

## تحلیل خطر جابه‌جایی ناشی از گسیختگی‌های سطحی گسل شمال تبریز به روش احتمالاتی

محمد رضا حسینی<sup>۱</sup>، حبیب رحیمی<sup>۲\*</sup> و علی سنقری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۳)

### چکیده

روش تحلیل خطر احتمالی جابه‌جایی ناشی از گسیختگی سطحی، یکی از روش‌های نوین در برآورد میزان جابه‌جایی محتمل در منطقه‌ای است که خطر گسیختگی گسل مسبب وجود دارد. در این مطالعه با استفاده از رویکرد احتمالاتی و روش زمین‌لرزه، به بررسی میزان جابه‌جایی سطحی گسل شمال تبریز پرداخته شده و جابه‌جایی محتمل در دوره بازگشت‌های مختلف در قالب نقشه‌های همبندی برآورد شده است. با توجه به گسیختگی‌های سطحی ناشی از زمین‌لرزه‌های ۱۷۲۱ و ۱۷۸۰ میلادی گسل شمال تبریز که به ترتیب با ۵۰ و ۶۰ کیلومتر گسیختگی سطحی همراه بودند، جهت برآورد احتمال جابه‌جایی ناشی از گسیختگی سطحی این گسل با روش زمین‌لرزه، قطعه‌ای به طول ۵۰ تا ۶۰ کیلومتر از گسل برای چشمه احتمالی گسیختگی سطحی انتخاب شد. مطابق مطالعات دیرینه-شناسی در این منطقه، جابه‌جایی احتمالاتی به ترتیب بین صفر تا ۴/۵ و صفر تا ۷/۱ متر انتخاب و بر اساس مطالعات دیرینه‌شناسی و کاتالوگ زمین‌لرزه‌های تاریخی، دوره بازگشت و بزرگای احتمالی ناشی از فعالیت گسل شمال تبریز، ۶۴۵ سال و  $M_w \sim 7.7$  در نظر گرفته شد. جابه‌جایی احتمالاتی برای نرخ فزونی ۵ درصد در ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برای جابه‌جایی‌های اصلی محتمل (روی گسل) گسل شمال تبریز برآورد شده است. همچنین با اعمال رابطه کاهندگی پیترسن، جابه‌جایی احتمالاتی بیشینه گسل شمال تبریز برای جابه‌جایی‌های ۴/۵ و ۷/۱ متر در نرخ فزونی ۵ درصد در ۵۰ سال، ۱۸۶ سانتی‌متر؛ در ۴۷۵ سال، ۴۶۹ سانتی‌متر و در ۲۴۷۵ سال، ۶۵۵ سانتی‌متر تخمین زده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل خطر، گسیختگی سطحی، تحلیل خطر احتمالاتی جابه‌جایی، گسل شمال تبریز

## ۱ مقدمه

زمین لرزه‌ها نه تنها به دلیل لرزش زمین، بلکه به دلیل ایجاد گسیختگی‌های سطحی، تهدیدی جدی برای بسیاری از فعالیت‌های بشر محسوب می‌شوند. کاهش تلفات و خسارات زلزله، نیازمند پیش‌بینی دامنه و مکان جنبش‌های زمین و جابه‌جایی‌های سطحی احتمالی در آینده است. خطر جابه‌جایی گسل بر اساس روابط تجربی ارزیابی می‌شود. این روابط که با استفاده از داده‌های گسیختگی زمین لرزه‌های تاریخی به دست می‌آیند، احتمال لغزش سطحی همالرز گسیختگی‌های روی گسل (اصلی) و خارج از گسل (توزیع شده) را برای بزرگا و فاصله‌های مختلف تا گسل مسبب ارزیابی و امکان پیش‌بینی میزان لغزش روی گسل فعال یا در نزدیکی آن را فراهم می‌کنند (بیز و همکاران، ۲۰۱۹).

جابه‌جایی‌های سطحی همالرز وابسته به زمین لرزه‌های بزرگ باعث خسارات چشمگیری در تأسیسات سطحی و زیرسطحی در مجاورت گسل‌ها می‌شود. تخریب ساختمان‌ها و خطوط لوله در زمین لرزه ۱۹۷۱ سن فرناندو کالیفرنیا-ایالات متحده آمریکا (جینگز، ۱۹۷۱)، تخریب پل‌ها در زمین لرزه ۱۹۹۵ کوبه-ژاپن (کامفورت، ۱۹۹۵ و کوکتسو و همکاران، ۱۹۹۸) و زمین لرزه ۱۹۹۹ از میت-ترکیه (بارکا، ۱۹۹۹ و بوخون و همکاران، ۲۰۰۱)، تخریب سدها و تونل‌ها در زمین لرزه ۱۹۹۹ جی‌جی-تایوان (لی و همکاران، ۲۰۰۲) و خطوط راه آهن در زمین لرزه ۱۹۷۶ گواتمالا (یانگ و همکاران، ۱۹۸۹) نمونه‌هایی از خسارات وارده به دلیل گسیختگی‌های سطحی گسل‌ها است.

روش تحلیل خطر احتمالاتی جابه‌جایی گسل کاربردهای زیادی دارد که برای نمونه می‌توان به کاهش خسارات در زمین لرزه دنالی با بزرگای  $M_w \sim 7/9$  در سال ۱۹۷۰ اشاره کرد. این زمین لرزه به گسیختگی سطحی و زیرسطحی منجر شد و خطوط لوله با متحمل شدن ۶ متر

جابه‌جایی ناشی از گسلش اصلی، موفق به مهار یک فاجعه انسانی و اقتصادی شدند. این موفقیت به دلیل تحقیقات فشرده زمین‌شناسی و مهندسی در شناسایی و توصیف گسل دنالی از نظر موقعیت دقیق و جابه‌جایی‌های بالقوه آن و تأکید بر این نکته بود که غلبه بر چنین تهدیدی، نیازمند پژوهش‌های زمین‌شناسی و مهندسی است (بیز و همکاران، ۲۰۱۹). در ایالت کالیفرنیا در سال ۱۹۷۱ (پس از زمین لرزه سن فرناندو)، قانون منطقه‌بندی گسل آلکوویست-پرילו (Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning, AP) به تصویب رسید که مبتنی بود بر ممانعت از ساخت‌وساز روی گسل یا مجاورت آن تا زمانی که تحقیقات زمین‌شناسی، وجود سطح خطر کم روی گسل را تأیید نکند.

راه دیگر جهت کاهش خطر جابه‌جایی و تأثیرات گسیختگی گسل بر سازه در حال ساخت این است که میزان جابه‌جایی احتمالاتی گسل با برآورد نرخ فزونی سطوح مختلف جابه‌جایی رخداد در زیر یک ساختار به همراه منحنی خطر احتمالاتی جابه‌جایی بررسی شود (یانگز و همکاران، ۲۰۰۳). شایان ذکر است در مطالعات تحلیل خطر جابه‌جایی سطحی، جابه‌جایی‌های غیرزمین‌ساختی همچون خزش گسل، پس لرزه، روانگرایی خاک و زمین لغزش لحاظ نمی‌شوند (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱). تاکنون چندین پژوهشگر، داده‌های جابه‌جایی گسل را برای ارزیابی خصوصیات گسیختگی گسل جمع‌آوری و تحلیل کرده‌اند؛ برای مثال میزان جابه‌جایی گسل و استخراج روابط تجربی میان طول گسیختگی و بزرگا، طول گسیختگی و سازوکار گسل، بیشترین جابه‌جایی گسل، جابه‌جایی متوسط گسل و موارد دیگر را ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۳، ۱۹۹۴) و پیترسن و وسنوسکی (۱۹۹۴) بررسی کرده‌اند. همفیل-هیلی و ولدون (۱۹۹۹) نیز با بررسی توزیع جابه‌جایی گسل در گسلش اصلی، مشخص کردند که جابه‌جایی‌های ناشی از گسیختگی،

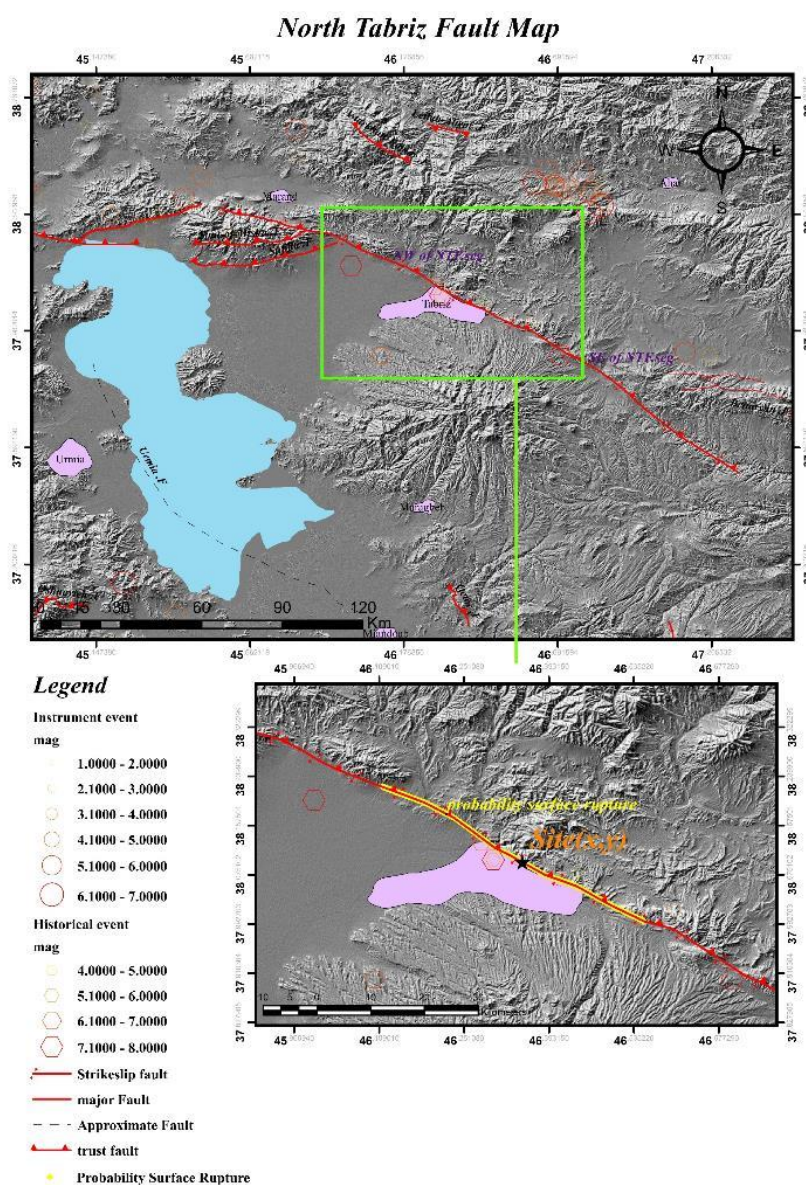
می‌بایند و ممکن است در حد چند سانتی‌متر تا چندین متر اندازه‌گیری شوند. پیترسن و همکاران (۲۰۱۱) روشی برای برآورد خطر احتمالاتی جابه‌جایی گسل امتدادلغز ارائه کردند که دقت نقشه‌برداری از گسل و تأثیر پیچیدگی نوع رد (trace) گسل نقشه‌برداری‌شده را نیز در برمی‌گیرد. چن و پیترسن (۲۰۱۹) موضوع عدم قطعیت محل گسیختگی را در ارزیابی خطر جابه‌جایی گسل مطرح کردند. کاتونا (۲۰۲۰) خطر جابه‌جایی سطحی ناشی از گسلش را در طراحی نیروگاه‌های هسته‌ای بررسی کرده است.

