

بررسی تغییرات تنش زمین لرزه دوگانه اهر ورزقان

وحید فرحناک^{۱*}، ایرج جزیریان^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده:

زمین لرزه‌های ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر و ورزقان در ساختارهای البرز-آذربایجان روی داده است که روند شرقی غربی دارند. در این تحقیق مدل‌سازی تحلیلی اکادا برای زمین لرزه اهر-ورزقان انجام شده است. روند عمومی گسل‌های این منطقه نیز شرقی-غربی است. از گسل‌های مهمی که در این ناحیه وجود دارد، میتوان به گسل اهر در ۶ کیلومتری و گسل شمال تبریز در ۴۵ کیلومتری جنوب رومرکز زمین لرزه اهر و ورزقان اشاره کرد. نتایج حاصل نشان می‌دهد، براساس مدل سازی تحلیلی اکادا بیشترین جابجایی افقی در رومرکز زمین لرزه به اندازه ۰.۰۵۵ متر است و جابجایی‌های قائم دارای مقدار بسیار کوچکی بوده که این ناشی از امتدادلغز بودن گسل اهر-ورزقان می‌باشد. همچنین منابع مختلف سازوکار کانونی امتدادلغز زمین لرزه اهر-ورزقان را تایید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: اکادا، سیستم تعیین موقعیت جهانی، زمین لرزه، گسل



۱- مقدمه

آنالیز امکان فعال شدن مجدد لغزش در صفحات ضعیف موجود از قبل در بسیاری از شاخه‌های زمین‌شناسی امری حیاتی است. آنالیز فعال شدن مجدد لغزش در تخمین خطر لرزه‌ای نیز بسیار مهم می‌باشد، چون ابزاری را فراهم می‌آورد که با 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. 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:

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

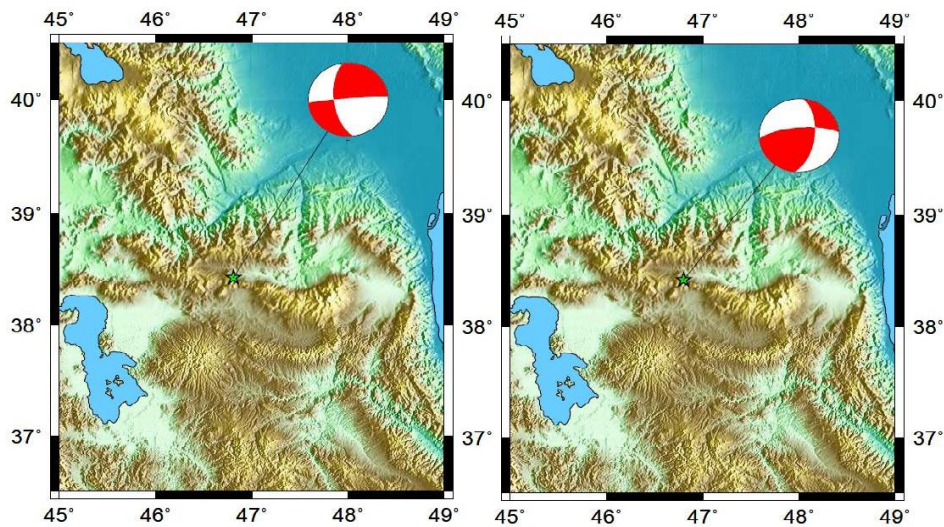
که τ و σ_n به ترتیب تنش‌های برشی و نرمال عمل‌کننده در سطح گسل، μ ضریب اصطکاک لغزشی و p_f فشار مایع منفذی است. رابطه‌ی (۱) فقط در بخش شکننده پوسته که تحت تاثیر فرآیندهای اصطکاکی است قابل اعمال می‌باشد.

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

ایران در منطقه برخورد مایل صفحه‌های زمین‌ساختی عربستان و اورسیا قرار داشته و دچار تغییر شکل داخل قاره‌ای است. این منطقه شاهد زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی متعدد بزرگ و ویرانگری بوده است و کوه‌های البرز در ایران از نظر زمین‌ساختی فعال بوده و تمایل لغزش در محدوده‌ی گسل‌هایی با طول چند ده کیلومتر که این رشته‌کوه‌ها را در بر گرفته‌اند قابل مطالعه است.

