

اولین نشانه‌های زمین لرزه تاریخی AD ۱۳۸۴ شهری، بر روی گسل پیشوا بر پایه پژوهش‌های پارینه لرزه‌شناختی، جنوب‌خاوری تهران

طاهره مجیدی نیری^۱، حمید نظری^۲، منوچهر فرشی^۲، مرتضی طالبیان^۲، آمنه کاوه فیروز^۱

^۱دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

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

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۳/۲۴

چکیده

گسل پیشوا با درازای حدود ۳۵ کیلومتر در جنوب‌خاوری ورامین قرار گرفته است. این گسل در جنوبی‌ترین مرز میان ایالت‌های ساختاری البرز و ایران مرکزی واقع شده و روند کلی آن شمال‌باختری - جنوب‌خاوری (N38W, 33NE) و دارای سازوکار وارون با مؤلفه چپ‌بر همراه با گسل‌های ناهمسوی (Antithetic) عادی است. بررسی‌های ریخت‌زمین‌ساختی انجام شده در راستای گسل پیشوا، نشان از فعال بودن آن دارد. بر پایه بررسی‌های انجام شده در ساختگاه‌های T1 و T2 ترانشه پارینه لرزه‌شناسی گسل پیشوا، تعداد ۳ تا ۵ رخداد لرزه‌ای با دوره بازگشت ۳۲۶۵ سال برای این گسل شناسایی شد که جوان‌ترین و کهن‌ترین رخدادها به ترتیب سن ۰/۸۷، ۲۹ هزار سال دارند. برپایه میزان جابه‌جایی در مدت هر رویداد مه‌لرزه‌ای و با بهره‌گیری از روابط Wells & Coppersmith (1994) بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین زمین‌لرزه‌شناسایی شده به ترتیب دارای بزرگای ۷/۰۸ و ۵/۹ هستند. از آن جایی که سن جوان‌ترین رویداد شناسایی شده در حدود ۸۷۰ سال به دست آمده، بنابراین احتمالاً بتوان زمین‌لرزه AD ۱۳۸۴ (میلادی) شهری را به این گسل منتسب دانست.

کلیدواژه‌ها: پارینه‌لرزه‌شناسی، ترانشه، گسل پیشوا، بزرگا، دوره بازگشت، زمین لرزه.

***نویسنده مسئول:** طاهره مجیدی نیری

E-mail: t.majidi9076@gmail.com

۱- مقدمه

گسل پیشوا در جنوب‌خاوری شهر پیشوا واقع در شهرستان ورامین با درازایی نزدیک به ۳۵ کیلومتر (بربریان و همکاران، ۱۳۶۴) بین طول جغرافیایی ۴۳° ۵۱' و ۵۲° ۰' و عرض جغرافیایی ۱۸° ۳۵' و ۶' قرار گرفته است (شکل ۱). روند کلی گسل پیشوا شمال‌باختری - جنوب‌خاوری است (N38W, 33NE)، دارای سازوکار وارون با مؤلفه چپ‌بر همراه با گسل ناهمسوی (Antithetic) عادی است (شکل ۱).

گستره مورد بررسی از نظر تقسیمات ساختاری در پهنه ایران مرکزی (نبوی، ۱۳۵۵) قرار گرفته است. پهنه گسلی پیشوا در شمالی‌ترین بخش ایالت ساختاری ایران مرکزی و در همسایگی لبه جنوبی ایالت البرز قرار دارد. مرز میان این دو ایالت کاملاً آشکار و ناگهانی نیست و به این دلیل منطقه را به‌طور قطعی به یک ایالت مشخص نمی‌توان نسبت داد. چرا که هم از دیدگاه رسوبی و هم از نظر ویژگی‌های ساختاری از هر دو ایالت تأثیر پذیرفته است.

در گذشته پژوهش‌هایی چون Kalhor (1961) در قالب شناسایی میدان‌های نفتی، Rieben (1955)، امینی و همکاران (۱۳۵۶)، بربریان و همکاران (۱۳۶۴)، بررسی‌های زمین‌ریخت‌شناسی و ساختاری شبانیان (۱۳۷۷)، صفایی (۱۳۷۹) و عباسی (۱۳۸۱)، در شاخه‌های گوناگون علوم زمین، در این گستره انجام شده است. در این پژوهش برای نخستین بار از روش پارینه‌لرزه‌شناسی و روش مقایسه شناخت واحدهای هم‌ارز سنی و در نتیجه برآورد زمان رخدادهای کهن لرزه‌ای حاصل از جنبش گسل استفاده شده است.

بر اساس برداشت‌های انجام شده در بخش‌های کاظم‌آباد و پیشوا (شبانیان، ۱۳۷۷)، این دو بخش پهنه‌های گسلی پراویه با سازوکار واژگون معرفی شدند که مؤلفه راستالغز چپ‌گرد کوچکی نیز در آنها دیده می‌شود. میانگین شیب صفحه‌های اندازه‌گیری شده در این دو پهنه ۶۵ درجه رو به شمال‌خاوری به‌دست آمده و همچنین بر اساس پیمایش‌های لرزه‌ای برداشت شده در پهنای بخش گچی آباد به‌عنوان یک گسل راندگی با شیب رو به شمال‌خاوری تفسیر شده است.

عباسی (۱۳۸۱) رژیم زمین‌ساختی فشارشی با سوی تنش بیشینه (N040) را برای

۲- انتخاب ساختگاه

جابه‌جایی‌های سطحی شناسایی شده در طول گسل پیشوا از نظر ریخت‌زمین‌ساختی گویای فعال بودن این گسل هستند. همچنین شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی کمی محاسبه شده برای گسل نیز نشان از فعال بودن گسل پیشوا دارند. بر همین اساس شاخص میزان پیچ و خم پیشانی کوهستان (Mountain Front Sinuosity) محاسبه شده از رابطه Stewart & Hancock (1994) ۱/۱۲ و شاخص میزان مسطح شدگی پیشانی کوهستان (Mountain front faceting) ارایه شده توسط Wells et al. (1988) ۸۱ درصد را نشان می‌دهند (مجیدی و همکاران، ۱۳۸۸) (شکل ۲). حرکت چپ‌بر آبراهه‌ها در محل برخورد با گسل (شکل ۲) به خوبی مؤلفه چپ‌بر گسل پیشوا را نشان می‌دهد.

در این پژوهش بر اساس بررسی شاخص‌های کیفی و کمی یاد شده و با توجه به رخنمون مشخص گسل، جابه‌جایی‌های افقی (Horizontal) یافت شده و نیز رسوبات نرم و جوان حاصل از به تله افتادن حوضه توسط گسل، به منظور حفر ترانشه پارینه‌لرزه‌شناسی، ساختگاهی با مختصات ۵۶۶۸۵۲، ۳۹۰۶۴۳۷ (UTM) انتخاب شد (شکل ۱). محل مورد نظر به منظور احداث ساختمان حفر شده بود، اما به دلیل مشاهده آشکار گسل و گوه واریزه‌ای، دیواره‌های موردنظر آماده شد و به عنوان ترانشه‌های پارینه لرزه‌شناسی مورد استفاده قرار گرفت. پس از آن دو دیواره برای لوگ‌برداری آماده شدند (شکل ۳).