سطح خطر گسل شمال تبریز به دلیل عبور از منطقه ۵ شهرداری تبریز بالا است و در صورت گسیختگی سطحی احتمالی، به خرابی‌های بسیاری در این منطقه مسکونی منجر می‌شود. جمعیت این منطقه بالغ بر ۱۵۰ هزار نفر و مساحت آن ۳۲ هزار کیلومتر مربع است و مناطق مهمی از جمله باغمیشه، الهیه، شهرک رشیدیه و ... را شامل می‌شود. خوشبختانه در این منطقه هیچ اداره و سازمان دولتی قرار نگرفته است. در این مطالعه بر اساس مطالعه دیرینه‌شناسی گسل شمال تبریز (حسامی و همکاران، ۲۰۰۳)، قطعه‌ای به طول ۵۰ تا ۶۰ کیلومتر به‌عنوان چشمه گسیختگی احتمالاتی در آینده فرض شد. برای توصیف رفتار احتمالی این گسل، جایگاه‌هایی به فاصله ۵۰ متر از یکدیگر و ابعاد سلولی ۲۵×۲۵ متر مربع روی رد گسل فرض شد (شکل ۱). به دلیل نبود زمین‌لرزه‌های دستگاهی بزرگ همراه با گسیختگی سطحی (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱)، رد ساده برای گسل در نظر گرفته شد. مطالعات زیادی درباره جابه‌جایی‌های تاریخی گسل شمال تبریز انجام شده است. بر اساس مطالعات دیرینه‌شناسی حسامی و همکاران (۲۰۰۳) و قاسمی و همکاران (۲۰۱۵)، جابه‌جایی محتمل برای گسل شمال تبریز به ترتیب بین صفر تا ۴/۵ و صفر تا ۷/۱ متر است. همچنین با توجه به مطالعه دیرینه‌شناسی حسامی و همکاران (۲۰۰۳) و کاتالوگ زمین‌لرزه‌های تاریخی موسوی و همکاران

اغلب در پایان گسیختگی‌ها افت می‌کنند و میزان جابه‌جایی مستقل از اندازه گسیختگی است. بیاسی و ولدون (۲۰۰۶) با بررسی داده‌های جابه‌جایی دیرینه‌شناسی، توابع چگالی احتمال طول گسیختگی و بزرگا را محاسبه کردند. یانگز و همکاران (۲۰۰۳) دو رویکرد متفاوت را برای برآورد نرخ فزونی جابه‌جایی معرفی کردند. در روش اول، جابه‌جایی مستقیماً از داده‌های زمین‌شناسی، نرخ لغزش گسل و مقدار متوسط جابه‌جایی گسل بر رخداد به‌دست می‌آید. این روش تنها برای جابه‌جایی‌های گسل (اصلی) استفاده می‌شود. روش دوم، روش زمین‌لرزه است که مشابه روش تحلیل خطر احتمالاتی لرزه‌ای ( Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA) است و در آن، روابط کاهندگی جابه‌جایی، جایگزین رابطه کاهندگی شتاب و سایر پارامترهای خطر لرزه‌ای می‌شود. باید توجه کرد که هر زمین‌لرزه باعث وقوع تکان در محل مورد نظر می‌شود، اما هر زمین‌لرزه سبب ایجاد گسیختگی سطحی در منطقه نمی‌شود؛ به همین دلیل برای به‌دست آوردن روابط کاهندگی، تنها از داده زمین‌لرزه‌هایی استفاده می‌شود که سبب ایجاد گسیختگی در منطقه شده‌اند (یانگز و همکاران، ۲۰۰۳). پیترسن و همکاران (۲۰۱۱) خطر جابه‌جایی گسل را برای امتدادلغز مطالعه کردند. ایشان داده‌های جابه‌جایی‌های اصلی (روی گسل) و توزیعی (خارج از گسل) نه زمین‌لرزه امتدادلغز را که گشتاور لرزه‌ای آنها بین ۶/۵ تا ۷/۶ بود، انتخاب و مدل‌سازی و این داده‌ها را با سیزده زمین‌لرزه امتدادلغز جهانی ادغام کردند. این سیزده زمین‌لرزه را و سنوسکی (۲۰۰۸) از بین رخدادهایی انتخاب کرده بود که بزرگایی کمتر از ۷/۹ داشتند. جابه‌جایی روی گسل اصلی، در انتهای گسیختگی افت می‌کند و اغلب در واحد متر اندازه‌گیری می‌شود، درحالی‌که جابه‌جایی‌های توزیع‌شده (خارج از گسل) با فاصله گرفتن از گسیختگی کاهش

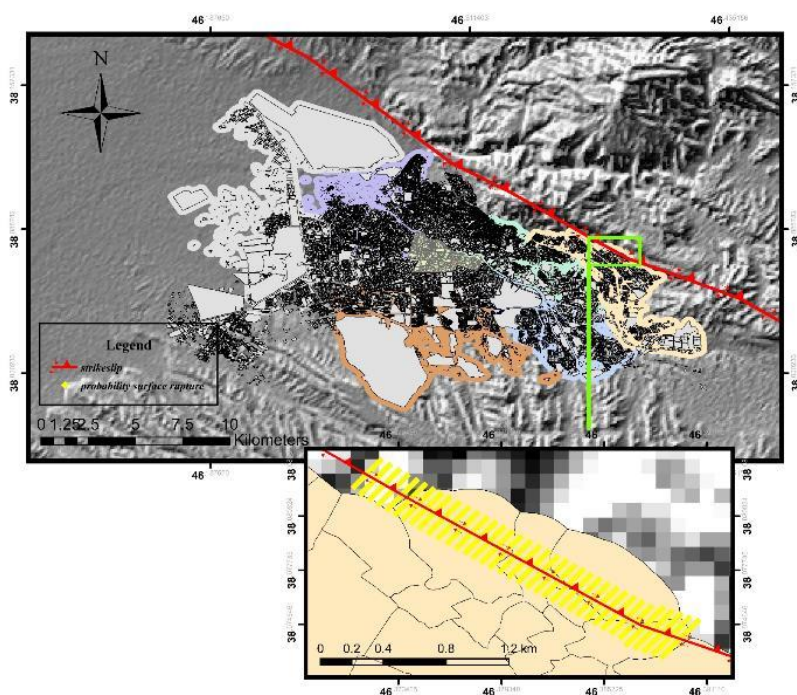
است (شکل‌های ۴ تا ۶). در گام دوم، به دلیل عبور گسل شمال تبریز از منطقه ۵ شهر تبریز (شکل ۲)، با در نظر گرفتن قطعه‌ای به طول ۲ کیلومتر از گسل شمال تبریز، جابه‌جایی احتمالاتی برآورد شده و مقادیر جابه‌جایی احتمالاتی با شکل‌های سه‌بعدی و منحنی‌های همبند (شکل‌های ۷ و ۸) به‌نمایش درآمده است.

(۲۰۱۴)، دوره بازگشت ۶۴۵ سال و بزرگای ۷/۷ Mw~ برای فعالیت گسل شمال تبریز در نظر گرفته شد. در گام اول با در نظر گرفتن جایگاهی با مختصات جغرافیایی (۳۸/۹۶°N, ۴۶/۳۴۹°E)، برای دوره بازگشت ۶۴۵ سال و بزرگای ۷/۷ Mw~ و جابه‌جایی‌های ۴/۵ و ۷/۱ متر و نرخ فزونی ۵ درصد در ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال، مقادیر جابه‌جایی احتمالاتی و منحنی‌های مهندسی به‌دست آمده



شکل ۱. موقعیت گسل شمال تبریز و چشمه گسیختگی احتمالاتی در آینده و نمایش جایگاه (X,Y) برای برآورد جابه‌جایی احتمالی.

## Tabriz City Map



شکل ۲. نمایش گسل شمال تبریز و عبور آن از منطقه ۵ شهر تبریز.