در این تحقیق تمایل لغزش در گسل اهر-ورزقان با استفاده از تنش منطقه‌ای محاسبه شده با مشاهدات GPS، هندسه گسل‌های شناخته شده و ضریب اصطکاک به همراه ساز و کار ژرفی زمین‌لرزه‌های محتمل محاسبه می‌گردد.

در بعد از ظهر ۱۱ آگوست ۲۰۱۲ شمالغرب ایران با دو زمین‌لرزه‌ی به لرزه در آمد. اولین لرزه با بزرگای $M_w = ۶.۵$ در ۱۶:۵۲ وقت محلی (۱۲:۵۲ گرینویچ) و ۱۱ دقیقه بعد در ۱۰ کیلومتر غربی (رو مرکز زمین لرزه‌ی اول) زمین لرزه‌ای به بزرگای $M_w = ۶.۳$ اتفاق افتاد. برآوردهای اولی از خسارت‌های جانی ۳۳۰ تن کشته و ۲۶۰۰۰ نفر زخمی می‌باشد، در این زمین لرزه‌ها بیش از ۵۰۰۰۰ نفر بی‌خانمان شدند و از ۵۳۷ روستای واقع در منطقه ۳۶۵ روستا تحت تاثیر قرار گرفته که از این روستاها (بین ۵۰٪ تا ۹۰٪) تخریب سنگین و ۴۶ روستا به طور کامل ویران شدند. شکل ۱ رو مرکز و ساز و کار کانونی دو زمین‌لرزه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: رو مرکز زمین لرزه‌های اهر - ورزقان (از چپ به راست) به همراه ساز و کار کانونی

۲- تنش کولمب

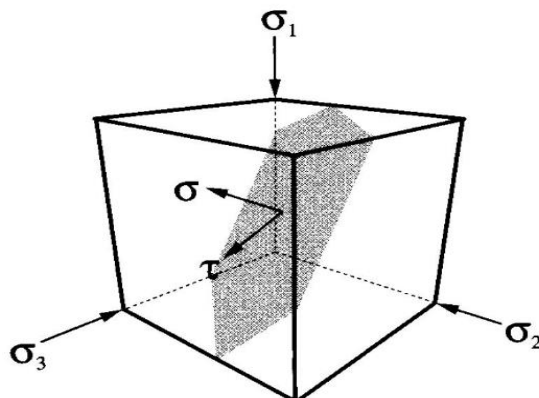
جهت انجام محاسبات بایستی برای گسل مرجع پارامترهای گسیختگی و هندسه گسل، همچنین برای گسل گیرنده که تنش کولمب روی آن محاسبه می‌شود باید هندسه و مکانیزم گسلش مشخص گردد. به طور کلی تنش کولمب اختلاف تنش برشی (τ) با ضریبی (ضریب اصطکاک) از تنش نرمال (σ) به صورت رابطه‌ی ۲ می‌باشد:

$$CFC = \tau - \mu\sigma \quad (2)$$

۳- تمایل لغزش

بر حسب تنش موثر $\sigma = \sigma_n - p_f$ ، که اثر فشار منفذی را در نظر می‌گیرد، شرط بحرانی برای لغزش روی صفحه ضعیف موجود از قبل را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۳ نوشت شکل (۵):

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma} \quad (3)$$



شکل ۲: تنش نرمال σ_n ، تنش برشی τ ، روی یک سطح دلخواه در میدان تنش تعریف شده توسط تنش‌های فشاری اصلی

$$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$$

تمایل لغزش روی یک سطح به صورت نسبت تنش برشی به تنش نرمال روی آن سطح تعریف می‌شود.



$$T_s = \frac{\tau}{\sigma} \quad (۴)$$

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 موثر 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 0.6~0.85 می‌باشد. در یک منطقه با جنس سنگ معین، فرض یک μ مشخص، زاویه بهینه برای لغزش را مشخص می‌کند (رابطه‌ی ۳) که مناسبترین جهت صفحه شکست نسبت به جهت ماکزیمم فشارش است. در این صفحه تمایل لغزش ماکزیمم است، یعنی $T_s = T_s^{max}$.