۳- بررسی‌های پارینه لرزه‌شناسی بر روی گسل پیشوا

۳-۱. دیواره اصلی (T1)

دیواره شمال‌خاوری- جنوب‌باختری ترانشه حفر شده بر روی گسل پیشوا (T1) کم‌وبیش در سوی عمود بر گسل و میان مختصات جغرافیایی (UTM) ۵۶۶۸۵۲ تا ۵۶۶۸۵۸ و ۳۹۰۶۴۳۷ تا ۳۹۰۶۴۴۴ واقع شده است. طول این دیواره کم‌وبیش ۹ متر و بلندای آن در حدود ۴ متر است. در مجموع ۱۷ نهشته رسوبی- چینه‌ای به همراه گسل اصلی پیشوا، گسل ناهمسوی (Antithetic) آن و برخی گسل‌های احتمالی در این دیواره شناسایی شد (شکل ۴). شرح تفصیلی واحدها در بخش پیوست آورده شده است. گسل پیشوا (F1) در دیواره T1 در مختصات جغرافیایی ۵۶۶۸۵۲، ۳۹۰۶۴۳۷ قرار گرفته و شیب و امتداد آن $N39^{\circ}W, 40^{\circ}NE$ اندازه‌گیری شده است (شکل ۴). عملکرد گسل پیشوا وارون، با مؤلفه چپ‌گرد است و این حرکت، به‌خوبی در دیواره دیده می‌شود، به گونه‌ای که گوه واریزه‌ای بریده شده توسط گسل در فرود دیواره وجود دارد، اما در فراد دیواره گسل در اثر فرسایش از بین رفته و دیده نمی‌شود. همچنین در واحد ۱۰ بالاراندگی بخش فراد دیواره به خوبی قابل تشخیص است. در اثر عملکرد گسل پیشوا، عارضه پر شده (Feature Flink) در واحد ۵ ایجاد شده، ولی در واحدهای جوان‌تر از این واحد، جابه‌جایی ایجاد نکرده و فقط تمامی واحدها را تا واحد ۱ بریده است. گسل پیشوا در دیواره یاد شده، به سطح زمین نمی‌رسد و در زیر واحد ۱ دیده می‌شود.

گسل F2 در دیواره T1 در مختصات ۵۶۶۸۵۴، ۳۹۰۶۴۳۹ قرار گرفته و شیب و امتداد گسل $N37^{\circ}W, 35^{\circ}SW$ است (شکل ۴). عملکرد این گسل عادی است و جابه‌جایی عادی در واحدهای ۱۰ و ۱۱ ایجاد کرده است. با توجه به این که گسل F2 به گسل پیشوا رسیده است، از آن به عنوان گسل ناهمسوی (Antithetic) گسل پیشوا یاد می‌شود. در اینجا لازم به یادآوری است که دیواره‌های شمال‌خاوری- جنوب‌باختری (T1) و شمال‌باختری- جنوب‌خاوری (T2) فراهم آمده در این ترانشه‌زنی در سوی عمود نسبت به یکدیگر واقع شده‌اند و نهشته‌های رسوبی- چینه‌ای موجود در هر دو مشابه هستند، اما به دلیل گسترش بیشتر لوگ دیواره T1 در برگیرنده واحدهای رسوبی- چینه‌ای بیشتری بوده و افزون بر آن جابه‌جایی‌های گسلی بیشتری نیز در آن به ثبت رسیده است (شکل‌های ۴ و ۵).

۳-۲. دیواره فرعی (T2)

دیواره شمال‌باختری- جنوب‌خاوری ترانشه حفر شده بر روی گسل پیشوا (T2) کم‌وبیش هم‌راستا با گسل پیشوا و بین مختصات جغرافیایی (UTM) ۳۹۰۶۴۳۷، ۵۶۶۸۵۲ تا ۳۹۰۶۴۴۲، ۵۶۶۸۴۲ واقع شده است. طول این دیواره در حدود ۵/۵ متر و بلندای آن نزدیک به ۴ متر است. در این دیواره ۱۶ واحد رسوبی- چینه‌ای به همراه گسل اصلی پیشوا (F1) شناسایی شد (تصویر ۵). ویژگی نهشته‌های شناسایی شده در لوگ دیواره T2 (شامل واحدهای ۱a، ۲، ۳، ۴، ۵، ۷، ۸، ۹، ۱۱، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸) به شرحی که در بخش پیوست بیان شده است، می‌باشند.

گسل اصلی پیشوا (F1) در مختصات جغرافیایی ۵۶۶۸۵۰، ۳۹۰۶۴۳۹ و با شیب و امتداد $N38^{\circ}W, 33^{\circ}NE$ آشکارا در دیواره T2 دیده می‌شود. این گسل عملکرد وارون با مؤلفه چپ‌گردی دارد و این حرکت، به‌خوبی در دیواره دیده می‌شود، به گونه‌ای که گوه واریزه‌ای بریده شده توسط گسل، در فرود دیواره موجود است، در حالی که این بخش در فراد دیواره در اثر فرسایش از میان رفته است و اثری از آن دیده نمی‌شود. گسل پیشوا در لوگ یاد شده، به سطح زمین نمی‌رسد و در زیر لایه ۱ دیده می‌شود. گسل F2 در دیواره T2 در مختصات ۵۶۶۸۴۸، ۳۹۰۶۴۳۹ قرار گرفته و شیب و امتداد آن $N40^{\circ}W, 74^{\circ}NE$ است. عملکرد این گسل عادی است و جابه‌جایی عادی در واحدهای ۹ و ۱۱ ایجاد کرده است. با توجه به این که گسل F2 به گسل پیشوا رسیده است، می‌توان آن را به عنوان گسل ناهمسوی (Antythetic) گسل پیشوا در نظر گرفت.

۴- برآورد میزان جابه‌جایی شاقولی و جابه‌جایی بر روی سطح گسل

برای محاسبه جابه‌جایی شاقولی و جابه‌جایی بر روی سطح گسل، باید از کف لایه در فراد دیواره تا کف لایه جابه‌جاشده در فرود دیواره گسل ملاک قرار داده شود، زیرا ممکن است سطح بالایی لایه بر اثر عواملی چون فرسایش و یا ... از بین رفته باشد (شکل ۶). افزون بر آن، از بررسی لایه‌های کهن تر این نکته قابل برداشت خواهد بود، که میزان جابه‌جایی به ثبت رسیده در آنها بیشتر است، چرا که لایه‌های کهن، تعداد زمین‌لرزه‌های بیشتری را تجربه کرده‌اند.

به عنوان مثال برای محاسبه جابه‌جایی بر روی سطح گسل برای واحد ۱۰، از کف لایه جابه‌جاشده در فراد دیواره تا کف همان لایه در فرود دیواره (AA') اندازه‌گیری می‌شود. برای محاسبه جابه‌جایی شاقولی، خطی عمود بر خط AA' و بر روی آن خط AA' رسم می‌شود که نشانگر جابه‌جایی شاقولی واحد جابه‌جا شده است (شکل ۶). به این ترتیب جابه‌جایی‌های شاقولی و بر روی سطح گسل برای واحدهای دو دیواره محاسبه شد (جدول‌های ۱ و ۲).

۵- محاسبه بزرگای رخدادهای دیرینه مه‌لرزه‌ای

با استفاده از روابط Wells & Coppersmith (1994) و داده‌های حاصل از محاسبه میزان جابه‌جایی‌ها، بزرگای زمین‌لرزه‌های رخ داده، قابل برآورد است. این روابط مبتنی بر سازوکار گسل‌ها هستند و بنابراین، با توجه به سازوکار وارون گسل پیشوا و عادی گسل ناهمسوی (Antithetic) آن، از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$F_N : M_W = 6.78 + 0.65 \log (AD)$$

$$F_R : M_W = 6.64 + 0.13 \log (AD)$$

$$F_G : M_W = 6.63 + 0.82 \log (AD)$$

F_G و F_R ، F_N بزرگای محاسبه شده در روابط Wells & Coppersmith (1994) به ترتیب برای گسل‌های عادی، وارون و بزرگای کل هستند. AD نیز میانگین جابه‌جایی بر حسب متر است، اگر جابه‌جایی کل (Total Offset) را داشته باشیم، می‌توان مقدار آن را به جای AD در رابطه قرار داد و میزان بزرگای محاسبه کرد. اما در شرایطی که این مقدار وجود ندارد، از بیشترین مقدار جابه‌جایی (عمودی یا سطح گسل) استفاده می‌شود. به این ترتیب بر اساس تشخیص افق‌های رویداد (Event horizons) و قرار دادن میزان جابه‌جایی‌ها در روابط یاد شده، بزرگای رخدادهای لرزه‌ای به دست می‌آید (جدول‌های ۳ و ۴).

