

شبیه‌سازی عددی رفتار اصطکاکی گسل امتدادلغز شمال تبریز با استفاده از روش المان محدود

محمود یزدانی^{۱*}، محمد ساسانی^۲

۱- استادیار گروه خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- کارشناس ارشد، گروه خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

myazdani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۷/۰۵

چکیده- در این مقاله، با استفاده از روش المان محدود، مدلی عددی از گسل امتدادلغز شمال تبریز ارائه شده است. جهت بررسی رفتار اصطکاکی گسل، مدل رفتاری ضعیف‌شدگی با لغزش^۱ به گسل اعمال می‌شود. این مدل بر مبنای مکانیزم ناپایداری چسب-لغز رفتار می‌کند. مدلسازی گسل بر مبنای روابط المان محدود و با نرم‌افزار ABAQUS به صورت سه‌بعدی انجام یافته که در آن گسل به صورت صفحه‌ای از تماس دو ناحیه الاستیک تشکیل شده است. نتایج مدلسازی با معیارهای زمین‌شناسی مانند سرعت پوسته و نرخ جابه‌جایی در صفحه گسل مقایسه گردیده که همگرایی مناسبی بین نتایج و معیارهای صحت‌سنجی مشاهده می‌شود. برای اصطکاک گسل، نتایج با دو ضریب اصطکاکی مختلف با نرخ جابه‌جایی ایستگاه‌های GPS مقایسه شده که همگرایی در ضریب اصطکاک استاتیکی ۰/۱ مشهودتر است.

واژگان کلیدی: مدلسازی سه‌بعدی گسل، المان محدود، چسب-لغز، گسل شمال تبریز

۱- مقدمه

قابل توجهی در سده‌های اخیر در این شهر گزارش نشده است، در حالی که مطالعات ژئودزی بر مقدار قابل توجهی دگرشکلی امتدادلغز در طرفین گسل تبریز اشاره دارد [۱].

گسل‌های امتداد لغز با طول بیش از ۱۰۰ کیلومتر، که در بسیاری از مناطق فعال قاره‌ای مشاهده و گزارش شده‌اند، توانایی تولید زمین‌لرزه‌های بزرگ را دارند.

۲- فعالیت‌های انجام‌شده در زمینه مدلسازی گسل

در سال ۱۹۷۹، نخستین مدلسازی‌های عددی گسل بر مبنای روش اجزاء محدود توسط ریچاردسون^۲ به صورت

در شمال باختر ایران، وجود حرکت‌های برشی سبب ایجاد گسل‌های امتدادلغز شده است که گسل شمال تبریز یکی از نمونه‌های بارز و بسیار مهم آن می‌باشد. شهر تبریز بارها در طی تاریخ در اثر زلزله ویران شده که آخرین زمین‌لرزه مخرب پیرامون آن، به بیش از ۲۰۰ سال پیش باز می‌گردد. زمین‌لرزه

1- Slip weakening

2- Richardson

دوبعدی تهیه شد. با توجه به نیاز مدل‌سازی عددی به پارامترهای مناسب ورودی، مطالعات صحرایی نیز بر روی گسل‌ها توسعه یافته و گسل‌هایی که بر روی آن‌ها مطالعات گسترده صحرایی صورت گرفته بود مورد مطالعه عددی قرار گرفتند. در همین راستا، سازمان‌هایی شکل گرفتند که هدف آن‌ها مطالعات محلی زمین در حوالی گسل بود. از جمله مؤسسه بین‌المللی حفاری عمیق علمی^۱ (ICDP) است که تاکنون پروژه‌هایی در مناطق لرزه‌خیز از جمله گسل‌های سن‌آندریاس، چلونگپو^۲، شمال آناتولی^۳، آلپاین^۴ و ... را انجام داده است. در سال ۲۰۰۱، کایا و ونگ [۲] مدلی دوبعدی با استفاده از روش اجزاء محدود و نرم‌افزار ABAQUS از گسل سن‌آندریاس ارائه دادند. این مدل یکی از نخستین مدل‌هایی بود که پوسته را به دو بخش الاستیک و ویسکوالاستیک تقسیم کرد. در سال ۲۰۰۲، جان چارلز لینچ [۳] رساله دکترای خود را با موضوع مدل‌های المان محدود از چرخه زمین‌لرزه در نواحی گسل‌های امتدادلغز به انجام رسانید. در این مورد هم قطعه‌ای از گسل سن-آندریاس موضوع کار مدل‌سازی بود. در همان سال، هیراها را با نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS مدلی دوبعدی از منطقه فرونشست در شمال ژاپن تهیه کرد. در این مدل، از دو قانون اصطکاکی ساده و قانون اصطکاکی نرخ و حالت^۵ استفاده شده و نتایج مقایسه شدند [۴]. در سال‌های اخیر نیز موضوع مدل‌سازی عددی گسل مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. از جمله این افراد می‌توان به ژینگ و همکاران از دانشگاه کوینزلند^۶ اشاره کرد که او بر روی روابط اجزاء محدود برای تعریف قوانین

اصطکاکی کار می‌کند [۵]. مسترلارک و هوگر از سال ۲۰۰۳ بر روی مدل‌سازی مناطق فرونشست با استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار ABAQUS، به صورت سه بعدی، کار می‌کنند و در سال ۲۰۰۸ نیز روی مدل‌سازی زلزله سوماترای سال ۲۰۰۴ فعالیت داشته‌اند [۶]. تمپلتون نیز رساله دکترای خود را با کار روی اثرات تغییر شکل‌های غیرالاستیک خارج از صفحه گسل بر روی دینامیک گسلش در دانشگاه هاروارد^۷ به انجام رساند. این تحقیق روی گسل سن‌گابریل^۸ به روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام یافته است. تحلیل به صورت دوبعدی بوده و قانون اصطکاکی ضعیف‌شدگی با لغزش بر صفحه گسل وارد می‌شود [۷]. از سال ۲۰۰۸، در مرکز زلزله-شناسی جنوب کالیفرنیا، با همکاری سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) گروهی تشکیل شد که با ارائه مدل‌های تئوری از گسل‌های مختلف، به همراه پارامترهای ورودی مشخص، قابلیت نرم‌افزارهای مختلف در مدل‌سازی گسل در شرایط یکسان را مقایسه می‌کند.

در ایران، در سال ۱۳۸۶ شهرکی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS و روش المان محدود مدلی سه‌بعدی از گسل شمال تهران، جهت بررسی تغییر شکل پوسته در سطح زمین، تهیه کرد. این مدل دارای طول ۹۰۰ و عرض ۲۲۵ کیلومتر می‌باشد. عمق مدل ۳۶۰ کیلومتر است که ۳۰ کیلومتر فوقانی آن الاستیک و مابقی ویسکوالاستیک است [۸]. در سال ۱۳۸۸، کلانتر و یزدانی با استفاده از نرم‌افزار UDEC و روش اجزاء مجزا بخشی از صفحه فلات ایران را (جنوب شرق) به صورت دوبعدی مدل کرد. تحلیل وی شبه‌استاتیک بوده و محیط به صورت همگن و الاستیک در نظر گرفته شد [۹]. تاکنون مدل‌سازی عددی گسل شمال

1- International Continental Scientific Drilling Program

2- Chelungpu fault

3- North Anatolian fault

4- Alpine fault

5- Rate and state friction law

6- University of Queensland

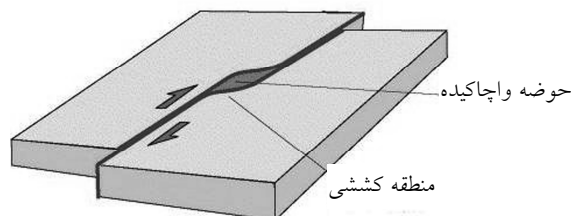
7- Harvard University

8- San Gabriel Fault

تبریز صورت نگرفته است و تنها مطالعات زمین‌شناسی و رفتارسنجی روی این گسل انجام شده است.