### ۲ لرزه‌زمین‌ساخت گسترده مورد مطالعه

شهر تبریز با جمعیتی بالغ بر دو میلیون نفر و مساحتی معادل ۱۶۷ کیلومتر مربع در شمال غرب ایران از جمله پرجمعیت‌ترین شهرهای کشور به‌شمار می‌آید که در طول تاریخ، زمین‌لرزه‌های مخربی را تجربه کرده است. یکی از بارزترین معضلات این شهر، بنا نهاده شدن و گسترش آن روی پهنه یکی از جنب‌ترین چشمه‌های لرزه‌زای ایران زمین یعنی گسل شمال تبریز است. بر اساس مطالعات تاریخیچه لرزه‌خیزی بربریان و ارشدی (۱۹۷۶) و ژئودزی ماسون و همکاران (۲۰۰۶)، زمین‌ساخت منطقه از نوع فعال است. از سال ۸۵۸ میلادی تاکنون، این شهر و مناطق پیرامون آن چندین زمین‌لرزه مخرب بزرگ و متوسط را به خود دیده است که بر پایه شواهد و قرائن تاریخی، می‌توان دست‌کم وقوع سه زمین‌لرزه را به فعالیت گسل شمال تبریز نسبت داد (بربریان و بی‌تس، ۱۹۹۹). سازوکار کانونی زمین‌لرزه -

ها در شمال غرب ایران و جنوب شرقی ترکیه نشان می‌دهد همگرایی بین صفحات عربستان و اوراسیا در این مناطق در طول گسله امتداد لغز راست بر مستهلک می‌شود. تعدادی از این قطعات گسلی به همراه زمین‌لرزه‌های ۱۹۳۰، ۱۹۶۶ و ۱۹۷۶ گسیخته شده و آثار دگرشکلی از خود برجای گذاشته‌اند (حسامی و همکاران، ۲۰۰۳). با وجود این، گسل شمال تبریز که یکی از قطعات این سامانه امتداد لغز راست بر را تشکیل می‌دهد، در دو سده اخیر به لحاظ لرزه‌خیزی غیرفعال بوده است. در میان زمین‌لرزه‌های تاریخی متعددی که در منطقه تبریز به وقوع پیوسته است، تنها سه زمین‌لرزه ویرانگر سال‌های ۱۰۴۲ و ۱۷۲۱ ( $M_s \sim 7/3$ ) و سال ۱۷۸۰ ( $M_s \sim 7/4$ ) با گسیختگی سطحی در طول گسل شمال تبریز همراه بوده‌اند (حسامی و همکاران، ۲۰۰۳). زمین‌لرزه‌های ۱۷۲۱ و ۱۷۸۰ میلادی که به فاصله حدود ۶۰ سال از یکدیگر روی دادند، به

### ۳ برآورد خطر گسیختگی گسل به روش زمین- لرزه احتمالاتی

تحلیل خطر احتمالی لرزه‌ای (PSHA) از زمان توسعه آن در اواخر دهه ۱۹۶۰ و اوایل دهه ۱۹۷۰ برای ارزیابی خطرات لرزش زمین و ایجاد پارامترهای طراحی لرزه‌ای به کار می‌رود (کرنل، ۱۹۶۸، ۱۹۷۱). این روش که برای تجزیه و تحلیل خطر جابه‌جایی احتمالی گسل با دو رویکرد زمین لرزه و جابه‌جایی معرفی شده است (یانگز و همکاران، ۲۰۰۳)، ابتدا برای تخمین جابه‌جایی گسل‌های کوهستان یوکا مطرح شد که محل دفن زباله‌های هسته‌ای بود (استپ و همکاران، ۲۰۰۱). روش تحلیل خطر جابه‌جایی احتمالی گسل، برای محیطی با گسلش نرمال معرفی شد. گفتنی است توزیع‌های احتمالی به دست آمده برای هر نوع گسلش در دنیا را می‌توان در نواحی با زمین- ساخت مشابه استفاده کرد (یانگز و همکاران، ۲۰۰۳).

رویکرد زمین لرزه، مشابه تجزیه و تحلیل خطر احتمالی لرزه‌ای است و به رخداد جابه‌جایی عارضه‌هایی همانند گسل‌ها، برش جزیی، شکستگی یا زمین ناشکسته در سطح یا در نزدیکی سطح مربوط می‌شود. در این رویکرد، رابطه کاهندگی جابه‌جایی گسل جایگزین رابطه کاهندگی جنبش زمین می‌شود. در رویکرد جابه‌جایی، بدون بررسی سازوکار علت گسیختگی، از مشخصات جابه‌جایی گسل مشاهده شده در جایگاه مورد نظر، برای تعیین خطر در آن منطقه استفاده می‌شود. نرخ رخداد جابه‌جایی‌ها و توزیع جابه‌جایی گسل مستقیماً از ویژگی‌های گسل یا ویژگی‌های زمین‌شناسی در جایگاه مورد نظر حاصل می‌شود (یانگز و همکاران، ۲۰۰۳).

در رویکرد زمین لرزه که برای تحلیل خطر جابه‌جایی احتمالی گسل استفاده می‌شود، نرخ فزونی  $v_k(z)$ ، که مستقیماً از رابطه تحلیل خطر احتمالاتی لرزه‌ای به دست می‌آید، با توجه به نرخ سالانه زمین لرزه‌ها بیان و مطابق رابطه کرنل (۱۹۶۸) محاسبه می‌شود (یانگز و

ترتیب با دست کم ۵۰ و ۶۰ کیلومتر گسیختگی سطحی همراه بودند که حدود ۴۰ کیلومتر از آن در دو زمین لرزه مزبور هم‌پوشانی داشته است (بربریان، ۱۹۹۷). این موضوع بیانگر آن است که زمین لرزه‌های بزرگ در طول گسل شمال تبریز در زمان‌های خاص تمرکز یافته‌اند و از نظر مکانی به یکدیگر مربوط هستند. وقوع زمین لرزه ۱۹۷۶ چالدران در ترکیه که با حدود ۵۵ کیلومتر شکستگی همراه شد، به این موضوع اشاره دارد که احتمالاً طول شکستگی سطحی ناشی از زمین لرزه‌های تاریخی در این منطقه در حدود ۵۰ تا ۶۰ کیلومتر متغیر است (توکسوز و همکاران، ۱۹۷۷). بررسی دقیق‌تر توزیع زمانی زمین لرزه‌های گستره تبریز (بربریان و بیس، ۱۹۹۹) نیز نمایانگر توزیع خوشه‌ای (رگباری) زمین لرزه‌ها در طول زمان و در این محدوده است. در صورت صحت چنین الگویی، با توجه به فقدان رویداد لرزه‌ای به مدت بیش از ۲۰۰ سال در گستره تبریز (محدوده زمانی بین خوشه‌ای)، محدوده مورد مطالعه مراحل پایانی ذخیره‌سازی تنش را سپری کرده و آماده رهاسازی انرژی ذخیره شده است. حسامی و همکاران (۲۰۰۳) نیز در همین باره، موضوع تمرکز مکانی- زمانی زمین لرزه‌های مرتبط با گسل شمال تبریز را مطرح کرده‌اند. ایشان بر اساس مطالعات دیرینه لرزه‌شناسی بخش غربی گسل شمال تبریز، با معرفی چهار زمین لرزه به وقوع پیوسته در این بخش از گسل یاد شده، دوره بازگشت زمین لرزه‌های آن را  $821 \pm 176$  سال پیشنهاد و مقدار جابه‌جایی امتداد لغز راست بر را در هر رویداد لرزه‌ای (slip per event) این بخش از گسل شمال تبریز  $3/5$  تا  $4/5$  متر برآورد کرده‌اند. بربریان (۱۹۹۷) احتمال گسیخته شدن به یکباره تمامی قطعات گسلی شمال تبریز را مطرح کرده و آن را از موضوعات مهم در مبحث خطر زمین لرزه برای شهر تبریز و منطقه شمال غرب ایران دانسته است.

همکاران، ۲۰۰۳):

است و شامل حاصل ضرب دو احتمال زیر است (یانگز و همکاران، ۲۰۰۳):

(۳)

$$P_{kn}^*(D>d|m,r) = P_{kn}(Slip|m,r) \cdot P_{kn}(D>d| m, r, slip)$$

در شکل ۳، برای محاسبه خطر جابه‌جایی احتمالاتی گسیختگی گسل امتداد لغز، یک گسل و یک جایگاه به مساحت  $z^2$  در مختصات  $(x,y)$  رسم شده است. فاصله عمودی جایگاه تا گسل  $r$  است. فاصله تصویر این نقطه روی گسیختگی گسل تا نزدیک‌ترین انتهای گسیختگی با  $d$ ، طول کلی گسیختگی سطحی گسل با  $L$  و فاصله گسیختگی تا انتهای گسل با  $s$  نشان داده شده است. جهت ساده کردن محاسبات، نسبت  $l/L$  فاصله نسبی پای عمود تا انتهای گسیختگی تعریف می‌شود (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱).