$$2\theta = \tan^{-1}\left(\frac{1}{\mu}\right) \quad (۵)$$

تمایل لغزش نرمالیزه شده بین صفر و یک تغییر می‌کند که با تقسیم تمایل لغزش به حداکثر مقدار ممکن آن بدست می‌آید $T'_s = T_s/T_s^{max}$. بنابراین تمایش نرمالیزه شده از ۱۰۰ درصد در نزدیکی جهت ایده آل شکست تا صفر درصد در جهت تنش‌های اصلی متغیر است. نسبت اختلاف تنش R به صورت رابطه‌ی ۶ با عملیات جبری بدست می‌آید:

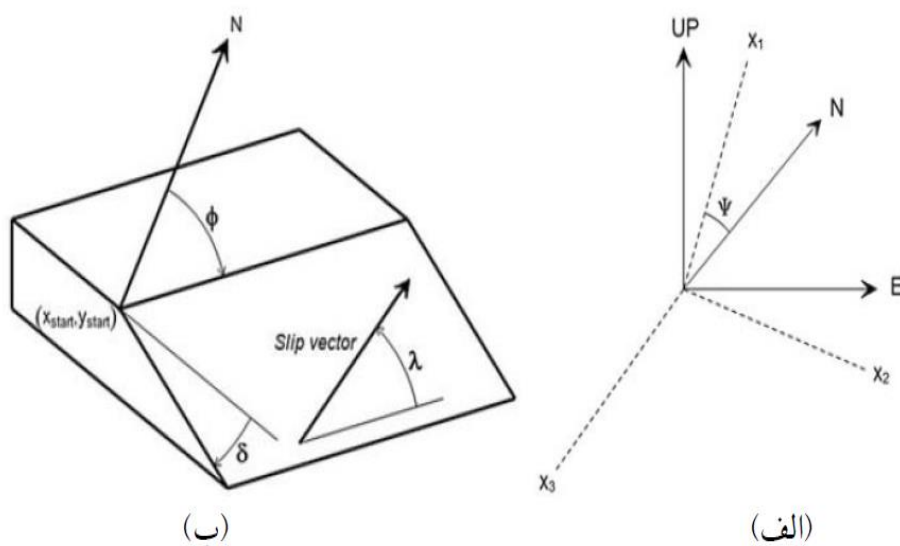
$$1 - R = \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (۶)$$

پارامترهای ورودی مورد نیاز جهت انجام آنالیز تمایل لغزش عبارتند از: (۱) جهت تنش اصلی (۲) نسبت اختلاف تنش R (۳) هندسه سیستم گسلی و (۴) ضریب اصطکاک.

سیستم مختصات راستگرد مشخص کننده جهت تنش‌های اصلی X_1, X_2, X_3 در شکل ۶ الف نشان داده شده است. جهت هر محور اصلی بر حسب آزیموت و شیب تعریف می‌شود (شکل ۶ الف). آزیموت ψ در صفحه افقی بر حسب درجه و به صورت ساعتگرد از مبدا شمال در محدوده $0^\circ \leq \psi \leq 360^\circ$ یا $-180^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$ اندازه گیری می‌شود. شیب δ نیز در صفحه‌ی قائم عمود بر جهت آزیموت در محدوده $0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$ اندازه گیری می‌شود.

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 قرار داد مورد استفاده در زمین شناسی تنش‌های فشاری مثبت هستند، بنابراین تنش‌های اصلی از بیشترین به کمترین فشارش مرتب می‌شوند. استفاده از نسبت اختلاف تنش یعنی R (رابطه ۶) به جای خود مقادیر تنش‌های اصلی برای آنالیز تمایل لغزش کافی است.

