

ارزیابی خطر لرزه‌ای برای گسل شمال تبریز با تحلیل تمایل لغزش براساس تنش منطقه‌ای مستخرج از سازوکار ژرفی زمین‌لرزه‌ها و مشاهدات GPS

اصغر راست‌بود^{۱*}، بابک شاهنده^۲، مهدی محمدزاده^۳

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دریافت: ۹۹/۱۰/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۲۹، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۳/۲۹

چکیده

تحلیل تمایل لغزش، ابزار با ارزشی جهت ارزیابی فعال شدن مجدد یک گسل و برآورد خطر لرزه‌ای است. انجام این تحلیل ابزار مفیدی را جهت کمی‌سازی پتانسیل لغزش روی یک گسل فراهم می‌آورد. گسل و میدان تنش تحت بررسی می‌تواند معلوم یا فرضی باشد. با استفاده از جهت لغزش احتمالی می‌توان سازوکار ژرفی را نیز تعیین نمود که با استفاده از آن امکان بررسی سازگاری مابین سازوکارهای ژرفی با ساختارهای زمین‌شناسی وجود دارد. انجام این آنالیز هم در مورد یک گسل و هم در مجموعه‌ای از گسل‌ها امکان‌پذیر است. پتانسیل لغزش به میدان تنش منطقه‌ای، جهت صفحه گسل و ضریب اصطکاک بستگی دارد. با توجه به واقع شدن کلان‌شهر تبریز در مجاورت گسل شمال تبریز، مطالعه پتانسیل لرزه‌ای در این گسل از اهمیت ویژه‌ای جهت تحلیل خطر لرزه‌ای برای این شهر برخوردار است. در این تحقیق اطلاعات هندسی گسل از منابع مختلف استخراج و ثابت فرض شد. در ادامه تنش منطقه‌ای از منابع مختلف گردآوری شد. همچنین با استفاده از مشاهدات GPS تنش منطقه‌ای که بهترین انطباق را به منطقه مورد مطالعه داشته باشد برآورد گردید. سپس تنش با استفاده از قانون کاوچی (Cauchy's law) در راستای بخش‌های مختلف گسل و عمود بر آن‌ها تجزیه و پتانسیل لغزش برای آن‌ها با در نظر گرفتن درصد نسبت تنش برشی به نرمال محاسبه گردید. حالت‌های مختلف تنش نتایج متفاوتی را برای تحلیل در پی داشتند. نکته قابل توجه در نتایج، تمایل لغزش بالای ۵۰ درصد برای شاخه گسل گذرنده از شمال کلان‌شهر تبریز می‌باشد که پتانسیل رخداد زمین‌لرزه را در این بخش نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: تمایل لغزش، میدان تنش منطقه‌ای، سازوکار ژرفی، GPS، گسل شمال تبریز.

۱- مقدمه

استفاده از آن می‌توان پتانسیل لغزش در گسل معلوم یا ناشناخته را در میدان تنش معلوم یا فرضی به صورت کمی بیان کرد. فعال شدن مجدد گسل برای لغزش به مقاومت اصطکاکی در مقابل لغزش بستگی دارد (Jaeger, ۱۹۶۹). معمولاً فرض می‌شود که بعد از ایجاد شکست برشی، سنگ در صفحه شکست چسبندگی نشان نمی‌دهد؛ بنابراین شرط فعال شدن مجدد همان شرط ناویه-کولمب برای گسل‌های بدون چسبندگی است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau = \mu(\sigma_n - p_f) \quad (1)$$

تحلیل فعال شدن مجدد لغزش در صفحات ضعیف موجود از قبل مورد توجه بسیاری از شاخه‌های زمین‌شناسی از جمله تئوری حل مسئله معکوس زمین‌ساخت است. به عنوان مثال در زمین‌شناسی مهندسی بایستی تنش در توده سنگ، زیر تنش بحرانی لازم جهت شروع لغزش باشد. همین نکته در زمین‌شناسی ذخایر جهت انتخاب مخازن ایمن هیدروکربن مهم می‌باشد. تحلیل فعال شدن مجدد لغزش در تخمین خطر لرزه-ای نیز بسیار مهم می‌باشد، چون ابزاری را فراهم می‌آورد که با

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۳۹۲۵۲۴

آدرس ایمیل: arastbood@tabrizu.ac.ir (ا. راست‌بود)، babakshahandeh95@ms.tabrizu.ac.ir (ب. شاهنده)،

m.mohammadzadeh96@ms.tabrizu.ac.ir (م. محمدزاده).

از تکنیک‌های بصری، تحلیل تمایل لغزش است که توسط Morris و همکاران (۱۹۹۶) ارائه شده است، که در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود و با جزئیات زیاد در بخش ۲ توضیح داده می‌شود. ثابت شده است که این روش، روشی مؤثر برای پیش‌بینی ناپایداری گسل و جهت‌های احتمالی فعال‌شدن مجدد در حالت‌های مختلف زمین‌ساختی است (Lisle و Srivastava, ۲۰۰۴).

نمایش اولیه تمایل لغزش توسط Morris و همکاران در سال ۱۹۹۶ ارائه شده و متشکل از تصویر نیمکره پایین هم‌زاویه از تمام قطب‌های تمام جهت‌های ممکن گسل است، که با توجه به مقدار تمایل لغزش نرمال منحنی میزان زده شده است. Alaniz-Alvarez و همکاران (۱۹۹۸) یک روش گرافیکی مشابه را با استفاده از مرجع مقاومت پارگی سنگ بدون شکست ارائه دادند. نمایش گرافیکی بهتر تمایل لغزش، نمایش سه بعدی از سطح گسل است که تمایل لغزش محاسبه‌شده را در سه بعد روی سطح گسل نشان دهد. تحلیل تمایل لغزش روی گسل-های وزویوس^۳ در ساحل غربی ایتالیا و ارزیابی پیامدهای خطر زمین‌لرزه‌ای و آتش‌فشانی آن بررسی شده است (Ventura و Giuseppe, ۱۹۹۹). در تحقیق دیگری تمایل لغزش به‌عنوان یک روش عددی به مدل سه‌بعدی گسل‌های جنوب شرق هلند اعمال شده و فعال شدن مجدد این گسل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است (Worum و همکاران, ۲۰۰۴). تحلیل تمایل لغزش جهت تست کنترل مکانیکی و ساختاری روی صفحات گسیختگی پس‌لرزه‌ها روی زمین‌لرزه سال ۱۹۹۷ کولیتوریتو^۴ در مرکز ایتالیا با بزرگی گشتاوری ۶/۰ و زمین‌لرزه سال ۱۹۹۹ منطقه چی‌چی^۵ در تایوان با بزرگی گشتاوری ۷/۵ بررسی شده است (Trippetta و Colletini, ۲۰۰۷).

تجزیه و تحلیل تمایل لغزش، پتانسیل فعال شدن مجدد گسل و لرزه‌خیزی ناشی از آن در مخزن زمین حرارتی عمیق شمال شرق آلمان انجام شده است (Moeck و همکاران, ۲۰۰۹). تمایل لغزش برای درک فعالیت بلندمدت گسل‌های فعال شمال شرق ژاپن مورد استفاده قرار گرفته است (Miyakawa و Otsubo, ۲۰۱۵). کاربرد تئوری فعال‌سازی اصطکاکی در گسل‌های فعال ژاپن بر اساس تجزیه و تحلیل تمایل لغزش بررسی شده است (Yukutake و همکاران, ۲۰۱۵). در مورد زمین‌لرزه‌های کوینا^۶ در غرب هند اعتقاد بر

که τ و σ_n به ترتیب تنش‌های برشی و نرمال عمل‌کننده در سطح گسل، μ ضریب اصطکاک لغزشی و p_f فشار مایع منفذی است. رابطه (۱) فقط در بخش شکننده پوسته که تحت تأثیر فرآیندهای اصطکاکی است قابل اعمال است.

شرایط تنش منجر به لغزش گسل در دو مقاله کلیدی توسط Wallace (۱۹۵۱) و Bott (۱۹۵۹) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. فرضیه Wallace-Bott که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد بیان می‌کند که جهت حرکت پس از ایجاد یک شکست منطبق بر جهت بیشینه تنش برشی در صفحه شکستگی است. برای یک میدان تنش معلوم، جهت لغزش توسط دو عامل تعیین می‌شود: جهت صفحه گسل نسبت به محورهای اصلی تنش، و نسبت تفاضل تنش تعریف‌شده توسط مقدار نسبی سه تنش اصلی.

فرض Wallace-Bott اساس چندین روش معکوس‌سازی جهت برآورد میدان تنش از سازوکارهای ژرفی زمین‌لرزه یا داده‌های لغزش گسل است (Angelier, ۱۹۷۹)، (Etchecopar و همکاران, ۱۹۸۱) و (Forsyth و Gephart, ۱۹۸۴). اعتبار این فرض ممکن است به دلیل فرض اولیه همگنی میدان تنش و صرف‌نظر کردن از عواملی همچون اندرکنش گسلی و دوران بلوک گسلی زیر سؤال باشد.

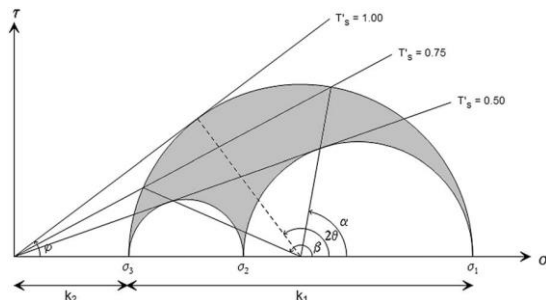
با این وجود، نشان داده شده است که می‌توان از آن به‌عنوان تقریب مرتبه اول استفاده کرد، زیرا اختلاف مابین جهت لغزش پیش‌بینی شده و مشاهده شده به‌طور متوسط کمتر از ده درجه است (Zoback و Zoback, ۱۹۸۰)، (Rebai و همکاران, ۱۹۹۲)، (Dupin و همکاران, ۱۹۹۳)، (Pollard و همکاران, ۱۹۹۳) و (Pascal, ۲۰۰۲).

روش‌های مستقیم چون دانش پیشینی در مورد تنسور^۱ تنش اعمال‌شده را در نظر می‌گیرند لذا از رویکرد معکوس روش‌های وارونگی پیروی می‌کنند. با دانستن هندسه گسل، این روش‌ها اغلب برای پیش‌بینی جهت لغزش در امتداد گسل-ها در اثر تنش‌ها استفاده می‌شوند (Pascal, ۲۰۰۴). یک رویکرد مکمل ارزیابی پتانسیل لغزش گسل‌ها است. چندین تکنیک گرافیکی و تحلیلی برای این منظور در نظر گرفته شده که از پیچیدگی دایره موهر^۲ تا نمودارهای مثلثی مشابه آنچه که در سنگ‌شناسی استفاده می‌شود، توسعه می‌یابند (Ranalli و Yin, ۱۹۹۲) و (Moore و Twiss, ۱۹۹۲). یکی

4. Colfiorito
5. Chi-Chi
6. Koyna

1. Tensor
2. Mohr
3. Vesuvius

بنابراین واضح است که تمایل لغزش مساوی ضریب اصطکاک لغزشی است. صفحات گسلی که احتمال لغزش آن‌ها زیاد است صفحاتی با نسبت بالای تنش برشی به تنش نرمال مؤثر نزدیک به مقدار μ می‌باشند. آنالیز تمایل لغزش بر این حقیقت استوار است که شیب معیار شکست یعنی ضریب اصطکاک یک محدوده‌ای را پوشش می‌دهد که معمولاً محدوده $0.85 \sim 0.6$ می‌باشد (Byerlee, ۱۹۷۸). با ثابت گرفتن نسبت اختلاف تنش (قطر دایره موهر) محدوده‌ای از ترکیبات (θ, μ) پیدا می‌شود که لغزش در آن‌ها امکان‌پذیر است (شکل (۲)). در یک منطقه با جنس سنگ معلوم، فرض یک μ مشخص، زاویه بهینه برای لغزش را مشخص می‌کند $2\theta = \tan^{-1}(1/\mu)$ که مناسب‌ترین جهت صفحه شکست نسبت به جهت بیشینه فشارش است. در این صفحه تمایل لغزش بیشینه است، یعنی $T_s = T_s^{max}$. تمایل لغزش نرمال شده بین صفر و یک تغییر می‌کند که با تقسیم تمایل لغزش به حداکثر مقدار ممکن آن به دست می‌آید؛ یعنی $T'_s = T_s/T_s^{max}$. بنابراین تمایل تنش نرمال شده از ۱۰۰ درصد در نزدیکی جهت ایده‌آل شکست تا صفر درصد در جهت تنش‌های اصلی متغیر است.