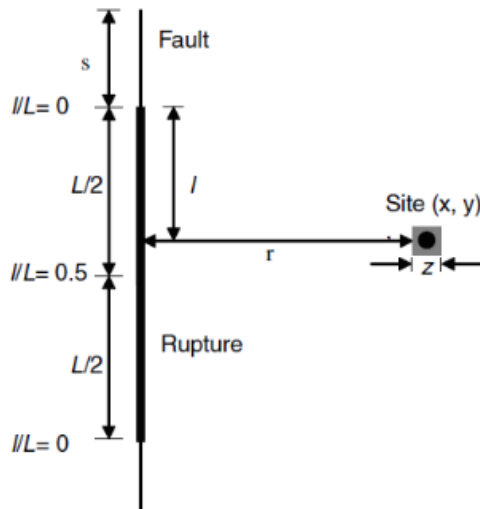
$$v_k(z) = \sum_n \alpha_n(m^0) \int_{m_0}^{m_n^H} f_n(m) [\int_0^\infty f_{kn}(r|m) \cdot P^*(Z>z|m,r) \cdot dr] \cdot dm$$

که میزان فزونی  $Z$  پارامتر جنبش زمین (بیشینه شتاب زمین، بیشینه شتاب طیفی پاسخ) را از سطح مشخص شده  $Z$  در جایگاه  $k$  تعیین می‌کند. در هنگام محاسبه نرخ فزونی جابه‌جایی  $D$  از مقدار مشخص  $d$ ، در رابطه (۱) پارامتر جابه‌جایی، جایگزین پارامترهای جنبش زمین می‌شود (یانگز و همکاران، ۲۰۰۳):

(۲)

$$v_k(d) = \sum_n \alpha_n(m^0) \int_{m_0}^{m_n^H} f_n(m) [\int_0^\infty f_{kn}(r|m) \cdot P^*(D>d|m,r) \cdot dr] \cdot dm$$

عبارت  $P(D>d|m,r)$  تابع تضعیف  $\cong$  جابه‌جایی گسل در سطح زمین یا نزدیک به آن است. این تابع تضعیف جابه‌جایی، از تابع تضعیف جنبش زمین معمول متفاوت



شکل ۳. تعریف متغیرهای استفاده شده در تحلیل خطر گسیختگی گسل.  $x$  و  $y$  مختصات جایگاه،  $z$  ابعاد ناحیه مفروض برای محاسبه احتمال گسیختگی گسل در جایگاه (برای مثال، ابعاد پی ساختمان)،  $r$  فاصله از جایگاه تا اثر گسل،  $l$  فاصله اندازه‌گیری شده از نزدیک‌ترین نقطه روی گسیختگی تا نزدیک‌ترین انتهای گسیختگی،  $L$  طول کلی گسیختگی،  $s$  فاصله از انتهای گسیختگی تا انتهای گسل و نسبت  $l/L$  فاصله از روی گسل است.

توزیع شده) باشد، از رابطه زیر جهت به دست آوردن نرخ فزونی جابه‌جایی احتمالاتی ناشی از گسلش اصلی (روی

اگر  $D$  جابه‌جایی روی گسل (گسلش اصلی) و  $d$  جابه‌جایی در جایگاه خارج از این گسل (گسلش

گسل) استفاده می‌شود (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱):  
(۴)

$$\lambda(D) \lambda(D \geq D_0)_{xyz} = \alpha(m) \times \alpha(m) \int_{m,s} f_{M,S}(m,s) P[sr \neq 0|m] \times \int_r P[D \neq 0|z, sr \neq 0] \times P[D \geq D_0 | L, m, D \neq 0] f_R(r) dr dm ds$$

$P[SR \neq 0|M]$  با توجه به بزرگای معین  $M$  ناشی از گسلش تعریف می‌شود. از آنجا که رابطه‌های تجربی بین پارامترهای مختلف گسل فرمول‌بندی شده‌اند، این احتمال برای گسلش‌های مختلف امتداد لغز، نرمال و معکوس به دست آمده است (ولز و کوپراسمیت، ۱۹۹۴). در تحلیل خطر جابه‌جایی گسل، بررسی احتمال ایجاد گسیختگی سطحی با توجه به بزرگای ( $M$ ) در سطح زمین حائز اهمیت است؛ در نتیجه از رابطه (۵) (ولز و کوپراسمیت، ۱۹۹۳) می‌توان استفاده کرد:

$$P[sr \neq 0|M] = \frac{e^{a+bM}}{1+e^{a+bM}} \quad (۵)$$

که ضرایب  $a$  و  $b$  ثابت هستند. مقدار این ضرایب برای گسلش امتداد لغز به ترتیب  $۱۲/۵۱$  و  $۲/۰۵۳$  گزارش شده است. احتمال گسیختگی سطحی برابر ۱۰ درصد برای بزرگای  $Mw \sim ۵$  و برابر ۹۵ درصد برای بزرگای  $Mw \sim ۷/۵$  است (ریزو، ۲۰۱۳). از این احتمال گسیختگی در برآورد نرخ فزونی جابه‌جایی استفاده می‌شود؛ زیرا در زمین‌لرزه‌هایی همانند لومپرتا در سال ۱۹۸۹ با بزرگای  $۶/۹$  و آلاسکا در سال ۲۰۰۲ با بزرگای  $Mw \sim ۶/۷$ ، گسیختگی به سطح زمین نرسید. این دو زمین‌لرزه باعث تغییر شکل سطحی نشدند و پدیده‌ای غیرزمین‌ساختی محسوب می‌شوند (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱).

عبارت  $P[D \neq 0|z, sr \neq 0]$  نشان‌دهنده احتمال وجود جابه‌جایی غیرصفر در فاصله  $r$  از گسیختگی در ناحیه‌ای به ابعاد  $z^2$  و با توجه به رخداد بزرگای  $m$  است که با گسیختگی سطحی همراه است. احتمال  $P[D \geq D_0 | L, m, D \neq 0]$  برای جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر یا مساوی با یک مقدار داده‌شده در جایگاه مورد نظر برای جابه‌جایی اصلی (روی گسل) است. این احتمال با انتگرال‌گیری حول یک توزیع لگ-نرمال به دست می‌آید (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱).

در این رابطه برای ارزیابی خطر جابه‌جایی ناشی از گسیختگی گسل، از توابع چگالی احتمال (Probability Density Function, PDF) برای توصیف زمین‌لرزه‌ها و جابه‌جایی‌های بالقوه روی یا نزدیک گسیختگی استفاده و احتمال‌هایی برای توصیف پتانسیل گسیختگی و جابه‌جایی غیرصفر تعریف می‌شود (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱). در ادامه، هریک از پارامترهای مطرح در برآورد احتمالاتی جابه‌جایی توضیح داده می‌شود.

### ۳-۱ تابع چگالی احتمال

تابع چگالی احتمال  $f_{M,S}(m,s)$ ، بزرگای زمین‌لرزه و مکان گسیختگی‌های روی یک گسل را مشخص می‌کند. از آنجا که بزرگای و موقعیت گسیختگی روی گسل مسبب با یکدیگر همبستگی دارند؛ در نتیجه از یک توزیع احتمالاتی برای محاسبه این پارامترها استفاده می‌شود. در گام بعدی، تغییرپذیری در مکان گسیختگی را باید در نظر گرفت. تابع چگالی احتمال  $f_R(r)$ ، فاصله عمودی ( $r$ ) جایگاه مورد نظر تا کلیه گسیختگی‌های بالقوه را تعریف می‌کند (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱).

### ۳-۲ احتمالات

احتمال  $P[SR \neq 0|M]$ ، نسبت تعداد سلول‌هایی است که روی گسل اصلی واقع هستند و گسیختگی دارند به تعداد کل سلول‌های مفروض. احتمال بروز گسیختگی سطحی



۳-۳ پارامتر  $\alpha$ 

احتمال گسیختگی گسلش‌های اصلی است، در محاسبه احتمال گسیختگی گسلش‌های توزیع شده به رابطه زیر تبدیل می‌شود (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱):

$$= \ln(p) \quad (6)$$

$$a(z)\ln(r)+b(z)$$

مقادیر ضرایب استفاده شده برای اندازه‌های سلولی  $25 \times 25$  تا  $200 \times 200$  متر مربع در رابطه (۶) در جدول ۱ آورده شده است (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱).

## ۳-۵ دقت نقشه برداری

صحت نقشه برداری مکان گسل، تابعی از شرایط زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی است و برای تشخیص و تفسیر یک زمین‌شناس در تبدیل این اطلاعات مکانی (spatial) به نقشه‌های زمین‌شناسی و سامانه اطلاعات جغرافیایی (Geomorphic Information System) گسل نقش بسزایی دارد. یک نقشه گسلی، با استفاده از تصویر سازی عکس‌های هوایی، تفسیر الگوهای گسلش از زمین‌ریخت‌شناسی و تبدیل مکان‌های گسل به یک نقشه مبنا یا سامانه اطلاعات جغرافیایی تولید می‌شود. در بسیاری از موارد، شناسایی مکان و رد گسل ممکن است با مشکل همراه باشد؛ زیرا رسوبات و فرسایش ممکن است سطح گسل را نامفهوم یا پنهان کنند که به افزایش عدم قطعیت در شناسایی محل واقعی گسل منجر می‌شود. رد گسل‌های نقشه برداری شده، بر مبنای اینکه تا چه حدی واضح و دقیق مکان‌یابی شوند، در چهار دسته درست تقریبی (accurate)،

هنگامی که اندازه بالقوه زمین‌لرزه‌ای با بزرگای مشخص مدل‌سازی شود، می‌توان ارزیابی کرد که چند وقت یک‌بار این گسیختگی‌ها اتفاق می‌افتند. پارامتر نرخ  $\alpha(m)$  توصیف‌کننده دفعات تکرار این زمین‌لرزه‌ها در مدل است. این پارامتر تابعی از بزرگای است و می‌تواند تنها تابعی از یک گسیختگی منفرد یا تابعی از زمین‌لرزه‌های تجمعی با بزرگای بیش از بزرگای کمینه مهم در پروژه‌های مهندسی باشد (یانگز و همکاران، ۲۰۰۳). این پارامتر معمولاً بر مبنای نرخ لغزش، نرخ دیرینه‌شناسی زمین‌لرزه - های بزرگ یا نرخ زمین‌لرزه‌های تاریخی گسل مسبب است و با واحد زمین‌لرزه در سال توصیف می‌شود. با حذف پارامتر  $\alpha(m)$  از رابطه (۴) می‌توان به برآورد خطر جابه‌جایی تعیینی (Deterministic Fault Displacement Hazard) گسل پرداخت (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱).