۳- لرزه زمین ساخت تبریز

سامانه گسلی شمال تبریز بزرگ‌ترین قطعه امتدادلغز منطقه شمال غرب ایران است. در تمامی مطالعات صورت گرفته به حرکت امتدادلغز راست گرد گسل شمال تبریز در اثر حرکت کلی موجود در منطقه که همان حرکت رو به سمت شمال صفحه عربی است، اشاره شده است. علاوه بر داده‌های حاصل از مطالعات ژئودزی، پدیده‌های ژئومورفولوژیکی نیز بر حرکت امتدادلغز این گسل دلالت دارند [۱۰]. نمونه‌ای از این پدیده‌ها وجود آبگیرهای فرونشستی است. این آبگیرها که در شمار حوضه‌های وچاکیده^۱ قرار می‌گیرند دشت‌هایی هستند که در اثر ایجاد نشست در راستای گسل‌های امتدادلغز تراکشی به وجود می‌آیند و گویای انبساط محلی همراه با حرکت امتدادلغز هستند (شکل ۱).



شکل (۱) نحوه پدید آمدن آبگیرها در گسل امتدادلغز [۱۱]

۴- مبانی مدل سازی

در مطالعه حاضر، بررسی خصوصیات رفتاری گسل شمال تبریز از طریق مدل‌سازی پوسته زمین به صورت سه‌بعدی انجام می‌پذیرد. با توجه به اطلاعات ژئوفیزیکی و همچنین رفتار امتداد لغز گسل، صفحات گسل به صورت قائم در نظر گرفته شده است.

روش مورد استفاده برای مدل‌سازی، روش اجزاء محدود بوده و از نرم‌افزار ABAQUS، که بر مبنای این روش توسعه یافته، استفاده شده است [۱۲].

۴-۱- اجزای مدل

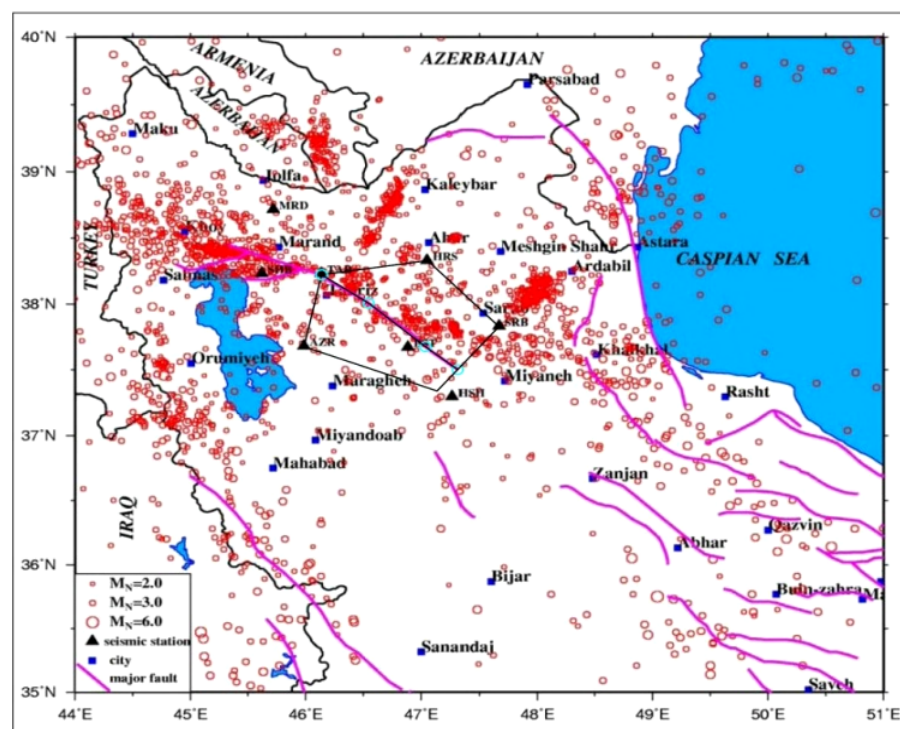
مدل شامل صفحات پوسته است که از تماس صفحات، گسل شمال تبریز تشکیل می‌گردد. در این مدل، تنها بخش جامد فوقانی پوسته مدل شده و از انحنای پوسته و اثر توپوگرافی صرف‌نظر شده است. گسل در قالب المان‌های تماسی دوبعدی قائم در مدل‌سازی وارد شده است.

۴-۲- هندسه مدل

در شکل ۲، محدوده مدل بر روی نقشه نشان داده شده است. ناحیه مورد مطالعه طول جغرافیایی ۴۵ تا ۴۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ تا ۳۹ درجه شمالی را شامل می‌شود. مساحت ناحیه در نظر گرفته شده در حدود ۱۴۵۴۴ کیلومتر مربع و محیط آن در حدود ۴۶۵ کیلومتر است. مختصات نقاط پیرامونی مدل در سیستم مختصاتی طول و عرض جغرافیایی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱) مختصات نقاط پیرامونی مدل

نقطه	سیستم مختصات جغرافیایی	
	طول جغرافیایی شرقی (درجه)	عرض جغرافیایی شمالی (درجه)
A	۴۶/۱۳	۳۸/۲۳
B	۴۵/۹۸	۳۷/۶۸
C	۴۷/۱۳	۳۷/۳۴
D	۴۷/۶۷	۳۷/۸۳
E	۴۷/۰۵	۳۸/۳۳



شکل (۲) محدوده مدل‌سازی شده گسل شمال تبریز

جدول (۲) مختصات نقاط انتخابی روی گسل

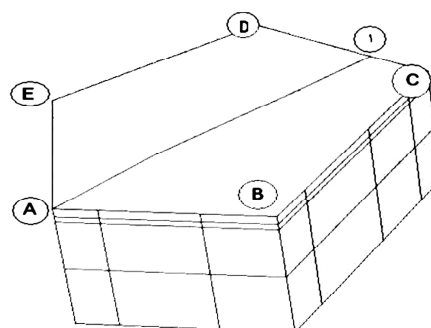
طول (کیلومتر)	نقطه	سیستم مختصات جغرافیایی	
		عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)
۱۳۵	۱	۳۷/۵	۴۷/۳
	۲	۳۷/۶۸	۴۷/۰۲
	۳	۳۸/۰۱	۴۶/۵۳
	۴	۳۸/۲۳	۴۶/۱۳

در شکل ۳، هندسه مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار ABAQUS، شامل لایه‌بندی عمقی مدل و رخمون سطحی گسل شمال تبریز قابل مشاهده است.