شکل ۲- نمایش تمایل لغزش نرمال شده با دیاگرام موهر. مجموعه صفحات با توجیه $\alpha < \theta < \beta$ نسبت به تنش فشاری ماکزیمم قبل از این که شکست جدید با زاویه $\pm\theta$ نسبت به تنش فشاری ماکزیمم تشکیل شود خواهند لغزید. تنش‌های اصلی $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ را می‌توان برحسب پارامترهای مجهول k_1 و k_2 بیان کرد (Neves و همکاران، ۲۰۰۹).

اگر تنشور تنش به‌طور کامل معلوم باشد (جهت‌های تنش اصلی و مقادیر تنش اصلی) تنش‌های برشی و نرمال، σ و τ عمل‌کننده روی یک سطح معلوم عبارت‌اند از (Jaeger, ۱۹۶۹):

این است که زمین‌لرزه‌ها در اثر تغییر فشار مایع به دلیل نفوذ آب مخزن (مخازن کوینا و وارنا^۷) به سطح زیرین ایجاد می‌شوند. با این فرض تحلیل تمایل لغزش برای گسل‌های زیر این مخازن انجام شده است (Mallik و DAS, ۲۰۲۰).
با توجه به واقع‌شدن کلان‌شهر تبریز در مجاورت گسل شمال تبریز مطالعه و تحلیل تمایل لغزش بین بخش‌های مختلف این گسل از اهمیت ویژه‌ای جهت تحلیل خطر لرزه‌ای در این شهر برخوردار است. در این تحقیق نخست جهت و دامنه محورهای اصلی نرخ تنش از تحقیقات انجام شده قبلی استخراج و با مشاهدات GPS^A موجود نیز محاسبه شد و سپس تحلیل تمایل لغزش روی بخش‌های مختلف گسل انجام شد. نتایج حاصل از تحلیل، تمایل لغزش را در کلیه بخش‌های شاخه اصلی گسل بالای ۵۰٪ نشان می‌دهد.

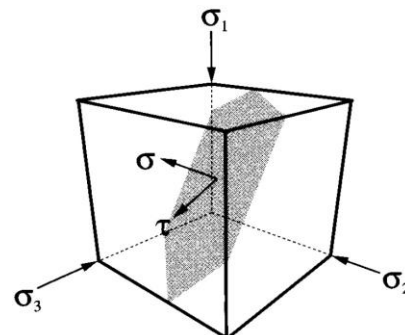
۲- مفهوم تمایل لغزش

برحسب تنش مؤثر $\sigma = \sigma_n - p_f$ ، که اثر فشار مایع منفذی را در نظر می‌گیرد، شرط بحرانی برای لغزش روی صفحه ضعیف موجود از قبل را می‌توان به‌صورت زیر نوشت (شکل (۱)):

$$\mu = \tau / \sigma \quad (۲)$$

تمایل لغزش روی یک سطح به‌صورت نسبت تنش برشی به تنش نرمال روی آن سطح تعریف می‌شود (Morris و همکاران، ۱۹۹۶).

$$T_s = \tau / \sigma \quad (۳)$$



شکل ۱- تنش نرمال، σ_n و تنش برشی، τ ، روی یک سطح دلخواه در میدان تنش تعریف‌شده توسط تنش‌های فشاری اصلی $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ (Morris و همکاران، ۱۹۹۶)

تمایل لغزش T_s محاسبه شده با استفاده از این عبارات مستقل از انتخاب پارامتر k_1 است. بنابراین، مقدار نسبی تنش‌های برشی و نرمال (تمایل لغزش) مستقل از مقدار مطلق تنش‌های اصلی است و فقط به جهت صفحه شکست در میدان تنش و به نسبت اختلاف تنش‌های اصلی وابسته است. به همین روش می‌توان نشان داد که آگاهی از اختلاف تنش $\sigma_1 - \sigma_3$ و فشار مایع منفذی که معمولاً با دقت خوبی معلوم نیستند اهمیت چندانی در محاسبات ندارد. جهت احتمالی حرکت را می‌توان از جهت ماکزیم تنش برشی در صفحه شکست برآورد کرد. در سیستم مختصات تنش‌های اصلی، مؤلفه‌های بردار تنش برشی $\vec{\tau}$ را می‌توان برحسب $\Gamma = n^2 + (1 - \varphi)m^2$ به صورت زیر نوشت:

$$\tau_1 = -\Gamma l \quad (۱۳)$$

$$\tau_2 = -(\Gamma - 1 + \varphi)m \quad (۱۴)$$

$$\tau_3 = -(\Gamma - 1)n \quad (۱۵)$$

بردار تنش برشی نرمال شده نیز مستقل از انتخاب k_1 است. با اطلاع از آزیموت و شیب سطح گسل و جهت لغزش روی سطح گسل، می‌توان سازوکار ژرفی زمین‌لرزه‌های احتمالی را نیز محاسبه و ترسیم کرد.

مطابق تئوری تمایل لغزش، جهت صفحات گسلی مستعد برای فعالیت مجدد تابع توجیه تانسور تنش، نسبت شکل تنش φ (یا نسبت اختلاف تنش‌های اصلی R)، ضریب اصطکاک μ و فشار مایع منفذی p_f (که با استفاده از تنش مؤثر به طور ضمنی در نظر گرفته می‌شود) است.

پارامترهای ورودی موردنیاز جهت انجام آنالیز تمایل لغزش عبارت‌اند از: (۱) جهت تنش‌های اصلی؛ (۲) نسبت اختلاف تنش R ؛ (۳) هندسه سیستم گسلی، (۴) ضریب اصطکاک.

سیستم مختصات راست‌گرد مشخص‌کننده جهت تنش‌های اصلی X_1, X_2, X_3 در شکل (۳-الف)، نشان داده شده است. جهت هر محور اصلی برحسب آزیموت و شیب تعریف می‌شود (شکل (۳-الف)). آزیموت Ψ در صفحه افقی برحسب درجه و به صورت ساعت‌گرد از مبدأ شمال در محدوده $0^\circ \leq \Psi \leq 360^\circ$ یا $180^\circ \leq \Psi \leq -180^\circ$ اندازه‌گیری می‌شود. شیب δ نیز در صفحه قائم، عمود بر جهت آزیموت در محدوده $0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$ اندازه‌گیری می‌شود.

$$\tau^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 l^2 m^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 m^2 n^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 n^2 l^2 \quad (۴)$$

$$\sigma = l^2 \sigma_1 + m^2 \sigma_2 + n^2 \sigma_3 \quad (۵)$$

که $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$ مقادیر تنش‌های اصلی و (l, m, n) کسینوس‌های هادی نرمال بر صفحه در سیستم تنش اصلی هستند. در اکثر موارد، جهت تنش‌های اصلی و نسبت اختلاف تنش‌های اصلی معلوم است، $R = (\sigma_1 - \sigma_2) / (\sigma_1 - \sigma_3)$. این حالت به‌ویژه زمانی اتفاق می‌افتد که میدان تنش با روش‌های معکوس‌سازی از اندازه‌گیری لغزش‌های زمین‌شناسی و سازوکارهای ژرفی زمین‌لرزه‌ها به‌دست آمده باشد. با استفاده از تعریف نسبت شکل، φ ، به صورت:

$$\varphi = 1 - R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (۶)$$

مقادیر تنش‌های اصلی را می‌توان برحسب φ و دو پارامتر مجهول k_1 و k_2 ، که با اندازه و موقعیت دایره موهر سه‌بعدی در ارتباط است نوشت (شکل (۲))،

$$\sigma_1 = k_1 + k_2 \quad (۷)$$

$$\sigma_2 = k_1 \varphi + k_2 \quad (۸)$$

$$\sigma_3 = k_2 \quad (۹)$$

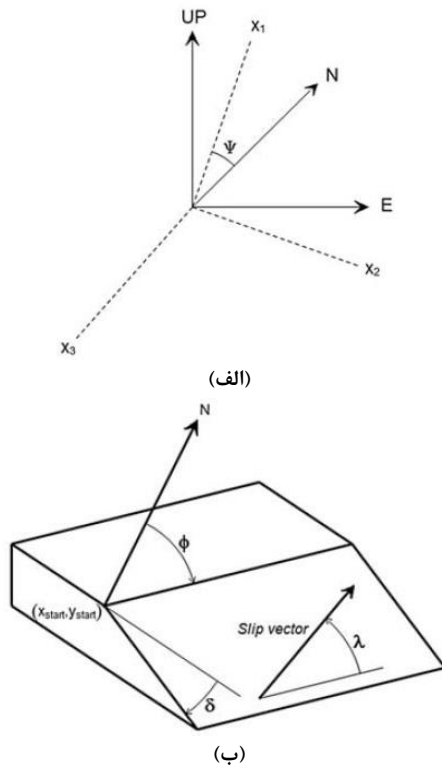
با جایگذاری این عبارات در معیار لغزش اصطکاک (رابطه (۲))، و فرض مماس بودن پوش^۱ لغزش اصطکاک به دایره موهر $\sigma_1 \cdot \sigma_3$ (یعنی استفاده از رابطه $\tan \varphi = 1 / \tan 2\theta$)، می‌توان نشان داد که:

$$k_2 = k_1 \varphi - \sigma_1 \quad (۱۰)$$

و می‌توان پارامتر k_2 را از معادلات مقادیر تنش اصلی حذف کرد. بدین ترتیب می‌توان تنش‌های برشی و نرمال عمل‌کننده روی یک سطح را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\tau = [(1 - \varphi)^2 l^2 m^2 + \varphi^2 m^2 n^2 + n^2 l^2]^{\frac{1}{2}} \quad (۱۱)$$

$$\sigma = k_1 \left(\frac{\varphi + 1}{2} - (1 - \varphi)m^2 - n^2 \right) \quad (۱۲)$$



شکل ۳- الف) آزمون Ψ محورهای اصلی تنش (X_1, X_2, X_3) نسبت به سیستم مرجع، ب) هندسه صفحه گسل برحسب آزمون ϕ و شیب δ تعریف می‌شود. زاویه ریک λ نشان-دهنده لغزش بوده و در محاسبات سازوکار ژرفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. X_{start}, Y_{start} نیز مختصات کارتزین نقطه شروع اثر سطحی گسل است (Neves و همکاران، ۲۰۰۹).

گسل شمال تبریز، در نخستین گزارش‌های لرزه زمین‌ساختی منتشرشده، به‌عنوان یک گسل واژگون پرشیب معرفی گردید (Arshadi و Berberian، ۱۹۷۶). با این وجود، بر پایه بررسی عکس‌های هوایی، به شواهدی مبنی بر جابه‌جایی امتداد لغز راست‌گرد در طول این گسل اشاره شد. پس از آن، جابه‌جایی راست‌گرد آبراهه‌ها و دیگر عوارض زمین-ریخت‌شناختی کواترنری^{۱۱} در راستای این گسل، توسط پژوهشگران دیگری، با شواهد قوی‌تر، بر روی زمین مستند گردید (Hesami و همکاران، ۲۰۰۳؛ Karakhanian و همکاران، ۲۰۰۴).