۶- برآورد نرخ رسوبگذاری

با توجه به مقایسه چینه‌ای واحدهای جدا شده در ترانشه پارینه‌لرزه‌شناسی پیشوا با نتایج به دست آمده از ترانشه‌های پارینه‌لرزه‌شناسی اجرا شده بر روی گسل شمال تهران (ساخنگاه وردآورد و چیتگر) (Nazari, 2006) و کاوه فیروز، ۱۳۸۸) و سن‌های مطلق و نسبی واحدهای چینه‌شناختی، نرخ رسوبگذاری برای نهشته‌های تفکیک شده در ترانشه گسل پیشوا بین ۰/۱۶ و ۰/۲۸ میلی‌متر در سال برآورد شد. بر این اساس از نرخ رسوبگذاری ۰/۱۶ میلی‌متر در سال به دست آمده از لوگ ترانشه گسل شمال تهران (ساخنگاه وردآورد و پیرو آن لوگ دیواره چیتگر)، و همچنین ستبرای لایه (در لوگ پیشوا) استفاده شد و سن نسبی رسوبگذاری برای هر واحد به دست آمد. با توجه به بیش‌ترین و کم‌ترین سن واحد مرجع (واحد سرخ لوگ تهران، 68 unit)، سن بیشینه و کمینه‌ای برای واحدهای تفکیک شده در لوگ ترانشه بر روی گسل پیشوا برآورد شد (مجیدی، ۱۳۸۸).

۷- بازسازی سناریوی رخدادهای لرزه‌ای کهن

در این پژوهش، بازسازی سناریوی رخداد زمین‌لرزه‌ها بر اساس الگوی برگشتی تهیه

در شناسایی دومین افق لرزه‌ای دیواره T2 تأثیر گسل F2 حذف شده و تنها گسل اصلی پیشوا (F1) باقی مانده است. در این مرحله، گوه واریزه‌ای ایجاد شده در افق لرزه‌ای پنجم بریده شده است و در فرادیواره گسل به سمت بالا رانده شده است. این درحالی است که در دیواره کنونی اثری از گوه واریزه‌ای در بخش فرادیواره دیده نمی‌شود و به نظر می‌رسد علت آن شسته شدن و فرسایش این بخش از واحد ۱۳ باشد.

شکل‌گیری سومین افق لرزه‌ای در دیواره T2 با عملکرد گسل F1 بر روی واحدهای ۱۱ و ۱۵ و بالا آوردن این واحدها در فرادیواره گسل صورت پذیرفته است. در این حالت، بخش زیرین واحد ۱۵ به‌منظور محاسبه میزان جابه‌جایی در این دیواره دیده نمی‌شود.

با تعیین سن نسبی (شرح داده شده در برآورد نرخ رسوبگذاری) رویدادهای دیرینه مه‌لرزه‌ای رخ داده بر روی این بخش از گسل پیشوا، همان‌گونه که در شکل ۱۶ ارائه شده است، سن آخرین رویداد دیرینه مه‌لرزه‌ای به ثبت رسیده در این بخش از گسل (Event1) در دیواره T1 در حدود ۸۷۰ سال برآورد شده است. بنابراین با توجه به سن یاد شده احتمالاً بتوان زمین‌لرزه ۱۳۸۴ AD شهری (بربریان و همکاران، ۱۳۶۴) را به این گسل نسبت داد.

۸- دوره بازگشت رخدادهای لرزه‌ای

برای محاسبه دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ها، اگر بر روی گسلی چندین رخداد لرزه‌ای شناسایی شود، با تقسیم زمان بر تعداد رخدادها، دوره بازگشت میانگین آنها قابل دستیابی است. به نظر می‌رسد طرح زمانی زمین‌لرزه‌های کهن بازسازی شده بر روی گسل پیشوا در چهارچوب دو خوشه لرزه‌ای، میان سال‌های ۰.۸۷-۷.۴ ka و ۱۷.۲-۲۹.۰ ka رخ داده است. با این دیدگاه برای برآورد دوره بازگشت با توجه به نامشخص بودن مرز کهن‌ترین زمین‌لرزه، از خوشه لرزه‌ای جوان‌تر، یعنی ۰.۸۷-۷.۴ ka استفاده شده است.

$$7400-870 = 6530 \text{ yr}$$

$$6530.2 = 3265 \text{ yr}$$

۹- نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی‌های انجام شده بر روی گسل و ترائشه پارینه‌لرزه‌شناسی پیشوا، سازوکار این گسل از نوع وارون با مؤلفه چپ‌بر همراه با گسل‌های ناهم‌سوی (Antithetic) عادی بوده است. نرخ رسوبگذاری به‌دست آمده برای دو دیواره T1 و T2، ۰/۱۶ میلی‌متر در سال به‌دست آمد. میزان کمترین و بیشترین جابه‌جایی واحدها برای تمامی رویدادهای دیرینه مه‌لرزه‌ای، ۰/۰۲ و ۲/۹۰ متر به‌دست آمد. براساس روابط Wells & Coppersmith (1994) بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین زمین‌لرزه برآورد شده بر پایه میزان جابه‌جایی‌های گسلی به ثبت رسیده در دیواره‌های T1 و T2، ۷/۰۸ و ۵/۹ به‌دست آمد. بر روی گسل پیشوا ۳ تا ۵ رخداد لرزه‌ای با دوره بازگشت ۳۲۶۵ سال و با توجه به نتایج آزمون‌های سن یابی (OSL) به عمل آمده بر روی این بخش از گسل پیشوا، سن جوان‌ترین رویداد مه‌لرزه‌ای به وقوع پیوسته (Event1) در حدود ۸۷۰ سال برآورد شد. با توجه به سن این رویداد لرزه‌ای شاید بتوان زمین‌لرزه سال ۱۳۸۴ میلادی شهری را به این گسل نسبت داد.

سپاسگزاری

در اینجا بر خود لازم می‌دانیم تا از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به سبب فراهم آوردن امکانات کافی برای انجام این پژوهش سپاسگزاری کنیم.

شده از لوگ انجام پذیرفته است. برای دستیابی به این منظور، در ابتدا جوان‌ترین افق رویداد (جوان‌ترین واحد رسوبی- چینه‌ای بریده شده در طی آخرین فعالیت زمین‌لرزه‌ای گسل) شناسایی می‌شود.

پس از تشخیص جوان‌ترین افق رویداد، با حذف واحد نهشته شده بر روی آن و نیز با به شمار آوردن جابه‌جایی‌های صورت گرفته، به تدریج به زمان پیش از رویداد زمین‌لرزه یادشده می‌رسیم. در پایانی‌ترین مرحله بازسازی، به کهن‌ترین افق رویدادی می‌رسیم که به‌صورت منطقی تعداد زمین‌لرزه بیشتری را تجربه کرده است. به هنگام انجام این فرایند همراه با شناسایی رخدادهای لرزه‌ای، شکل دیواره ترائشه در زمان پیش از شروع اولین رویداد گسلش زمین‌لرزه‌ای و اعمال جابه‌جایی مشخص خواهد شد.