۳-۴- مش‌بندی

در مش‌بندی مدل گسل شمال تبریز، با توجه به هندسه مدل و محدودیت‌های برنامه، از المان‌های چهاروجهی^۱ با

بعد سوم (عمق) با توجه به مطالعات ژئوفیزیکی انجام‌شده [۱۳]، ۴۵ کیلومتر در نظر گرفته شده است که این عمق به چهار لایه با مشخصات مصالح مختلف تقسیم شده است. در مدل‌سازی، گسل به سه قطعه تقسیم شده که در جدول ۲ طول گسل و مختصات نقاط انتخاب‌شده بر روی گسل ارائه شده است. تقسیم‌بندی گسل به سه قطعه صرفاً جهت انطباق هندسه گسل در مدل با واقعیت بوده و این سه قطعه فقط از لحاظ هندسی با هم متفاوت‌اند.



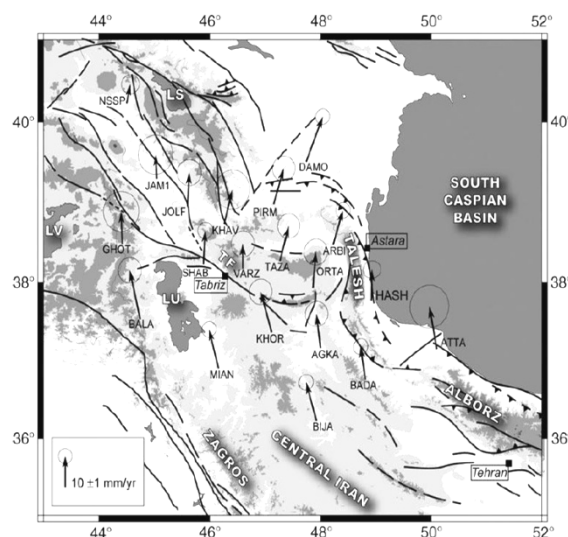
شکل (۳) هندسه مدل سه‌بعدی گسل شمال تبریز در ABAQUS

1- Tetrahedron

که در سطوح مختلف بر روی پوسته اعمال می‌شوند، در مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. در این بخش، سرعت حرکت پوسته بر روی مرزهای مدل مورد مطالعه، بر اساس مطالعات ژئودزی انجام گرفته بر روی تغییر شکل‌های پوسته زمین در شمال غرب ایران، تعیین شده است.

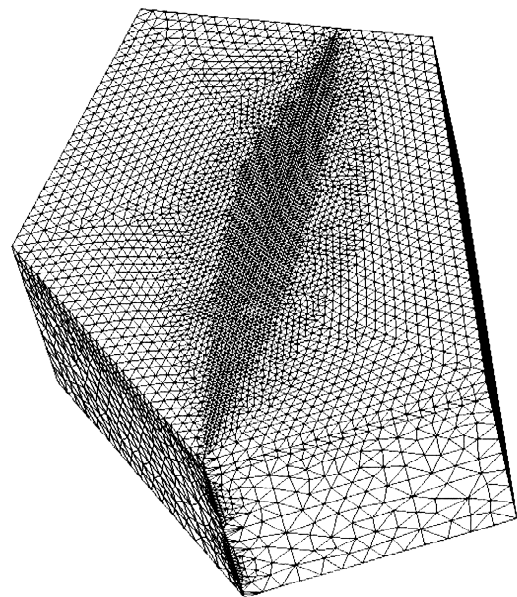
۴-۴-۱- تغییر شکل پوسته ایران

به منظور مطالعه توزیع تغییر شکل در شمال غرب پوسته ایران، گروه‌های تحقیقاتی ایران و فرانسه (بخش ژئودزی سازمان ملی نقشه‌برداری ایران و بخش دینامیک پوسته دانشگاه مونتیپولیه فرانسه) مطالعه گسترده‌ای بر مبنای سامانه موقعیت‌یاب جهانی^۱ را در ایران انجام داده‌اند. در این مطالعه، شبکه‌ای مشتمل بر ۱۹ ایستگاه در محدوده شمال غرب ایران با توزیع همگن نصب شده است (شکل ۵) [۱۴]. در جدول ۳، مختصات هر یک از این ایستگاه‌ها ارائه شده است. ایستگاه‌های KHOR و VARZ داخل محدوده مدل‌سازی قرار دارند.



شکل (۵) موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری تغییر شکل پوسته در شمال غرب ایران و بردارهای سرعت مربوطه [۱۴]

چهار گره استفاده شده است. به منظور کاهش زمان تحلیل و در عین حال افزایش دقت جواب‌ها، ابعاد المان‌ها متغیر در نظر گرفته شده‌اند. بدین ترتیب که در نزدیکی گسل به منظور دقت بالا ابعاد کوچک بوده (در حدود صد متر)، و با فاصله گرفتن از گسل و نزدیک شدن به مرزها، به تدریج ابعاد بزرگ‌تر شده و در مرزها ابعاد المان‌ها در حدود پنج کیلومتر است (شکل ۴).



شکل (۴) مش‌بندی مدل گسل شمال تبریز

نحوه المان‌بندی با چندین بار تغییرات در اندازه المان‌ها و کنترل نتایج حاصله تعیین شده است و سعی شده است هم دقت جواب‌ها مدنظر قرار گیرد و هم زمان صرف‌شده برای تحلیل مدل بهینه شود.

۴-۴-۲- شرایط مرزی

در مطالعه حاضر، به منظور شبیه‌سازی وضعیت تکتونیکی فلات ایران تحت رژیم ژئودینامیکی در عهد حاضر، شرایط مرزی سرعت تغییر شکل در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن این شرایط مرزی، اثرات کلیه نیروهای تکتونیکی،

1- Global Positioning System (GPS)

جدول (۳) مختصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری تغییر شکل پوسته

ایستگاه	سیستم مختصات جغرافیایی	
	طول جغرافیایی شرقی (درجه)	عرض جغرافیایی شمالی (درجه)
AGKA	۴۸/۰۰۵	۳۷/۱۶۹
ARBI	۴۸/۲۳۱	۳۸/۴۷۷
ATTA	۵۰/۱۰۲	۳۷/۱۵۶
BADA	۴۸/۸۱۴	۳۶/۷۶۴
BALA	۴۴/۷۵	۳۷/۵۳۴
BIJA	۴۷/۹۳	۳۶/۲۳۲
DAMO	۴۷/۷۴۴	۳۹/۵۱۳
GHOT	۴۴/۴۲۸	۳۸/۴۸۹
HASH	۴۸/۹۹۲	۳۷/۷۶۴
JAM1	۴۵/۰۴۹	۳۹/۲۹۷
JOLF	۴۵/۶۰۵	۳۸/۹۵۲
KHAV	۴۲/۲۶۵	۳۸/۷۳۶
KHOR	۴۷/۱۲۳	۳۷/۳۶۸
MIAN	۴۶/۱۶۲	۳۶/۹۰۸
ORTA	۴۷/۸۶۹	۳۷/۹۲۹
PIRM	۴۷/۱۵۷	۳۸/۹۸۴
SHAB	۴۵/۸۸۷	۳۸/۲۲۸
TAZA	۴۷/۲۷۱	۳۸/۲۷
VARZ	۴۶/۶۰۳	۳۸/۱۸۷

یک از مؤلفه‌های شمالی و شرقی ترسیم شده است (شکل ۶). سپس پروفیل سرعت در امتداد مرزها برای هر یک از مؤلفه‌های شمالی و شرقی به صورت مجزا تعیین می‌شود.