Berberian در سال ۱۹۹۷ گسل تبریز را به چند قطعه

مقادیر تنش‌های اصلی با $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ نشان داده می‌شود و با توجه به تعریف داریم: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$. مطابق قرارداد مورداستفاده در زمین‌شناسی تنش‌های فشاری مثبت هستند، بنابراین تنش‌های اصلی از بیش‌ترین به کم‌ترین فشارش مرتب می‌شوند. استفاده از نسبت اختلاف تنش یعنی R (رابطه ۶)) به‌جای خود مقادیر تنش‌های اصلی برای آنالیز تمایل لغزش کافی است. در انجام محاسبات نیازی به افقی یا قائم فرض نمودن تنش‌های اصلی نیست ولی همگن فرض کردن میدان تنش لازم است. گسل‌ها مسطح در نظر گرفته شده و فرض براین است که باهم اندرکنشی ندارند و جهت آن‌ها با آزمون و شیب مشخص می‌شود (شکل ۳-ب)) (Richard و Aki، ۱۹۸۰).

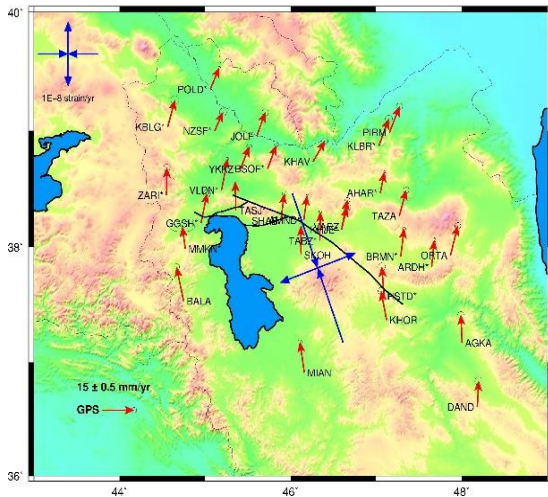
۳- منطقه مورد مطالعه

ایران در منطقه برخورد صفحه‌های زمین‌ساختی عربستان و اوراسیا قرار داشته و دچار تغییرشکل داخل قاره‌ای است. زمین‌ساخت ایران عمدتاً نتیجه برخورد مایل بین صفحه‌های عربستان و اوراسیا است که با آهنگ 22 ± 2 میلی‌متر در سال با مشارکت منطقه شمال غرب ایران با آهنگ 8 ± 2 میلی‌متر در سال همگرا می‌شود (Vernant و همکاران، ۲۰۰۴). این همگرایی بین کوتاه‌شدگی در کوه‌های زاگرس، تغییر شکل داخلی ایجادشده توسط گسل‌های عمده‌تعداد لغز در مرکز ایران و کوتاه شدن در کوه‌های البرز توزیع شده است (شکل ۴)).

گسل شمال تبریز، یک ساختار پیچیده با راستای شمال‌غربی-جنوب‌شرقی، در ناحیه شمال‌غرب ایران است. این گسل با درازای نزدیک به ۱۵۰ کیلومتر (که با در نظر گرفتن گسل شمال میشو به‌عنوان دنباله شمال‌غربی آن به حدود ۲۱۰ کیلومتر می‌رسد)، با یک روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق از جنوب مرند شروع شده و با عبور از حاشیه شمالی شهر تبریز تا نزدیکی بستان‌آباد امتداد دارد. گسل یادشده، از سوی شمال‌غربی، به یک پهنه گسلی واژگون پیوند می‌خورد که در ناحیه شمال دریاچه ارومیه (گسل‌های صوفیان و تسوج) رو به غرب-جنوب‌غربی می‌چرخد. ادامه جنوب شرقی گسل شمال تبریز نیز با پهنه‌های گسلی واژگون شمال و جنوب بزقوش، دوزدوزان و جنوب سراب، پیوند می‌خورد که این مجموعه رو به شرق-شمال شرقی تغییر روند می‌دهد (Berberian و Yeats، ۱۹۹۹).

11. Quaternary

10. Rake



شکل ۵- بردارهای سرعت GPS شبکه ژئودینامیک^{۱۳} غیر دائم و پیوسته شمال غرب کشور در چارچوب مرجع اوراسیا انتخابی از مرجع Djamour و همکاران (۲۰۱۱) که برای محاسبه محورهای اصلی کرنش در منطقه گسل شمال تبریز مورد استفاده قرار گرفته است.

قطعه شرقی گسل شمال تبریز، با یک فاصله، از جنوب قطعه غربی آغاز شده، از شهر تبریز تا روستای باسمنج ادامه می‌یابد. میان این دو قطعه، یک حوضه کششی قرار گرفته است. شاخه‌های جوانی از هر دو قطعه جدا شده، با راستای گسل غربی، این فروافتادگی را در میان خود می‌گیرند. این شاخه‌های جوان، پرتگاه‌های آشکاری دارند که آن‌ها را در شمال غرب شهر تبریز می‌توان دنبال کرد، و احتمالاً در طی زمین‌لرزه سال ۱۷۸۰ میلادی با بزرگای $M_s = 7/4$ و رویدادهای پیش از آن تشکیل شده‌اند.

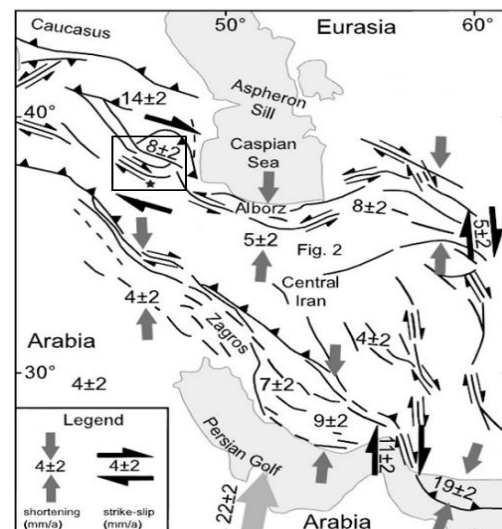
۴- مراحل محاسبه تمایل لغزش در گسل شمال تبریز

۴-۱- استخراج مشخصات هندسی گسل

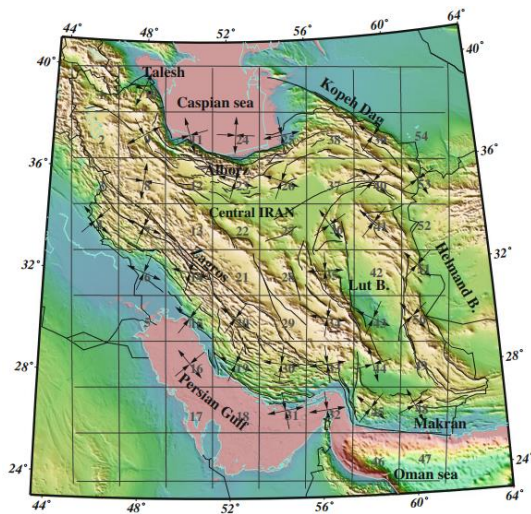
با استفاده از نقشه گسل‌های فعال ایران (Hesami و همکاران، ۲۰۰۳) گسل براساس تغییر امتداد به بخش‌های مجزا تقسیم گردید به نحوی که هر بخش تقریباً دارای راستای ثابتی باشد. نتیجه در شکل (۶) قابل مشاهده است.

بدین ترتیب در نهایت تعداد ۱۱ بخش یا شاخه از گسل جهت آنالیز در نظر گرفته شد. بخش‌های گسلی در نظر گرفته شده به صورت سه بعدی در شکل (۷) و به صورت دوبعدی در

تقسیم کرد که درازای مجموع آن‌ها به ۲۱۰ کیلومتر می‌رسد. این قطعه‌ها بر پایه شماری از گسیختگی‌های سطحی در زمین‌لرزه‌های سال‌های ۱۷۸۰، ۱۷۲۱ و ۱۷۸۶ میلادی تعیین شده‌اند. براساس مطالعات Karakhanian و همکاران (۲۰۰۴)، هندسه این گسل شامل قطعه‌های ناهم‌ردیفی است که به طور راست پله آرایش یافته‌اند. دو قطعه اصلی، یکی در شرق و دیگری در غرب شهر تبریز، اهمیت ویژه برای برآورد خطر زمین‌لرزه‌ای دارند. قطعه غربی از شهر صوفیان تا شهر تبریز ادامه دارد و نشانه‌های آشکاری از جابه‌جایی آبراهه‌ها که از جنبش راستالغز راست‌گرد در طول آن حکایت دارد، بر روی آن دیده می‌شود. افزون بر این، شواهد آشکاری از وقوع گسلش سطحی ناشی از رویداد زمین‌لرزه‌های پیشین را می‌توان در قالب عوارض ریخت زمین‌ساختی و بررسی‌های دیرینه لرزه‌شناختی در طول آن استنباط نمود (Hesami و همکاران، ۲۰۰۳). دنباله شمال غربی گسل شمال تبریز از دامنه‌های شمالی کوه میشو می‌گذرد که اغلب آن را یک گسل جداگانه (گسل شمال میشو) معرفی کرده‌اند (Berberian و Yeats، ۱۹۹۹).



شکل ۴- نقشه زمین‌ساختی ساده شده ایران با بردارهایی که نشان‌دهنده جهت حرکت‌های نسبی هستند. جابه‌جایی‌های نسبی در شمال غرب ایران با آهنگ 8 ± 2 میلی‌متر در سال به صورت برشی رخ می‌دهند (با تغییر از Vernant و همکاران، ۲۰۰۴). منطقه مورد مطالعه در شمال غرب ایران با مستطیل و محل تقریبی کلان‌شهر تبریز با علامت ستاره مشخص شده است.



شکل ۸- جهت حداکثر محوره‌های اصلی فشاری و کششی حاصل از معکوس‌سازی تنش سازوکارهای ژرفی. سلول‌های خالی در شمال غرب ایران نشانگر عدم وجود داده کافی است (Zarifi و همکاران، ۲۰۱۳)

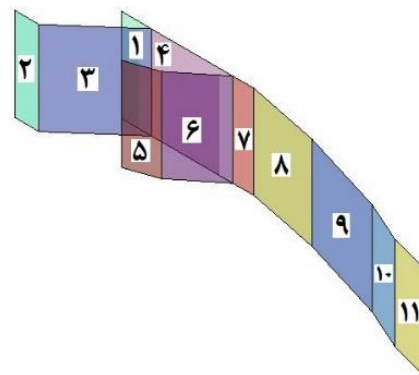
۴-۲- برآورد تنش منطقه‌ای

نخست مؤلفه‌های اصلی تنسور تنش منطقه‌ای از منابع مختلف استخراج شد. از کارهای قبلی انجام شده در این زمینه می‌توان به مقاله Zarifi و همکاران (۲۰۱۳) و Afra و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد. در تحقیق اول از سازوکارهای ژرفی زمین- لرزه‌های با عمق کمتر از ۴۰ کیلومتر در بازه زمانی سال‌های ۱۹۰۹ تا ۲۰۱۲، نرخ کرنش لرزه‌ای و بردارهای سرعت GPS جمع‌آوری شده مابین سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۱۱ برای برآورد مقدار و جهت نرخ‌های کرنش و تنش اصلی بیشینه در کل ایران استفاده شده است. مطابق شکل‌های (۸) و (۹) خروجی جهت محوره‌های اصلی تنش‌های فشاری و کششی حاصل از معکوس- سازی سازوکارهای ژرفی و نرخ کرنش لرزه‌ای به دلیل کمبود اطلاعات کافی فاقد خروجی در شمال غرب ایران است. از طرفی مطابق شکل (۱۰) نحوه شبکه‌بندی به نحوی است که منطقه مورد مطالعه داخل یک سلول قرار نگرفته و در چهار سلول ۱، ۲، ۹ و ۱۰ توزیع شده است. لذا از خروجی‌های مقاله Zarifi و همکاران (۲۰۱۳) در این تحقیق استفاده نشد. در تحقیق انجام شده توسط Afra و همکاران (۲۰۱۷) از سازوکار ژرفی زمین لرزه‌ها برای برآورد تنش منطقه‌ای با دو روش معکوس چندگانه^{۱۳} و وارونگی توأم تکراری^{۱۴} استفاده شده است. روش

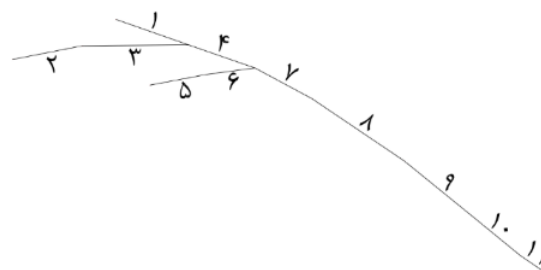
شکل (۸) نمایش داده شده و مشخصات هندسی هر بخش گسلی در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۶- شاخه‌بندی گسل شمال تبریز به نحوی که هر بخش دارای امتداد و شیب تقریباً ثابتی است.