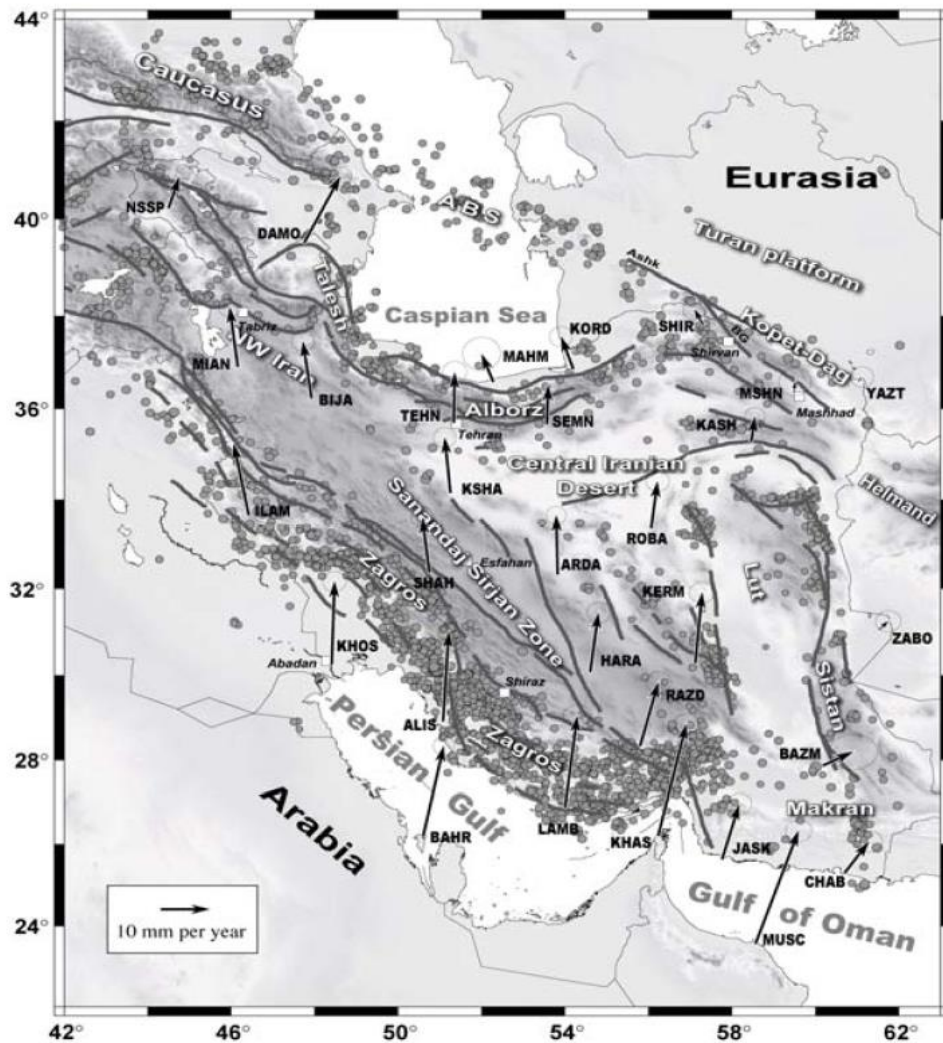
گسل‌های مسطح در نظر گرفته شده و فرص بر این است که با هم اندرکنشی ندارند. جهت آن‌ها با آزیموت و شیب مشخص می‌شود. (شکل ۶ ب).



شکل ۳: الف) آزیموت ψ محورهای اصلی تنش (X_1, X_2, X_3) نسبت به سیستم مرجع ب) هندسه صفحه گسل بر حسب آزیموت φ و شیب δ تعریف می‌شود. ریک λ نشان دهنده لغزش بوده و در محاسبات ساز و کار ژرفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. X_{start}, Y_{start} نیز مختصات کارترین نقطه شروع اثر سطحی گسل است.

۴- منطقه‌ی مورد مطالعه و نتایج

زمین لرزه‌های ورزقان و اهر در ایالت لرزه زمین ساختی البرز-آذربایجان رخ داده است. رشته کوه‌های البرز حاصل برخورد خرد قاره ایران مرکزی در جنوب و بلوک جنوب خزر در شمال است. استان آذربایجان شرقی در شمالغرب ایران به سبب قرار گرفتن در رشته کوه‌های البرز-آذربایجان ناحیه‌ای لرزه خیز به شمار می‌آید. زمین لرزه‌های ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر و ورزقان در ساختارهای البرز-آذربایجان روی داده است که روند شرقی غربی دارند. روند عمومی گسل‌های این منطقه نیز شرقی-غربی است. از گسل‌های مهمی که در این ناحیه وجود دارد، میتوان به گسل اهر در ۶ کیلومتری و گسل شمال تبریز در ۴۵ کیلومتری جنوب رومرکز زمین لرزه‌ی اهر و ورزقان اشاره کرد (شکل ۷).



