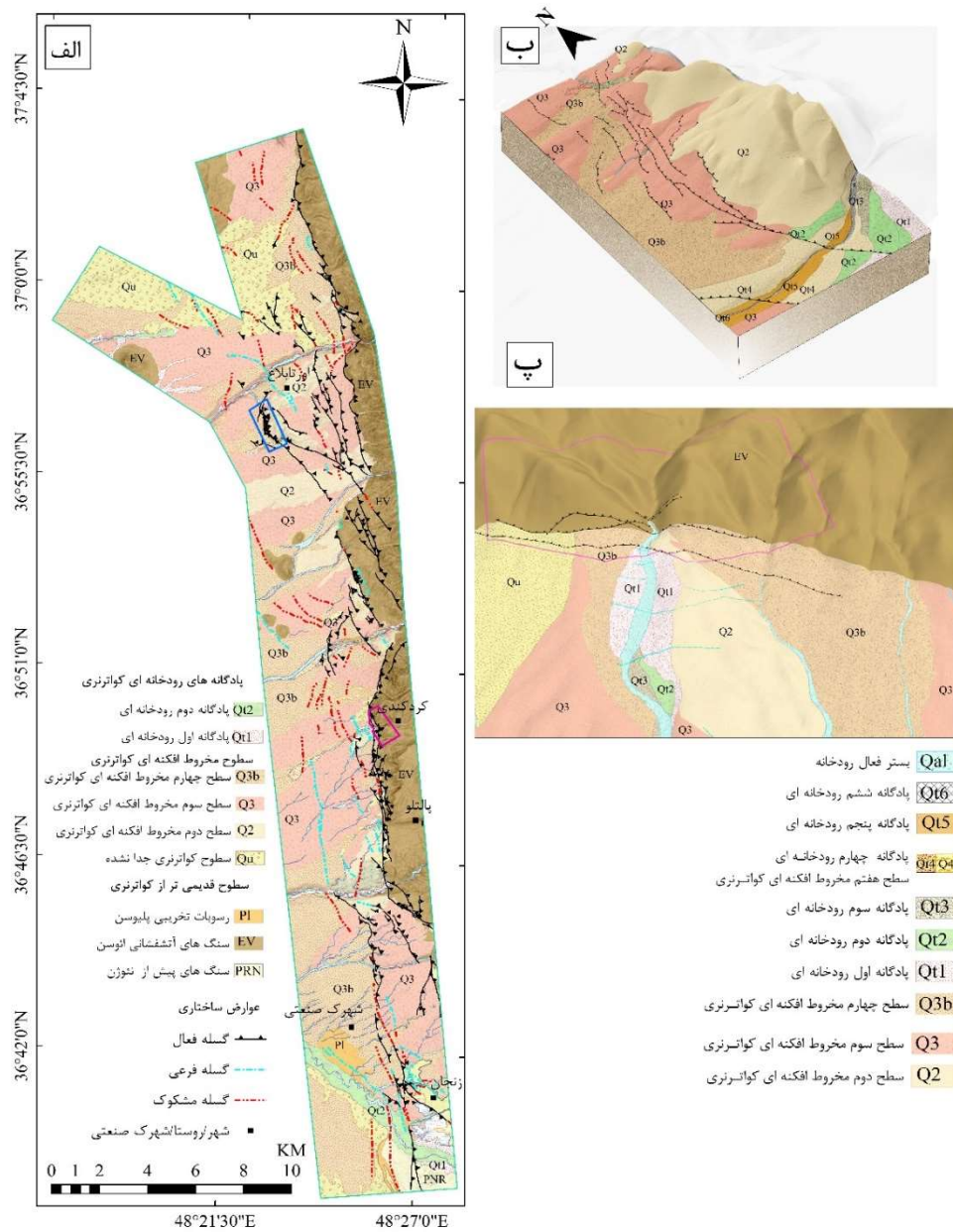
#### ۴-۲-۱-۲ سطوح زمین ریختی کواترنری

سطوح زمین ریختی گستره مرتبط با سیماهای رودخانه ای و مخروط افکنه ای بوده، به ترتیب در ۸ و ۷ رده سن نسبی دسته بندی شده اند. مبنای این دسته بندی برای سطوح پلکانی نزدیک به هم، ارتفاع و موقعیت نسبی زمین ریخت رسوبی،

#### ۴-۲-۱-۱ الگوی گسلش کواترنری

Error! Reference source not found. گسله را در سه رده ماهیتی اصلی، فرعی و مشکوک بر اساس معیارهای زمین شناختی و زمین ریخت شناختی نشان می دهد. گسله های اصلی آنهایی هستند که الگوی ساختاری اصلی گسله را ساخته یا کنترل می کنند و براساس مشاهدات زمین شناسی یا زمین ریخت شناسی فعالیت کواترنری داشته اند. بر پایه این نقشه به روز شده، پهنه گسله شمال زنجان از سه بخش اصلی (جنوبی، میانی و شمالی) با روند عمومی شمالی-جنوبی ساخته شده است که هر یک در انتهای شمالی خود ۴۰ تا ۴۵ درجه به سمت شمال غرب می چرخند. بخش شمالی تر در ۱ تا ۲ کیلومتری شرق تکه جنوبی آغاز می شود و به شمال ادامه می یابد. فاصله میان هر دو قطعه متوالی با شمار زیادی از گسله های راندگی که به طور فلسی قرار دارند، دربر گرفته شده است.

بخش جنوبی از محل تقاطع با گسله سلطانیه در جنوب غرب زنجان آغاز می شود و تا جنوب رودخانه سارمساقلو (36°45'44", 48°24'36") با طول ۱۴/۴۰ کیلومتر ادامه می یابد. روند کلی این بخش شمالی-جنوبی است و قسمت انتهایی آن آزیموت ۳۴۴ درجه را در پیش می گیرد. بخش میانی از شمال رودخانه سارمساقلو، در مرز دشت و کوهستان تا شرق روستای اورتابلاغ قابل پیگیری است. در منطقه هم پوشانی قسمت جنوبی و میانی (به طول ۳/۳۰ کیلومتر)، چندین گسله معکوس با شیب کم قرار



شکل ۶. نقشه به روز شده پهنه گسله شمال زنجان به همراه مدل‌های ریخت‌زمین‌ساختی سه‌بعدی از برخی نواحی کلیدی. الف) نقشه ردسطحی گسله‌ها که در آن واحدهای کواترنری با توجه به جایگاه و ویژگی‌های زمین‌ریختی به انواع و دسته‌های مختلف جدا شده‌است. محدوده‌های برداشت تصاویر پهنابندی اورتابلاغ (چهارگوش آبی) و کردکندی (چهارگوش بنفش) نمایش داده شده است. ب) نقشه ریخت‌زمین‌ساختی از سایت اورتابلاغ که با پهنابند برداشت شده به صورت سه‌بعدی ارائه شده است. پ) نقشه ریخت‌زمین‌ساختی از سایت کردکندی که با پهنابند برداشت شده به صورت سه‌بعدی ارائه شده است.

توالی آنها ممکن است محلی و منحصر به هر رودخانه باشد. برای نمونه، پادگانه‌های رودخانه‌ای Q1 در کنار بستر رودهای مختلف، ممکن است در سرتاسر گستره پژوهش هم‌سن نباشند. در هم‌ارزسازی جانبی سطوح دور از هم،

ارتباط آن با چشمه تغذیه کننده و نیز تقدم و تاخر فرسایش رسوب در پیدایش یا تغییر آن زمین‌ریخت بوده است. رده‌بندی پادگانه‌های رودخانه‌ای بر مبنای سن نسبی تشکیل‌شان در پیرامون هر رودخانه انجام شده و ترتیب و

که جابه‌جایی انباشتی آبراهه‌ها در آن نگاشته شده است، از جمله کهن‌ترین جابه‌جایی‌های مرتبط با حرکت کواترنری گسله شمال زنجان به حساب می‌آیند. پیش‌تر، سلیمانی و همکاران (۲۰۱۱) به برخی از این جابه‌جایی‌ها اشاره کرده‌اند و با استناد به بازسازی عمومی و ساده‌ای که انجام داده‌اند، مقدار تقریبی ۷۵۰ متر را برای جابه‌جایی راست‌الغز راست‌بر در امتداد رودخانه سارمساقلو و سهرین پیشنهاد داده‌اند. در نزدیکی کردکندی نیز جابه‌جایی ۱۴۰ متر را برای گسله شمال زنجان گزارش کرده‌اند.