## ۳-۴ اندازه سلولی (Foot Print)

برای محاسبه خطر جابه‌جایی‌های گسلش اصلی، از رابطه (۴) استفاده شده است. با تغییر اندازه ابعاد سلولی، تغییری در سطح خطر ایجاد نمی‌شود و این پارامتر را می‌توان با در دسترس بودن داده‌های جابه‌جایی اصلی در منطقه مورد مطالعه بررسی کرد. برای محاسبه خطر گسیختگی توزیع شده (خارج از گسل)، با در نظر گرفتن روش یانگز و همکاران (۲۰۰۳)، احتمال گسیختگی سطحی با مدل‌سازی جابه‌جایی‌های ثانویه تا فاصله ۱۲ کیلومتری از گسل مسبب بررسی شد. رابطه (۵) که رابطه‌ای برای محاسبه

جدول ۱. احتمال گسیختگی توزیع شده برای اندازه‌های سلولی مختلف (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱).

شماره	اندازه سلول ( $m^2$ )	$a(z)$	$b(z)$	انحراف معیار ( $\sigma$ )
۱	$25 \times 25$	-۱/۱۴۷۰	۲/۱۰۴۶	۱/۲۵۰۸
۲	$50 \times 50$	-۰/۹۰۰۰	۰/۹۸۶۶	۱/۱۴۷۰
۳	$100 \times 100$	-۱/۰۱۱۴	۲/۵۵۷۲	۱/۰۹۱۷
۴	$150 \times 150$	-۱/۰۹۳۴	۳/۵۵۲۶	۱/۰۱۸۸
۵	$200 \times 200$	-۱/۱۵۳۸	۴/۲۳۴۲	۱/۰۱۷۷

متری) از گسل خودداری شود. در جدول ۲ خلاصه‌ای از انحراف معیار جابه‌جایی‌های مشاهده‌شده در زمین لرزه‌های امتدادلغز برای دسته‌بندی‌های مختلف دقت نقشه‌برداری ارائه شده است (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱).

با توجه به مقادیر نمایی به‌دست آمده از این معادلات برازش، جابه‌جایی میانگین برابر است با (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱):

$$D_{\text{mean}} = e^{\mu + \sigma^2/2} \quad (7)$$

(approximate)، استنباطی (inferred) و پنهان (concealed) تقسیم‌بندی می‌شود (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱).

مثالی کاربردی نشان می‌دهد در گسل فعالی که زمین لرزه‌های بزرگ تکرار شده در هر چند صد سال در آن رخ می‌دهد، تحلیل خطر گسیختگی گسل باید یکی از مباحث مهم برای طراحی سازه‌ها یا خطوط لوله واقع در نزدیکی این گسل باشد و اگر این گسل رد ساده (پیچیده) داشته باشد، باید از ساخت و ساز تا فاصله ۱۵۰ متری (۳۰۰

جدول ۲. خلاصه‌ای از دقت فاصله اندازه‌گیری شده از رد گسل نقشه‌برداری شده تا گسیختگی سطحی مشاهده‌شده (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱).

انحراف معیار دو طرفه روی گسل (m)	انحراف معیار یک طرفه (m)	میانگین (m)	دقت نقشه‌برداری
۵۲/۹۲	۴۳/۱۴	۳۰/۶۴	همه
۲۶/۸۹	۱۹/۵۴	۱۸/۴۷	درست
۴۳/۸۲	۳۵/۸۹	۲۵/۱۵	تقریبی
۶۵/۵۲	۵۲/۳۹	۳۹/۳۵	پنهان
۷۲/۶۹	۵۶/۹۹	۴۵/۱۲	استنباطی

دلیل وجود محدودیت‌ها در دقت نقشه‌های پایه یا تصاویر و دقت تجهیزات مورد استفاده برای انتقال این اطلاعات به نقشه یا پایگاه داده است (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱).

### ۷-۳ رابطه کاهندگی گسلش امتدادلغز

در این مطالعه برای برآورد جابه‌جایی ناشی از گسیختگی احتمالاتی گسل شمال تبریز، از رابطه کاهندگی پیترسن و همکاران (۲۰۱۱) استفاده شده است. داده‌های جابه‌جایی‌های گسیختگی که از گسلش اصلی به دست آمده‌اند، بسیار پراکنده هستند و اغلب، بیشترین پراکندگی را نزدیک به مرکز گسیختگی گسل دارند و در انتهای گسیختگی به سرعت کاهش می‌یابند. در برخی از زمین لرزه‌ها از جمله زمین لرزه کوهستان بورگو ( Borrego Mountain) در سال ۱۹۶۸، بزرگ‌ترین جابه‌جایی‌ها در نزدیکی انتهای گسیختگی سطحی گسل مشاهده شد

### ۶-۳ عدم قطعیت شناختی و تصادفی

عدم قطعیت‌هایی درباره کیفیت نقشه‌برداری و پیچیدگی رد گسل وجود دارد که به عدم قطعیت شناختی (epistemic) در محل گسیختگی‌های آینده تبدیل می‌شود. تابع چگالی احتمال برای  $r$  شامل هر دو مؤلفه شناختی و تصادفی (aleatory) است. جابه‌جایی‌ها روی گسل اصلی و خارج از آن می‌توانند شامل مؤلفه‌هایی از عدم قطعیت شناختی و تغییرپذیری تصادفی باشند. عدم قطعیت شناختی مربوط به خطای اندازه‌گیری جابه‌جایی در امتداد گسیختگی گسل است. تغییرپذیری تصادفی مربوط به تغییرپذیری طبیعی در جابه‌جایی‌های گسل بین زمین لرزه‌ها است. با این حال، تغییرپذیری اندازه‌گیری شده در گسیختگی‌ها شامل عدم قطعیت نقشه‌برداری شناختی است؛ زیرا در حال حاضر، داده‌هایی برای جداسازی این عدم قطعیت‌ها وجود ندارد. عدم قطعیت شناختی مکان، به

جابه‌جایی اصلی گسل در تحلیل چندمتغیره و نرمالیزه شده از سه مدل دوسویه (bilinear)، بیضوی (elliptical) و درجه دو (quadratic) استفاده شده است (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱). این سه مدل، عدم قطعیت تصادفی مشابهی دارند و پایه و اساس مشخصی برای ترجیح دادن یک مدل به مدل‌های دیگر وجود ندارد؛ در نتیجه در تحلیل خطر جابه‌جایی احتمالاتی از هر سه مدل با وزن‌های یکسانی استفاده شد. پیترسن و همکاران (۲۰۱۱) نتایج تحلیل چندمتغیره را به تحلیل نرمالیزه شده ترجیح داده‌اند؛ زیرا در تحلیل نرمالیزه شده، عدم قطعیت تصادفی مربوط به محاسبه جابه‌جایی میانگین از مطالعه ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴) به عدم قطعیت تصادفی نتایج برازش رابطه کاهندگی پیترسن اضافه می‌شود (پاول و شرکت ریزو، ۲۰۱۳). برازش داده‌های جابه‌جایی گسلش اصلی در دو تحلیل متفاوت و در سه مدل صورت گرفت و عدم قطعیت ۵ درصد در مدل‌سازی داده‌های جابه‌جایی امتدادلغز در نظر گرفته شد. در این مطالعه، از تحلیل چند-متغیره و سه مدل ذکر شده استفاده شده است. معادله سه مدل در روش چندمتغیره در جدول ۳ ارائه شده است (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱).

(پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱). بسیاری از داده‌های جمع‌آوری شده گسیختگی سطحی، به صورت گسیختگی‌های نامتقارن رفتار می‌کنند (وسنوسکی و همکاران، ۲۰۰۸). در حال حاضر روشی برای تعیین مکان جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر روی گسیختگی سطحی گسل وجود ندارد؛ بنابراین توزیع جابه‌جایی‌های نامتقارن در امتداد یک گسل، عدم قطعیت‌های بزرگ‌تری را به‌خصوص در نزدیکی انتهای گسیختگی گسل تعریف خواهد کرد (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱).

برای مشخص کردن توزیع جابه‌جایی گسلش اصلی، پیترسن و همکاران (۲۰۱۱) دو رویکرد متفاوت را معرفی کردند. در رویکرد نخست، معادلات بهترین برازش به روش کمترین مربعات برای لگاریتم طبیعی جابه‌جایی به صورت تابعی از بزرگای و فاصله در تحلیلی چندمتغیره توسعه داده شد (پاول و شرکت ریزو، ۲۰۱۳). در رویکرد دوم، داده‌های جابه‌جایی با جابه‌جایی میانگین نرمال می‌شوند. جابه‌جایی میانگین تابعی از فاصله است. بزرگای به صورت مستقیم در تحلیل نرمالیزه شده وارد نمی‌شود، اما به دلیل وابستگی جابه‌جایی میانگین به بزرگای، محاسبات تحت تأثیر قرار می‌گیرد. جابه‌جایی میانگین با رابطه ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴) محاسبه می‌شود. برای محاسبه

جدول ۳. مدل‌های مختلف استفاده شده در روابط کاهندگی گسلش اصلی (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۱).