(الف)

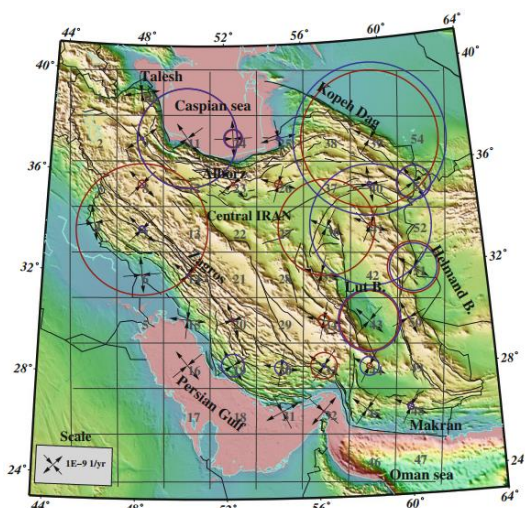


(ب)

شکل ۷- الف) هندسه سه‌بعدی بخش‌های مختلف گسل شمال تبریز. جهت تشخیص بهتر، صفحه هر بخش با شماره و رنگ جداگانه نشان داده شده است، ب) تقسیم گسل شمال تبریز به بخش‌هایی با امتداد تقریباً ثابت که با شماره مشخص شده‌اند.

14. Iterative joint inversion method

13. Multiple inverse method



شکل ۹- جهت و دامنه نسبی محورهای اصلی نرخ کرنش لرزه‌ای، سلول‌های خالی در شمال غرب ایران نشانگر عدم وجود داده کافی است (Zarifi و همکاران، ۲۰۱۳)

معکوس چندگانه توسط Yamaji در سال ۲۰۰۰ مطرح شده و توسط (Yamaji و Sato، ۲۰۰۶)، (Yamaji و Otsubo، ۲۰۰۶)، (Sato و Yamaji، ۲۰۰۶) و (Otsubo و همکاران، ۲۰۰۶) توسعه داده شده است. روش وارونگی توأم تکراری نیز توسط Vavrycuk در سال ۲۰۱۴ مطرح شده است.

در مقاله Afra و همکاران (۲۰۱۷) منطقه شمال غرب ایران با استفاده از تشابه میدان سرعت مسطحاتی GPS و سازوکارهای ژرفی موجود از زمین‌لرزه‌ها به ۹ منطقه تقسیم شده است که گسل شمال تبریز به‌طور کامل در منطقه شماره ۲ قرار گرفته است (شکل (۱۱))، لذا در این تحقیق از نتایج مقاله فوق‌الذکر استفاده گردید. دو حالت تنش منطقه‌ای مستخرج از این مقاله در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۱- پارامترهای هندسی قطعات گسلی مورد استفاده در تحلیل. ستون اول شماره بخش گسلی، ستون‌های دوم و سوم مختصات UTM^{۱۵} نقطه شروع بخش، ستون چهارم آزیموت و ستون پنجم طول بخش گسلی را نشان می‌دهد.

شماره بخش	X (UTM) (متر)	Y (UTM) (متر)	آزیموت (درجه)	طول (کیلومتر)
۱	۵۲۸۴۹۳/۱۷۰	۴۲۵۵۴۶۶/۳۸۰	۱۰۹/۶۷۰	۱۶/۴۲۹
۲	۴۸۹۳۲۳/۲۲۰	۴۲۳۹۲۱۳/۱۷۰	۱۰۹/۶۶۰	۱۳/۲۶۹
۳	۵۰۱۸۱۸/۵۳۰	۴۲۳۴۷۴۷/۸۶۰	۷۰/۱۷۵	۴۴/۷۹۲
۴	۵۴۳۹۵۵/۴۸۰	۴۲۴۹۹۳۸/۹۵۰	۱۰۹/۲۲۲	۴۴/۰۱۲
۵	۵۴۰۸۵۵/۴۷۰	۴۲۲۷۰۰۸/۷۶۰	۹۰/۵۶۵	۱۷/۵۳۷
۶	۵۵۸۳۹۰/۷۴۰	۴۲۲۶۸۳۶/۱۰۰	۷۲/۳۸۲	۲۸/۴۵۷
۷	۵۸۵۵۱۳/۰۶۰	۴۲۳۵۴۴۹/۲۵۰	۱۰۸/۸۰۳	۱۱/۱۹۱
۸	۵۹۶۱۰۶/۸۲۰	۴۲۳۱۸۴۲/۴۳۰	۱۲۰/۸۶۳	۳۹/۷۶۳
۹	۶۳۰۲۳۹/۱۲۰	۴۲۱۱۴۴۳/۶۸۰	۱۲۶/۵۷۶	۴۷/۹۸۵
۱۰	۶۶۸۷۷۳/۸۱۰	۴۱۸۲۸۵۰/۳۸۰	۱۳۴/۲۱۲	۲۳/۲۹۸
۱۱	۶۸۵۴۷۳/۰۸۰	۴۱۶۶۶۰۴/۲۰۰	۱۲۴/۳۸۴	۲۳/۰۰۶

جدول ۲- نتایج حاصل از سه روش استخراج تنش منطقه‌ای در محدوده گسل شمال تبریز

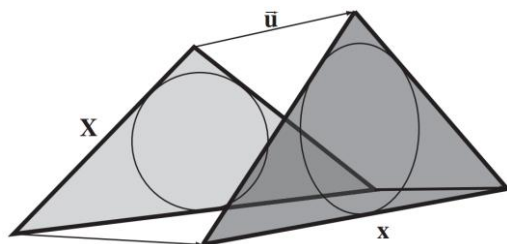
روش	σ_1 (°)		σ_2 (°)		σ_3 (°)	
	میل	روند	میل	روند	میل	روند
معکوس چندگانه	۱۳۴	۱	۸۵	۲۳۵	۵	۴۴
وارونگی توأم تکراری	۱۴۲	۲	۷۳	۲۳۸	۱۷	۵۱
مشاهدات مسطحاتی GPS	۱۶۵/۱	۰/۰	-۹۰/۰	۱۶۵/۱	۰/۰	۷۵/۱

سه نقطه را در سیستم مختصات اولیه X نشان می‌دهد (مثلث روشن) که توسط سه بردار غیرموازی \vec{u} جابه‌جا شده و به مختصات نهایی x منتقل شده‌اند (مثلث تیره). اگر تغییر شکل همگن باشد (یعنی خطوط موازی در حالت اولیه در حالت نهایی نیز خطوط موازی باقی بمانند)، رابطه مابین بردارهای جابه‌جایی و وضعیت مرجع به صورت زیر بیان می‌شود:

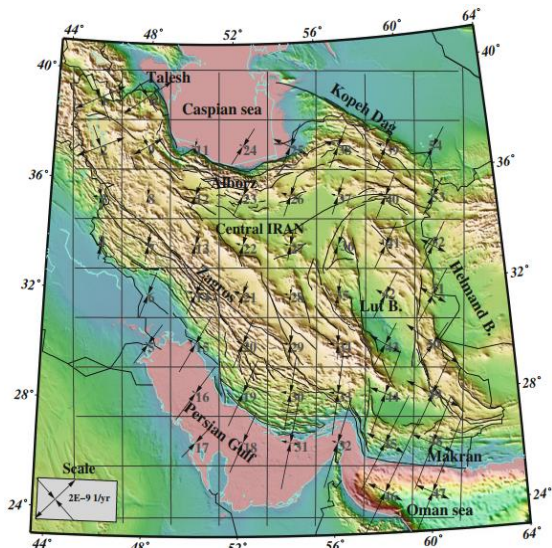
$$u_i = t_i + G_{ij}X_j, \quad G_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial X_j} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، t_i یک مقدار ثابت است که انتقال یک نقطه نسبت به مبدأ را نمایش می‌دهد و G_{ij} گرادیان‌های جابه‌جایی در وضعیت مرجع هستند. G تنسور گرادیان جابه‌جایی لاگرانژی نامیده می‌شود (Means, ۱۹۷۶).

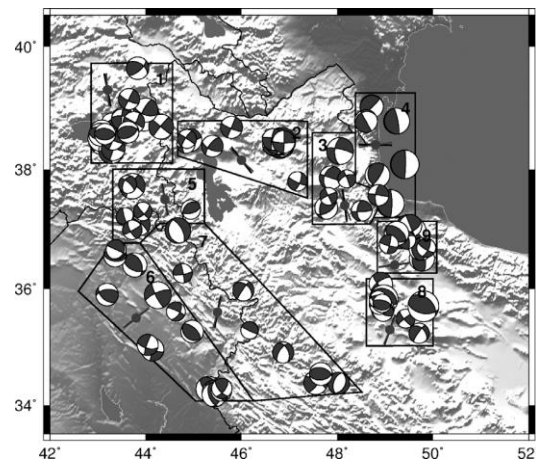
از رابطه (۱۶) دیده می‌شود که جهت حل دستگاه معادلات در حالت دوبعدی شش مجهول خواهیم داشت: دو مؤلفه بردار انتقال و چهار مؤلفه تنسور گرادیان جابه‌جایی لاگرانژی. هر ایستگاه GPS با جابه‌جایی یا سرعت جابه‌جایی معلوم، اگر در فضای دوبعدی باشد دو معادله خواهد داشت. بنابراین در فضای دوبعدی حداقل سه نقطه که روی یک خط قرار ندارند، برای حل تنسور کرنش یا تنسور گرادیان جابه‌جایی مورد نیاز است. برای حل این سیستم معادلات خطی با استفاده از روش‌های جبر خطی، می‌بایست رابطه (۱۶) به صورت سه ماتریس بازنویسی شود که دو تا از این ماتریس‌ها شامل کمیت‌های معلوم و ماتریس دیگر شامل کمیت‌های مجهول است. در حالت دوبعدی معادلات بازنویسی شده برای وضعیت مرجع به صورت زیر خواهند بود:



شکل ۱۲- سه نقطه در وضعیت اولیه X در امتداد بردارهای غیرموازی \vec{u} به وضعیت نهایی x حرکت کرده و منجر به ایجاد کرنش می‌شوند (Cardozo و Allmendinger, ۲۰۰۹).



شکل ۱۰- جهت و دامنه نسبی محورهای اصلی نرخ کرنش ژئودتیکی^{۱۶} ناشی از میدان سرعت ترکیبی GPS Zarifi و همکاران، (۲۰۱۳). نحوه شبکه‌بندی به نحوی که است که منطقه مورد مطالعه داخل یک سلول قرار نگرفته و در چهار سلول ۱، ۲، ۹ و ۱۰ توزیع شده است.