افزون بر جابه‌جایی‌های انباشتی افقی، گسله شمال زنجان سبب ایجاد جابه‌جایی‌های شاقولی نیز در سطوح کواترنری شده است. اما، جابه‌جایی‌های شاقولی با برهم‌ریختن تعادل فرسایش-رسوب، سرعت نابودی یا تغییر شکل پرتگاه‌های گسله را افزایش می‌دهد؛ فرسایش در بخش بالا آمده افزایش می‌یابد و از ارتفاع آن می‌کاهد. از سوی دیگر نیز، رسوب‌گذاری در بخش پایین افتاده سطح، بخشی از بلندی پرتگاه را کاهش داده، اندازه‌گیری جابه‌جایی شاقولی واقعی را دشوار می‌کند. برای همین، پیدا کردن بیشینه جابه‌جایی شاقولی انباشتی، به‌طور معمول، دشوارتر از جابه‌جایی‌های انباشتی افقی است. در سال ۲۰۱۱، سلیمانی و همکاران در ۵ کیلومتری شمال شهر زنجان به پرتگاه گسلی با ارتفاع ۲۰ متری در رسوبات کواترنری اشاره کرده بودند. در سال ۱۳۹۷، بدوزاده یک پرتگاه گسلی با ارتفاع بیشینه ۳۵ متر را در شمال شهر زنجان گزارش کرد. بر اساس این اطلاعات، اندازه بیشینه جابه‌جایی‌های افقی انباشتی بسیار بزرگتر از جابه‌جایی‌های شاقولی در پهنه گسله شمال زنجان است.

### ۴-۲-۳ بررسی آثار جوان‌ترین حرکات گسله

#### شمال زنجان با اطلاعات پهبادمینا

##### ۴-۲-۳-۱ سایت پهبادی کردکندی

این سایت در ۱۷ کیلومتری شهر زنجان قرار دارد، جایی که

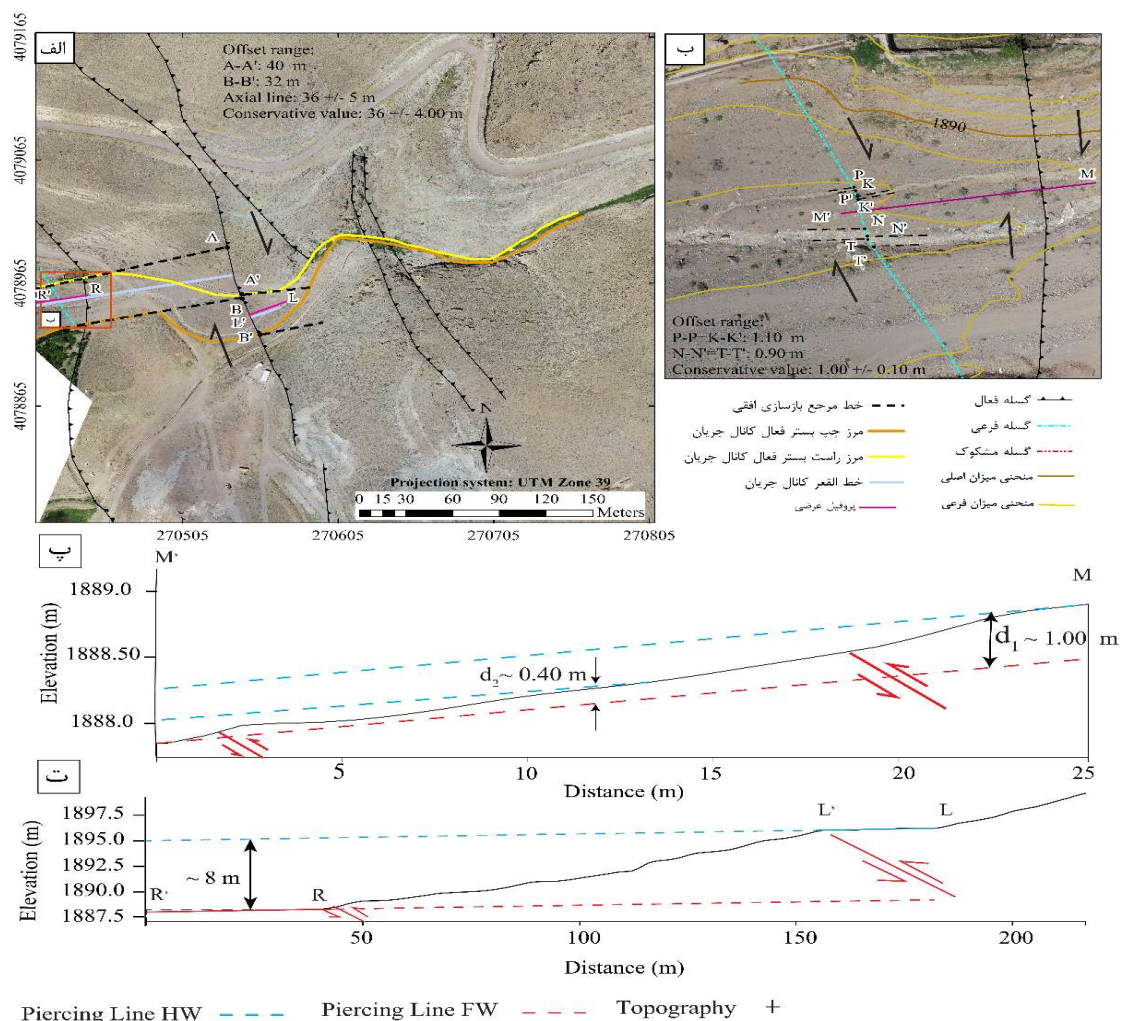
افزون بر انتقال روابط قبلی به پیرامون سطوح شناسایی شده، از مقایسه رنگ سطوح (با در نظر داشتن تغییر رنگ‌های محلی ناشی از چشمه تغذیه‌کننده)، بافت و تراکم زهکشی، عمق زهکشی و درجه فرسایش سطح استفاده شده است. به‌طور معمول، سطوح قدیمی‌تر به پیشانی کوهستان نزدیک‌ترند و محل تشکیل آنها به خواستگاهشان یعنی سنگ‌های ائوسن نزدیک‌تر است. قطعات سنگی فرسایش یافته در مخروط‌افکنه‌های جوان‌تر که در پایین دست مخروط‌افکنه‌های قدیمی‌تر قرار دارند، گردتر و دانه‌ریزتر هستند و هر چه سطوح جوان‌تر می‌شوند، با نادیده گرفتن تغییرات محلی، نهشته‌ها جورشدگی بیشتری نشان می‌دهند.

### ۴-۲-۲ بیشینه جابه‌جایی انباشتی

به‌طور معمول، سن و اندازه جابه‌جایی انباشتی پیرو سن سطح زمین‌ریختی‌ای است که آن سیما یا عارضه جابه‌جا شده در آن ایجاد شده است. طبق قانون تقاطع عناصر، آبراهه‌ای که بستر خود را درون یک سطح زمین‌ریختی کنده است، به‌طور قطع، جوانتر از آن زمین‌ریخت است. حال در راستای یک گسله مشخص، هر چه سیما یا عارضه جابه‌جا شده سن نسبی بیشتری داشته باشد، اندازه جابه‌جایی‌ای که در طول زمان ثبت می‌کند، بیشتر خواهد بود. برای گسله شمال زنجان، کهن‌ترین سیما‌های زمین‌ریختی کواترنری بریده شده با گسله، رودخانه‌های فصلی یا دائمی بزرگ گستره هستند که سامانه زهکشی اصلی را کنترل کرده‌اند. این سیماها قدرت فرسایشی بیشتری نسبت به آبراهه‌های کوچک‌تر دارند و به همین خاطر، جای خوبی برای اندازه‌گیری جابه‌جایی انباشتی شاقولی نیستند. اما، با وجود فرسایش قابل‌توجه در دیواره‌های بستر در نزدیکی پهنه گسله، شکل اصلی خود را در فاصله از گسله حفظ می‌کنند و ابزار خوبی برای برآورد بیشینه جابه‌جایی انباشتی افقی در راستای گسله هستند. جابه‌جایی‌های افقی بزرگ با توجه به سن نسبی نهشته‌هایی

سطوح کواترنری کنده و پادگانه‌های محلی  $Q_{11}$  تا  $Q_{15}$  را با طرح پلکانی پیرامون بستر فعال خود ایجاد کرده است. در بلافضل غربی گسله، مرزهای فرسایشی  $Q_2$  با  $Q_3$  و  $Q_3$  با بستر متروک آبراهه مرکزی مشخص است. افزون بر آن، لبه‌های جابه‌جا شده پادگانه‌های محلی در راستای گسله امکان برآورد جابه‌جایی‌های راستالغز راست‌بر را فراهم کرده است.