در بازسازی سناریوی لرزه‌ای دیواره T1، به‌دلیل گستردگی این دیواره، تعداد واحدهای رسوبی- چینه‌ای بیشتری در مقایسه با دیواره T2 ظاهر یافته است. در دیواره T1، گسل F1 فقط لایه‌های ۱a، ۲ و ۳ را بریده اما در این لایه‌ها جابه‌جایی ایجاد نکرده است. همچنین گسل ناهم‌سوی F2 نیز همانند گسل F1 تنها لایه‌های یاد شده را بریده و باز هم هیچ گونه جابه‌جایی در آنها ایجاد نکرده است (شکل ۷). در مورد دومین افق لرزه‌ای شناسایی شده در دیواره T1 آنچه می‌توان بیان کرد آن است که در اثر عملکرد گسل F1، در واحد ۵ عارضه پرشده (Feature flink) ایجاد شده (پرشدگی واحد ۵ توسط واحد ۳) و گسل F2 نیز تنها این واحد را بریده است (شکل ۷). آن چه که درباره سومین افق لرزه‌ای شناسایی شده در دیواره T1 باید به آن اشاره کرد آن است که گسل F1 در بخش فرادیواره باعث جابه‌جایی واحد ۸ به میزان تقریبی ۴ سانتی‌متر به‌سوی بالا شده است و همچنین بر اثر این رویداد لرزه‌ای ۸ سانتی‌متر جابه‌جایی در واحد ۱۰ شکل گرفته است. در اثر عملکرد گسل F2 واحد ۱۰ به میزان ۸/۸ سانتی‌متر و واحد ۱۱ نیز در حدود ۱۰ سانتی‌متر در فرادیواره این گسل به‌سوی پایین جابه‌جا شده است (تصویر ۷).

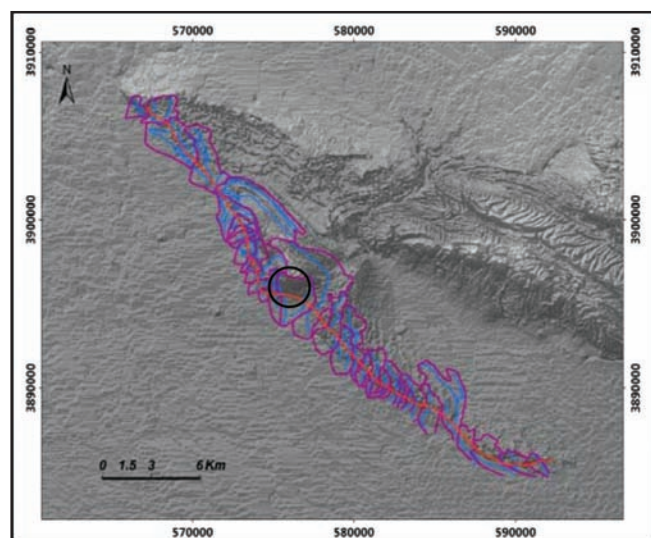
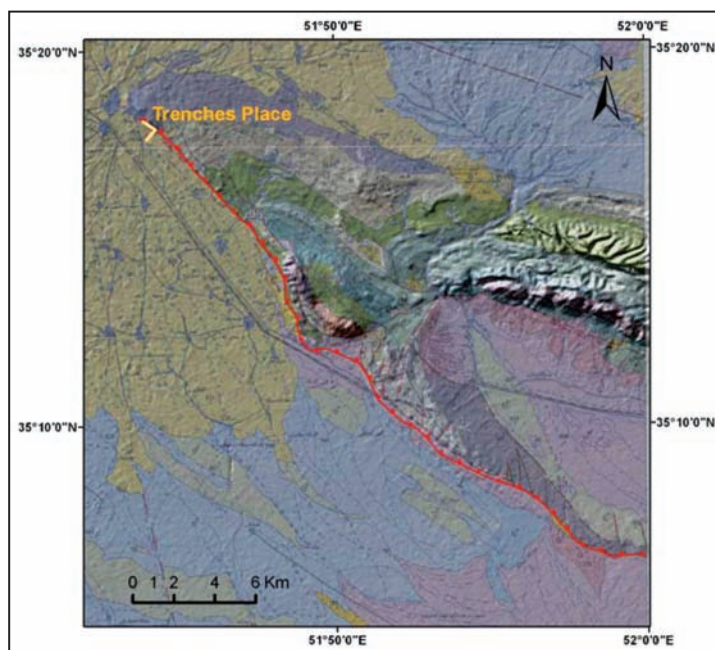
در شناسایی چهارمین افق لرزه‌ای، تأثیر گسل F2 حذف شده و تنها گسل اصلی پیشوا (F1) باقی مانده است. در این مرحله، گوه واریزه‌ای (Colluvial Wedge) (که خود در مرحله پس از رویداد لرزه‌ای ایجاد می‌شود (Post event Horizon)) ایجاد شده در افق لرزه‌ای پنجم بریده و در فرادیواره گسل به‌سوی بالا رانده شده است، در حالی که در دیواره کنونی اثری از گوه واریزه‌ای یاد شده در سوی فرادیواره دیده نمی‌شود و به نظر می‌رسد علت آن شسته شدن و فرسایش این بخش از واحد ۱۳ باشد. همچنین شباهت نسبی واحدهای ۱۱ و ۱۴ و نیز قرار گرفتن آنها در زیر واحد ۱۳ می‌تواند دلیلی بر وجود واحد ۱۳ در بخش یاد شده باشد.

شکل‌گیری پنجمین افق لرزه‌ای در دیواره T1 بیانگر تأثیر گسل F1 بر روی واحدهای ۱۱ و ۱۲ و بالا آوردن این واحدها در فرادیواره گسل است. در این مرحله گوه واریزه‌ای (C.W.) در اثر شکل‌گیری گسل و عملکرد آنها بر روی واحدهای ۱۱ و ۱۲ ایجاد شده است، که در اثر حرکت بعدی گسل برش خورده است. در این تفسیر بخش زیرین واحد ۱۲ برای محاسبه میزان جابه‌جایی در این دیواره دیده نمی‌شود.

در دیواره T2 به‌دلیل کوچک‌تر بودن آن (در مقایسه با دیواره T1) و پوشیده شدن بخش بالایی، تنها سه افق لرزه‌ای شناسایی شده است.

در اولین افق لرزه‌ای دیواره T2 گسل F1 واحد ۹ را متأثر کرده و آن را بریده است. در سوی فرادیواره این گسل تنها شاهد واحد ۸ هستیم و اثری از آن در بخش فرودیواره دیده نمی‌شود. در این جا گسل F2 باعث حرکت لایه‌های ۹ و ۱۱ به ترتیب به میزان ۱۳ و ۱۳/۸ سانتی‌متر در فرادیواره گسل شده است (شکل ۸).

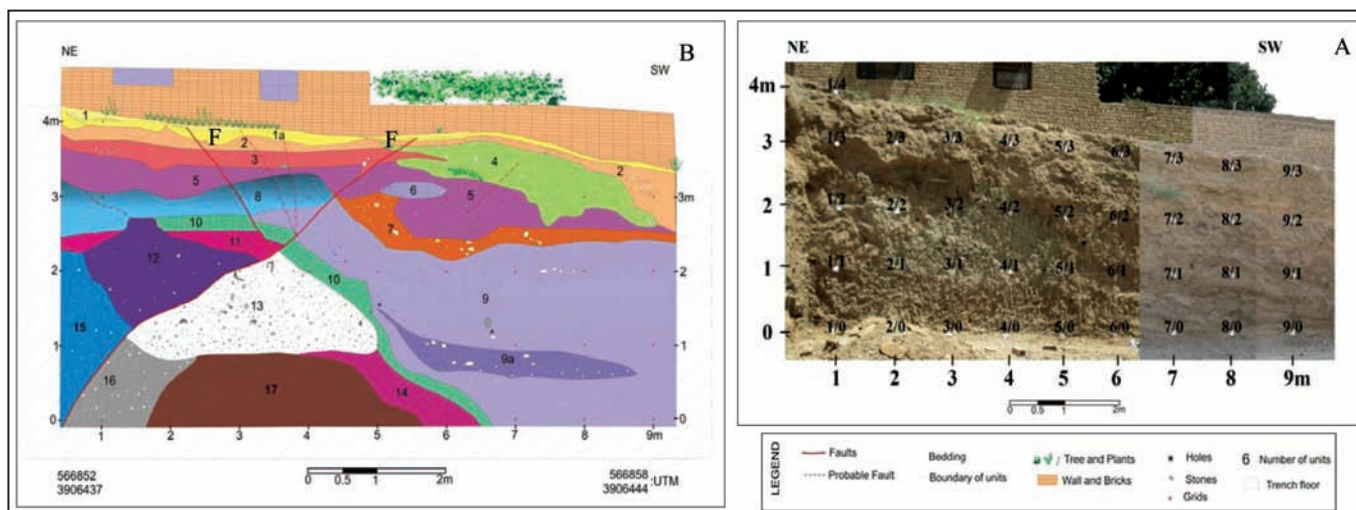
شکل ۱- وضعیت گسل و پرتگاه پیشوا با روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری و میل به سوی شمال‌خاور همراه با واحدهای زمین‌شناختی موجود در منطقه و موقعیت ترانسه‌های پارینه لرزه‌شناسی گسل پیشوا، بر روی DEM ۱۰ متر.