شکل ۱۱- تقسیم‌بندی منطقه شمال غرب ایران بر اساس تشابه در میدان سرعت مسطحاتی GPS و سازوکار ژرفی زمین‌لرزه‌ها (Afra و همکاران، ۲۰۱۷). گسل شمال تبریز به‌طور کامل در منطقه شماره ۲ قرار گرفته است.

برای برآورد تنش منطقه‌ای می‌توان از مشاهدات GPS نیز استفاده کرد. برای این منظور نخست کرنش منطقه‌ای محاسبه می‌شود. تغییر شکل گرادیان میدان جابه‌جایی است. شکل (۱۲)

در حالتی که مختصات وضعیت مرجع معلوم است، تنسور کرنش لاگرانژی به شکل زیر خواهد بود:

$$E_{ij} = \frac{1}{2} [G_{ij} + G_{ji} + G_{ki}G_{kj}] \quad (20)$$

جهت محاسبه تنسور آهنگ تنش نخست تنسور گرادیان جابه‌جایی، سپس تنسور آهنگ کرنش و در نهایت با استفاده از قانون هوک^{۱۸} تعمیم‌یافته تنسور آهنگ تنش محاسبه می‌شود.

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij} \quad (21)$$

در رابطه اخیر μ ضریب برشی و λ ثابت لامه^{۱۹} می‌باشد که در حالت جامد پواسن^{۲۰} برابر ۷۰ گیگاپاسکال در پوسته فرض شده‌اند.

از طرفی در تحقیق صورت گرفته توسط ظریفی و همکاران در سال ۲۰۱۳ جهت تنش منطقه‌ای به‌دست‌آمده از وارون-سازی سازوکارهای ژرفی و جهت کرنش منطقه‌ای به‌دست‌آمده از مشاهدات GPS دارای ضریب همبستگی ۰/۷۹ می‌باشند. لذا می‌توان با توجه به ضریب همبستگی بالای جهت تنش و کرنش منطقه‌ای در ایران از اختلاف آن‌ها صرف‌نظر کرد.

۳-۴- برآورد و تحلیل تمایل لغزش

برای محاسبه پارامترهای تغییرشکل روش‌های مختلفی وجود دارد. در برخی از این روش‌ها از مشاهدات انجام‌یافته برای تعیین پارامترها استفاده می‌شود. ولی در ژئودزی روش‌هایی به‌کار می‌روند که مختصات سرشکن شده در آن موجود باشد. در این روش‌ها حداقل باید دو سری مشاهده در دو اپک زمانی در هر نقطه برای محاسبه مقادیر جابه‌جایی در امتداد محورهای مختصات در نظر گرفته شود. به‌عنوان مثال می‌توان از مشاهدات GPS استفاده نمود. در این تحقیق از میدان سرعت GPS برگرفته از مرجع Djamour و همکاران (۲۰۱۱) در محدوده منطقه مورد مطالعه استفاده شد. شبکه GPS مذکور از دریای خزر تا مرز ایران و ترکیه را پوشش داده است. فاصله متوسط مابین هر دو ایستگاه در نزدیکی گسل شمال تبریز حدود ۲۰ کیلومتر و در بقیه مناطق مابین ۳۰ تا ۷۰ کیلومتر است. ایستگاه‌های شبکه به‌صورت دائمی و دوره‌ای هستند. ایستگاه‌های دوره‌ای به‌مدت ۴۸ ساعت و حداقل سه دوره از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸ مشاهده انجام داده‌اند. پردازش مشاهدات به‌منظور

$$\begin{bmatrix} {}^1u_1 \\ {}^1u_2 \\ {}^2u_1 \\ {}^2u_2 \\ \dots \\ \dots \\ {}^nu_1 \\ {}^nu_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & {}^1X_1 & {}^1X_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & {}^1X_1 & {}^1X_2 \\ 1 & 0 & {}^2X_1 & {}^2X_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & {}^2X_1 & {}^2X_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & {}^nX_1 & {}^nX_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & {}^nX_1 & {}^nX_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ G_{11} \\ G_{12} \\ G_{21} \\ G_{22} \end{bmatrix} \quad (17)$$

رابطه (۱۷) را می‌توان نه تنها برای سه ایستگاه در حالت دو بعدی بلکه در حالت کلی برای n ایستگاه نوشت. برای بیشتر از سه ایستگاه در حالت دو بعدی، تعداد معادلات بیشتر از تعداد پارامترهای مجهول خواهد شد. در این حالت اطلاعات اضافی را می‌توان برای ارزیابی دقت پارامترهای محاسبه‌شده مورد استفاده قرار داد. جهت حل معادله (۱۷) از تئوری معکوس-سازی کلاسیک و به‌ویژه حل مسئله کم‌ترین مربعات خطی استفاده می‌شود که به شکل زیر می‌باشد:

$$\vec{b} = M\vec{a} \quad (18)$$

که در آن \vec{b} بردار جابه‌جایی‌ها یا سرعت‌های جابه‌جایی معلوم، M ماتریس طرح با موقعیت اولیه ایستگاه‌ها و \vec{a} بردار مجهولات مسئله می‌باشد. برای حل کردن مسئله و به‌دست آوردن بردار \vec{a} ، بردار \vec{b} در معکوس ماتریس M ضرب می‌شود.

$$\vec{a} = M^{-1}\vec{b} \quad (19)$$

اگر ایستگاه‌ها بر اساس فاصله‌ای که از نقطه محاسبه تنسور کرنش دارند وزن‌دهی نشده باشند، مسئله مربع خطی عمومی را می‌توان با تجزیه مقدار تکین (SVD) حل کرد (Press و همکاران، ۱۹۹۲). با این‌که روش‌های سریع‌تری نیز موجود می‌باشند، روش SVD این مزیت را دارد که اگر معادلات نرمال نزدیک به سینگولار^{۱۷} باشند، جواب پایدارتری خواهد داد. این حالت وقتی اتفاق می‌افتد که در حالت دو بعدی ایستگاه‌ها تقریباً در یک خط قرار گرفته باشند. اگر ایستگاه‌ها نسبت به نقطه محاسبه تنسور کرنش بر اساس فاصله‌ای که با آن دارند، وزن‌دهی شده باشند، می‌توان مسئله مربعات خطی را با روش کم‌ترین مربعات وزن‌دار با پایداری کم‌تر حل کرد (Menke، ۱۹۸۴). با محاسبه مجهولات یعنی بردار \vec{a} ، گرادیان جابه‌جایی (چهار المان آخر در حالت دو بعدی بردار \vec{a}) محاسبه می‌شود.

19. Lamé
20. Poisson

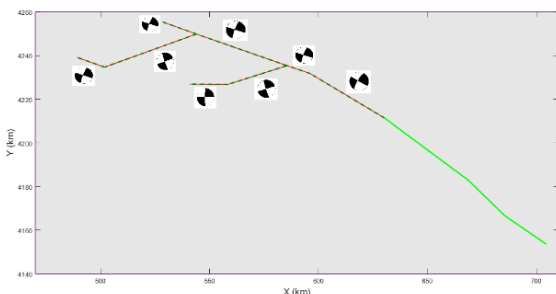
17. Singular
18. Hooke

آن‌ها در شکل (۵) نمایش داده شده و در جدول (۳) ارائه شده است. با استفاده از این میدان سرعت نخست با استفاده از رابطه (۱۹) تنسور گرادیان جابه‌جایی، سپس با استفاده از رابطه (۲۰) تنسور نرخ کرنش و در نهایت با استفاده از قانون هوک تعمیم-یافته (رابطه (۲۱)) تنسور نرخ تنش محاسبه می‌شود.

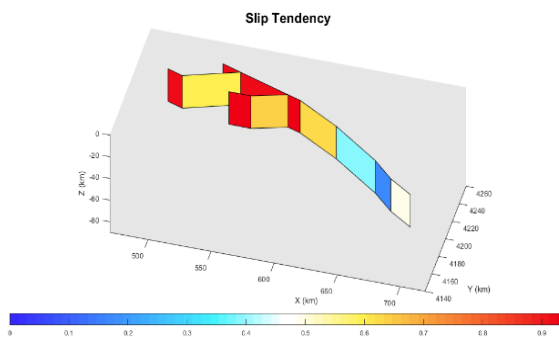
محاسبه مختصات و سرعت ایستگاه‌ها با استفاده از نرم‌افزار GAMIT/GLOBK انجام شده است (Herring و همکاران، ۲۰۰۹). از این میدان سرعت تعداد ۳۱ ایستگاه GPS نزدیک به گسل شمال تبریز انتخاب شد. میدان سرعت ایستگاه‌های GPS انتخابی در چهارچوب مرجع اوراسیا به‌همراه بیضی خطای ۹۵٪

جدول ۳- میدان سرعت GPS و مدل در منطقه شمال غرب ایران، ستون اول نام ایستگاه‌های GPS، ستون‌های دوم و سوم مختصات جغرافیایی ایستگاه‌ها، ستون‌های چهارم و پنجم مؤلفه‌های سرعت ایستگاه‌ها، ستون‌های ششم، هفتم و هشتم دقت و همبستگی مشاهدات GPS و ستون نهم مرجع مشاهدات را نشان می‌دهد (برگرفته از Djamour و همکاران، ۲۰۱۱).