شاخه‌های گسلی جوان ۷۸۰ متر از پیشانی کوهستان فاصله گرفته‌اند. توالی کامل مخروط‌افکنه‌های کواترنری پس از  $Q_1$  در مرز کوه و دشت شکل گرفته‌اند.  $Q_3$  در فرودست گسله به صورت باریکه‌ای در دل  $Q_2$  نشسته اما با دور شدن از لبه کوه به سمت دشت، نیمه جنوبی سطح  $Q_2$  را پوشانده است.  $Q_{3b}$  در پایین‌دست، روی پنجه مخروط‌افکنه  $Q_3$  قرار گرفته است. آبراهه مرکزی، مطابق شکل ۷، با خروج از لبه کوه و گذر از عرض گسله، بستر خود را در این مجموعه



شکل ۷. بازسازی جابه‌جایی‌های افقی و شاقولی در سایت کردکندی. (الف) جنبش‌های گسلی جوان‌تر از  $Q_{11}$  آبراهه را به اندازه  $36 \pm 4$  متر جابه‌جا کرده است. (ب) بزرگ‌نمایی محدوده چهارگوش قرمز در شکل (الف) که شواهدی از تغییر شکل زمین‌لرزه‌ای را نشان می‌دهد. جابه‌جایی افقی با سن هولوسن در محدوده ۱/۰۰۰ متر است. پله‌شدگی منحنی‌های تراز توپوگرافی این جابه‌جایی افقی را به زیبایی نمایش می‌دهد. بریدگی خطی و ناگهانی این مجموعه زمین‌ریخت‌های جوان گواهِ محکمی بر زمین‌لرزه‌ای بودن آنهاست. (پ) بازسازی پروفیل عرضی  $MM'$  در شکل (ب) نشان دهنده جابه‌جایی شاقولی انباشتی در حدود ۱ متر و جابه‌جایی منفرد ۰/۴۰ متر است. (ت) بازسازی پروفیل عرضی  $RR'$  در پایین دست گسله و  $LL'$  در بالادست گسله جابه‌جایی شاقولی در حدود ۸ متر را برای این پهنه گسلی در همراهی با جابه‌جایی افقی ۳۲ تا ۴۰ متری انباشتی افقی نشان می‌دهد. نسبت مقیاس محور عمودی به افقی ۱:۴ برای شکل (پ) و ۱:۳/۵ برای شکل (ت) است.

پخش شدن شاخه‌های گسله در بخش شمالی سایت مشهودتر است؛ جایی که فراوانی پرتگاه‌های گسلی بیشتر است. در جنوب رودخانه ارمغانخانه روند شمالی-جنوبی گسله به شمال غرب-جنوب شرق تبدیل شده، رد سطحی آن دیگر قابل پیگیری نیست. مطابق

شکل ۸ در بخش شمالی سایت یک آبراهه بستر خود را در مخروط افکنه کوچکی که باید از Q<sub>3</sub> جوانتر باشد، کنده و سه پادگانه رودخانه‌ای بر جای گذاشته است. این مجموعه با گسله بریده شده است. بیشترین مقدار جابه‌جایی افقی قابل بازسازی در این مجموعه مربوط به جابه‌جایی دیواره‌های راست (AA') و چپ (BB') آبراهه میانی است و در حدود ۴۰±۴ متر است. با توجه به

شکل پ-بلندی پرتگاه گسله در اینجا نزدیک به ۸ متر از سطح مخروط افکنه می‌رسد که سن آغاز تشکیل آن باید اندکی بیشتر از مخروط افکنه پایین دست باشد.

در دل پادگانه رودخانه‌ای Q<sub>3</sub> یک جابه‌جایی افقی ۴/۵۰ متری قابل بازسازی است. اگر زاویه افتادگی بردار لغزش میانگین زمین‌ریختی (۱۱ درجه) را که با استناد به جابه‌جایی‌های افقی ۴۰ متر و شاقولی ۸ متری به دست آمده است، به جابه‌جایی افقی ۴/۵۰ متری اعمال کنیم جابه‌جایی شاقولی مرتبط با آن برابر ۰/۹ متر به دست می‌آید. با مد نظر قرار دادن اثر فرسایش بر کف آبراهه این مقدار حد پایین جابه‌جایی شاقولی در این سن است.

در ۷۰ متری جنوب این آبراهه اصلی، یک شیار باریک و جوان در نشیب پرتگاه گسله ایجاد شده و با آخرین فعالیت گسله به طور شاقولی جابه‌جا شده است. نبود اثر فرسایش و فروکند در لبه جدید پرتگاه در پیشانی این شیار نشان می‌دهد که این جابه‌جایی زمین‌لرزه‌ای و مربوط به آخرین جنبش گسله بوده است. کف این شیار با سطح

بر مبنای تصویر خطوط مرجع برازش شده بر این مرزها (شکل)، جابه‌جایی انباشتی ۳۶±۴ متر (پس از تشکیل Q<sub>11</sub>) اندازه‌گیری می‌شود. علاوه بر جابه‌جایی انباشتی افقی ۳۲ تا ۴۰ متر، یک بازسازی هندسی نیز از پروفیل عرضی -RR' LL' برای این پهنه گسلی قابل ارائه است. این بازسازی جابه‌جایی شاقولی در حدود ۸ متر را به دست می‌دهد.

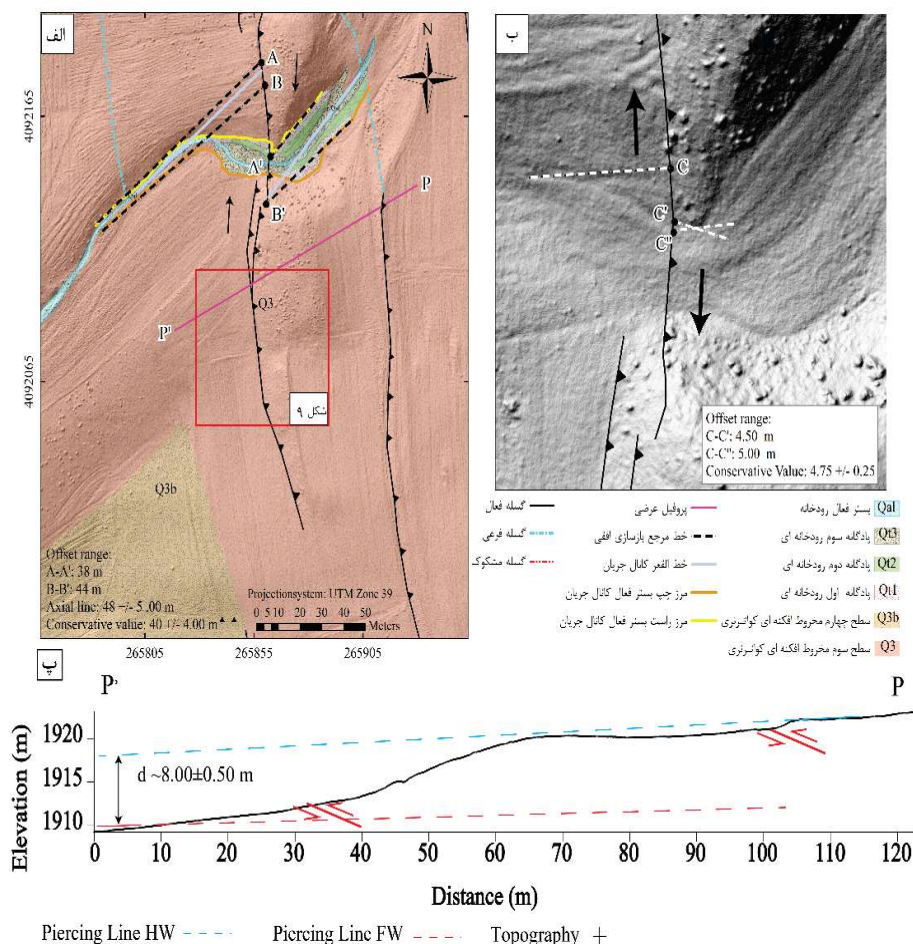
یک شاخه جوان‌تر گسله به سمت دشت پیش رفته و سطح Q<sub>14</sub> را بریده است (شکل -ب). جوان‌ترین جابه‌جایی گسله در اینجا به اندازه ۱/۰±۰/۱۰ متر برای دو آبراهه جوان کنده شده روی پادگانه رودخانه‌ای Q<sub>14</sub> مشهود است (خطوط مرجع بازسازی 'PP'، 'NN' و 'TT'). بر مبنای شکل (پ)، برش عرضی MM' در عرض شاخه جوان گسله در این پادگانه جابه‌جایی شاقولی انباشتی حدود ۱ متر و جابه‌جایی منفرد حدود ۰/۴۰ متر را نشان می‌دهد؛ هرچند به دلیل قرارگیری این بخش در حاشیه مدل ارتفاعی رقومی، تعیین عدم قطعیت برای آن ممکن نیست. با استناد به هندسه بسیار ساده جابه‌جایی و نبود آثار فرسایش -رسوب متوالی در این سیما، این مجموعه جابه‌جایی به عنوان جوان‌ترین جابه‌جایی زمین‌لرزه‌ای روی این شاخه از گسله تلقی می‌شود.