شکل ۴: زمین لرزه‌های تاریخی و دستگاہی ثبت شده و بردارهای سرعت بدست آمده از آنالیز GPS به همراه گسل‌های ایران [۶]

۴-۱- پارامترهای گسیختگی

در روابط زیر M_w بزرگای گشتاوری زمین لرزه RLD طول گسیختگی زیر سطحی بر حسب کیلومتر، RW عرض گسیختگی در راستای شیب گسل بر حسب کیلومتر و AD متوسط جداشدگی بر حسب متر است. که با استفاده از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\log(\text{RLD}) = -2.57 + 0.62 \times M_w \quad (7)$$

$$\log(\text{RW}) = -0.76 + 0.27 \times M_w \quad (8)$$

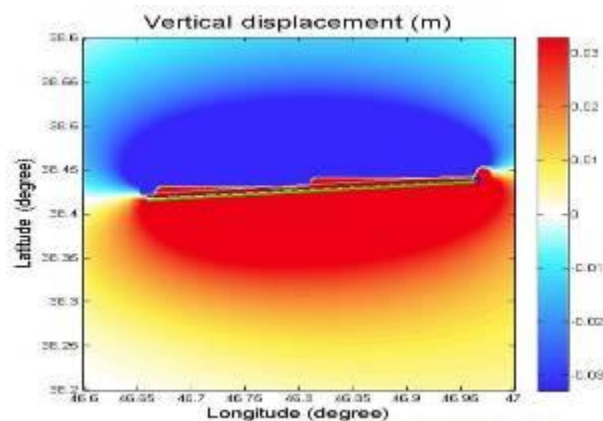
$$\log(\text{AD}) = -1.7 + 1.04 \times M_w \quad (9)$$

همچنین طول خط گسیختگی از ۳۰۰۰ پس لرزه (تا آذر ماه ۱۳۹۱) با استفاده از رگرسیون کمترین مربعات برآورد شده است که با طول گسیختگی برآورد شده با روابط تجربی سازگار می‌باشد.

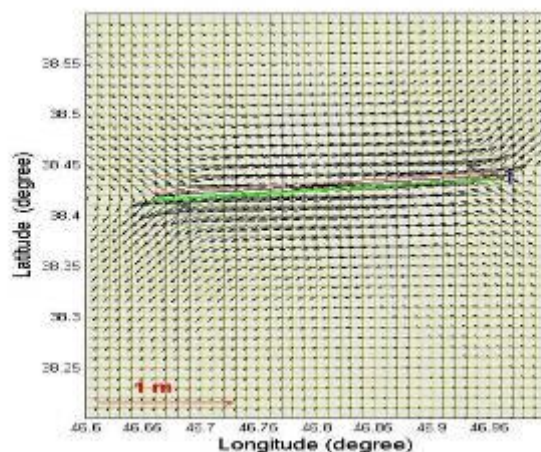


۴-۲- مدل‌سازی میدان جابجایی سه بعدی و تغییر تنش کولمب

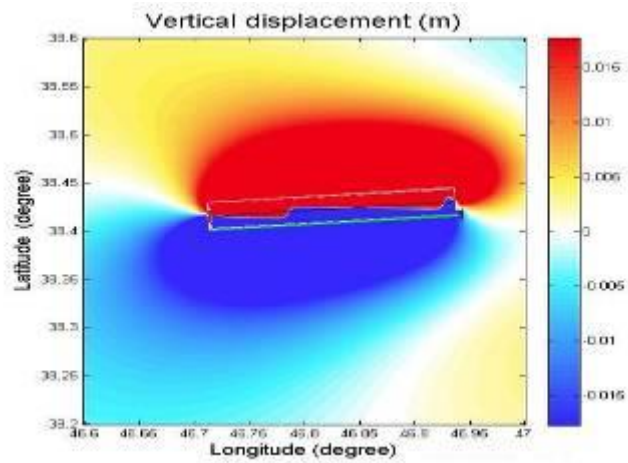
مدل سازی به عنوان یک ابزار با توانایی‌های محاسباتی گسترده و با هزینه کم به عنوان یکی از رایج ترین و پذیرفته‌ترین ابزار تحلیل در آمده است. جهت مدل‌سازی میدان جابجایی سه بعدی مربوط به این زمین‌لرزه از مدل تحلیلی اکادا استفاده شده است [1],[2],[3]. مدل اکادا که بر پایه‌ی نظریه جداشدگی استوار است، قادر است تا به توضیح آن قسمت از نظریه الاستیسیته که مرتبط با میدان‌های جابجایی ناپیوسته است بپردازد. بر پایه این مدل، جابه‌جایی حاصل از وقوع حرکت در یک گسل امتداد لغز و یا شیب لغز را می‌توان با استفاده از داده‌های در دسترس مربوط به مشخصات گسل مورد نظر به دست آورد و نتایج حاصل را تحت عنوان تغییر شکل حاصل از زمین لرزه ارائه کرد [4]. به کمک مدل اکادا می‌توان جابجایی را در هر عمقی نسبت به سطح زمین پیدا کرد. جابجایی افقی و قائم بعد از زمین لرزه $M_w=6.5$ اهر در شکل‌های ۵، ۷ و زمین لرزه‌ی ورزقان در شکل‌های ۶، ۸ نشان داده شده است. تنش کولمب حاصل از زمین لرزه‌های اهر-ورزقان در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده است.