جدول (۴) مقادیر سرعت پوسته در ایستگاه‌های اندازه‌گیری تغییر

شکل پوسته بر مبنای ثابت اوراسیا

سایت	مؤلفه شرقی سرعت (E) (میلی متر در سال)	مؤلفه شمالی سرعت (N) (میلی متر در سال)
AGKA	-۱/۵	۱۰/۸
ARBI	۳/۵	۱۱
ATTA	-۲/۷	۱۳/۵
BADA	-۱/۷	۱۰/۵
BALA	-۳/۸	۱۵/۶
BIJA	-۳/۷	۱۲/۳
DAMO	۶	۱۴/۳
GHOT	-۰/۵	۱۰/۳
HASH	۰/۲	۱۰/۱
JAM1	-۰/۵	۷/۸
JOLF	۰/۶	۱۰/۹
KHAV	۳	۱۱
KHOR	-۴	۱۳
MIAN	-۳/۵	۱۲/۵
ORTA	۱	۱۱/۵
PIRM	۳/۷	۱۱/۳
SHAB	۰/۷	۱۰/۹
TAZA	۳/۲	۱۱/۲
VARZ	-۰/۱	۷/۸

۴-۵- پارامترهای مدل‌های رفتاری اجزای مدل

۴-۵-۱- پوسته زمین

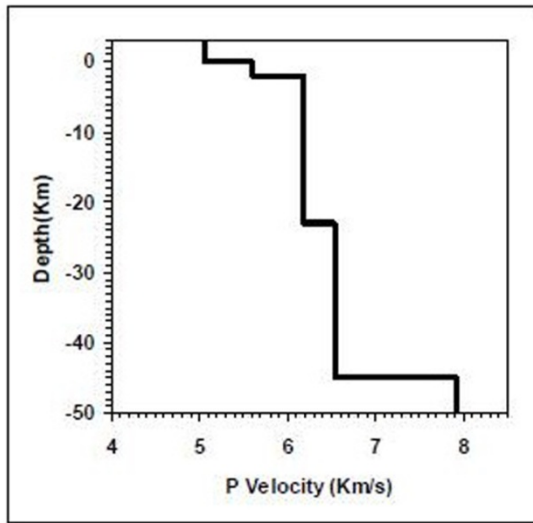
مدل رفتاری پوسته زمین الاستیک در نظر گرفته شده است. در مورد جنس پوسته در منطقه مورد نظر، تنها اطلاعات سرعت امواج فشاری و نسبت آن‌ها با سرعت امواج برشی و عمق لایه‌ها موجود است (شکل ۷). در واقع تقسیم مدل به چهار

شبکه نصب شده، سه مرتبه در سپتامبر ۲۰۰۲، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعات هر یک از ایستگاه‌ها حداقل برای مدت ۴۸ ساعت مورد مطالعه قرار گرفته است. مقادیر سرعت پوسته در هر یک از ایستگاه‌ها بر مبنای ثابت اوراسیا محاسبه شده و نتایج به‌دست آمده از این مطالعات در جدول ۴ ارائه شده است [۱۴].

۴-۴-۲- تعیین شرایط مرزی

در ابتدا، با استفاده از داده‌های موجود و نرم‌افزار SURFER، خطوط هم‌سرعت در محدوده شمال غرب ایران برای هر

$$\rho \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = 1.6612 * V_p - 0.4721 V_p^2 + 0.0671 V_p^3 - 0.0043 V_p^4 + 0.000106 V_p^5 \quad (2)$$



شکل (۷) سرعت موج فشاری در اعماق مختلف در محدوده گسل شمال تبریز [۵]

جدول (۵) مقادیر مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و دانسیته محاسبه شده در عمق‌های مختلف

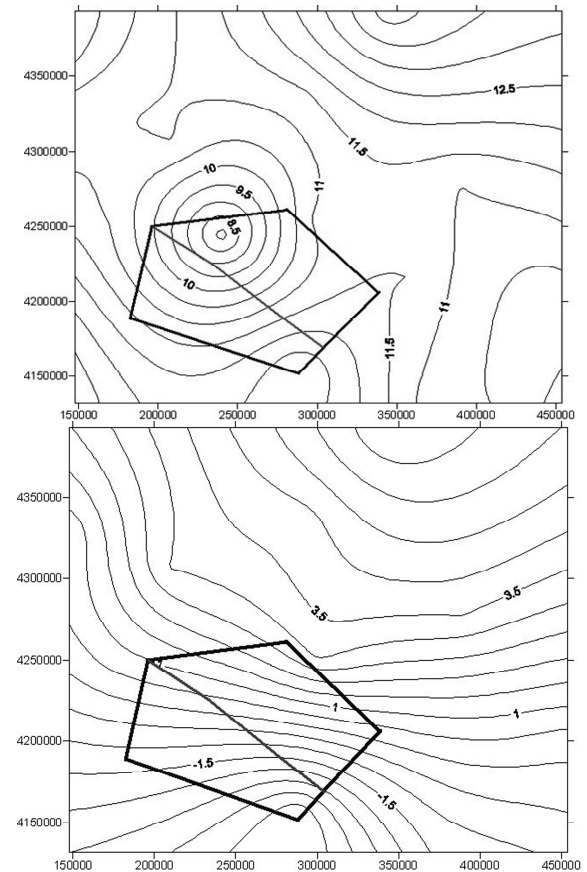
عمق (کیلومتر)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	دانسیته (Kg/m ³)
۰ تا ۳	۴۸۰۰	۲۷۱۲	۴۷	۰/۲۷	۲۵۰۵
۳ تا ۵	۵۴۰۰	۳۰۵۰	۶۱	۰/۲۷	۲۶۰۰
۵ تا ۲۳	۶۱۰۰	۳۴۴۶	۸۲	۰/۲۷	۲۷۳۸
۲۳ تا ۴۵	۶۶۰۰	۳۷۲۹	۱۰۱	۰/۲۷	۲۸۵۹

۴-۵-۲- گسل

روابط رفتاری مختلفی توسط محققان برای بیان اصطکاک در سنگ ارائه شده است که عبارت‌اند از: قانون کولمب، قانون بایرلی، قانون ضعیف‌شدگی با لغزش و قانون اصطکاکی نرخ و حالت.