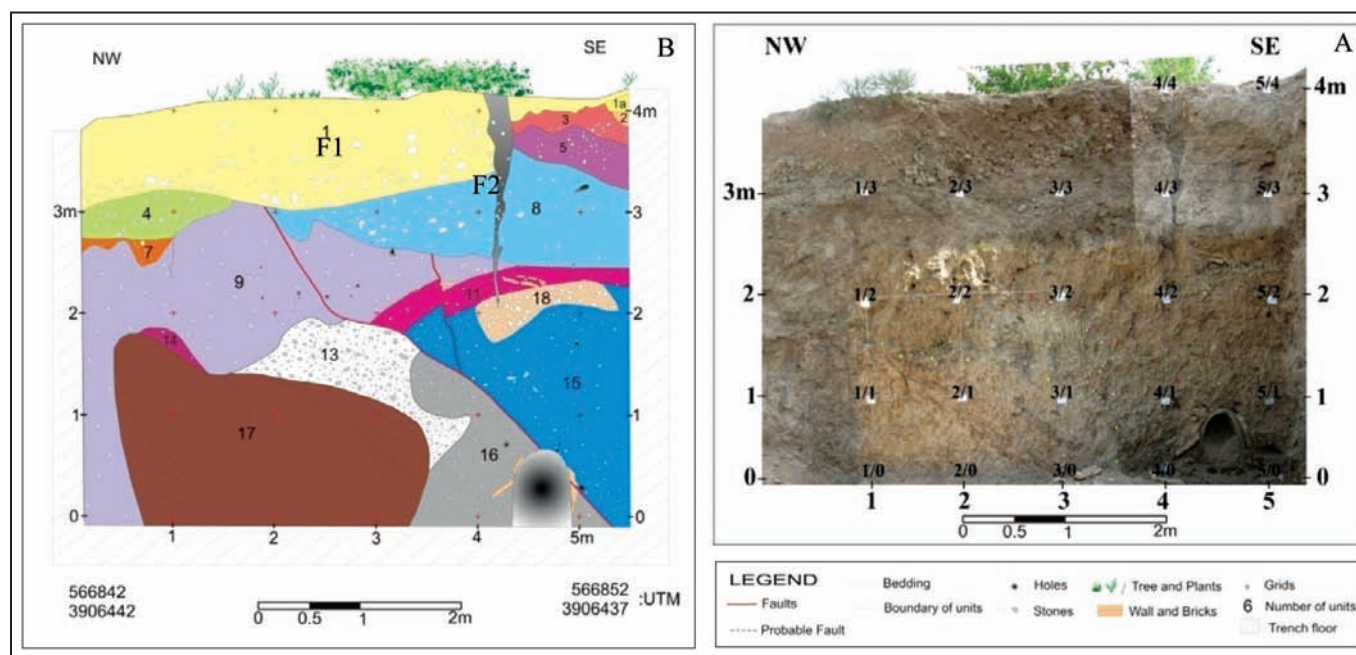
شکل ۲- نمایش وضعیت آبراهه‌ها و حوضه‌های آبریز جدا شده در پرتگاه پیشوا؛ شکل زمینه، مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM) تهیه شده از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ (سازمان نقشه‌برداری کشور). خطوط آبی رنگ نشانگر آبراهه‌های اصلی، خط سرخ رنگ نشانگر گسل پیشوا، خطوط بنفش رنگ نشان‌دهنده مرز حوضه‌های آبریز در محدوده پرتگاه و گسل پیشوا و دایره سیاه‌رنگ نشان‌دهنده جابه‌جایی چپ‌بر دو آبراهه قطع شده توسط گسل پیشوا است.

شکل ۳- شبکه‌بندی (ایجاد شبکه‌ای مبنا از خطوط تراز و شاقولی در دیواره T1) ترانسه پارینه لرزه‌شناسی، حفر شده به روش غربی بر روی گسل پیشوا (انجام شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور).

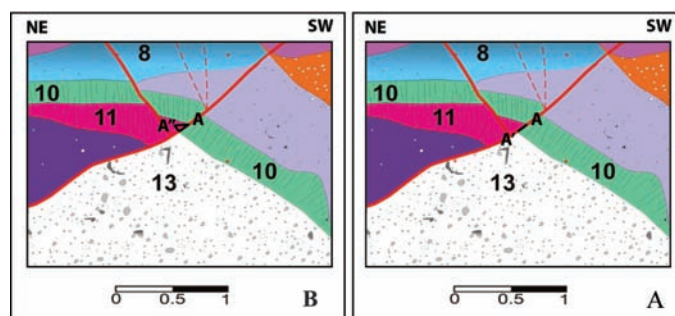




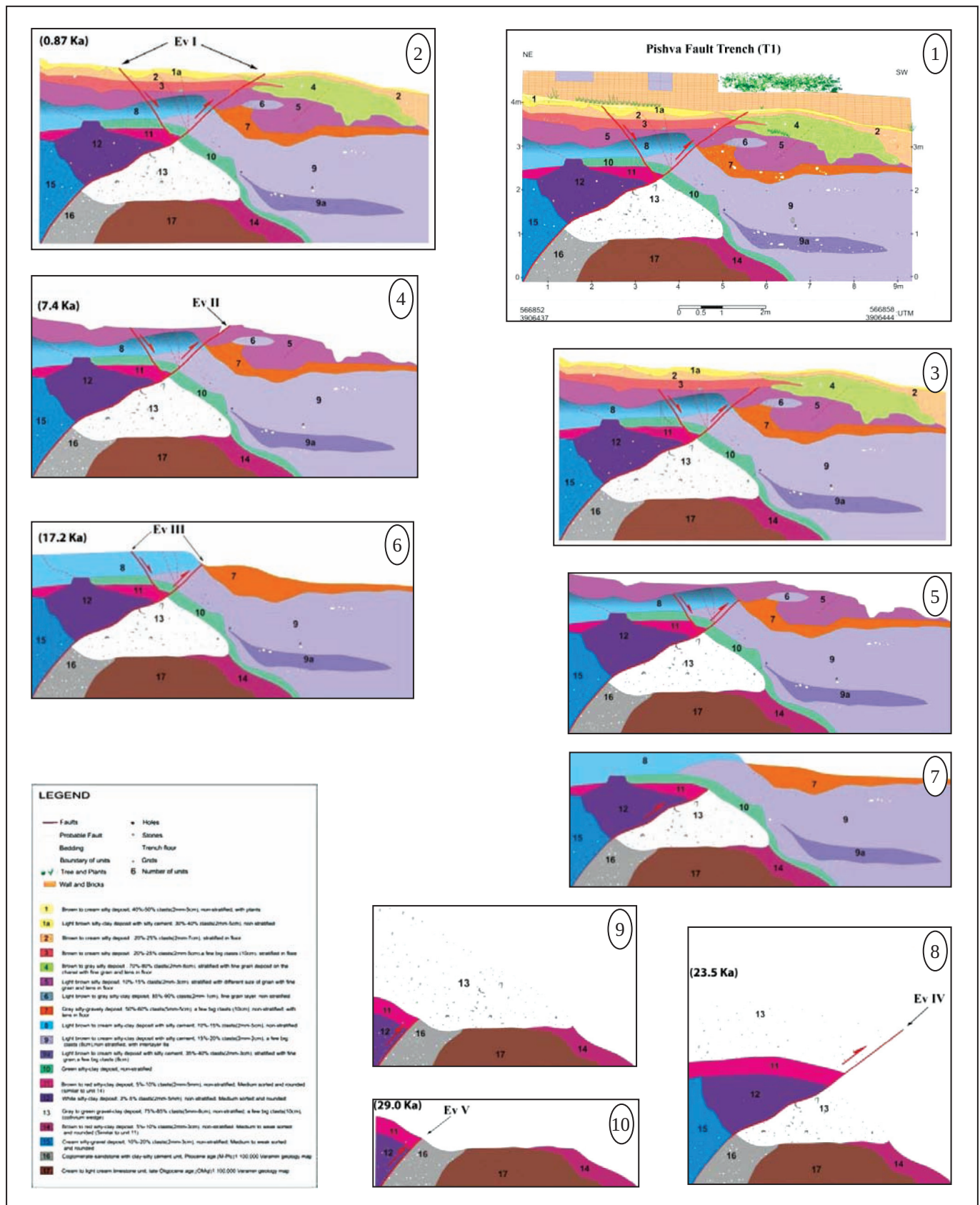
شکل ۴- (A) دیواره T1 همراه با شبکه بندی روی آن و مقیاس عکس، (B) لوگ دیواره T1 رسم شده همراه با کوچک ترین جزئیات، در این شکل خطوط سرخ نشانگر گسل ها، دایره و بیضی های سفید و خاکستری نیز نشانگر قله سنگ های موجود در واحدهای رسوبی-چینه ای هستند، خطوط منقطع نیز نشان دهنده لایه بندی واحدهای رسوبی-چینه ای مختلفی هستند که با رنگ های مختلف از یکدیگر جدا شده اند.