وزن	مدل	نوع تحلیل
0.34	دوسویه $\ln(D)=1.7969Mw+8.5206(l/L)-10.2855, \sigma_{in} = 1.2906, l/L < 0.3$ $\ln(D)=1.7658Mw-7.8962, \sigma_{in} = 0.9624, l/L \geq 0.3$	
0.33	درجه دو $\ln(D)=1.7895Mw+14.4696(l/L)-20.1723(l/L^2)-10.54512, \sigma_{in} = 1.1346$	چندمتغیره
0.33	بیضوی $\ln(D)=3.3041\sqrt{1-\frac{1}{0.5^2}[(l/L)-0.5]^2}+1.7927Mw-11.2192, \sigma_{in} = 1.1348$	

## ۴ نتایج

## ۱-۴ جابه‌جایی احتمالاتی سطوح مختلف فزونی

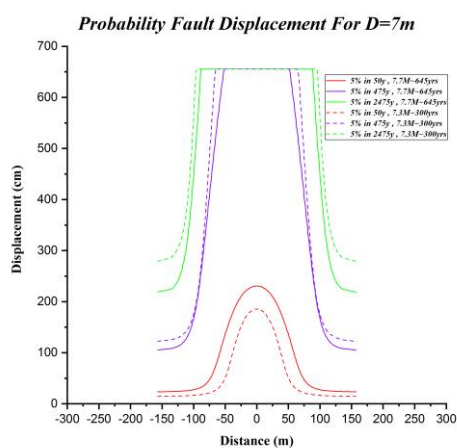
در گام اول، با فرض واقع شدن یکی از جایگاه‌ها روی رد گسل تبریز در مختصات ( $38/096^{\circ}N$ ,  $46/349^{\circ}E$ )، جابه‌جایی احتمالاتی و نرخ فزونی سالیانه برآورد شده است. دو سناریو برای جابه‌جایی در دوره بازگشت ۶۴۵ سال در نظر گرفته شده است. جابه‌جایی احتمالاتی گسل شمال تبریز برابر ۴/۵ متر (حسامی و همکاران، ۲۰۰۳) و ۷/۱ متر (قاسمی و همکاران، ۲۰۱۵) فرض و با توجه به نرخ فزونی ۵ درصد در ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال جابه‌جایی احتمالاتی برآورد شد. در جابه‌جایی ۴/۵ متر، در نرخ فزونی ۵ درصد در ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال به ترتیب ۱۸۶، ۴۶۹ و ۴۶۹ سانتی‌متر جابه‌جایی بیشینه برآورد شده است. در جابه‌جایی ۷/۱ متر، نرخ فزونی ۵ درصد در ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال به ترتیب ۱۸۶، ۶۵۵ و ۶۵۵ سانتی‌متر جابه‌جایی بیشینه برآورد شده است. باید به این نکته اشاره کرد که مقدار جابه‌جایی بیشینه در ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال به ترتیب تا فاصله‌های ۶۰ و ۱۰۰ متر از جایگاه مفروض مشاهده می‌شود و سطح خطر بالاتری خواهد داشت.

## ۲-۴ مقایسه مدل‌های مختلف برازش

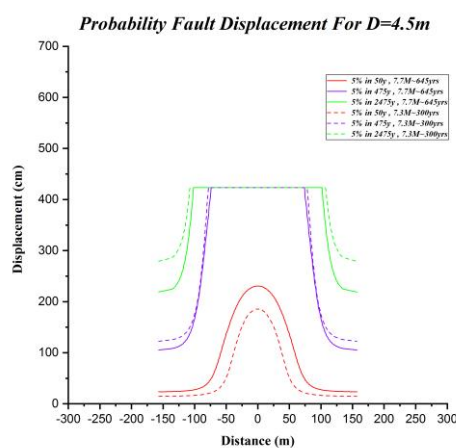
همان‌طور که اشاره شد، مدل‌های برازش (دوسویه، بیضوی و درجه دو) عدم قطعیت‌های مشابهی دارند. در این بخش به مقایسه جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده از این مدل‌ها پرداخته می‌شود. در این مطالعه برای به‌دست‌آوردن جابه‌جایی‌های احتمالاتی از مدل دوسویه استفاده شده است.

## ۳-۴ نرخ فزونی سالیانه ۵ درصد در ۵۰ سال

با فرض ساده بودن رد گسل شمال تبریز، به‌کارگیری مدل دوسویه و دوره بازگشت ۶۴۵ سال، نرخ فزونی سالیانه برای دو سناریوی جابه‌جایی ۴/۵ و ۷/۱ متر بررسی شده است. در این مقایسه، نرخ فزونی سالیانه ۵ درصد در ۵۰ سال برای هر دو سناریوی جابه‌جایی ۴/۵ و ۷/۱ متر، در فاصله‌های ۲۰، ۶۴ و ۱۲۰ متری از جایگاه مفروض بررسی شده است. در حالت جابه‌جایی ۴/۵ متر، نرخ فزونی سالیانه جابه‌جایی ۴ متر در فاصله‌های ۲۰، ۶۴ و ۱۲۰ متری به ترتیب  $4/5 \times 10^{-4}$ ،  $1/81 \times 10^{-4}$  و  $7/51 \times 10^{-6}$  است. در حالت جابه‌جایی ۷/۱ متر، مقدار نرخ فزونی سالیانه برای فاصله‌های ذکر شده، به ترتیب  $4/69 \times 10^{-4}$ ،  $1/89 \times 10^{-6}$  و  $7/96 \times 10^{-6}$  برآورد شده است.

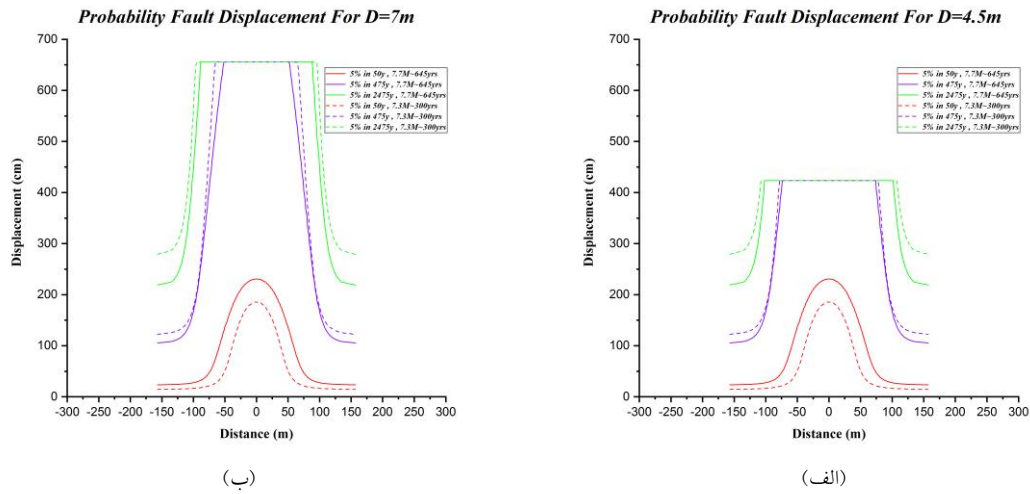


(ب)

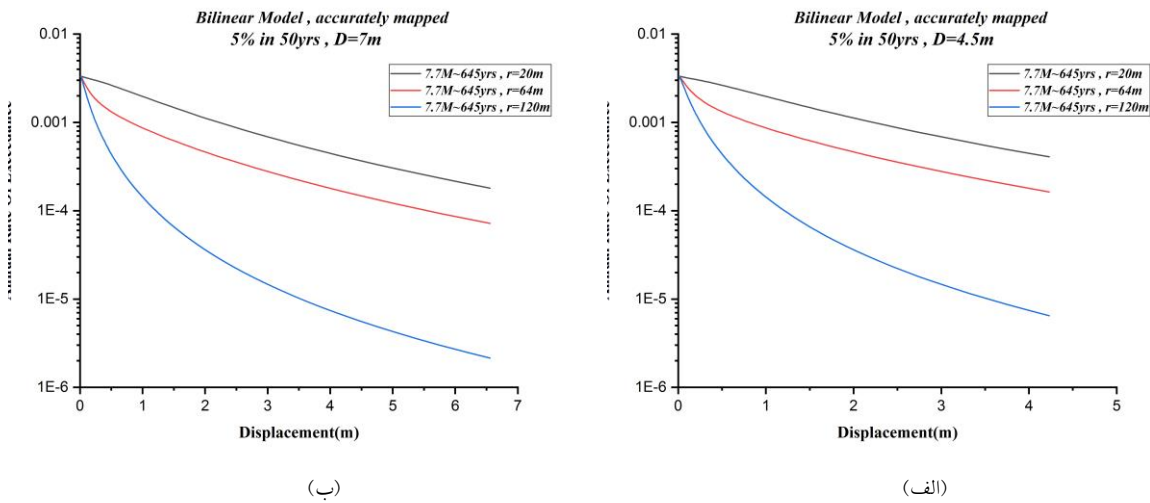


(الف)

شکل ۴. مقایسه جابه‌جایی احتمالاتی، نرخ فزونی ۵ درصد در ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برای (الف) جابه‌جایی ۴/۵ متر (ب) جابه‌جایی ۷/۱ متر.



شکل ۵. مقایسه جابه‌جایی احتمالی، مدل‌های مختلف برازش برای (الف) جابه‌جایی ۴/۵ متر (ب) جابه‌جایی ۷/۱ متر.