در این مطالعه، مدل رفتاری گسل مدل ضعیف‌شدگی با لغزش در نظر گرفته شده است. طی مرور زمان این قانون به شکل‌های مختلفی بیان شده است [۱۶] که در

لایه با خواص مقاومتی و ضخامت‌های مختلف بر مبنای همین شکل صورت گرفته است. مقادیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون از روابط زیر محاسبه شده است:



شکل (۶) خطوط هم‌سرعت مربوط به سرعت تغییر شکل پوسته در شمال غرب ایران (بالا: مولفه شمالی سرعت؛ پایین: مولفه شرقی سرعت)

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad ; \quad V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad ; \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

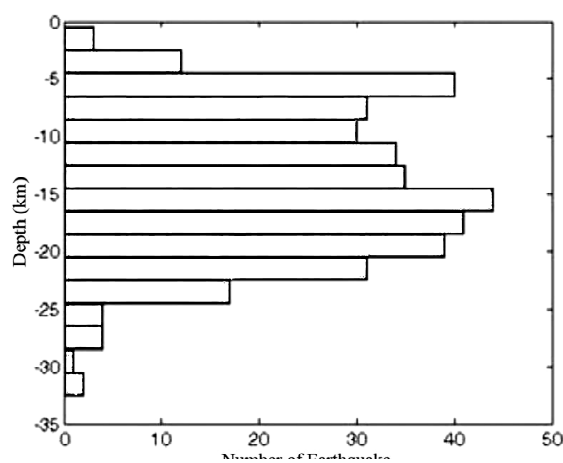
که در این روابط V_s سرعت موج برشی، E مدول الاستیسیته، λ پارامتر لامه، G مدول برشی و ν ضریب پواسون است.

دانسیته مصالح از طریق رابطه نافه-دراکه^۱ (رابطه ۲) محاسبه شده [۱۵] و نتایج در جدول ۵ آمده است:

1- Nafe-Drake

۴-۶- فرضیات دیگر

در این تحقیق، با توجه به قانون اصطکاکی به‌کار رفته (قانون ضعیف‌شدگی با لغزش)، از اثرات فشار آب حفره-ای، دما و عمق در مقاومت صفحه گسل صرف‌نظر شده است. البته اثر عمق و دما به‌صورت ضمنی در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب که با توجه به فراوانی رخدادهای مختلف در اعماق گوناگون (شکل ۹)، در این تحلیل، عمق ۱۴ کیلومتری به عنوان عمق کانونی فرض شده است و در این عمق مربعی با ابعاد ۵ کیلومتر در نظر گرفته شده که درون این مربع مقاومت اصطکاکی بالاتر از مقاومت اصطکاکی صفحه گسل در نظر گرفته شده است. با این کار تجمع تنش در این ناحیه اتفاق افتاده و آزادسازی انرژی زلزله در داخل مربع به وقوع می‌پیوندد. از نظر محل طولی گسل، این ناحیه در جایی انتخاب شده است که فراوانی رخداد زیاد است (شکل ۱۰). در واقع با این کار منطقه‌ای که شروع آزادسازی انرژی زلزله در آن ناحیه رخ می‌دهد (کانون زمین‌لرزه) در مدل‌سازی منظور شده است.

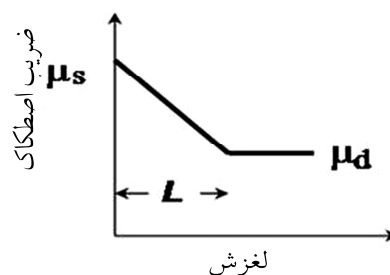


شکل (۹) کانون ژرفی زمین‌لرزه‌ها [۵]

۵- آنالیز مدل

آنالیز مدل به دو مرحله کلی تقسیم می‌شود:

این تحلیل شکل خطی این قانون به‌کار رفته است (شکل ۸). قانون ضعیف‌شدگی با لغزش انطباق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین، این قانون هم قابلیت توصیف رفتار اصطکاکی در گسل‌های از پیش موجود را دارد و هم رفتار سنگ سالم تحت برش را می‌توان با آن مدل کرد [۱۷].



شکل (۸) شکل خطی قانون ضعیف‌شدگی با لغزش

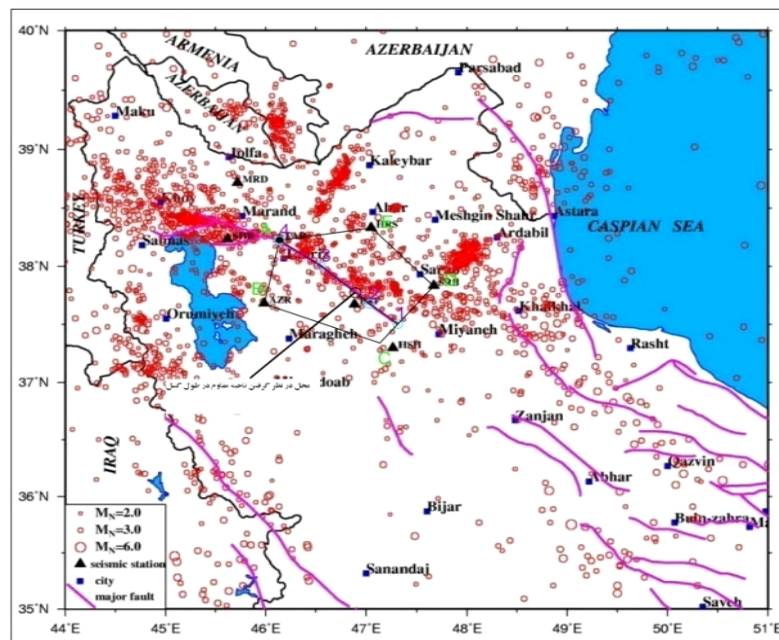
رابطه این قانون به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \mu(x) &= \mu_s - \frac{x}{L}(\mu_s - \mu_d) & 0 < x < L \\ \mu(x) &= \mu_d & L < x \end{aligned} \quad (3)$$

که در این رابطه μ_s ضریب اصطکاک استاتیکی، μ_d ضریب اصطکاک دینامیکی، L فاصله ضعیف‌شدگی (m)، x جابه‌جایی (m) و $\mu(x)$ ضریب اصطکاک متناظر با جابه‌جایی است.

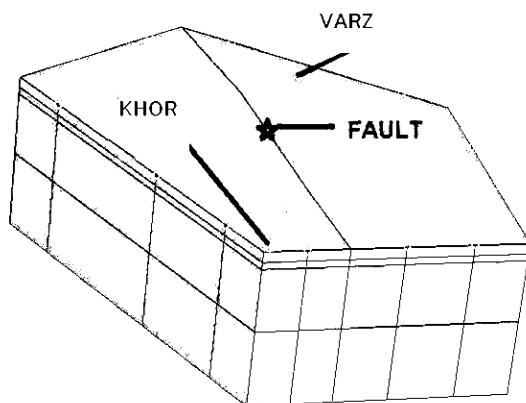
برای مقاومت اصطکاکی گسل‌ها در مطالعه حاضر حالت‌های مختلفی در نظر گرفته شده است. ضریب اصطکاک دینامیکی در این مطالعه ۰/۰۵ و مقدار طول لغزش بحرانی در کلیه حالت‌ها برابر ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به نبود اطلاعات کافی از پارامترهای اصطکاکی گسل شمال تبریز، این پارامترها با توجه به مطالعات انجام‌شده بر روی گسل‌هایی مانند گسل سن آندریاس^۱ در آمریکا تخمین زده شده است [۱۸].

1- San Andreas Fault



شکل (۱۰) فراوانی رخدادها در پهنه شمال غربی ایران

هم استخراج می‌شوند (شکل ۱۱).