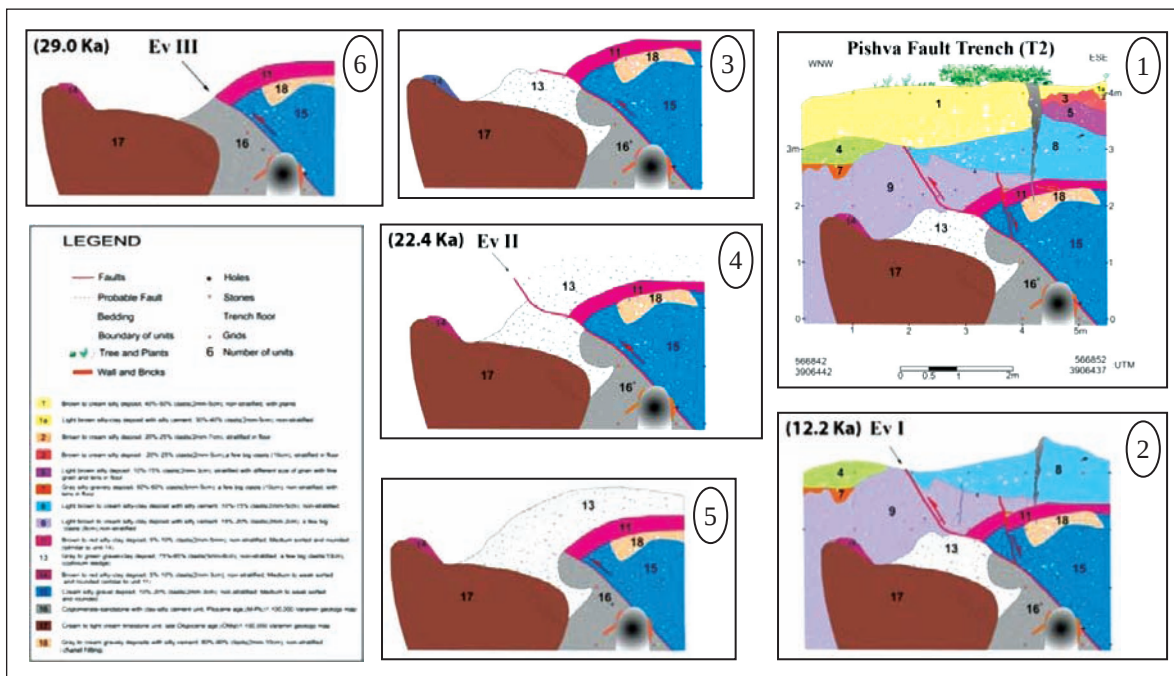
شکل ۵- (A) دیواره T2 همراه با شبکه بندی روی آن و مقیاس عکس، (B) لوگ دیواره T2 رسم شده همراه با کوچک ترین جزئیات، در این شکل خطوط سرخ نشانگر گسل ها، دایره و بیضی های سفید و خاکستری نشانگر قله سنگ های موجود در واحدهای رسوبی-چینه ای هستند. خطوط منقطع نیز نشان دهنده لایه بندی واحدهای رسوبی-چینه ای مختلفی است که با رنگ های متفاوت از یکدیگر جدا شده اند.



شکل ۶- (A) روش محاسبه جابه جایی سطح گسل، خط مشکی رنگ (AA') نشانگر جابه جایی روی سطح گسل است. (B) محاسبه جابه جایی شاقولی، وتر مثلث قائم الزاویه رسم شده (AA'') نشانگر جابه جایی شاقولی واحد ۱۰ بر اثر جنبایی گسل پیشوا است.



شکل ۷- بازسازی سناریوی رخدادهای دیرینه مه‌لرزه‌ای در دیواره T1 از ترانه پیشوا.



شکل ۸- بازسازی سناریوی رخدادهای دیرینه مه‌لرزه‌ای در دیواره T2 از ترانسه پیشوا (برای توضیحات بیشتر به متن مقاله مراجعه شود).

جدول ۱- جابه‌جایی‌های به دست آمده از عملکرد گسل‌های موجود در دیواره T1.

دیواره T1 - ۳۹۰۶۴۳۷، ۵۶۶۸۵۲ تا ۳۹۰۶۴۴۴، ۵۶۶۸۵۸ (UTM)						
نام گسله	شماره واحد	جابه‌جایی روی سطح گسله (سانتی‌متر)	جابه‌جایی شاقولی گسله (سانتی‌متر)	ساز و کار گسله	شیب و امتداد گسله	GPS
F1 (Pishva.F)	۷	۱/۵	۲	معکوس با مؤلفه چپ‌گرد	N39°W, 40°NE	3906437 566852
	۹	۷	۱۱			
	۱۰	۸	۱۳			
	۱۳	۲۹۰	۲۵۱			
F2	۱۰	۸/۸	۱۱	عادی	N37°W, 35°SW	3906439 566854
	۱۱	۱۰	۱۳/۵			

جدول ۲- جابه‌جایی‌های به دست آمده از عملکرد گسل ناهمبوسی عادی موجود در دیواره T2.

دیواره T2 - ۳۹۰۶۴۴۲، ۵۶۶۸۴۲ تا ۳۹۰۶۴۳۷، ۵۶۶۸۵۲ (UTM)						
نام گسله	شماره واحد	جابه‌جایی روی سطح گسله (سانتی‌متر)	جابه‌جایی قائم گسله (سانتی‌متر)	ساز و کار گسله	شیب و امتداد گسله	GPS
F2	۹	۱۳	۱۱/۵	عادی	N40°W, 74°NE	3906439 566850
	۱۱	۱۳/۸	۱۳/۲			

جدول ۳- بزرگای برآورد شده برای رخداد‌های دیرینه مه‌لرزه‌ای براساس میزان جابه‌جایی به ثبت رسیده در افق رویداد (واحد رسوبی- چینه‌ای شماره ۱۱، ۱۰، ۹، ۷ در شکل ۴) لوگ دیواره T1.