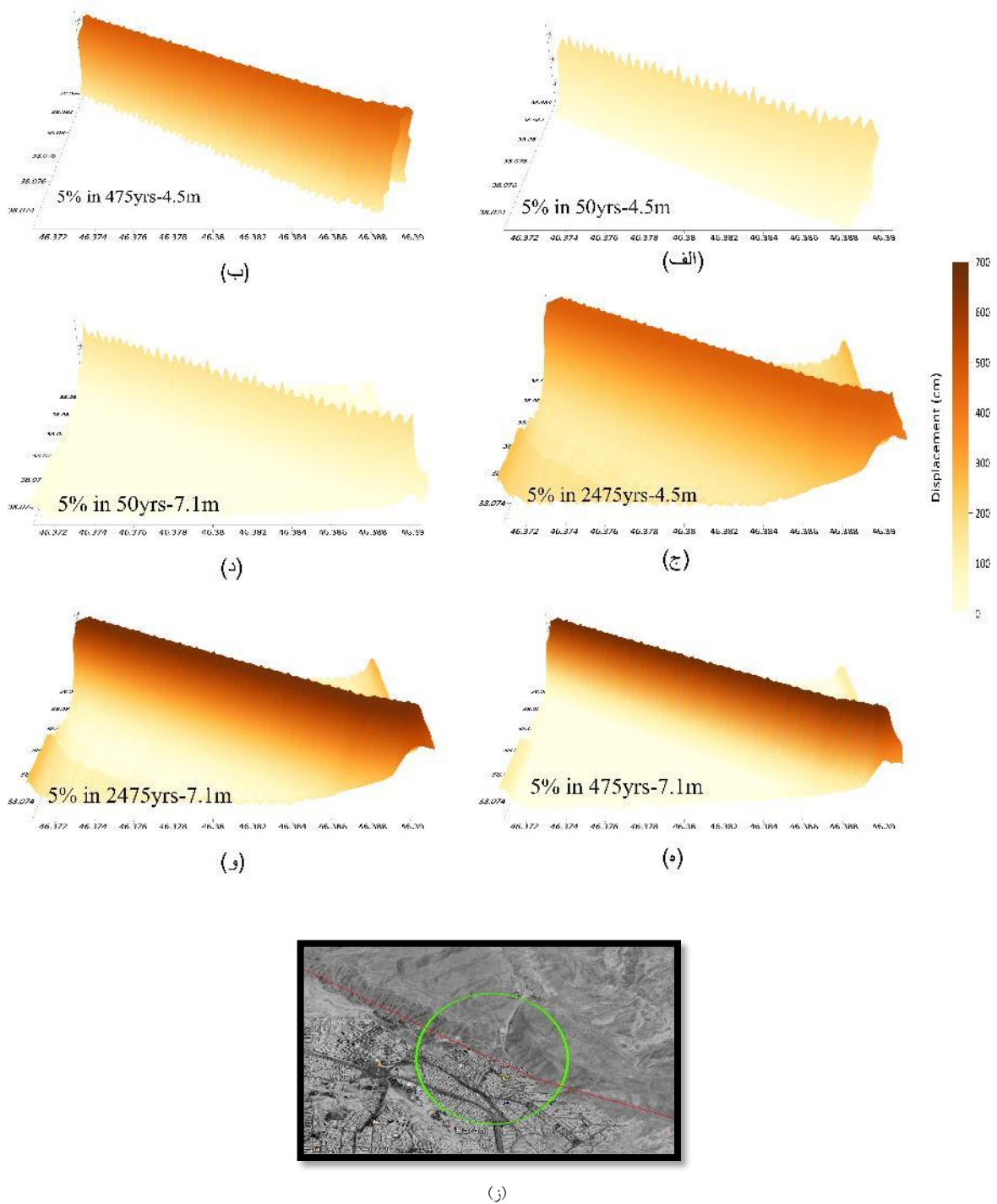


شکل ۶. مقایسه نرخ فزونی سالیانه جابه‌جایی برای (الف) جابه‌جایی ۴/۵ متر (ب) جابه‌جایی ۷/۱ متر.

#### ۴-۴ جابه‌جایی احتمالاتی گسل شمال تبریز

به دلیل عبور گسل شمال تبریز از منطقه پنج شهر تبریز، برآورد جابه‌جایی احتمالاتی در منطقه حائز اهمیت است و پیش‌بینی مناطقی با سطح خطر بالاتر مهم است. جابه‌جایی

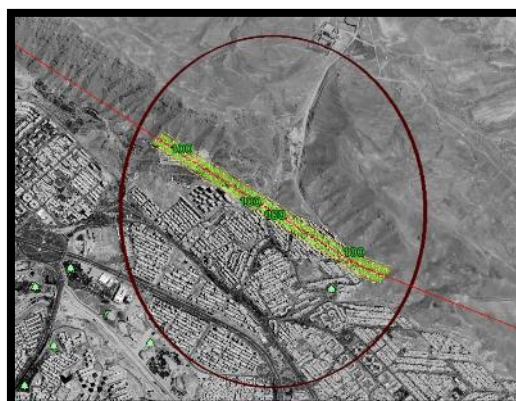
احتمالاتی سه‌بعدی و منحنی‌های همبند برای قطعه‌ای به طول ۲ کیلومتر از گسل شمال تبریز به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ برآورد شده است.



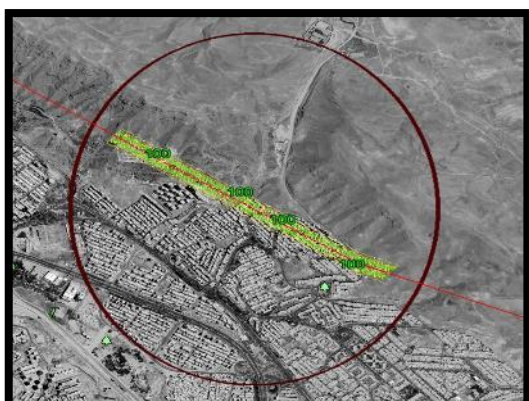
شکل ۷. مقایسه جابه‌جایی احتمالاتی قطعه گسل شمال تبریز که از منطقه ۵ شهر تبریز عبور کرده است. (الف) جابه‌جایی احتمالاتی برای نرخ فزونی ۵ درصد در ۵۰ سال و جابه‌جایی ۴/۵ متر (ب) جابه‌جایی احتمالاتی برای نرخ فزونی ۵ درصد در ۴۷۵ سال و جابه‌جایی ۴/۵ متر (ج) جابه‌جایی احتمالاتی برای نرخ فزونی ۵ درصد در ۲۴۷۵ سال و جابه‌جایی ۴/۵ متر (د) جابه‌جایی احتمالاتی برای نرخ فزونی ۵ درصد در ۵۰ سال و جابه‌جایی ۷/۱ متر (ه) جابه‌جایی احتمالاتی برای نرخ فزونی ۵ درصد در ۴۷۵ سال و جابه‌جایی ۷/۱ متر (و) جابه‌جایی احتمالاتی برای نرخ فزونی ۵ درصد در ۲۴۷۵ سال و جابه‌جایی ۷/۱ متر (ز) قطعه دو کیلومتری گسل شمال تبریز که از منطقه ۵ شهر تبریز عبور کرده است.



(ب)



(الف)



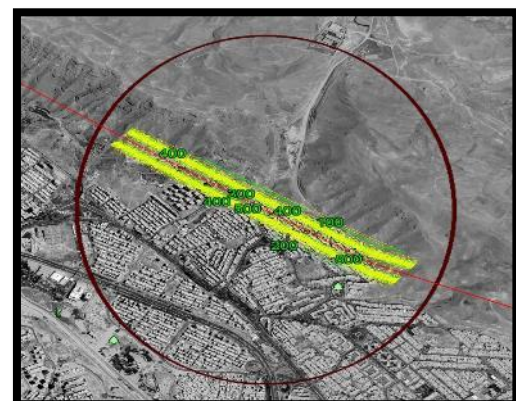
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۸. منحنی‌های همبند جابه‌جایی احتمالاتی گسل شمال تبریز (الف) جابه‌جایی احتمالاتی برای نرخ فزونی ۵ درصد در ۵۰ سال و جابه‌جایی ۴/۵ متر (ب) جابه‌جایی احتمالاتی برای نرخ فزونی ۵ درصد در ۴۷۵ سال و جابه‌جایی ۴/۵ متر (ج) جابه‌جایی احتمالاتی برای نرخ فزونی ۵ درصد در ۲۴۷۵ سال و جابه‌جایی ۴/۵ متر (د) جابه‌جایی احتمالاتی برای نرخ فزونی ۵ درصد در ۵۰ سال و جابه‌جایی ۷/۱ متر (ه) جابه‌جایی احتمالاتی برای نرخ فزونی ۵ درصد در ۴۷۵ سال و جابه‌جایی ۷/۱ متر (و) جابه‌جایی احتمالاتی برای نرخ فزونی ۵ درصد در ۲۴۷۵ سال و جابه‌جایی ۷/۱ متر.

## ۵ نتیجه‌گیری

با فرض داشتن سازوکار امتدادلغز، ساده بودن رد گسل، دوره بازگشت ۶۴۵ سال و بزرگای  $M_w \sim 7/7$ ، برآورد جابه‌جایی احتمالاتی گسل شمال تبریز صورت گرفت. با اجرای روش پیترسن و همکاران (۲۰۱۱)، جابه‌جایی احتمالاتی برای نرخ فزونی ۵ درصد در ۵۰، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برای جابه‌جایی‌های اصلی محتمل (روی گسل) گسل شمال تبریز برآورد شده است. در این مطالعه، با استفاده از رابطه کاهندگی پیترسن و همکاران (۲۰۱۱)، جابه‌جایی احتمالاتی بیشینه گسل شمال تبریز در نرخ فزونی ۵ درصد در ۵۰ سال، برای جابه‌جایی‌های ۴/۵ و ۷/۱ متر، ۱۸۶ سانتی‌متر و جابه‌جایی‌های ذکرشده در نرخ فزونی ۵ درصد در ۴۷۵ سال و ۲۴۷۵ سال به ترتیب ۴۶۹ و ۶۵۵ سانتی‌متر برآورد شده است. در حالت‌های نرخ فزونی ۵ درصد در ۴۷۵ سال و ۲۴۷۵ سال، جابه‌جایی احتمالی بیشینه تا فاصله ۷۰ و ۱۰۰ متری از جایگاه برآورد شده است. در حالت‌های جابه‌جایی احتمالی ۴/۵ و ۷/۱ متر، نرخ فزونی جابه‌جایی سالیانه ۵ درصد در ۵۰ سال برای فاصله‌های ۲۰، ۶۴ و ۱۲۰ متر از جایگاه مفروض، به ترتیب  $4 \times 10^{-4}$ ،  $1/81 \times 10^{-6}$ ،  $7/51 \times 10^{-6}$ ،  $4/69 \times 10^{-4}$  و  $1/89 \times 10^{-6}$  به دست آمده است.