## ۲-۳-۲-۴ سایت پهبادی اورتابلاغ

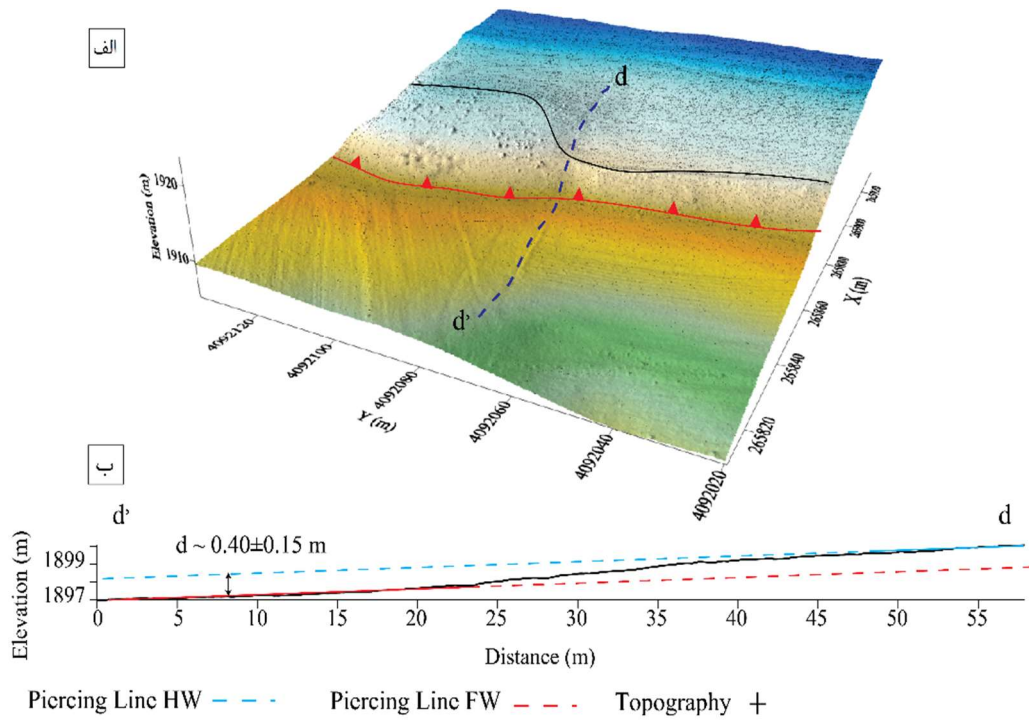
سایت اورتابلاغ در جنوب غربی روستای اورتابلاغ و جنوب رودخانه ارمغانخانه قرار دارد. بخش شرقی با رسوبات کواترنری قدیمی Q<sub>2</sub> پوشیده شده است و بخش فروافتاده غربی رسوبات جوان‌تر Q<sub>3</sub>، Q<sub>3b</sub> و Q<sub>4</sub> را در بر می‌گیرد. روند عمومی گسله شمالی-جنوبی است، تعدادی پرتگاه گسلی با نشیب رو به غرب با ارتفاع‌های مختلف در رسوبات Q<sub>3</sub> دیده می‌شود. رسوبات Q<sub>3b</sub> در فرودپواره گسله تشکیل شده‌اند. شاخه‌های جوان گسله با فاصله از مرز کوه و دشت، رسوبات جوان را بریده‌اند.

زمین در فرودپواره گسله در غرب پرتگاه اختلاف ارتفاع نزدیک به ۴۰ سانتی متر را نشان می‌دهد (شکل ۹). نزدیک به ۹۰۰ متر دورتر در جنوب شرق، مطابق شکل ۱۰، مجموعه سیمای رودخانه‌ای زیبایی جابه‌جایی‌های راست بر گسله را در خود ثبت کرده‌است. آبراهه اصلی بستر خود را در سطح Q2 کنده و ۶ پادگانه رودخانه‌ای پیرامون خود به‌جا گذاشته است. جوان‌ترین پادگانه Qt6 است که درست در کنار بستر فعال رودخانه قرار دارد. مقدار جابه‌جایی راست بر قابل بازسازی به کمک مرز دو پادگانه رودخانه‌ای Qt2-1 و Qt2-2 و بر اساس

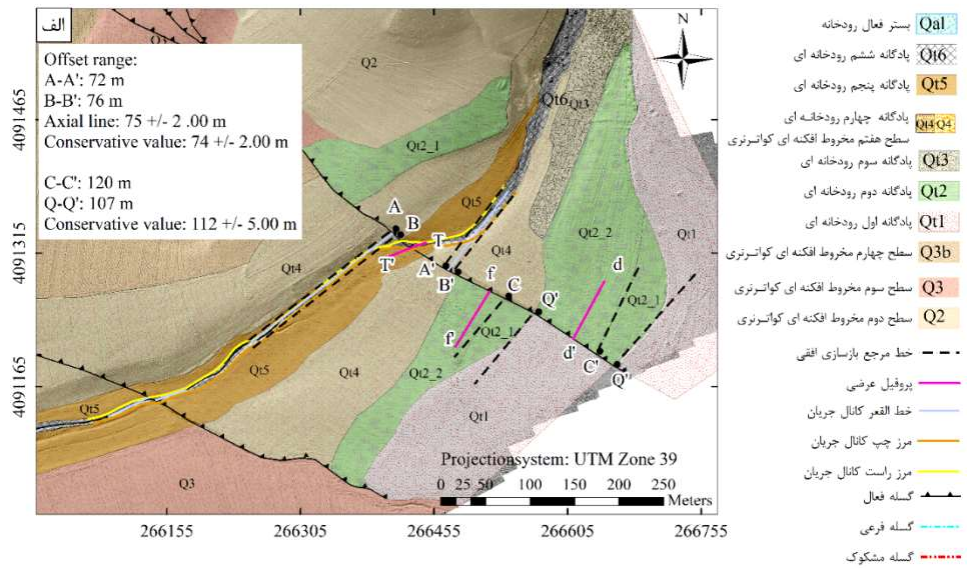
خطوط بازسازی مرجع 'QQ' در محدوده ۱۱۲ متر قرار دارد. از سویی دیگر، جابه‌جایی شاقولی از بازسازی پروفیل‌های ارتفاعی 'ff' dd بر روی پادگانه Qt2-1 در حدود ۵/۲۵ متر است. با این نسبت جابه‌جایی، زاویه افتادگی بردار لغزش گسله ۲ درجه برآورد می‌شود. در این حالت جابه‌جایی افقی معادل پروفیل 80/0 TT' متری برابر ۲۳ متر بدست می‌آید. جابه‌جایی کانال اصلی آبراهه که در سطح Qt4 ایجاد شده، به کمک خطوط مرجع بازسازی 'AA' و 'BB' در بازه ۷۲ تا ۷۶ متر به دست می‌آید.