شکل (۱۱) محل ایستگاه‌های داخل مدل و نقطه FAULT

برای کنترل مدل مورد مطالعه، نتایج به‌دست آمده از مدل باید با مشاهدات زمین‌پیمایی^۱ مربوط به تغییر شکل‌های کوتاه‌مدت^۲ (مربوط به دوره‌های میان لرزه‌ای) مطابقت داشته باشد. بدین منظور مدل برای مدت ۱۰ سال اجرا شده و نتایج به‌دست آمده جهت کنترل با نتایج

۱. در این مرحله، به منظور ایجاد شرایط اولیه متناسب با رژیم ژئودینامیکی فعلی ناحیه مورد مطالعه، مدل به مدت ۲۵۰ سال تحت تغییر شکل‌های تکتونیکی قرار گرفته است. از آنجاکه اطلاعاتی در مورد وضعیت تنش‌های موجود در پوسته در این ناحیه موجود نیست، لذا در این مرحله، جهت ایجاد تنش‌های اولیه متناسب با واقعیت در مدل، مقاومت اصطکاکی گسل‌ها در حد صفر در نظر گرفته شده است. علت انتخاب ۲۵۰ سال، دوره بازگشت زلزله‌های بزرگ‌تر از ۷ ریشتر این گسل است که بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ سال اشاره شده است [۱۹].

۲. در این مرحله اصطکاک گسل فعال می‌شود. بازه‌های زمانی این تحلیل ۱۰۰ سال در نظر گرفته می‌شود.

در مدل تهیه‌شده، نقاطی متناظر با ایستگاه‌های اندازه‌گیری تغییر شکل‌های پوسته که در محدوده مدل قرار دارند (ایستگاه‌های KHOR و VARZ)، در نظر گرفته شده‌اند. جابه‌جایی این نقاط در کلیه مراحل آنالیز ثبت می‌شوند. علاوه بر این نقاط، نتایج خروجی در روی گسل

1- Geodetic
2- Short-term

مشاهدات صحرایی مقایسه شده است (جدول ۶).

اثر نیروهای تکتونیکی‌اند.

جدول (۷) سرعت تغییر مکان ایستگاه‌ها در مدل برای حالت‌های مختلف مقاومت اصطکاکی گسل

ایستگاه	حالت ۱ ($\mu = 0.10$)		حالت ۲ ($\mu = 0.20$)	
	V_y ($\frac{mm}{year}$)	V_x ($\frac{mm}{year}$)	V_y ($\frac{mm}{year}$)	V_x ($\frac{mm}{year}$)
KHOR	۱/۸۴	۱/۱	۱/۷۵	۱۱/۰۲
VARZ	-۰/۱	۷/۱۴	-۰/۰۴	۶/۹
FAULT	۳/۴۱	۵/۲۳	۲/۱۹	۳/۴۲

علاوه بر نرخ تغییر شکل در ایستگاه‌ها، میزان جابه‌جایی سالانه گسل نیز می‌تواند بررسی شود. در این راستا دوازده نقطه روی گسل انتخاب شد و جابه‌جایی سالیانه آن نقاط در دو حالت ضریب اصطکاک استاتیکی ۰/۲ و ۰/۱ برداشت شد (شکل ۱۵) و با میانگین‌گیری، نرخ جابه‌جایی سالیانه گسل، به ترتیب ۶/۳۳ و ۷/۹۵ میلیمتر بر سال به‌دست آمد که مقدار آن در مطالعات مختلف ۸ میلی‌متر در سال گزارش شده است.

۶- نتیجه‌گیری

۶-۱- نرخ جابه‌جایی

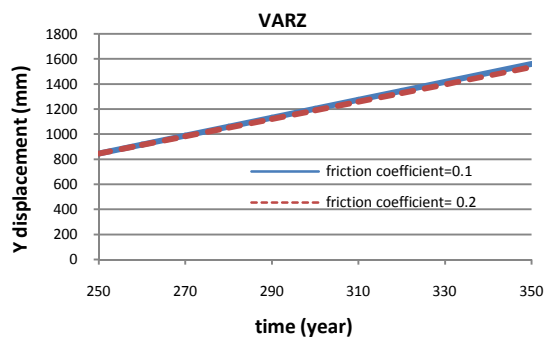
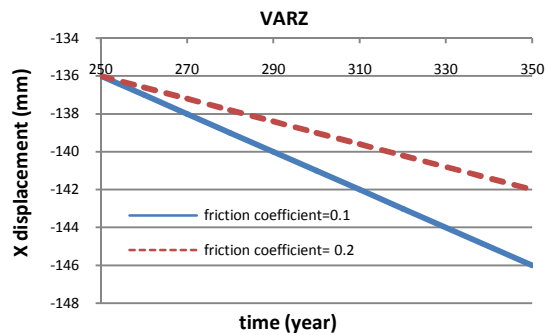
نتایج تحلیل روی گسل شمال تبریز نشان می‌دهد که در تحلیل‌هایی که ضریب اصطکاک استاتیکی برابر با ۰/۱ درنظر گرفته شده است، همگرایی بیشتری بین نتایج حاصل از مدل-سازی و معیارهای زمین‌شناسی برقرار است. این امر در نتایج میزان حرکت راست‌گرد گسل (شکل ۱۵) مشهود است. بدین ترتیب که نرخ حرکت راست‌گرد گسل شمال تبریز، در منابع مختلف، ۸ میلی‌متر در سال گزارش شده است. در حالی‌که در تحلیل حاضر میانگین نرخ حرکت راست‌گرد گسل، برای ضریب اصطکاک ۰/۲، مقدار ۶/۳۳ میلی‌متر در سال و برای ضریب اصطکاک ۰/۱، ۷/۹۵ میلی‌متر در سال است. در نتیجه گسل با اصطکاک پایین با معیارهای زمین‌شناسی سازگارتر

جدول (۶) مقایسه نتایج مدلسازی با قرائت ایستگاه‌های GPS

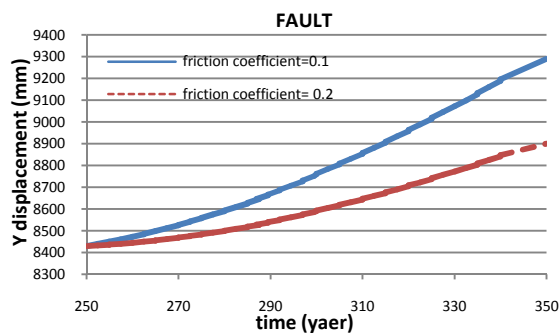
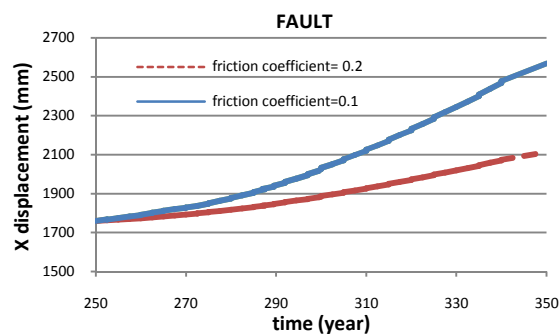
ایستگاه	نتایج حاصل از قرائت ایستگاه‌ها ($\frac{mm}{year}$)		نتایج حاصل از مدلسازی عددی ($\frac{mm}{year}$)	
	VE	VN	VE	VN
KHOR	۱۳	-۴	۱۰/۶۷	۱/۵۳
VARZ	۷/۸	-۰/۱	۶/۲۴	-۰/۹

منحنی‌های تغییر مکان ایستگاه‌های فرضی در امتدادهای X و Y بر حسب زمان برای بازه زمانی ۲۵۰ تا ۳۵۰ سال (آنالیز مرحله دوم)، که طی آن حالت‌های مختلف مقاومت اصطکاکی برای گسل درنظر گرفته شده است، در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده‌اند.