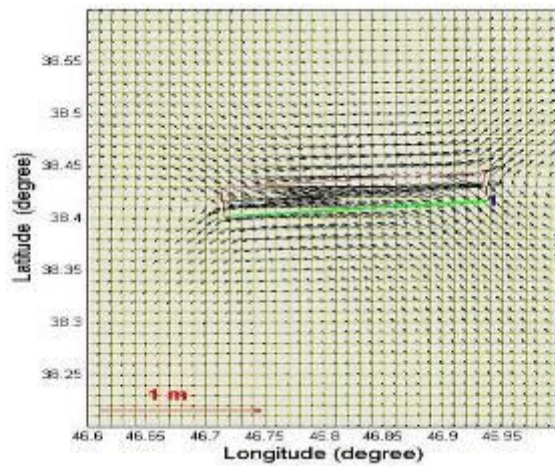
شکل ۵: جابجایی قائم بر حسب متر پس از زمین لرزه $M_w=6.5$ اهر، خط سیاه طول گسیختگی برآورد شده براساس رگرسیون کمترین مربعات



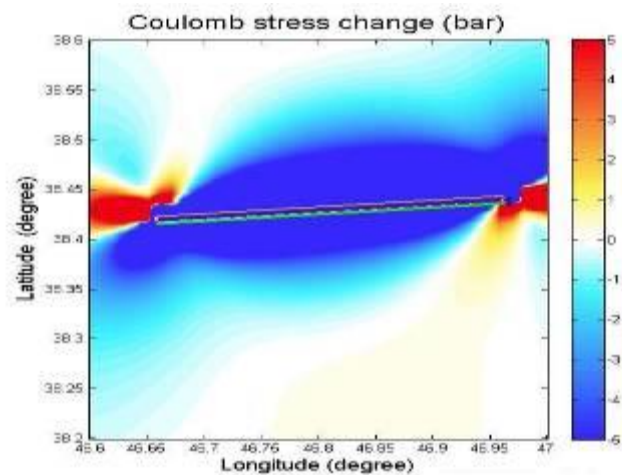
شکل ۶: جابجایی افقی بر حسب متر پس از زمین لرزه $M_w=6.5$ اهر



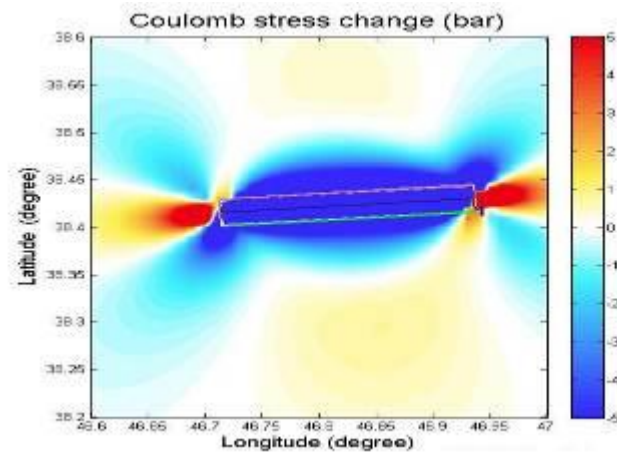
شکل ۷: جابجایی قائم بر حسب متر پس از زمین لرزه $M_w=6.3$ ورزقان، خط سیاه طول گسیختگی برآورد شده براساس رگرسین کمترین مربعات