دیواره T1 - (UTM) ۳۹۰۶۴۴۴، ۵۶۶۸۵۸ تا ۳۹۰۶۴۳۷، ۵۶۶۸۵۲							
Event	Unit	F1(AD)	F2(AD)	Total (AD)	F_N, M_W	F_R, M_W	F_G, M_W
۲	۷۸،۹	۰/۱۳	۰/۱۳۵	متر ۰/۲۶۵	۶/۴۰	۶/۵۶	۶/۱۶
۳	۱۰،۱۱	۰/۸۶	۰	متر ۰/۸۶	۶/۷۳	۶/۶۳	۶/۵۷
۴	۱۳	۲/۹۰	۰	متر ۲/۹۰	۷/۰۸	۶/۷	۷/۰

جدول ۴- بزرگای برآورد شده برای رخداد‌های دیرینه مه‌لرزه‌ای براساس میزان جابه‌جایی به ثبت رسیده در افق رویداد (واحد رسوبی- چینه‌ای شماره ۱۱، ۱۰، ۹ در شکل ۵) لوگ دیواره T2.

دیواره T2 - (UTM) ۳۹۰۶۴۴۲، ۵۶۶۸۴۲ تا ۳۹۰۶۴۳۷، ۵۶۶۸۵۲							
Event	Unit	F1(AD)	F2(AD)	Total (AD)	F_N, M_W	F_R, M_W	F_G, M_W
۲	۹،۱۱	-	۰/۱۳	متر ۰/۱۳	۶/۲۰	۶/۵۲	۵/۹۰
۳	۱۳	۰/۳۶	۰	متر ۰/۳۶	۶/۴۹	۶/۵۸	۶/۲۶

پیوست

نهشته‌های موجود در لوگ‌ها از جدید به قدیم به شرح زیر هستند:

واحد ۱- نهشته‌های سیلتی به رنگ نخودی دارای دانه‌های گراولی حداکثر به اندازه ۵ سانتی‌متر به میزان ۴۰ تا ۵۰ درصد و از جنس ماسه‌سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت)، سیمان ۵۰ تا ۶۰ درصد واحد، جورشدگی و گردشدگی ضعیف، بدون جهت‌یافتگی در لایه، به‌صورت پراکنده دارای پوشش گیاهی، به‌هم‌ریخته به‌علت در سطح قرار گرفتن (خاک دستی)، بیشترین ستبرای لایه ۲۰ سانتی‌متر.

واحد ۱ا- نهشته‌های سیلتی-رسی به رنگ نخودی دارای دانه‌های گراولی حداکثر به اندازه ۵ سانتی‌متر به میزان ۳۰ تا ۴۰ درصد و از جنس ماسه‌سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت)، سیمان ۶۰ تا ۷۰ درصد واحد، جورشدگی و گردشدگی ضعیف، لایه بدون جهت‌یافتگی و حالت توده‌ای به‌علت وجود سیلت بالا، به‌صورت پراکنده دارای پوشش گیاهی، بیشترین ستبرای لایه ۳۰ سانتی‌متر. واحد ۲- نهشته‌های سیلتی به رنگ نخودی تا کرم‌رنگ، دارای دانه‌های گراولی حداکثر به اندازه ۷ سانتی‌متر به میزان ۲۰ تا ۲۵ درصد و از جنس ماسه‌سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت)، سیمان ۷۵ تا ۸۰ درصد واحد، جورشدگی متوسط و گردشدگی ضعیف، دارای چینه‌بندی در کف واحد، ستبرای متوسط لایه ۳۰ سانتی‌متر.

واحد ۳- نهشته‌های سیلتی به رنگ نخودی تا کرم‌رنگ دارای دانه‌های گراولی حداکثر به اندازه ۵ سانتی‌متر به میزان ۲۰ تا ۲۵ درصد و از جنس ماسه‌سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت)، به ندرت قطعات ۱۰ سانتی‌متری دارد، سیمان ۷۵ تا ۸۰ درصد واحد، جورشدگی متوسط و گردشدگی ضعیف، دارای چینه‌بندی از قطعات با اندازه‌های متفاوت در کف واحد، ستبرای متوسط لایه ۳۰ سانتی‌متر.

واحد ۴- نهشته‌های رسی-سیلتی به رنگ نخودی تا خاکستری رنگ، دارای قطعات گراولی حداکثر به اندازه ۶ سانتی‌متر به میزان ۷۰ تا ۸۰ درصد و از جنس ماسه‌سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت) و سیمان ۲۰ تا ۳۰ درصد واحد، گردشدگی و جورشدگی متوسط تا ضعیف، وجود ذرات ریزدانه و حالت عدسی‌شکل در کف واحد، وجود چینه‌بندی موازی به‌صورت تناوبی از دانه‌های ریزدانه در بخش بالایی کانال، دارای پوشش گیاهی پراکنده در سطح لایه، ستبرای لایه بین ۷۰ سانتی‌متر تا ۱ متر.

واحد ۵- نهشته‌های سیلتی به رنگ نخودی، دارای قطعات گراولی حداکثر به اندازه ۳ سانتی‌متر، دانه‌ها ۱۰ تا ۱۵ درصد و از جنس ماسه‌سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت) و سیمان ۸۵ تا ۹۰ درصد واحد، گردشدگی و جورشدگی ضعیف، وجود حالت عدسی‌شکل تصویر و لایه‌بندی از ذرات ریزدانه در کف واحد و چینه‌بندی با تناوبی از دانه‌های ریزدانه و درشت دانه، بیشترین ستبرای لایه ۱ متر.