مقادیر سرعت‌های به‌دست آمده برای هر وضعیت مقاومت اصطکاکی، در هر ایستگاه، در جدول ۷ جمع‌بندی شده است. نتایج ارائه شده در جدول ۷ نشان می‌دهد که، با تغییر مقاومت اصطکاکی گسل، در ایستگاه‌ها شاهد تغییر معنی داری در سرعت تغییر مکان نیستیم. با توجه به موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری سرعت (شکل ۱۱)، مشاهده می‌شود که در ایستگاه‌های KHOR و VARZ، که فاصله نسبتاً زیادی تا گسل شمال تبریز دارند، تغییرات مقاومت اصطکاکی گسل تأثیر چندانی بر روی سرعت تغییر شکل پوسته در این ایستگاه‌ها ندارد. بنابراین، جهت بررسی بیشتر، علاوه بر دو ایستگاه فوق، نقطه‌ای روی خط گسل هم درنظر گرفته می‌شود و نتایج روی آن نقطه هم استخراج می‌شود. این نقطه به نام FAULT نشان داده شده است. با بررسی نتایج، مشخص شد که تغییرات مقاومت اصطکاکی گسل روی نقطه‌ی سوم (FAULT) تأثیرگذارتر است. به نظر می‌رسد با دور شدن از گسل تأثیر جابه‌جایی لغزشی گسل بر روی تغییر شکل‌های پوسته کاهش می‌یابد و تغییر شکل‌ها تنها ناشی از تغییر شکل‌های الاستیک پوسته تحت



شکل (۱۳) جابه‌جایی در ایستگاه VARZ در راستای X (بالا) و Y (پایین) با دو ضریب اصطکاک استاتیکی مختلف

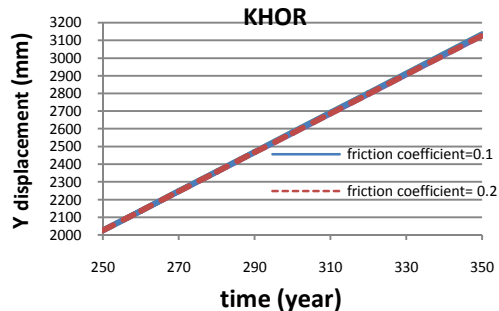
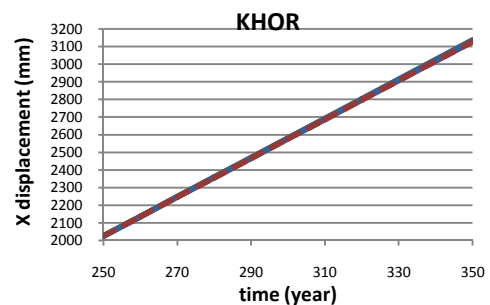


شکل (۱۴) جابه‌جایی در ایستگاه FAULT در راستای X (بالا) و Y (پایین) با دو ضریب اصطکاک استاتیکی مختلف

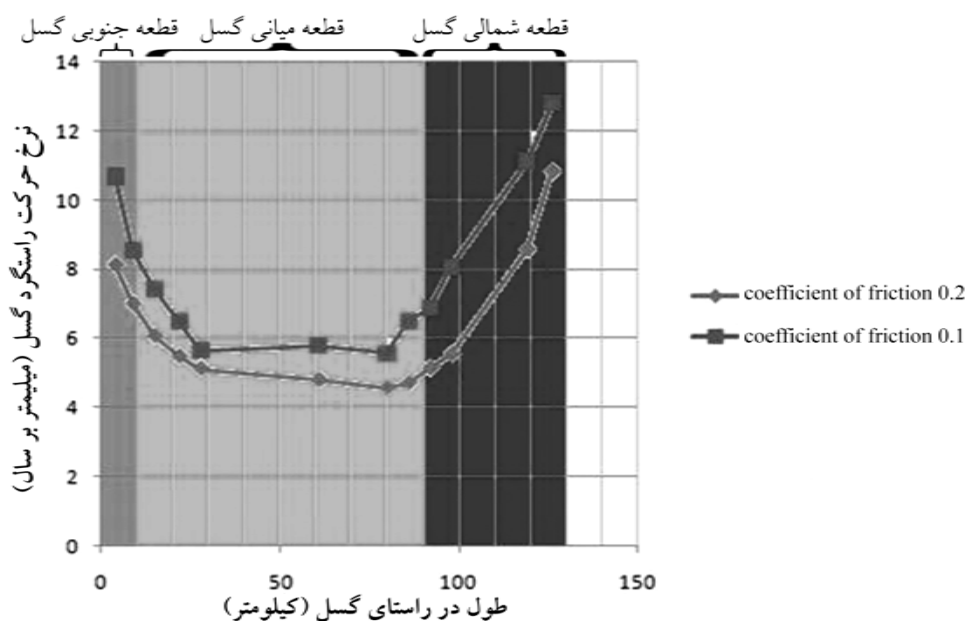
است. البته این یک حدس اولیه است و باید به فرضیات ساده‌کننده در مدل‌سازی عددی نیز توجه شود.

نتایج حاصل از تحلیل طولانی‌مدت گسل شمال تبریز بر این نکته دلالت دارند که ضرایب اصطکاک مختلف بر جابه‌جایی نواحی نزدیک به صفحه گسل تأثیر بیشتری دارند و در نقاط دور از صفحه گسل (ایستگاه‌های KHOR و VARZ)، با تغییر ضریب اصطکاک، تغییر چندانی در نرخ جابه‌جایی حاصل نمی‌شود.

هندس صفحه گسل نیز بر رفتار مکانیکی گسل تأثیر دارد. در این مطالعه، محدوده مدل‌سازی صفحه گسل، از سه قطعه تشکیل شده است که در یک راستا نیستند و همین امر موجب کمتر شدن جابه‌جایی قطعه میانی نسبت به دو قطعه انتهایی است. در واقع قطعه میانی گسل بین دو قطعه شمالی و جنوبی محصور شده است و این امر باعث محدود شدن نرخ جابه‌جایی در این قطعه شده است.



شکل (۱۵) جابه‌جایی در ایستگاه KHOR در راستای X (بالا) و Y (پایین) با دو ضریب اصطکاک استاتیکی مختلف



شکل (۱۵) نرخ حرکت راست‌گرد گسل شمال تبریز

earthquake cycles in mature strike-slip fault zone", University of California Berkeley, 2002.

- [4] Hirahara, K., "Interplate earthquake fault slip during periodic earthquake cycles in a viscoelastic medium at a subduction zone", *Pure appl. Geophys.*, Vol. 159, 2002, pp. 2201-2220.
- [5] Xing, H. L., Makinouchi, A., and Moraa, P. (2007), "Finite element modeling of interacting fault systems". *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 163, 106-121.
- [6] Masterlark, T., (2003), "Finite element model predictions of static deformation from dislocation sources in a subduction zone: sensitivities to homogeneous, isotropic, poisson-solid, and half-space assumptions". *Journal of Geophysical research*, 108, doi:10.1029/2002JB002296.
- [7] Templeton, E., (2009), "Effects of inelastic off-fault deformation on the dynamics of earthquake rupture and branch fault activation". PhD thesis, Harvard University, Massachusetts.