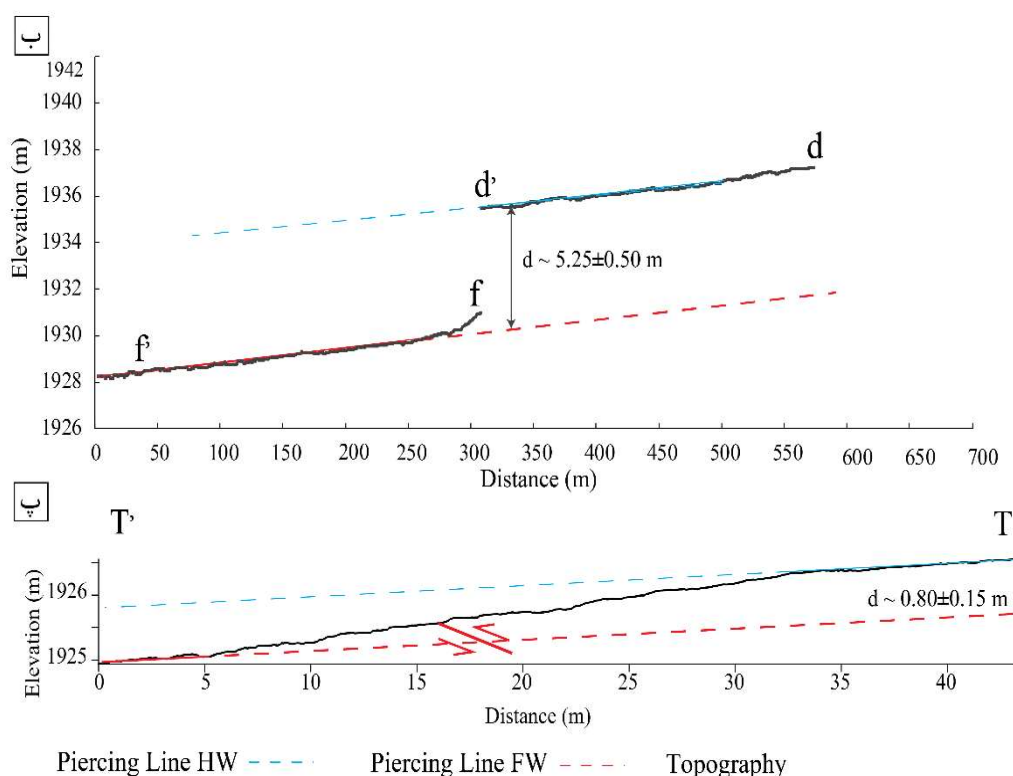


شکل ۸. بازسازی زمین‌ریختی در سایت اورتابلانغ. الف) جابه‌جایی افقی آبراهه‌ای که بستر خود را در رسوبات Q3 کنده است در حدود ۴۰ متر بازسازی شده است. ب) یک جابه‌جایی افقی ۴/۵۰ متر در دیواره راست آبراهه قابل اندازه‌گیری است. پ) بازسازی جابه‌جایی شاقولی پروفیل عرضی PP' برابر ۸/۰±۰/۵ متر است. نسبت مقیاس محور عمودی به افقی ۱: ۱/۵ است. مربع قرمز تصویر بزرگ شده در شکل ۹ را نشان می‌دهد.



شکل ۹. جابه‌جایی زمین‌لرزه‌ای ایجاد شده در یک شیار فرسایشی جوان در آخرین حرکت ناگهانی گسله. الف) مدل سه‌بعدی آبراهه که در فرادایواره گسله به اندازه ۰/۴۰ متر بالا آورده شده است. ب) بازسازی پروفیل عرضی dd' که از روی مدل رقومی زمین با قدرت تفکیک ۵ سانتی‌متر تهیه شده است. نسبت مقیاس محور عمودی به افقی ۱: ۱/۵ است.





شکل ۱۰. نقشه ریخت زمین‌ساختی و بازسازی زمین‌ریختی در سایت اورتابلاغ جنوبی. الف) بازسازی جابه‌جایی افقی پادگانه  $Q_{12-1}$  و کانال جریان نشان داده شده است. جابه‌جایی راست‌بر پادگانه  $Q_{12-1}$  به اندازه  $112 \pm 5$  متر قابل بازسازی است. مقدار جابه‌جایی افقی کانال جریان با سن نسبی جوان‌تر از  $Q_{14}$  برابر  $74 \pm 2$  متر است. موقعیت پروفیل‌های عرضی روی پادگانه‌های رودخانه‌ای به رنگ صورتی نشان داده شده است. ب) بازسازی جابه‌جایی شاقولی پروفیل  $dd'$  ff. ب) بازسازی جابه‌جایی شاقولی پروفیل  $TT'$ . نسبت مقیاس محور عمودی به افقی در شکل (ب) ۱:۱۶ و در شکل (پ) ۱:۴ است.

#### ۴-۴ تفسیر نتایج بدست آمده

مشاهدات در سایت‌های پهنادبنا از سطح جزئیات مکانی بالایی برخوردار است، طوری که زمین‌ریخت‌های کوچک غیر قابل شناسایی در مقیاس پهنه گسله، در مقیاس سایت قابل شناسایی، اندازه‌گیری و تحلیل کمی است. تحلیل زمین‌ریخت‌ها و سیماهای زمین‌ریختی در طول گسله شمال زنجان نشانه‌های آشکاری از گسیختگی سطحی آشکار، جابه‌جایی‌های سامان‌مند راست‌بر ناگهانی و پرتگاه‌های گسلی خطی ارائه می‌دهد، این مشاهدات گویای گسلش زمین‌لرزه‌ای دست‌کم در راستای بخشی از گسله شمال زنجان است.

بر مبنای مشاهدات انجام شده، گسله شمال زنجان مشتمل بر یک پهنه ساختاری متنوع و پیچیده است که از لبه کوه

تا چهار کیلومتری درون دشت گسترده شده است و مجموعه سیماهای آبرفتی پلیستوسن و هولوسن را بریده است. پرتگاه‌های خطی و مرتفع گسله در سطوح کواترنری نمود جابه‌جایی‌های شاقولی انباشتی است که در بلندترین حالت یافت شده، ناچیز بودن اندازه جابه‌جایی‌های شاقولی نسبت به افقی را نشان می‌دهد. به بیانی دیگر کوچک بودن زاویه ریک میانگین زمین‌ریختی (۲ تا ۱۱ درجه در سایت اورتابلاغ)، ممکن است به اشتباه به نشانه چیرگی سازوکار راستالغز گسله تفسیر شود. جابه‌جایی‌های بزرگ راستالغز در راستای بخش‌های اصلی گسله مربوط به زمانی است که فشارش بیشینه منطقه‌ای روند نزدیک به شمالی-جنوبی داشته و این گسله به طور اصلی راستالغز راست‌بر بوده است (به سلمانلو، ۱۳۹۴ و بدوزاده، ۱۳۹۷ رجوع شود). براساس

این نوع جابه‌جایی‌ها از بازسازی زمین‌ریخت‌هایی به‌دست آمده‌اند که به‌طور خطی و ناگهانی در راستای گسله بریده و جابه‌جا شده‌اند. از سوی دیگر، تاریخچه فرسایش-رسوب بسیار ساده‌ای را پس از جابه‌جا شدن طی کرده‌اند؛ طوری که با عناصر زمین‌ریختی رسوبی یا فرسایشی پس از گسلش رونوشت نشده یا تغییر نکرده‌اند. اما، چون شانس یافتن چنین شرایطی بسیار اندک بوده و به همان نسبت، تعداد اندازه‌گیری‌های مربوط نیز کم و انگشت‌شمار است، با اطمینان نمی‌توان تعیین کرد که این اندازه‌جابه‌جایی‌های تک‌رویدادی کدام نوع از جابه‌جایی بیشینه یا میانگین در رویداد باشند. از این رو در یک رویکرد متعادل، آنها را نماینده جابه‌جایی‌های میانگین منسوب به تک‌رویدادی می‌دانیم. با این فرض و با استناد به روابط تجربی ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴) برای تبدیل و برآورد پارامترهای مختلف گسلش زمین‌لرزه‌ای، این مقدار جابه‌جایی میانگین نشان می‌دهد گسله شمال زنجان در گذشته باستانی خود (با توجه به نبود نگاهت تاریخی) مسبب زمین‌لرزه‌های با بزرگای  $7/0$  بوده است. هرچند، در یک برآورد محتاطانه و در نبود اطلاعات آماری کافی از لغزش در هر رویداد، می‌توان آنچه اندازه گرفته‌ایم را نماینده جابه‌جایی تک‌رویدادی بیشینه دانست. با این فرض، بزرگای زمین‌لرزه مسبب این جابه‌جایی به کمترین ممکن، یعنی  $6/7$  قابل کاهش است. به شیوه دیگر، اگر طول  $50$  کیلومتری شناخته شده گسیختگی سطحی گسله شمال زنجان را منظور کنیم (آنچه از طول کل  $60$  کیلومتری گسله به طور مستند و با ماهیت گسیختگی جوان قابل شناسایی است)،  $70$  درصد این طول طبق روابط تجربی اشاره شده در رخداد زمین‌لرزه‌ای با بزرگای  $6/7$  می‌تواند گسیخته شود و صددرصد طول آن می‌تواند مسبب رخداد لرزه‌ای با بزرگای  $7$  باشد. از این رو، پیشنهاد بازه بزرگای  $6/7$  تا  $7/0$  برای آنچه گسله شمال زنجان در گذشته باستانی خود ایجاد کرده است، بسیار محتاطانه و