- واحد ۶- نهشته‌های سیلنی - رسی به رنگ خاکستری تا کرم رنگ، دانه‌ها ۸۵ تا ۹۰ درصد و از جنس ماسه سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت) و سیمان ۱۰ تا ۱۵ درصد، گردشگی و جورشدگی خوب، در مجموع واحد ریزدانه، و بیشترین اندازه دانه‌ها ۱ سانتی‌متر، عدم وجود چینه‌بندی در واحد، بیشترین ستبرای لایه ۲۵ سانتی‌متر.
- واحد ۷- نهشته‌های سیلنی - گراولی به رنگ خاکستری، دانه‌ها ۵۰ تا ۶۰ درصد و از جنس ماسه سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت)، اندازه دانه‌ها بین ۰/۵ تا ۵ سانتی‌متر و به‌ندرت قطعات به اندازه ۱۰ سانتی‌متر دارد، سیمان در واحد حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد، گردشگی و جورشدگی متوسط، نبود چینه‌بندی در واحد، وجود حالت عدسی شکل در کف این واحد به علت پوشیدگی کانال‌های آبراهه‌های کهن، بیشترین ستبرای لایه در بخش ستر آن در حدود ۵۰ سانتی‌متر.
- واحد ۸- نهشته‌های سیلنی به رنگ نخودی تا کرم رنگ، دانه‌ها ۱۰ تا ۱۵ درصد به قطر ۰/۲ تا ۲ سانتی‌متر و به‌ندرت قطعات به اندازه ۵ سانتی‌متر دارد و از جنس ماسه سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت) و سیمان ۸۵ تا ۹۰ درصد واحد، گردشگی متوسط و جورشدگی ضعیف، نبود چینه‌بندی در واحد.
- واحد ۹- نهشته‌های سیلنی به رنگ نخودی تا کرم رنگ، دانه‌ها ۱۵ تا ۲۰ درصد به قطر ۰/۲ تا ۲ سانتی‌متر و به‌ندرت قطعات به اندازه ۸ سانتی‌متر دارد و از جنس ماسه سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت) و سیمان ۸۰ تا ۸۵ درصد، گردشگی متوسط و جورشدگی واحد ضعیف، بیشترین اندازه دانه‌ها ۸ سانتی‌متر، نبود چینه‌بندی، وجود میان لایه ۹a در درون واحد، گسترده‌ترین واحد در لوگ و بیشترین ستبرای آن ۲/۵ متر.
- واحد ۹a- نهشته‌های سیلنی به رنگ نخودی تا کرم رنگ، دانه‌ها ۳۵ تا ۴۰ درصد، به اندازه ۰/۲ تا ۳ سانتی‌متر و به‌ندرت دارای قطعات به قطر ۸ سانتی‌متر و از جنس ماسه سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت) و سیمان ۶۰ تا ۶۵، گردشگی متوسط و جورشدگی واحد ضعیف، بیشترین اندازه دانه‌ها ۸ سانتی‌متر، وجود چینه‌بندی از لایه‌های ریزدانه.
- واحد ۱۰- نهشته‌های سیلنی سبزرنگ، تشکیل ۱۰۰ درصد واحد از سیلت و رس، که باعث سفت‌شدگی و ترک‌خوردگی واحد شده است، آسانی تشخیص آن از واحدهای همجوار خود به دلیل رنگ سبز، نبود چینه‌بندی در واحد، بیشترین ستبرای لایه ۳۰ سانتی‌متر.
- واحد ۱۱- نهشته‌های سیلنی - رسی قهوه‌ای تا سرخ رنگ، دارای ۵ تا ۱۰ درصد دانه از جنس ماسه سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت) و ۹۰ تا ۹۵ درصد سیمان سیلنی - رسی باعث چسبندگی این واحد شده است، گردشگی و جورشدگی قطعات متوسط تا ضعیف، نبود چینه‌بندی در واحد، تشخیص آسان از واحدهای همجوار خود به دلیل رنگ.
- واحد ۱۲- نهشته‌های سیلنی - رسی به رنگ سفید، دارای ۳ تا ۵ درصد دانه به اندازه ۰/۲ تا ۰/۵ سانتی‌متر از جنس ماسه سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت) و ۹۵ تا ۹۷ درصد سیمان سیلنی، گردشگی و جورشدگی دانه‌ها متوسط، نبود چینه‌بندی در واحد.
- واحد ۱۳- نهشته‌های گراولی تا ماسه‌ای با سیمان سیلنی در حدود ۲۵ تا ۳۵ درصد به رنگ خاکستری تا سبز، دانه‌ها ۷۵ تا ۸۵ درصد و از جنس ماسه سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت)، اندازه دانه‌ها بین ۰/۵ تا ۸ سانتی‌متر و به‌ندرت دارای قطعات به اندازه ۱۰ سانتی‌متر، جورشدگی ضعیف و گردشگی متوسط، ستبرای لایه ۸۰ سانتی‌متر.
- واحد ۱۴- نهشته‌های سیلنی - رسی به رنگ سرخ تا قهوه‌ای، میزان دانه‌ها ۵ تا ۱۰ درصد و از جنس ماسه سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت) و ترک‌خوردگی واحد به علت وجود ۹۰ تا ۹۵ درصد سیمان سیلنی، بیشترین اندازه دانه ۳ سانتی‌متر، گردشگی و جورشدگی متوسط تا ضعیف، نبود چینه‌بندی در واحد، بیشترین ستبرای لایه ۵۰ سانتی‌متر، به آسانی از لایه‌های مجاور قابل تشخیص است.
- واحد ۱۵- واحد سیلنی - گراولی به رنگ کرم، دارای ۱۰ تا ۲۰ درصد دانه از جنس ماسه سنگ، سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت) و ۸۰ تا ۹۰ درصد سیمان سیلنی، گردشگی و جورشدگی قطعات متوسط تا ضعیف، نبود چینه‌بندی در واحد، بیشترین اندازه دانه‌ها ۳ سانتی‌متر و ستبرای متوسط لایه ۱/۵ متر.
- واحد ۱۶- واحد کنگلومرای، ماسه سنگی با سیمان سیلنی - رسی به رنگ خاکستری (M-PI^c) (صادقی و فنودی، ۱۳۸۵) به سن پلیوسن، جنس قطعات کنگلومرا از ماسه سنگ و سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت).
- واحد ۱۷- واحد سنگ‌آهکی سخت به رنگ کرم تا کرم رنگ تیره (OM_q¹)، (صادقی و فنودی، ۱۳۸۵) لایه آهکی دارای فسیل به رنگ کرم روشن، متوسط تا ستر لایه، سن واحد اواخر الیگوسن و ستبرای آن در ترانشه ۹۰ سانتی‌متر.
- واحد ۱۸- نهشته‌های گراولی با سیمان سیلنی به رنگ خاکستری تا کرم، دانه‌ها ۸۰ تا ۹۰ درصد و از جنس ماسه سنگ و سنگ‌های آذرین (آندزیت، بازالت)، اندازه قطعات بین ۲ میلی‌متر تا ۱۰ سانتی‌متر، سیمان ۲۰ تا ۱۰ درصد واحد، نبود لایه‌بندی در واحد، جورشدگی متوسط تا ضعیف و گردشگی متوسط، ستبرای لایه ۳۰ سانتی‌متر.

کتابنگاری

- امینی، م.، ارژنگ روش، ب.، یوسفی، ک.، ۱۳۵۶- گزارش مقدماتی رسوبات آبرفتی اطراف تهران، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- بربریان، م.، قرشی، م.، ارژنگ روش، ب. و مهاجر اشجعی، ا.، ۱۳۶۴- پژوهش و بررسی ژرف نوزمین ساخت، لرزه‌زمین ساخت و خطر زمین لرزه- گسلش در گستره تهران و پیرامون (پژوهش و بررسی لرزه‌زمین ساخت ایران زمین)، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- شبانیان، ع.، ۱۳۷۷- بررسی الگوی دگرریختی در ساختارهای گستره کوه سرخ ورامین (جنوب‌خاوری تهران) با نگرشی بر لرزه‌خیزی گستره مورد نظر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- صادقی، ا. و فنودی، م.، ۱۳۸۵- نقشه زمین‌شناسی ورامین به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- صفایی، ه.، ۱۳۷۹، تحلیل ساختاری و ژئودینامیکی تغییر روند البرز مرکزی، پایان‌نامه دوره دکتری، دانشگاه شهید بهشتی.
- عباسی، م.، ۱۳۸۱- وضعیت تنش نوزمین ساختی در لبه جنوبی البرز مرکزی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- کاوه‌فیروز، آ.، ۱۳۸۸- بررسی‌های پارینه لرزه‌شناسی بر روی پهنه گسلی شمال تهران (پاره گسله چیتگر)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
- مجیدی نیری، ط.، ۱۳۸۸- بررسی‌های پارینه لرزه‌شناسی بر روی گسله پیشوا، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.

مجیدی نیری، ط.، نظری، ح.، قرشی، م.، طالبیان، م. و کاوه فیروز، آ.، ۱۳۸۸- امکان‌سنجی مطالعات پارینه‌لرزه‌شناسی بر روی گسله پیشوا، جنوب تهران، مجله رشد زمین‌شناسی. نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵- دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی اکتشافات معدنی کشور.

References

- Kalhor, R., 1961- Geology of Neogene formation in VaraminGarmsar area and evaluation of Abardej Nose. Unpublished National Iranian Oil Company, Geological report No. 233,17 p.
- Nazari, H., 2006- Anaales de la tectonique recente et active dans l'Alborz Central et la region de Tehran: Approche morphotectonique et paleoseismologique. Science de la terre et de l'eat. University of Montpllier II, pp.247.
- Riben, E. H., 1955- The geology of the Tehran plain, Am.J.Sci.
- Stewart, I. S. & Hancock, P. L., 1994- «Geotectonic», In:Hancock P. L. (Ed.), Continental Deformation, PergamonPress: 370-409.
- Wells, D. L. & Coopersmith, K. J., 1994- «Emprical realationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement.» Bull, Seismo. Soc.Am, (84) : 974-1002
- Wells, S. G., Bullard, T. F., Menges, C. M., Drake, P. G., Karas, P. A., Kelson, K. I., Ritter, J. B. & Wesling, J. R., 1988- 'Regional variations in tectonic geomorphology along a segmented convergent plate boundary, Pacific coast of Costa Rica', Geomorphology, 1,265-239 .