شکل ۸: جابجایی افقی بر حسب متر پس از زمین لرزه $M_w=6.3$ ورزقان



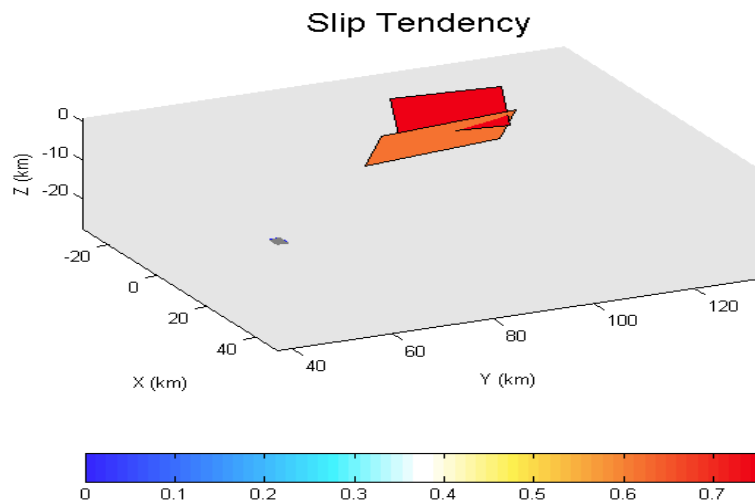
شکل ۹: تغییرات تنش کولمب بعد از زمین لرزه ی اهر



شکل ۱۰: تغییرات تنش کولمب بعد از زمین لرزه‌ی ورزقان

برای محاسبه‌ی تمایل لغزش نخست با استفاده از مشاهدات GPS مقادیر اصلی تنسور کرنش که بهترین انطباق را به منطقه مورد مطالعه دارد، محاسبه گردید. سپس با استفاده از قانون هوک تعمیم یافته مولفه‌های اصلی تنش محاسبه گردید. در ادامه مشخصات هندسی گسل اهر ورزقان با استفاده از مقالات و نقشه‌های زمین شناسی استخراج شد. با استفاده از قانون کوشی مولفه‌های نرمال و برشی منطقه‌ای در صفحه تک تک گسل‌ها محاسبه شد و با استفاده از نسبت تنش برشی به تنش نرمال مقدار تمایل لغزشی برای هر گسل محاسبه گردید.

نتیجه‌ی خروجی تمایل لغزش به صورت شکل ۱۱ آورده شده است.



شکل ۱۱: آنالیز تمایل لغزش گسل اهر-ورزقان



۵- نتیجه گیری

با استفاده از مدل‌های تحلیلی تعیین تغییر شکل با توجه به هندسه گسل، فیزیک زمین، میزان و نوع لغزش گسل در اثر زمین لرزه امکان محاسبه میدان تغییر شکل پوسته زمین با دقت مناسب فراهم می‌باشد. بدیهی است در این روش هر چه هندسه گسل را به صورت دقیق‌تری بدانیم، مدل سازی بهتری انجام می‌گیرد. مقدار ضریب اصطکاک در مدلسازی توزیع تنش بین ۰.۲ تا ۰.۸ قابل تغییر است، در صورتی که نتایج با $\mu=0.4$ ، نسبت پواسن برابر ۰.۲۵ و مدول برشی پاسکال محاسبه شده‌اند. از ویژگی‌های روش مدل سازی تحلیلی می‌توان به بحث پیش بینی خطر زمین لرزه در مطالعات مهندسی اشاره نمود. به طوریکه با توجه به طول و نوع گسل موجود در منطقه می‌توان بزرگی زمین لرزه‌هایی که امکان وقوع دارند را پیش بینی نمود و سپس با استفاده از مدل‌های تجربی که رابطه میان بزرگی زمین لرزه و میزان لغزش گسل را تعیین می‌کنند، اقدام به مدل سازی میدان جابجایی احتمالی در اثر لغزش گسل در منطقه نمود. آنالیز تمایل لغزش برای شبکه‌ای از گسل‌ها قبل از محاسبات تغییرات تنش کولمب به شناسایی گسل‌های مستعد برای زمین لرزه-های بزرگ بعدی کمک شایانی خواهد کرد. با استفاده از جهت لغزش پیش بینی شده و هندسه معلوم گسل مورد نظر امکان محاسبه و ترسیم ساز و کار ژرفی نیز وجود دارد. ساز و کار ژرفی پیش بینی شده ابزار مناسبی جهت بررسی سازگاری مابین سازو کار ژرفی مرتبط با زمین لرزه‌ها و گسل‌های مربوط به آن‌ها است. برای زمین لرزه‌ی اهر جابجایی افقی و قائم ۰.۵ و ۰.۰۱ متر و برای زمین لرزه‌ی ورزقان جابجایی افقی و قائم ۰.۴۸ و ۰.۰۱ متر برآورد شد که با نتایج حاصل از مشاهدات GPS سازگاری دارد. طبق محاسبات انجام شده در روزهای ابتدای وقوع زمین لرزه گسل اهر ورزقان دارای تمایل لغزش بالایی است.