شواهد زمین‌شناختی و ریخت‌زمین‌ساختی، آغاز حرکات فشاری در راستای این گسله به پس از تشکیل سطح  $Q_3$  بازمی‌گردد. برای نمونه، فرادیواره همه پهنه‌های راندگی بررسی شده درون دشت (مجموعه‌های اورتابلاغ و ...) با سطوح  $Q_3$  پوشیده شده‌اند و دگرریختی ناشی از فعالیت فشاری گسله سبب به هم ریختن این سطوح شده است. از سوی دیگر، سطوح  $Q_{3b}$  با خاستگاه تکتونیکی، در پای این پرتگاه‌ها ایجاد شده است. با این شرح، گسله شمال زنجان به‌طور اصلی یک گسله واژگون با مولفه کوچکی از حرکت راست‌بر است که نسبت این دو مولفه بسته به راستای هر شاخه گسله و نقش ساختاری آن می‌تواند تغییر کند. برای نمونه، در سایت اورتابلاغ، بخش جنوبی گسله با راستای  $290$  درجه سازوکار فعال راست‌الغز راست‌بر نشان می‌دهد در حالی که بخش شمالی آن که هم‌راستای گسله اصلی و شمالی-جنوبی است، سازوکار چیره فشاری دارد. در سرتاسر منطقه مورد پژوهش آثار جابه‌جایی سامانمند راست‌بر در لبه کوهستان و دشت دیده می‌شود. همین‌طور، پرتگاه‌های گسلی خطی ناشی از فعالیت شاخه‌های جوان گسله هستند که در فاصله  $500$  متری تا  $4$  کیلومتری از پیشانی کوهستان رسوبات کواترنری را بریده‌اند. بررسی‌های سنجش‌ازدور و میدانی نمونه‌ای از مقدار جابه‌جایی افقی هولوسن مرتبط با یک زمین‌لرزه دیرینه یا باستانی (؟) را نزدیک به  $1$  متر ( $90$  تا  $110$  سانتی‌متر) در یک مجموعه زمین‌ریختی بسیار جوان (لبه جوان‌ترین پادگانه بالادست بستر فعال، یک شیار فرسایشی در سطح پادگانه و پله جانبی در منحنی تراز توپوگرافی) در بستر رودخانه کردکندی (شکل ۷) نشان می‌دهد. مقدار جابه‌جایی شاقولی میانگین منسوب به تک‌رویداد هولوسن نیز در هر دو سایت اورتابلاغ و کردکندی به اندازه  $0/40$  تا  $0/50$  متر اندازه‌گیری شده است. مقدار این دو مولفه شاقولی و افقی نماینده جابه‌جایی مورب‌لغز  $1/1$  متری گسله در این دو جایگاه ساختاری است.

مبتنی بر مشاهدات خواهد بود.

اختلاف نسبت جابجایی افقی (۱/۰ متر) و شاقولی (۰/۴۰ متر) در هولوسن که پیش تر اشاره شد، و نیز نسبت جابجایی افقی (۷۰۰ متر) و شاقولی (۳۵ متر) گزارش شده توسط سلیمانی و همکاران (۲۰۱۱) و بدوزاده (۱۳۹۷) قابل توجه است. این اختلاف می‌تواند در ارتباط با تغییر در وضعیت تنش پلیوسن-کواترنری در گستره زنجان و شمال غرب ایران باشد (سلمانلو، ۱۳۹۴؛ افلاکی و همکاران، ۲۰۲۱). مشابه این تغییر وضعیت تنش در شمال شرق ایران (شبانیان و همکاران، ۲۰۱۰) و در شمال لوت (فرید و همکاران، ۲۰۱۱؛ بنی آدم و همکاران، ۲۰۱۹) نیز گزارش شده است. براساس این مجموعه مطالعات، زمان فعالیت رژیم تنش دیرین (بیشینه فشارش شمال غربی) از پس از برخورد پایانی در میوسن پسین آغاز شده و در زمان پلیوسن ادامه داشته است. رژیم تنش میانه فعالیت به نسبت کوتاهی داشته و با روند فشارش شمالی-جنوبی در پلیستوسن (جوان تر از ۲/۴ میلیون سال؛ شبانیان و همکاران، ۲۰۰۹ ب) منطقه را متأثر کرده است؛ در آن زمان، گسله شمال زنجان راستالغز محض بوده است. آخرین نسل رژیم تنش با سوی بیشینه فشارش افقی شمال شرقی زمانی در پلیستوسن آغاز شده و تا امروز فعالیت داشته است؛ این رژیم تنش مسئول جوان ترین تغییر شکل ها در گستره زنجان و گسلش فشاری در راستای گسله شمال زنجان است. با این تاریخچه به نظر می‌رسد جابه‌جایی‌های انباشتی راست بر بزرگ مربوط به رژیم تنش میانه است و جابه‌جایی‌های شاقولی جوان ناشی از فعالیت رژیم تنش اخیر است (بدوزاده، ۱۳۹۷). در رژیم تنش فعال نیز، اختلاف روند شاخه‌های جوان گسله (نسبت به پهنه اصلی) سبب بروز اختلاف در سازوکار آنها و ناگزیر، تغییر در نسبت جابه‌جایی‌های شاقولی به افقی جوان شده است. این ترکیب پیچیده جنبشی-دینامیکی-زمین‌ریختی مسبب بروز اختلاف نسبت‌های جابه‌جایی در گذر زمان در راستای گسله شمال زنجان است و نشان

می‌دهد، در کنار بررسی‌های ریخت‌زمین‌ساختی، اندازه‌گیری‌ها و تحلیل‌های جنبشی ضروری است. چرا که مشاهدات صرف بر مبنای داده‌های سنجش‌ازدور تنها تغییر شکل پایانی زمین‌ریخت‌ها را توصیف می‌کند و در نواحی با تکتونیک فعال شاید نتواند ارزیابی درستی درباره رفتار امروزی یک گسله ارائه دهد.

## ۵ نتیجه‌گیری

گستره شمال زنجان در محل تاثیر سه قلمرو تکتونیکی ایران مرکزی، حوضه خزر جنوبی و رشته‌کوه البرز است. گسله شمال زنجان به عنوان لبه باختری کوهستان البرز، به‌طور فعال بخشی از کوتاه‌شدگی ناشی از همگرایی ورقه‌های زمین‌ساختی اوراسیا-عربی را در خود جای داده است. این گسله از سه بخش ساختاری مشخص ساخته شده که هر یک با یک پهنه هم‌پوشانی متشکل از آرایه‌های راندگی فلسی از هم جدا می‌شوند. سازوکار چیره گسله شمال زنجان فشاری با مولفه کوچکی از حرکت راست بر است. این گسله به عنوان یک مرز تکتونیکی مهم رشته‌کوه البرز را در غرب محدود می‌کند و در نبود لرزه‌خیزی دستگامی و تاریخی، باید به عنوان یک چشمه مهم لرزه‌زا در نظر گرفته شود. بررسی‌های سنجش‌ازدور و میدانی مقدر جابه‌جایی مورب‌لغز گسله را در هولوسن، مرتبط با یک زمین‌لرزه دیرینه یا باستانی (؟)، ۱/۱ متر نشان می‌دهد. بر پایه این مشاهدات، گسله شمال زنجان به طور قطع یک گسله زمین‌لرزه‌زاست و با استناد به شواهد موجود در تاریخ خود زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۶/۷ تا ۷ را ایجاد کرده است. در صورت انجام سن‌سنجی روی سطوح کواترنری شناسایی شده، نتایج این پژوهش می‌تواند نقش بسزایی در برآورد نرخ لغزش گسله شمال زنجان داشته باشد. انجام پژوهش‌های تکمیلی دیرینه‌لرزه‌شناسی برای تعیین دقیق رفتار لرزه‌ای گسله شمال زنجان پیشنهاد می‌شود. از دید ریخت‌زمین‌ساختی، حرکت راستالغز گسله شمال

دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان. ثبوتی، فرهاد، قدس. (۱۳۹۲). مطالعه لرزه خیزی و پهنه بندی خطر زمین لرزه برای شهر زنجان و منطقه طارم، استان زنجان.

جوزی، ا. (۱۳۹۳). بررسی لرزه زمین ساخت شمال ایران با استفاده از داده های شبکه محلی. دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران.

سلمانلو، ع. (۱۳۹۴). بررسی تغییرات میدان تنش سنوزوئیک پسین (میوسن-کواترنری) در گستره زنجان و کاربرد آن در ژئودینامیک شمال باختر ایران. دانشگاه بوعلی سینا همدان.

Aflaki, M., Shabanian, E., Sahami, S., & Arshadi, M. (2021). Evolution of the stress field at the junction of Talesh – Alborz – Central Iran during the past 5 Ma: Implications for the tectonics of NW Iran. *Tectonophysics*, 821, 229115.

<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229115>.

Allen, M. B., Kheirkhah, M., Emami, M. H., & Jones, S. J. (2011). *Right-lateral shear across Iran and kinematic change in the Arabia – Eurasia collision zone*. 555–574.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04874.x>.

Ambraseys, & Jackson. (1998). Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, 133(2), 390–406.

<https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00508>.

Baniadam, F., Shabanian, E., & Bellier, O. (2019). The kinematics of the Dasht-e Bayaz earthquake fault during Pliocene-Quaternary: Implications for the tectonics of eastern Central Iran. *Tectonophysics*, 772, 228218.

<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.228218>.

Bello, S., Nardis, R. De, Scarpa, R., Brozzetti, F., Cirillo, D., & Ferrarini, F. (2021). *Fault Pattern and Seismotectonic Style of the Campania – Lucania 1980 Earthquake (M w 6.9, Southern Italy): New Multidisciplinary Constraints*. 8(January), 1–29.

<https://doi.org/10.3389/feart.2020.608063>.