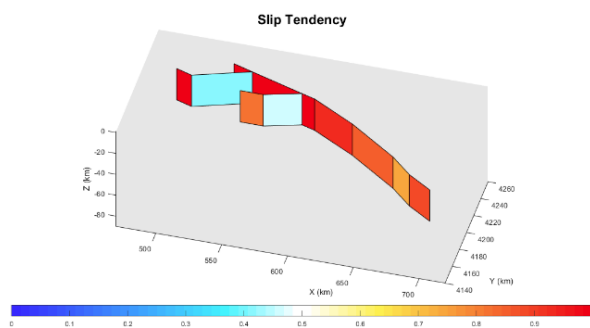
منطقه	long. (°E)	lat. (°N)	Ve (mm/yr)	Vn (mm/yr)	σ_e (mm/yr)	σ_n (mm/yr)	همبستگی
AGKA	۴۸/۰۰۵	۳۷/۱۶۹	-۰/۵۷	۱۲/۳۹	۰/۵۸	۰/۵۹	۰/۰۰۵
AHAR*	۴۷/۰۵۰	۳۸/۴۶۸	۱/۹۳	۰۹/۱۳	۰/۱۸	۰/۲۵	-۰/۰۰۶
AMND*	۴۶/۱۵۵	۳۸/۲۳۱	۱/۵۷	۱۰/۹۵	۰/۲۵	۰/۱۸	-۰/۰۰۷
ARDH*	۴۷/۶۵۰	۳۷/۸۲۹	۱/۲۳	۱۱/۸۸	۰/۲۶	۰/۴۰	-۰/۰۰۴
BALA	۴۴/۷۵۰	۳۷/۵۳۴	-۳/۳۸	۱۵/۰۰	۰/۵۹	۰/۶۰	۰/۰۱۰
BRMN*	۴۷/۲۸۸	۳۷/۹۱۹	۱/۵۹	۱۲/۴۰	۰/۳۸	۰/۲۱	-۰/۰۰۴
B sof*	۴۵/۷۳۲	۳۸/۶۷۴	۴/۰۷	۱۰/۳۱	۰/۳۷	۰/۲۲	-۰/۰۰۴
DAND	۴۸/۱۸۳	۳۶/۶۰۷	۰/۶۴	۱۱/۵۱	۰/۷۱	۰/۷۴	-۰/۰۰۹
GGSH*	۴۴/۹۵۴	۳۸/۲۰۷	۲/۸۰	۱۳/۱۵	۰/۶۹	۰/۷۰	-۰/۰۰۲
HSTD*	۴۷/۰۹۴	۳۷/۵۷۶	-۱/۱۰	۱۳/۰۰	۰/۶۹	۰/۶۹	-۰/۰۰۱
JOLF	۴۵/۶۰۵	۳۸/۹۵۲	۴/۰۱	۱۰/۵۲	۰/۶۰	۰/۶۱	۰/۰۰۸
KBLG*	۴۴/۵۶۵	۳۹/۰۳۱	۳/۴۱	۱۱/۹۰	۰/۷۹	۰/۸۰	-۰/۰۰۲
KHAV	۴۶/۲۶۵	۳۸/۷۳۶	۵/۵۶	۹/۱۰	۰/۶۰	۰/۶۱	۰/۰۱۰
KHJE*	۴۶/۵۹۶	۳۸/۱۵۲	۲/۶۰	۹/۹۶	۰/۷۱	۰/۷۲	-۰/۰۰۱
KHOR	۴۷/۱۲۳	۳۷/۳۶۸	-۲/۶۳	۱۲/۸۷	۰/۶۰	۰/۶۱	۰/۰۰۹
KLBR*	۴۷/۰۲۲	۳۸/۸۶۹	۴/۷۰	۱۱/۸۹	۰/۶۹	۰/۶۹	-۰/۰۰۱
MIAN	۴۶/۱۶۲	۳۶/۹۰۸	-۲/۱۶	۱۳/۵۴	۰/۴۱	۰/۳۹	۰/۰۰۰
MMKN*	۴۴/۷۷۱	۳۷/۹۸۵	-۱/۵۲	۹/۸۸	۲/۴۳	۰/۹۷	۰/۰۰۰
NZSF*	۴۵/۱۱۴	۳۸/۹۹۹	۳/۹۳	۸/۲۲	۰/۶۹	۰/۶۹	-۰/۰۰۱
ORTA	۴۷/۸۶۹	۳۷/۹۲۹	۳/۴۹	۱۳/۰۸	۰/۵۷	۰/۵۸	۰/۰۰۵
PIRM	۴۷/۱۵۷	۳۸/۹۸۴	۴/۷۴	۱۱/۴۶	۰/۵۹	۰/۶۰	۰/۰۰۵
POLD*	۴۵/۰۶۲	۳۹/۳۵۱	۴/۳۱	۹/۶۱	۰/۲۰	۰/۲۲	-۰/۰۰۷
SHAB	۴۵/۸۸۷	۳۸/۲۲۸	۱/۶۰	۱۱/۹۸	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۰۰۴
SKOH	۴۶/۱۲۳	۳۷/۹۳۳	-۰/۰۷	۱۲/۸۵	۰/۳۸	۰/۵۶	-۰/۰۰۲
TABZ*	۴۶/۳۴۳	۳۸/۰۵۶	۰/۲۲	۱۲/۷۶	۰/۲۶	۰/۴۳	-۰/۰۰۲
TASJ*	۴۵/۳۶۱	۳۸/۳۱۶	-۰/۲۷	۱۲/۸۱	۰/۲۰	۰/۳۳	-۰/۰۰۶
TAZA	۴۷/۲۷۱	۳۸/۲۷۰	۳/۳۲	۱۱/۳۸	۰/۵۴	۰/۵۶	۰/۰۰۴
VARZ	۴۶/۶۰۳	۳۸/۱۷۸	۲/۴۹	۱۱/۷۳	۰/۴۶	۰/۴۶	-۰/۰۰۴
VLDN*	۴۵/۱۹۳	۳۸/۴۹۲	۲/۸۷	۱۳/۷۹	۰/۲۶	۰/۲۹	-۰/۰۰۴
YKKZ*	۴۵/۴۱۴	۳۸/۶۷۲	۴/۱۷	۹/۹۰	۰/۵۱	۰/۳۶	-۰/۰۰۳
ZARI*	۴۴/۵۵۰	۳۸/۴۴۶	۰/۱۹	۱۲/۲۷	۰/۶۴	۰/۶۴	-۰/۰۰۱



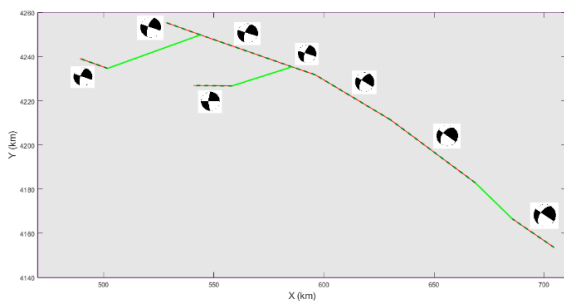
شکل ۱۴- بخش‌های مختلف گسل شمال تبریز که با تنش مستخرج از روش معکوس چندگانه دارای تمایل لغزش بالای ۵۰ درصد می‌باشند با خط چین مشخص شده‌اند. سازوکار ژرفی زمین‌لرزه‌های احتمالی نیز در این بخش‌ها نشان داده شده است



شکل ۱۳- هندسه سه‌بعدی بخش‌های مختلف گسل شمال تبریز که برحسب مقدار تمایل لغزش با تنش مستخرج از روش معکوس چندگانه به صورت رنگی بین صفر و یک نمایش داده شده است.



شکل ۱۵- هندسه سه‌بعدی بخش‌های مختلف گسل شمال تبریز که برحسب مقدار تمایل لغزش با تنش مستخرج از روش وارونگی توأم تکراری به صورت رنگی بین صفر و یک نمایش داده شده است.



شکل ۱۶- بخش‌های مختلف گسل شمال تبریز که با تنش مستخرج از روش وارونگی توأم تکراری دارای تمایل لغزش بالای ۵۰ درصد می‌باشند با خط چین مشخص شده‌اند. سازوکار ژرفی زمین‌لرزه‌های احتمالی نیز در این بخش‌ها نشان داده شده است.

نتایج حاصل برای تنش منطقه‌ای در جدول (۲) ارائه شده است. در ادامه با استفاده از قانون کاوچی^{۲۱} مؤلفه‌های نرمال و برشی تنش منطقه‌ای در صفحه بخش‌های مختلف گسل در هر سه حالت تنش محاسبه شد و با استفاده از درصد نسبت تنش برشی به تنش نرمال مقدار تمایل لغزش برای هر بخش گسل محاسبه گردید. مطابق شکل (۱۳) در حالتی که از روش معکوس چندگانه برای تعیین تنش منطقه‌ای استفاده شود در شاخه‌های بخش شمال غربی گسل مقادیر تمایل لغزش بالای ۵۰ درصد بوده و به سمت بخش جنوب شرقی گسل از مقدار آن کاسته شده و به زیر ۵۰ درصد می‌رسد.

در شکل (۱۴) بخش‌هایی از گسل که دارای تمایل لغزش بالای ۵۰ درصد می‌باشند با خط چین نمایش داده شده و با معلوم بودن هندسه گسل و جهت تنش منطقه‌ای سازوکار ژرفی زمین‌لرزه احتمالی روی شاخه‌ها نمایش داده شده است. مطابق شکل (۱۵) در حالتی که از روش وارونگی توأم تکراری برای تعیین تنش منطقه‌ای استفاده شود در کلیه شاخه‌های گسل تمایل لغزش بالای ۵۰ درصد بوده به نحوی که از شمال غرب گسل به سمت جنوب شرق از مقدار آن به تدریج کاسته شده ولی به زیر ۵۰ درصد نمی‌رسد. در شکل (۱۶) بخش‌هایی از گسل که دارای تمایل لغزش بالای ۵۰ درصد می‌باشند با خط-چین نمایش داده شده و سازوکار ژرفی زمین‌لرزه احتمالی روی شاخه‌ها نمایش داده شده است.

شاخه شماره ۸ گسل گذرنده از شمال کلان شهر تبریز می باشد که استعداد گسیختگی و بروز زمین لرزه را در این بخش نشان می دهد.

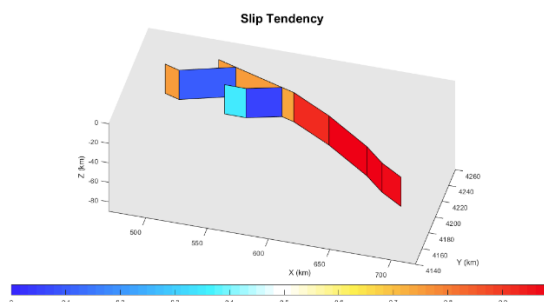
جدول ۴- نتایج حاصل برای کمیت تمایل لغزش بر حسب درصد برای بخش های مختلف گسل شمال تبریز، ستون اول نشان دهنده شماره بخش گسل مطابق شکل (۷) و ستون های دوم، سوم و چهارم به ترتیب تمایل لغزش را بر اساس سه روش معکوس چندگانه، وارونگی توأم تکراری و مشاهدات GPS نشان می دهند.

شماره بخش	تمایل لغزش بر حسب درصد		
	معکوس چندگانه	وارونگی توأم تکراری	مشاهدات GPS
۱	۹۲	۱۰۰	۷۷
۲	۹۲	۱۰۰	۷۷
۳	۶۰	۴۳	۱۲
۴	۹۳	۱۰۰	۷۶
۵	۹۴	۸۲	۳۶
۶	۶۴	۴۷	۰۶
۷	۹۴	۱۰۰	۷۵
۸	۶۲	۹۴	۹۴
۹	۴۰	۸۶	۹۹
۱۰	۱۸	۷۵	۹۹
۱۱	۴۹	۹۰	۹۷

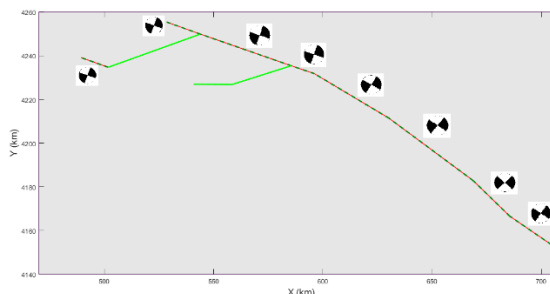
۵- نتیجه گیری

تحلیل تمایل لغزش، ابزاری جهت ارزیابی فعال شدن گسل و برآورد خطر لرزه ای است. انجام این تحلیل ابزار مفیدی را جهت کمی سازی پتانسیل لغزش، روی گسل های معلوم یا ناشناخته در میدان تنش معلوم یا فرضی فراهم می آورد. همچنین می توان با استفاده از جهت احتمالی لغزش، سازوکار ژرفی را نیز تعیین نمود که با استفاده از آن امکان بررسی سازگاری مابین سازوکارهای ژرفی با ساختارهای زمین شناسی وجود دارد.

باتوجه به واقع شدن کلان شهر تبریز در مجاورت گسل شمال تبریز، مطالعه پتانسیل لرزه ای در این گسل از اهمیت ویژه ای جهت تحلیل خطر لرزه ای برای این شهر برخوردار است. در این تحقیق نخست اطلاعات هندسی گسل از منابع مختلف استخراج شد. در ادامه تنش منطقه ای از منابع مختلف گردآوری و نیز با استفاده از مشاهدات GPS میدان تنشی که بهترین



شکل ۱۷- هندسه سه بعدی بخش های مختلف گسل شمال تبریز که بر حسب مقدار تمایل لغزش با تنش مستخرج از مشاهدات مسطحاتی GPS به صورت رنگی بین صفر و یک نمایش داده شده است.



شکل ۱۸- بخش های مختلف گسل شمال تبریز که با تنش مستخرج از مشاهدات مسطحاتی GPS دارای تمایل لغزش بالای ۵۰ درصد می باشند با خط چین مشخص شده اند. سازوکار ژرفی زمین لرزه های احتمالی نیز در این بخش ها نشان داده شده است.