مقادیر جابه‌جایی احتمالی به دست آمده با فرض ساده بودن رد گسل تبریز برآورد شده است. کمبود زمین‌لرزه‌های دستگاهی بزرگ در شمال غرب ایران، به ایجاد عدم قطعیت شناختی بزرگ‌تری در مقادیر جابه‌جایی احتمالی منجر می‌شود. به دلیل گذر گسل شمال تبریز از منطقه مسکونی شهر تبریز و رخداد زمین‌لرزه‌های مخرب تاریخی، برآورد جابه‌جایی‌های احتمالاتی آینده این گسل حائز اهمیت است. رابطه کاهندگی مورد استفاده در این مطالعه، برگرفته از برازش داده زمین‌لرزه‌های رخداد در نقاط مختلف جهان است و برای کاهش عدم قطعیت در این تحلیل خطر و مقادیر جابه‌جایی

احتمالی، می‌توان از داده‌های گسیختگی سطحی زمین‌لرزه‌های امتدادلغز در ایران، برای برازش و به دست آوردن روابط کاهندگی محلی استفاده کرد.

## منابع

- Baize, S., Nurminen, F., Dawson, T., Takao, M., Azuma, T., Boncio, P., and Marti, E., 2019, A worldwide and unified database of surface ruptures (SURE) for fault displacement hazard analyses: *Seismological Research Letters*, **91**(1), 499-520, <https://doi.org/10.1785/0220190144>.
- Barka, A., 1999, The 17 August 1999 Izmit Earthquake: *Science*, **285**(5435), 1858-1859, doi:10.1126/science.285.5435.1858.
- Berberian, M., 1997, Seismic sources of the transcaucasian historical earthquakes, in Giardini, D., and Balassanian, S., eds., *Historical and Prehistorical Earthquakes in the Caucasus*: Kluwer Academic Press, the Netherlands, **28**, 233-311, [https://doi.org/10.1007/978-94-011-5464-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-94-011-5464-2_13).
- Berberian, M., and Arshadi, S., 1976, On the evidence of the youngest activity of the North Tabriz Fault and the seismicity of Tabriz city, *Contribution to the Seismotectonic of Iran (Part II)*: Geological Survey of Iran, Report No. **39**, 397-418.
- Berberian, M., and Yeats, R. S., 1999, Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **89**(1), 120-139.
- Biasi, G. P., and Weldon, R. J., 2006, Estimating surface rupture length and magnitude of paleoearthquakes from point measurements of rupture displacement: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**(5), 1612-1623.
- Bouchon, M., Bouin, M. P., Karabulut, H., Toksöz, M. N., Dietrich, M., and Rosakis, A. J., 2001, How fast is rupture during an earthquake? New insights from the 1999 Turkey earthquakes: *Geophysical Research Letters*, **28**(14), 2723-2726.
- Chen, R., and Petersen, M. D., 2019, Improved implementation of rupture location uncertainty in fault displacement hazard assessment: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **109**(5), 2132-2137, <https://doi.org/10.1785/0120180305>.



- Comfort, L., 1995, Self-Organization in Disaster Response: The Great Hanshin Earthquake of January 17, 1995: US University of Colorado, Natural Hazards Center, 12.
- Cornell, C. A., 1968, Engineering seismic risk analysis: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **58**(5), 1583–1606.
- Hemphill-Haley, M. A., and Weldon II, R. J., 1999, Estimating prehistoric earthquake magnitude from point measurements of surface rupture: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **89**(5), 1264–1279.
- Hessami, K., Pantosti, D., Tabassi, H., Shabanian, E., Abbassi, M. R., Fegghi, K., and Solaymani, S., 2003, Paleoearthquakes and slip rates of the North Tabriz Fault, NW Iran: Preliminary results: *Annals of Geophysics*, **46**(5), 903–916, <https://doi.org/10.4401/ag-3461>.
- Jennings, P. C., 1971, Engineering features of the San Fernando earthquake of February 9, 1971: Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, <https://resolver.caltech.edu/CaltechEERL>, Report No. EERL-76/18.
- Katona, T. J., 2020, Safety of nuclear power plants with respect to the fault displacement hazard: *Applied Sciences*, **10**(10), 3624.
- Koketsu, K., Yoshida, Sh., and Higashihara, H., 1998, A fault model of the 1995 Kobe earthquake derived from the GPS data on the Akashi Kaikyo Bridge and other datasets: *Earth, Planets, and Space*, **50**(10), 803–811.
- Lee, J. C., Chu, H. T., Angelier, J., Chan, Y. C., Hu, J. C., Lu, C. Y., and Rau, R. J., 2002, Geometry and structure of northern surface ruptures of the 1999 Mw=7.6 Chi-Chi Taiwan earthquake: influence from inherited fold belt structures: *Journal of Structural Geology*, **24**(1), 173–192, doi:10.1016/S0191-8141(01)00056-6.
- Masson, F., Djamour, Y., Van Gorp, S., Chéry, J., Tatar, M., Tavakoli, F., and Vernant, P., 2006, Extension in NW Iran driven by the motion of the South Caspian Basin: *Earth and Planetary Science Letters*, **252**(1–2), 180–188, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.09.038>.
- Mousavi-Bafrouei, S. H., Mirzaei, N., and Shabani, E., 2014, A declustered earthquake catalog for Iranian plateau: *Annals of Geophysics*, **57**(6), <https://doi.org/10.4401/ag-6395>.
- Paul, C., Rizzo Associates, Inc., 2013, Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis Krško East and West Sites, Proposed Krško 2 Nuclear Power Plant, Krško, Slovenia, Revision 1, Technical Report, Project No. 11-4546, 13 May 2013, <http://www.ursjv.gov.si/fileadmin/ujv.gov.si>.
- Petersen, M. D., Dawson, T. E., Chen, R., Cao, T., Wills, C. J., Schwartz, D. P., and Frankel, A. D., 2011, Fault displacement hazard for strike-slip faults: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **101**(2), 805–825, <https://doi.org/10.1785/0120100035>.
- Petersen, M. D., and Wesnousky, S. G., 1994, Fault slip rates and earthquake histories for active faults in southern California: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**(5), 1608–1649.
- Ram, T. D., and Wang, G., 2013, Probabilistic seismic hazard analysis in Nepal: *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **12**(4), 577–586, <https://doi.org/10.1007/s11803-013-0191-z>.
- Stepp, J. C., Wong, I., Whitney, J., Quittmeyer, R., Abrahamson, N., Toro, G., and Sullivan, T., 2001, Probabilistic seismic hazard analyses for ground motions and fault displacement at Yucca Mountain, Nevada: *Earthquake Spectra*, **17**(1), 113–151, <https://doi.org/10.1193/1.1586169>.
- Toksöz, M. N., Arpat, E., and Şaroğlu, F. U. A. T., 1977, the East Anatolian earthquake of 24 November 1976: *Nature*, **270**(5636), 423–425.
- Wells, D. L., and Coppersmith, K. J., 1994, New Empirical Relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**(4), 974–1002.
- Wesnousky, S. G., 2008, Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: Issues and implications for seismic-hazard analysis and the process of earthquake rupture: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**(4), 1609–1632, <https://doi.org/10.1785/0120070111>.
- Young, C. J., Lay, T., and Lynnes, C. S., 1989, Rupture of the February 4, 1976, Guatemalan earthquake: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **79**(3), 670–689.
- Youngs, R. R., Arabasz, W. J., Anderson, R. E., et al., 2003, A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA): *Earthquake Spectra*, **19**(1), 191–219, <https://doi.org/10.1193/1.1542891>

## Probabilistic fault displacement hazard analysis for North Tabriz fault

Mohammadreza Hosseyni<sup>1</sup>, Habib Rahimi<sup>2\*</sup> and Ali Songhori<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Graduate, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup> M.Sc. Graduate, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 21 April 2021, Accepted: 04 August 2021)

### Summary

The probabilistic fault displacement hazard analysis method is one of the new methods in estimating the amount of possible displacement in the area at risk of causal fault rupture. In this study, using the probabilistic approach and earthquake method, the surface displacement of the North Tabriz fault has been investigated, and the probable displacement in different return periods has been estimated as contour maps. Assuming a strike-slip mechanism of the North Tabriz fault and earthquake method, to estimate the probability of displacement due to surface rupture, according to the surface ruptures caused by earthquakes of 1721 and 1780 North Tabriz fault, which were associated with 50 and 60 km of surface rupture respectively, a 50-60 km long section of North Tabriz fault was selected as the source of possible surface rupture. Due to a lack of data on large-scale earthquakes in northwestern Iran, the trace of North Tabriz fault is assumed to be a simple trace. This leads to a great epistemic uncertainty in the obtained possible displacement values

Owing to the passage of the North Tabriz fault through the residential area of Tabriz and destructive historical earthquakes, it is essential to estimate the possible future displacements of this fault. According to paleoseismic studies, probabilistic displacements were considered between zero to 4.5 and zero to 7.1 m, respectively. Using the paleoseismic studies and the catalog of historical earthquakes, the return period and the probable magnitude of the North Tabriz fault are 645 years and  $M_w \sim 7.7$ . In the case of exceedance rate of 5% in 475 and 2475 years, the maximum displacement is estimated up to a distance of 70 and 100 meters from the site. The attenuation relationships used in this study were derived from the fitting of seismic data occurred in different parts of the world. To reduce the uncertainty in this hazard analysis and the values of possible displacement, the data of surface rupture of strike-slip earthquakes in Iran can be used to fit and obtain local attenuation relationships. In this research, considering the attenuation relationship of Petersen, the estimated maximum probability displacement of the North Tabriz fault at an exceedance rate of 5% in 50 years, for 4.5 and 7.1m displacements, is 186 cm. Moreover, the estimated maximum probability displacements in 475 and 2475 years are 469 cm and 655 cm, respectively.

**Keywords:** Hazard analysis, surface rupture, probabilistic displacement hazard analysis, North Tabriz fault

---

\* Corresponding author:

rahimih@ut.ac.ir