Bi, H., Zheng, W., Ge, W., Zhang, P., & Zeng, J. (2018). *Constraining the distribution of vertical slip on the South Heli Shan Fault*

زنجان در رژیم تنش پیشین با حرکت جدید آن ( فشارشی نزدیک به محض) در سیمایهای امروزی ترکیب شده است و برآیندی از جابه جایی ها در عوارض زمین ریختی ایجاد کرده است. به دلیل جوان بودن رژیم تنش امروزی، می توان شواهد زمین ریختی هر دو رژیم تنش که منجر به جابه جایی شاقولی و راست بر شده است را در گستره مورد پژوهش مشاهده کرد. این تاریخچه نشان می دهد مشاهدات صرف بر مبنای داده های سنجش از دور تنها تغییر شکل پایانی زمین ریخت ها را توصیف می کند و ارزیابی رفتار امروزی یک گسله در نواحی با تکتونیک فعال باید در کنار اندازه گیری ها و تحلیل های جنبشی صورت گیرد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از سردبیر محترم مجله ژئوفیزیک ایران آقای دکتر جوان و داوران محترم مقاله که ما را در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند. تهیه بخشی از داده پهنه بندی استفاده شده در این مقاله از محل پژوهانه داخلی خانم زهره معصومی به شماره ۵۵۹۶۶ تامین شده است. لازم است، از مجموعه معدن آهن کردکندی به خصوص آقای مهندس مجتهدی که داده پهنه بندی را در اختیار پژوهشگران قرار دادند، قدردانی نمایم. در آخر از آقای مهندس بهرامی برای اجرای عملیات پروازی سایت اورتابلاغ تشکر می نمایم.

## منابع

بدوزاده، م. (۱۳۹۷). تکتونیک فعال و تکه بندی گسله شمال زنجان. دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران.

ثبوتی، ف.، حسامی، خ.، طبسی، ه. و قدس، ع. (۱۳۸۶)، گزارش مطالعات تفصیلی زلزله شناسی و لرزه خیزی استان زنجان، جلد اول-گسلش فعال در استان زنجان،

- Quaternary slip rates along the Doruneh Fault System (Central Iran). *Tectonics*, 35(2), 386–406. <https://doi.org/10.1002/2015TC003862>
- Foroutan, M. (2013). *Active tectonics and paleoseismology of strike-slip faults of Central Iran Mohammad Foroutan To cite this version: HAL Id: tel-00922358 L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE Tectonique active et paléosismol.*
- Gao, M., Xu, X., Klinger, Y., van der Woerd, J., & Tapponnier, P. (2017). High-resolution mapping based on an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to capture paleoseismic offsets along the Altyn-Tagh fault, China. *Scientific Reports*, 7(1), 8281. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08119-2>
- Grützner, C., Walker, R. T., Abdrakhmatov, K. E., Mukambaev, A., Elliott, A. J., & Elliott, J. R. (2017). Active Tectonics Around Almaty and along the Zailisky Alatau Range. *Tectonics*, 36(10), 2192–2226. <https://doi.org/10.1002/2017TC004657>
- Hackney, C., & Clayton, A. I. (2015). Unmanned Aerial Vehicles ( UAVs ) and their application in geomorphic mapping. *Geomorphological Techniques*, 7, 1–12. [http://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/geom\\_tech\\_chapters/2.1.7\\_UAV.pdf](http://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/geom_tech_chapters/2.1.7_UAV.pdf)
- Hauksson, E. (2002). The 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, Earthquake Sequence: Complex Conjugate Strike-Slip Faulting. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4), 1154–1170. <https://doi.org/10.1785/0120000920>
- Hessami, K., Jamali, F., & Tabassi, H. (2003). Major Active Faults of Iran. *IEEs*.
- Hodge, M., Biggs, J., Fagereng, Å., Elliott, A., Mdala, H., & Mphepo, F. (2019). *A semi-automated algorithm to quantify scarp morphology (SPARTA): application to normal faults in southern Malawi.* 27–57.
- James, M. R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., & Niethammer, U. (2017). Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280, 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.021>
- Jiao, Q., Jiang, W., Zhang, J., Jiang, H., Luo, Y., & Wang, X. (2016). Identification of paleoearthquakes based on geomorphological evidence and their tectonic implications for the (northeastern Tibet ) from high-resolution topographic data. <https://doi.org/10.1002/2017JB014901>
- Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2011). *Tectonic Geomorphology* (2nd ed.). John Wiley & Sons. [https://books.google.com/books/about/Tectonic\\_Geomorphology.html?id=83FuAvtSwe4C](https://books.google.com/books/about/Tectonic_Geomorphology.html?id=83FuAvtSwe4C)
- Deffontaines, B., Chang, K.-J., Champenois, J., Lin, K.-C., Lee, C.-T., Chen, R.-F., Hu, J.-C., & Fruneau, B. (2017). Active tectonics of the onshore Hengchun Fault using UAS DTM combined with ALOS PS-InSAR time series (Southern Taiwan). *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 19, 1–22. <https://doi.org/10.5194/nhess-2017-55>
- Delano, J. E., Howell, A., Stahl, T. A., & Clark, K. (2022). 3D Coseismic Surface Displacements From Historical Aerial Photographs of the 1987 Edgecumbe Earthquake, New Zealand. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(11). <https://doi.org/10.1029/2022JB024059>
- Djamour, Y., Vernant, P., Bayer, R., Nankali, H. R., Ritz, J. F., Hinderer, J., Hatam, Y., Luck, B., Le Moigne, N., Sedighi, M., & Khorrami, F. (2010). GPS and gravity constraints on continental deformation in the Alborz mountain range, Iran. *Geophysical Journal International*, 183(3), 1287–1301. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04811.x>
- Duvall, A. R., Harbert, S. A., Upton, P., Tucker, G. E., Flowers, R. M., & Collett, C. (2020). River patterns reveal two stages of landscape evolution at an oblique convergent margin, Marlborough Fault System, New Zealand. *Earth Surface Dynamics*, 8(1), 177–194. <https://doi.org/10.5194/esurf-8-177-2020>
- Ewertowski, M. W., Tomczyk, A. M., Evans, D. J. A., Roberts, D. H., & Ewertowski, W. (2019). Operational framework for rapid, very-high resolution mapping of glacial geomorphology using low-cost Unmanned Aerial Vehicles and structure-from-motion approach. *Remote Sensing*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/rs11010065>
- Farbod, Y., Bellier, O., Shabaniyan, E., & Abbassi, M. R. (2011). Geomorphic and structural variations along the Doruneh Fault System (central Iran). *Tectonics*, 30(6), 1–25. <https://doi.org/10.1029/2011TC002889>
- Farbod, Y., Shabaniyan, E., Bellier, O., Abbassi, M. R., Braucher, R., Benedetti, L., Bourlès, D., & Hessami, K. (2016). Spatial variations in late