مطابق شکل (۱۷) در حالی که از مشاهدات مسطحاتی GPS برای تعیین تنش منطقه ای استفاده شود در کلیه شاخه های گسل تمایل لغزش بالای ۵۰ درصد بوده به نحوی که از شمال غرب گسل به سمت جنوب شرق مقدار آن به تدریج افزایش می یابد و در حالت کلی بالای ۵۰ درصد است. در شکل (۱۸) بخش هایی از گسل که دارای تمایل لغزش بالای ۵۰ درصد می باشند با خط چین نمایش داده شده و سازوکار ژرفی زمین لرزه احتمالی روی آن ها نمایش داده شده است. در جدول (۴) مقادیر عددی تمایل لغزش بر حسب درصد در هر سه حالت قابل مشاهده است. مطابق شکل های (۱۴)، (۱۶) و (۱۸) سازوکارهای ژرفی به دست آمده در کلیه حالات تنش منطقه ای غالب بودن حرکت امتداد لغز راست گرد را نشان می دهند. نکته قابل توجه در محاسبات تمایل لغزش بالای ۵۰ درصد برای

۶- مراجع

- Afra M, Moradi A, Pakzad M, "Stress regimes in the northwest of Iran from stress inversion of earthquake focal mechanisms", *Journal of Geodynamics*, 2017, 111, 50-60.
- Aki K, Richards PG, "Quantitative seismology", First ed. Freeman and Co., New York, 932, 1980.
- Alaniz-Alvarez SA, Nieto-Samaniego AF, Tolson G, "A graphical technique to predict slip along a pre-existing plane of weakness", *Engineering Geology*, 1998, 49, 53-60.
- Angelier J, "Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population", *Tectonophysics*, 1979, 56, 17-26.
- Berberian M, Arshadi S, "On the evidence of the youngest activity of the North Tabriz Fault and the seismicity of Tabriz city", *Geological Survey and Mineral Exploration of Iran Report*, 1976, 39, 397-418.
- Berberian M, Yeats RS, "Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1999, 89, 120-139.
- Bott MHP, "The mechanics of oblique slip faulting", *Geological Magazine*, 1959, 96, 109-117.
- Byerlee JD, "Friction of rocks", *Pure and Applied Geophysics*, 1978, 102, 453-475.
- Cardozo N, Allmendinger RW, "SSPX: A program to compute strain from displacement/velocity data", *Computer & Geosciences*, 2009, 35, 6, 1343-1357.
- Collettini C, Trippetta F, "A slip tendency analysis to test mechanical and structural control on aftershock rupture planes", *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 255, 402-413.
- Das D, Mallik J, "Koyna earthquakes: a review of the mechanisms of reservoir-triggered seismicity and slip tendency analysis of subsurface faults", *Acta Geophysica*, 2020, 68, 4, 1097-1112.
- Djamour Y, Vernant P, Nankali HR, Tavakoli F, "NW Iran-eastern turkey present-day kinematics: results from the iranian permanent gps network", *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 307, 1-2, 27-34.
- Dupin JM, Sassi W, Angelier J, "Homogeneous stress hypothesis and actual fault slip: A distinct element analysis", *Journal of Structural Geology*, 1993, 15, 1033-1043.
- Etchecopar A, Vasseur G, Daignieres M, "An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis", *Journal of Structural Geology*, 1981, 3, 51-65.
- Gephart JW, Forsyth DW, "An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the Fernando earthquake sequence", *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89, 9305-9320.

انطباق را به منطقه مورد مطالعه داشته باشد برآورد گردید. سپس تنش با استفاده از قانون کاوچی در راستای بخش‌های مختلف گسل و عمود بر آن‌ها تجزیه و پتانسیل لغزشی آن‌ها با در نظر گرفتن درصد نسبت تنش برشی به نرمال محاسبه گردید. حالت‌های مختلف تنش منطقه‌ای نتایج متفاوتی را برای تحلیل تمایل لغزش در پی دارند. در حالتی که از روش معکوس چندگانه برای تعیین تنش منطقه‌ای استفاده شود مقادیر تمایل لغزش در شاخه‌های بخش شمال غربی گسل بالای ۵۰ درصد بوده و به سمت بخش جنوب شرقی گسل از مقدار آن کاسته شده و به زیر ۵۰ درصد می‌رسد. در حالتی که تنش منطقه‌ای از روش وارونگی توأم تکراری تعیین شود در کلیه شاخه‌های گسل تمایل لغزش بالای ۵۰ درصد بوده به نحوی که از شمال غرب گسل به سمت جنوب شرق از مقدار آن به تدریج کاسته شده ولی به زیر ۵۰ درصد نمی‌رسد. در حالت استفاده از مشاهدات GPS برای تعیین تنش منطقه‌ای، در کلیه شاخه‌های گسل تمایل لغزش بالای ۵۰ درصد بوده به نحوی که از شمال غرب گسل به سمت جنوب شرق مقدار آن به تدریج افزایش می‌یابد و در حالت کلی بالای ۵۰ درصد است. نکته قابل توجه در محاسبات تمایل لغزش بالای ۵۰ درصد برای شاخه گسل گذرنده از شمال کلان‌شهر تبریز می‌باشد که استعداد گسیختگی و رخداد زمین‌لرزه را در این بخش نشان می‌دهد.

سازوکارهای ژرفی به‌دست‌آمده در کنار تحلیل تمایل لغزش غالب بودن حرکت امتدادلغز راست‌گرد را در کلیه حالات تنش منطقه‌ای نشان می‌دهند.

آنالیز تمایل لغزش، روشی برای پیش‌بینی ناپایداری گسل و جهات احتمالی فعالیت مجدد آن در شرایط زمین‌ساختی مختلف است. از طرفی تغییر تنش کولمب ناشی از یک یا چند زمین‌لرزه ممکن است باعث بروز زمین‌لرزه‌های بعدی شود. آنالیز تمایل لغزش برای شبکه‌ای از گسل‌ها همراه با محاسبه کمیت تغییرات تنش کولمب به شناسایی گسل‌های مستعد برای زمین‌لرزه‌های بزرگ بعدی کمک شایانی خواهد کرد.

با استفاده از جهت لغزش پیش‌بینی‌شده و هندسه معلوم گسل مورد نظر امکان محاسبه و ترسیم سازوکار ژرفی زمین‌لرزه احتمالی نیز وجود دارد. سازوکار ژرفی پیش‌بینی‌شده ابزار مناسبی جهت بررسی سازگاری مابین سازوکار ژرفی مرتبط با زمین‌لرزه‌ها و گسل‌های شناخته‌شده مربوط به آن‌هاست.

- Pascal C, "SORTAN: A Unix program for calculation and graphical presentation of fault slip as induced by stresses", *Computers & Geosciences*, 2004, 30, 259-265.
- Pollard DD, Saltzer SD, Rubin AM, "Stress inversion methods: Are they based on faulty assumptions?", *Journal of Structural Geology*, 1993, 15, 1045-1054.
- Press WH, Teukolsky SA, Vetterling WT, Flannery BP, "Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing", second ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1992, 994.
- Rebai S, Philip H, Taboada A, "Modern tectonic stress field in the Mediterranean region; evidence for variation in stress directions at different scales", *Geophysical Journal International*, 1992, 110, 106-140.
- 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, Evren E, Dmitrova A, Filikova SV, Gomez F, Al-Ghazzi R, Karam G, "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*, 2006, 111, B5, B05411.
- Sato K, Yamaji A, "Uniform distribution of points on a sphere for improving the resolution of stress tensor inversion", *Journal of Structural Geology*, 2006, 28, 6, 972-979.
- Twiss RJ, Moores EM, "Structural Geology", WH Freeman, New York, 532, 1992.
- Ventura G, and Vilardo G, "Slip tendency analysis of the Vesuvius faults: implications for the seismotectonic and volcanic hazard assessment", *Geophysical Research Letters*, 1999, 26, 21, 3229-3232.
- Vavrycuk V, "Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms", *Geophysical Journal International*, 2014, 199, 69-77.
- Vernant P, Nilforoushan F, Hatzfeld D, Abassi MR, Vigny C, Masson F, Nankali H, Martinod J, Ashtiani A, Bayer R, Tavakoli F, Chery J, "Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman", *Geophysical Journal International*, 2004, 157, 381-398.
- Wallace RE, "Geometry of shearing stress and relation of faulting", *Journal of Geology*, 1951, 59, 118-130.
- Worum G, Wees JD, Bada G, Balen RT, Cloetingh S, Pagnier H, "Slip tendency analysis as a tool to constrain fault reactivation: A numerical approach applied to three-dimensional fault models in the Rover Valley rift system (southeast Herring TA, King RW, McClusky SC, "Introduction to GAMIT/GLOBK, Release 10.35", Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2009.
- Hessami K, Jamali F, Tabassi H, "Major active faults of Iran, scale 1: 2,500,000", *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*, 2003.
- Jackson J, "Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in eastern Turkey and the Caucasus", *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97, B9, 12471-12479.
- Jaeger JC, "Elasticity, fracture and flow with engineering and geological applications", First ed. Methuen and Co. Ltd., London, 268, 1969.
- Karakhanian AS, Trifonov VG, Philip H, Avagyan A, Hessami K, Jamali F, Bayraktutan MS, Bagdassarian H, Arakelian S, Davtian V, Adilkhanyan A, "Active faulting and natural hazards in Armenia, eastern Turkey and northwestern Iran", *Tectonophysics*, 2004, 380, 3, 189-219.
- Lisle RJ, Srivastava DC, "Test of the frictional reactivation theory for faults and validity of fault-slip analysis", *Geology*, 2004, 37, 569-572.
- Means WD, "Stress and Strain: Basic Concepts of Continuum Mechanics for Geologists", Springer, New York, 1976, 339.
- Menke W, "Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory", Academic Press, Orlando, FLA, 1984, 260.
- Moeck I, Kwiatek G, Zimmermann G, "Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in a deep geothermal reservoir", *Journal of Structural Geology*, 2009, 31, 1174-1182.
- Morris A, Ferrill DA, Henderson DB, "Slip-tendency analysis and fault reactivation", *Geology*, 1996, 24, 3, 275-278.
- Miyakawa A, Otsubo M, "Applicability of slip tendency for understanding long-term fault activity: a case study of active faults in northeastern Japan", *Journal of JSCE*, 2015, 3, 105-114.
- Neves MC, Paiva LT, Luis J, "Software for slip-tendency analysis in 3D: A plug-in for Coulomb", *Computers & Geosciences*, 2009, 35, 12, 2345-2352.
- Otsubo M, Yamaji A, "Improved resolution of the multiple inverse method by eliminating erroneous solutions", *Computers & Geosciences*, 2006, 32, 1221-1227.
- Otsubo M, Yamaji A, Kubo A, "Determination of stresses from heterogeneous focal mechanism data: an adaptation of the multiple inverse method", *Tectonophysics*, 2008, 457, 3-4, 150-160.
- Pascal C, "Interaction of faults and perturbation of slip: Influence of anisotropic stress states in the presence of fault friction and comparison between Wallace-Bott and 3D distinct element models", *Tectonophysics*, 2002, 356, 307-322.

- Netherlands)", *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109, B02401.
- Yamaji A, "The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data", *Journal of Structural Geology*, 2000, 22, 7, 441-452.
- Yamaji A, Sato K, "Distances for the solutions of stress tensor inversion in relation to misfit angles that accompany the solutions", *Geophysical Journal International*, 2006, 167, 2, 933-942.
- Yin ZM, Ranalli G, "Critical stress difference, fault orientation and slip direction in anisotropic rocks under non-Andersonian stress systems", *Journal of Structural Geology*, 1992, 14, 237-244.
- Yukutake Y, Takeda T, Yoshida A, "The applicability of frictional reactivation theory to active faults in Japan based on slip tendency analysis", *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 411, 188-198.
- Zarifi Z, Nilfouroushan F, Raeesi M, "Crustal stress map of iran: insight from seismic and geodetic computations", *Pure and Applied Geophysics*, 2013, 171, 7, 1219-1236.
- Zoback, ML, Zoback, MD, "Faulting patterns in north-central Nevada and strength of the crust", *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85, 275-284.