مراجع

- [1] King GCP, Stein RS, Line J. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. Bull. Seismol. Soc. Amer, 84: 935-953, 1997.
- [2] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. Seismol. Soc. Am, 82: 1018-1040, 1992.
- [3] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space. Bull. seism.Soc. Am, 75: 1135-1154, 1985.
- [4] Weatherley D. Coulomb stress changes due to Queensland earthquakes and the implications for seismic risk assessment. Earthquake Engineering in Australia, Canberra 24-26 November 2006.
- [5] Wells LDonald, Coppersmith J. Kevin. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the Seismological Society of America, 84: 974-1002, 1994).

[۶] گزارش اولیه‌ی سازمان نقشه برداری کشور از زلزله اهر-ورزقان (براساس شواهد ژئودتیکی)، سایت سازمان نقشه برداری کشور، www.ncc.org.ir.

[۷] راست بود، اصغر و وثوقی، بهزاد. افزایش توزیع نرخ لغزش مابین گسل‌های فعال بخش جنوبی البرز مرکزی با لحاظ اندرکنش مکانیکی مابین گسل‌ها، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۰.

[۸] نوری، س. و وثوقی، ب. و ابوالقاسم، ا. م. ۱۳۸۸، مدل سازی میدان جا به جایی هم لرزه یک گسل و تعیین حساسیت پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل به میدان جابه جایی آن، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۵، ۱، ۵۹-۷۳.



[۹] راست بود، اصغر، و وثوقی، بهزاد. بررسی تغییر شکل بین لرزه ای در ناحیه برخورد صفحه های زمین ساختی عربستان و اوراسیا در منطقه خاور میانه با استفاده از یک مدل تحلیلی. دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ۱۳۸۹.

[۱۰] بهیاری، مهدی. و محجل، محمد مهدی. نرخ لغزش کلی گسل تبریز و رابطه آن با تئوری تکنونیک فراری برای شمال غرب ایران. بیست و ششمین گردهمایی علوم زمین، ۱۳۸۶.

[۱۱] راست بود، اصغر، و وثوقی، بهزاد، طباطبایی، هانیه، آنالیز خطر لرزه خیزی گسل های فعال شمال تهران با محاسبه کمیت تمایل لغزش بر اساس تنش منطقه ای مستخرج از مشاهدات GPS، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.



Evaluation of stresses Ahar-Varzaghan double earthquakes

Farahnak, V. *¹, Jazirian, I. ²

1- Ms.c student of geodesy in Department of Geomatics, College of Engineering, Islamic Azad University of Sharud

2- Assistant professor in Department of Geomatics, College of Engineering, University of KNTU

Abstract

Ahar and Varzaghan earthquake occurred in Azerbaijan in Alborz structures which are east-west trend. In this research, analytical modeling for earthquake Akada Ahar-Varzaghan done. The area is east-west trending faults. There is a major fault in this area, it is the fault of Ahar and Tabriz fault at 6 km from the earthquake epicenter at 45 km southwest of Ahar and Varzaghan noted. The results show that, based on analytical modeling Akada maximum horizontal displacements in the epicentral the size of 0.055 m and has a very small vertical displacements due to the strike of the fault is Ahar-Varzaghan. The strike-slip earthquake focal mechanisms of Ahar-Varzaghan sources confirmed

Keywords: Okada, Global Positioning System, Earthquakes, faults