- Constructing Three Dimensional Models from Photography. In *US Department of Interior Bureau of Reclamation Research and Development Office* (Issue October). [https://www.researchgate.net/publication/308106693\\_Whitepaper\\_on\\_Structure\\_from\\_Motion\\_SfM\\_Photogrammetry\\_Constructing\\_Three\\_Dimensional\\_Models\\_from\\_Photography](https://www.researchgate.net/publication/308106693_Whitepaper_on_Structure_from_Motion_SfM_Photogrammetry_Constructing_Three_Dimensional_Models_from_Photography).
- Rao, G., He, C., Cheng, Y., Yu, Y., Hu, J., Chen, P., & Yao, Q. (2018). Active normal faulting along the Langshan Piedmont fault, North China: Implications for slip partitioning in the western Hetao Graben. *Journal of Geology*, *126*(1), 99–118. <https://doi.org/10.1086/694748>.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., ... Karam, G. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *111*(5), 1–26. <https://doi.org/10.1029/2005JB004051>.
- Shabaniyan, E. (2019). *Field trip guide: Active Tectonics of the North Zanjan Fault., 3rd Trigger conf.*
- Shabaniyan, E., Bellier, O., Siame, L., Arnaud, N., Abbassi, M. R., & Cochemé, J. J. (2009). New tectonic configuration in NE Iran: Active strike-slip faulting between the Kopeh Dagh and Binalud mountains. *Tectonics*, *28*(5), 1–29. <https://doi.org/10.1029/2008TC002444>.
- Shabaniyan, E., Bellier, O., Abbassi, M. R., Siame, L., & Farbod, Y. (2010). Plio-Quaternary stress states in NE Iran: Kopeh Dagh and Allah Dagh-Binalud mountain ranges. *Tectonophysics*, *480*(1–4), 280–304. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.10.022>.
- Shabaniyan, E., Bellier, O., Siame, L., Abbassi, M. R., Bourlès, D., Braucher, R., & Farbod, Y. (2012). The binalud mountains: A key piece for the geodynamic puzzle of NE Iran. *Tectonics*, *31*(6), 1–25. <https://doi.org/10.1029/2012TC003183>.
- Snively, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2008). Modeling the world from Internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, *80*(2), 189–210. <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0107-3>.
- Solaymani Azad, S., 2009, Evaluation de l'aléa southern part of the active Anqiu–Juxian fault, eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, *132*, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.10.012>.
- Khorrami, F., Vernant, P., Masson, F., Nilfouroushan, F., Mousavi, Z., Nankali, H., Saadat, S. A., Walpersdorf, A., Hosseini, S., Tavakoli, P., Aghamohammadi, A., & Alijanzade, M. (2019). An up-to-date crustal deformation map of Iran using integrated campaign-mode and permanent GPS velocities. *Geophysical Journal International*, *217*(2), 832–843. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz045>.
- Klinger, Y., Etchebes, M., Tapponnier, P., & Narteau, C. (2011). Characteristic slip for five great earthquakes along the Fuyun fault in China. *Nature Geoscience*, *4*(6), 389–392. <https://doi.org/10.1038/ngeo1158>.
- McCalpin, J. P. (2012). Paleoseismology, Second Edition. *Environmental & Engineering Geoscience*, *18*(3), 311–312. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.18.3.311>.
- McGill, S. F., & Sieh, K. (1991). Surficial offsets on the central and eastern Garlock Fault associated with prehistoric earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, *96*(B13). <https://doi.org/10.1029/91jb02030>.
- Meyer, B., & Le Dortz, K. (2007). Strike-slip kinematics in Central and Eastern Iran: Estimating fault slip-rates averaged over the Holocene. *Tectonics*, *26*(5). <https://doi.org/10.1029/2006TC002073>.
- Moradi, A. S., Hatzfeld, D., & Tatar, M. (2011). Microseismicity and seismotectonics of the North Tabriz fault (Iran). *Tectonophysics*, *506*(1–4), 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.04.008>.
- Mousavi Zahra. (2010). Interseismic deformation of two major active faults in eastern Iran: contribution of satellite radar interferometry ( InSAR ). *Supervision*, June.
- Niassarifard, M., Shabaniyan, E., Solaymani Azad, S., & Madanipour, S. (2021). New tectonic configuration in NW Iran: Intracontinental dextral shear between NW Iran and SE Anatolia. *Tectonophysics*, *811*, 228886. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228886>.
- Papanikolaou, I. D., Roberts, G. P., & Michetti, A. M. (2005). Fault scarps and deformation rates in Lazio–Abruzzo, Central Italy: Comparison between geological fault slip-rate and GPS data. *Tectonophysics*, *408*(1–4), 147–176. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.043>.
- Peterson, E., Klein, M., & Stewart, R. (2015).

- <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2002.01556.x>.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., & Ch, J. (2004). *Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman*. 381–398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02222.x>.
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin - Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002.
- Xiong, B., & Li, X. (2020). Offset measurements along active faults based on the structure from motion method – A case study of Gebiling in the Xorkoli section of the Altyn Tagh Fault. *Geodesy and Geodynamics*, 11(5), 358–366. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.05.005>.
- Zhang, Z., Deriche, R., Faugeras, O., & Luong, Q.-T. (1995). A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry. *Artificial Intelligence*, 78(1–2), 87–119. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(95\)00022-4](https://doi.org/10.1016/0004-3702(95)00022-4).
- Zielke, O., Klinger, Y., & Arrowsmith, J. R. (2015). Fault slip and earthquake recurrence along strike-slip faults - Contributions of high-resolution geomorphic data. *Tectonophysics*, 638(1), 43–62. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.11.004>.
- sisimique pour les villes de Téhéran, Tabriz et Zandjan dans le NW de l'Iran, Approche morphotectonique et paléosismologique, PhD thesis, University of Montpellier (in French and English).
- Solymani Azad, S. S., Dominguez, S., Philip, H., Hessami, K., Forutan, M. R., Zadeh, M. S., & Ritz, J. F. (2011). The Zandjan fault system: Morphological and tectonic evidences of a new active fault network in the NW of Iran. *Tectonophysics*, 506(1–4), 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.04.012>.
- Solaymani Azad, S., Philip, H., Dominguez, S., Hessami, K., Shahpasandzadeh, M., Foroutan, M., Tabassi, H., & Lamothe, M. (2015). Paleoseismological and morphological evidence of slip rate variations along the North Tabriz fault (NW Iran). *Tectonophysics*, 640–641, 20–38. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.11.010>.
- Song, X., Han, N., Shan, X., Wang, C., Zhang, Y., Yin, H., Zhang, G., & Xiu, W. (2019). Three-dimensional fault geometry and kinematics of the 2008 M 7.1 Yutian earthquake revealed by very-high resolution satellite stereo imagery. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111300. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111300>.
- Stocklin, J., & Eftekharneshad, J. (1969). *Zanjan geological map in scale 1:250,000*.
- Toori, M., & Seyitoğlu, G. (2014). *Neotectonics of the Zanjan – Kazvin area , Central Iran : Left lateral strike - slip induced restraining stepovers*. 260–276. <https://doi.org/10.3906/yer-1307-11>.
- Tziavou, O., Pytharouli, S., Souter, J., & Kingdom, U. (2017). *The use of UAVs in engineering geological surveys : mapping along Scotland ' s south-west coast .* 1–8.
- Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 73(June), 539–543. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.010>.
- Van Der Woerd, J., Tapponnier, P., Ryerson, F. J., Meriaux, A.-S., Meyer, B., Gaudemer, Y., Finkel, R. C., Caffee, M. W., Guoguang, Z., & Zhiqin, X. (2002). Uniform postglacial slip-rate along the central 600 km of the Kunlun Fault (Tibet), from <sup>26</sup>Al, <sup>10</sup>Be, and <sup>14</sup>C dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology. *Geophysical Journal International*, 148(3), 356–388.

## Application of high spatial resolution optical imageries in active fault investigations: the north Zanjan fault

Farzaneh Abedi<sup>1\*</sup>, Zohreh Masoumi<sup>2</sup>, Esmacil Shabani<sup>2</sup>, Stefano Salvi<sup>3</sup> and Stefano Pucci<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D., Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Center for Research in Climate Change and Global Warming (CRCC), Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran

<sup>3</sup> Professor, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, Italy

(Received: 23 January 2023, Accepted: 07 March 2023)

### Summary

The slow rate of active deformation and the absence of historical and instrumental moderate to large earthquakes in the Zanjan area have led to an underestimation of the active tectonic and seismotectonic impacts of major tectonic structures such as the Soltanieh and North Zanjan faults. The North Zanjan Fault (NZF), marking the western boundary of the Alborz Mountains, is a dextral reverse fault that directly affects the western districts of Zanjan city, where new urban and industrial sectors are emerging. However, it remains uncertain whether the fault experiences aseismic or seismogenic slip. Obtaining a geologically reliable answer to this question is crucial for our assessment of seismic hazard in the Zanjan region. In the absence of significant seismic activity, and in an effort to characterize the fault's behavior, we conducted an extensive investigation spanning several thousand years of geological activity along the NZF. This study involved a combination of photogrammetric technique, tectonic geomorphology, remote sensing, and field surveys. We utilized a wide array of aerial and specialized datasets, including open-access satellite images (e.g., Google Earth and SASPlanet), Keyhole (KH)9 dataset (1970-1980), 12.50 m ALOSPALSAR Digital Terrain Model, 30 m SRTM data, as well as drone-based Digital Surface Models (DSMs) and ortho-mosaics. Our three-dimensional morphotectonic analysis of both general-scale and newly acquired site-scale DEMs revealed a complex structural pattern for the NZF. This pattern consists of three distinct northern, central, and southern portions, interconnected through arrays of imbricate thrust faults.

The primary fault zone has migrated westward from the mountain front into the Quaternary plain. Sharp centimetric lateral and vertical displacements observed in present-day geomorphology suggest abrupt recent movements along the fault, indicating the seismogenic nature of a significant portion of the fault slip. The most recent fault offsets are observed along the southern and central fault zones, where the offsets recorded by active streambeds or gullies do not exceed approximately 0.5 meters vertically and 1.10 meters in total displacements. Assuming a similar order of total displacement for the average slip per event implies a moment magnitude in the range of 6.7 to 7.0 for the last earthquake along the NZF. Our findings provide a solid foundation for future complementary studies on the paleoseismicity and slip rate of the fault. This study demonstrates that multi-scale temporal and spatial datasets can be confidently employed in active tectonic studies on slowly slipping active faults. When accompanied by Quaternary dating, these datasets can unveil the history of faulting in intracontinental regions affected by low rates of active deformation.

**Keywords:** Active tectonics, Zanjan – bijar seismic gap, north Zanjan fault, drone, remote sensing