EXTENDED ABSTRACT

Seismic Hazard Assessment for the NTF by Slip Tendency Analysis based on the Regional Stress Extracted from the Focal Mechanism of Earthquakes and GPS Observables

Asghar Rastbood*, Babak Shahanden, Mehdi Mohammad-Zadeh

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 17 January 2021; Accepted: 19 June 2021

Keywords:

Slip Tendency, Regional Stress Field, Focal Mechanism, GPS, North Tabriz Fault.

1. Introduction

The reactivation of slip on pre-existing planes of weakness is of key interest to many geological phenomena, being implicit for instance in tectonic inversion theory and in the concept of stick slip behavior. The analysis of reactivation is crucial in engineering geology where rock masses must be below the critical stress level needed to initiate sliding and in reservoir geology for selecting safe hydrocarbon traps. It also constitutes a valuable tool in seismic hazard assessment as it provides a means of quantifying the slip potential on mapped or suspected faults in a known or inferred stress field.

The foundations of the fault reactivation theory can be found in Jaeger (1969). He proposed a condition for reactivation based on the frictional resistance to sliding. It is usually assumed that after a shear fracture develops, the rock possesses no cohesion across the fracture plane; so the criterion for reactivation is the Navier-Coulomb for cohesionless faults, expressed as,

$$\tau = \mu(\sigma_n - p_f) \quad (1)$$

Where τ and σ_n are the shear and the normal stresses acting on the fault surface, respectively, μ is the coefficient of the sliding friction and p_f is the pore fluid pressure. In general Eq. (1) applies only in the brittle part of the crust affected by frictional processes.

2. Methodology

In terms of the effective stress $\sigma = \sigma_n - p_f$, which incorporates the effect of the pore fluid pressure (see Eq. (1)), the critical condition for sliding on a pre-existing plane of weakness can be written as

$$\mu = \tau/\sigma \quad (2)$$

* Corresponding Author

E-mail addresses: arastbood@tabrizu.ac.ir (Asghar Rastbood), babak.shahandeh95@ms.tabrizu.ac.ir (Babak Shahandeh), m.mohammadzadeh96@ms.tabrizu.ac.ir (Mehdi Mohammad-Zadeh).

The slip tendency of a surface is defined as the ratio of the shear stress to the normal stress on that surface (Morris et al., 1996),

$$T_s = \tau / \sigma \tag{3}$$

It is therefore clear that the slip tendency equals the coefficient of sliding friction. The fault planes that will more likely slip are those with a high ratio of shear to the normal effective stress, close in value to μ . The slip-tendency analysis is based on the fact that the slope of the failure criterion, i.e. the coefficient of friction, may span a range of values limited by the Byerlee's experiments. Generally μ is in the range 0.6-0.85 (Byerlee, 1978). Fixing the stress difference ratio (Mohr's circle diameter), we find a variety of combinations (θ, μ) which make slip viable (Fig. 1). In a region dominated by a particular rock type, the assumption of a specific μ determines the optimum angle θ for sliding (Jaeger, 1969), $2\theta = \tan^{-1}(1/\mu)$. This is the most favourable orientation of the fracture plane relative to the direction of maximum compression. In this plane the slip tendency is maximum, i.e. $T_s = T_s^{max}$. A normalized slip tendency varying between 0 and 1 is defined by dividing the slip tendency by its maximum possible value $T'_s = T_s/T_s^{max}$. The normalized slip tendency then ranges from 100% near the ideal fault orientation to 0% in the principal stress directions.

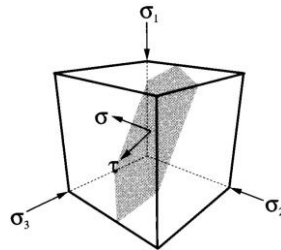


Fig. 1. Normal stress, σ_n , and shear stress, τ , on arbitrarily oriented surface within stress field defined by three principal compressive stresses σ_1, σ_2 and σ_3 (Morris et al., 1996).

3. Results and discussion

Using the map of major active faults of Iran (Hesami et al., 2003), NTF was divided into separate sections based on the change of length so that each section has almost a fixed direction. Finally, 11 sections or branches of the fault were considered for analysis. The considered fault sections are shown in three dimensions in Fig. 2.

In Afra et al. (2017), earthquake focal mechanisms were used to estimate regional stress with two methods: multiple inverse (Yamaji, 2000) and iterative joint inversion (Vavrycuk, 2014). Also, in this research, using the GPS horizontal velocity field from the reference of Jamour et al. (2011) in the study area, the main values of the stress tensor that have the best fit to the study area were calculated using the least squares method. For this purpose, first the displacement gradient tensor, then the strain rate tensor, and finally the stress rate tensor is calculated using the generalized Hook law. The results for regional stresses are presented in Table 1.

Table 1. Results of three methods for regional stress extraction

Method	$\sigma_1(^{\circ})$		$\sigma_2(^{\circ})$		$\sigma_3(^{\circ})$		φ
	Trend	Plunge	Trend	Plunge	Trend	Plunge	
Multiple inverse method	134	1	235	85	44	5	0.28
Iterative joint inversion	142	2	238	73	51	17	0.07
Horizontal GPS Observables	165.1	0.0	165.1	-90.0	75.1	0.0	0.45

Using the Cauchy's law, the normal and shear components of regional stress in the plane of different sections of NTF in all three stress states were calculated, and using the ratio of shear to normal stress,

the amount of slip tendency was calculated for each fault section. According to Fig. 3, in case of using multiple inverse method to determine the regional stress, in the branches of the northwestern part of the NTF, the values of slip tendency are above 50% and towards the southeastern part of the fault, its value is reduced to less than 50%.

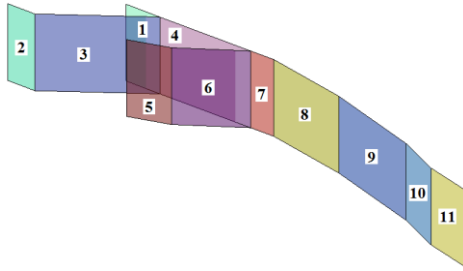


Fig. 2. Three-dimensional geometry of different parts of NTF. For better identification, the page of each section is shown with a separate number and color.

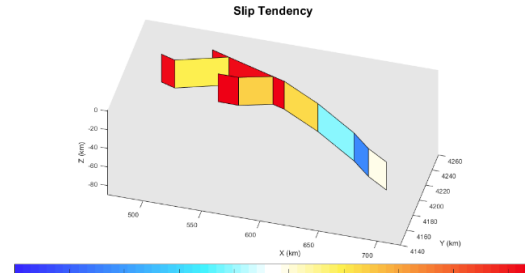


Fig. 3. Three-dimensional geometry of different parts of the NTF, which is shown in color between zero and one in terms of the amount of slip tendency with the stress extracted by the multiple inverse method.

According to Fig. 4, in the case of iterative joint inversion method to determine the regional stress in all branches of the fault, the slip tendency is above 50% so that from the northwest of the fault to the southeast, its value is gradually reduced, but does not fall below 50%. According to Fig. 5, in the case of GPS horizontal observations to determine the regional stress in all fault branches, the tendency to slip is above 50% so that from the northwest of the fault to the southeast, its value gradually increases and it is generally above 50%.

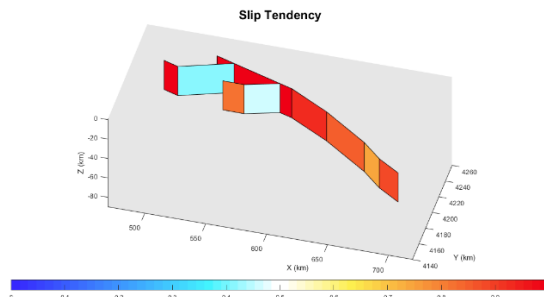


Fig. 4. Three-dimensional geometry of different parts of the NTF, which is shown in color between zero and one in terms of the amount of slip tendency with stress extracted from the iterative joint inversion method.

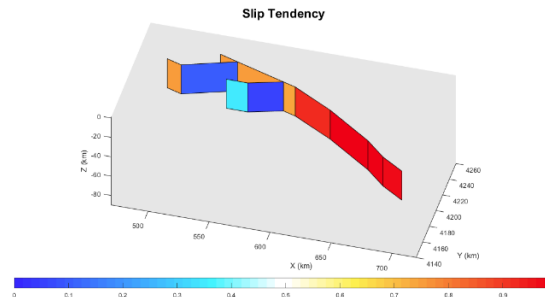


Fig. 5. Three-dimensional geometry of different parts of NTF, which is shown in color between zero and one in terms of the amount of slip tendency with stress extracted from horizontal GPS observations.

4. Conclusions

Slip tendency analysis is a valuable tool in fault reactivation evaluation and seismic hazard assessment as it provides a means of quantifying the slip potential on mapped or suspected faults in a known or inferred stress field. In addition to identifying the faults most prone to reactivation, it's possible to compute and plot synthetic focal mechanisms from the direction and sense of likely slip. This allows compatibility between focal mechanisms and geological structures to be verified. The potential for slip depends on the prevailing stress field, the fault surface orientation and the coefficient of friction. Due to the location of Tabriz metropolis near the NTF, the study of seismic potential in this fault is of particular importance for seismic hazard analysis in this city. In this study, the geometric information of the fault was selected from various sources and assumed to be constant. Then, the regional stress that has the best fit to the study area was collected and also calculated using GPS observables. Then the stress was decomposed using the Cauchy's law in the shear and normal directions of different parts of the fault and

the slip potential for them was calculated by considering the ratio of shear stress to normal. A noticeable point in the results is the slip tendency above 50% for the fault branch passing through the north of Tabriz metropolis, which shows the potential for earthquakes in this region. Different states of regional stress have different results for the slip tendency analysis. In the case of using multiple inverse method to determine the regional stress, the values of slip tendency in the branches of the northwestern part of the fault are above 50% and towards the southeastern part of the fault, its value is reduced to less than 50%. In the case that the regional stress is determined by the iterative joint inversion, in all branches of the fault, the slip tendency is above 50%, such that from the northwest of the fault to the southeast, its value is gradually reduced but does not reach below 50%. In the case of using GPS observables to determine regional stress, in all branches of the fault, the slip tendency is above 50%, so that from the northwest of the fault to the southeast, its value gradually increases and is generally above 50%. A noticeable point in the calculations is the slip tendency above 50% for the fault branch passing through the north of Tabriz metropolis, which shows the potential for rupture and the occurrence of earthquakes in this section. A noticeable point in the results is the slip tendency above 50% for the fault branch passing through the north of Tabriz metropolis, which shows the potential for rupture and the occurrence of earthquakes in this area.

5. References

- Afra M, Moradi A, Pakzad M, "Stress regimes in the northwest of Iran from stress inversion of earthquake focal mechanisms", *Journal of Geodynamics*, 2017, 111, 50-60.
- Byerlee JD, "Friction of rocks", *Pure and Applied Geophysics*, 1978, 102, 453-475.
- Djamour Y, Vernant P, Nankali HR, Tavakoli F, "NW Iran-Eastern Turkey Present-Day Kinematics: Results from the Iranian Permanent Gps Network", *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 307, 1-2, 27-34.
- Hesami K, Jamali F, Tabassi H, "Map of Major Active Faults of Iran" Published by International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Available from: [www. iiees. ac. ir/Seismology/ActiveFault. pdf](http://www.iiees.ac.ir/Seismology/ActiveFault.pdf), 2003.
- Jaeger JC, "Elasticity, Fracture and Flow with Engineering and Geological Applications", first ed. Methuen and Co. Ltd., London, 268 pp, 1969.
- Morris A, Ferrill, DA, Henderson DB, "Slip-tendency analysis and fault reactivation", *Geology*, 1996, 24, 3, 275-278.
- Vavrycuk V, "Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms", *Geophysical Journal International*, 2014, 199, 69-77.
- Yamaji A, "The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data", *Journal of Structural Geology*, 2000, 22, 7, 441-452.