[۸] شهرکی، م.، ابوالقاسم، ا. م.، جموری، ی.، و بحرودی، ع.، (۱۳۸۶)، مدل سه‌بعدی ویسکوالاستیک المان

۲-۶- جهت لغزش گسل

نتایج حاصل از تحلیل بر راست‌گرد بودن گسل شمال تبریز دلالت دارند که با مطالعات انجام‌شده سازگار است. البته میزان حرکت راست‌گرد در بخش مرکزی گسل کمتر از دو بخش شمالی و جنوبی آن است. علت این امر ممکن است ناشی از عدم هم‌راستایی سه قطعه گسل باشد که باعث می‌شود قطعه میانی به حالت قفل‌شدگی درآید و نرخ راست‌گرد بودن آن کمتر از دو قطعه شمالی و جنوبی باشد.

۷- منابع

- [1] Hessami, K., Pantosti, D., Tabasi, H., Shabanian, E., Abbasi, M. R., Fegghi, K. and Soleymani, S., "Paleoearthquakes and slip rates of the north tabriz fault, nw iran: preliminary results" *Annals of Geophysics*, Vol. 46 No. 5, 2003, pp. 903-915.
- [2] Caia, Y., and Wang, C.Y., "Testing fault models with numerical simulation: example from central california", *Tectonophysics*, Vol. 343, 2001, pp. 233-238.
- [3] Lynch, J. C., "Finite element models of

- restrengthening and their implications on the scaling, asymmetry, and mode of dynamic rupture on homogeneous and bimaterial interfaces", *Journal of Geophysical research*, 2008, 113(B08307).
- [17] Senatorski, P., "Slip-weakening and interactive dynamics of an heterogeneous seismic source Tectonophysics", 2002: p. 37-60.
- [18] Harris, R.A., M. Barall, R. Archuleta, B. Aagaard, J.-P. Ampuero, H. Bhat, V. Cruz-Atienza, L. Dalguer, P. Dawson, S. Day, B. Duan, E. Dunham, G. Ely, Y. Kaneko, Y. Kase, N. Lapusta, Y. Liu, S. Ma, D. Oglesby, K. Olsen, A. Pitarka, S. Song, and E. Templeton, "The SCEC/USGS dynamic earthquake rupture code verification exercise", *Seismological Research Letters*, 2009. 80(1): p. 119-126.
- [19] Ghanbari, E., Jalili, E., "The geological society of london 2006 paleoseismicity and new seismicity studies in azerbaijan and the necessity for seismic zonation", IAEG, 2006, 31.
- محدود برای بررسی تغییر شکل‌های سطحی گسل شمال تهران، نقشه برداری (۱۸)
- [۹] کلانتر، د.، (۱۳۸۸)، "مدل‌سازی عددی رفتار پهنه لرزه‌ای ایران بر اساس تحلیل‌های غیرخطی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، استاد راهنما دکتر محمود یزدانی.
- [۱۰] پورکرمانی، م. و صدیق، ح.، "پدیده‌های ژئومورفولوژیکی گسل تبریز"، *مجله جغرافیا و توسعه*، ۱۳۸۳.
- [11] Butler, T. M., Lloïd, G., & McCaig, A., "Teaching resources in structural geology in the school of earth sciences", 2008, (publication., from university of leeds. available on the world wide web at url <http://www.see.leeds.ac.uk/structure>).
- [12] Hibbitt, D., Karlsson, B., & Sorensen, P., (1978). ABAQUS (version 6.4.1). [finite element]. rhode Island: Dassault systems S.A.
- [۱۳] مرادی، ع. س.، تاتار، م.، هاتسفلد، د. و پل، آ.، "مطالعه ساختار سرعتی پوسته و سازوکار گسلش در زون گسلی امتدادلغز تبریز"، *علوم زمین*، ۷۰، ۱۳۷۸، ۱۴.
- [14] Masson, F., Djamour, Y., Gorp, S. V., Chéry, J., Tatar, M., Tavakoli, F., et al. "Extension in NW Iran driven by the motion of the south caspian basin", 2006, *Earth and Planetary Science Letters*, 252, 180-188.
- [15] Brocher, T. M. "Compressional and shearwave velocity versus depth in the san francisco bayarea, california: rules for usgs bay area velocity model. california" U.S. Geological Survey Open-File Report, 2005, [available on the World Wide Web at URL <http://pubs.usgs.gov/of/2005/1317/>]
- [16] Olsen-Kettle, L. M., Weatherley, D., Sae, E., Gross, L., & H.-B. Muhlhaus. "Analysis of slip-weakening frictional laws with static

Numerical Simulation of Frictional Behavior of Strike-Slip North Tabriz Fault Using Finite Element Method

M. Yazdani^{1*}, M. Sasani²

1-Assistant Professor, Civil and Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University

2-MSc. of geotechnical Engineering, Civil and Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University

myazdani@modares.ac.ir

Abstract

This paper describes the three-dimensional numerical modeling of a vertical strike-slip planar fault that resides in the crust and reaches the Earth's surface. The goal of this study is application of a constitutive relationship which represents the governing equation of the failure process and specifies the dependence between stress, fault slip, slip rate, and other relevant physical properties. There are several laboratory-derived friction constitutive laws among which the linear slip-weakening was adopted in this paper to simulate the failure process based on stick-slip instability of faults. The finite element code (ABAQUS) is used to model the mechanical behavior of fault illustrating the distribution of stress and deformation in the Earth's crust which involves the fault. Like other rock friction laws, slip weakening is a laboratory-derived friction law and it has three parameters which are estimated based on experimental results.

In this paper the North Tabriz fault in NW of Iran is adopted for simulation. The North Tabriz Fault (NTF) is one of the active faults in NW Iran that has a clear surface expression. It has an average strike of NW-SE over a length of about 150 km and appears to be generally close to vertical in dip. Right-lateral movement along this fault, documented by Berberian and Arshadi (1976) from the study of aerial photographs, can also be seen clearly in the field.

The analysis has been carried out in two steps; first the model ran for 250 years in which the fault has no friction. This step is needed to achieve the in-situ stress state in the crust. Then, the analysis continued for 100 years and in this stage the friction of fault is activated based on the slip-weakening law with these parameters : $\mu_s = 0.1$ and 0.2 ; $\mu_d = 0.05$ and $L_c = 0.4$ m.

Another analysis has been made for time interval period in 10 years and the deformation rate of the crust was calculated in locking situation in which the fault surfaces has no relation displacement. The results of analysis show that the slip weakening law could explain the stick-slip behavior which is the main mechanism of faulting.

Two stations are inside of the model geometry (KHOR & VARZ) and after the analysis was finished, the velocities of these stations are adopted for verifying the results.

In the first analysis (locking phase), the results show that the convergence between GPS results and the analysis results in VARZ station is more than KHOR station. Probably, it is due to the location of these stations. Since the KHOR station is very close to the boundaries of the model and the distribution of deformation rate isn't uniform, thus this factor can be the main source of such errors. In the second analysis, the effect of different coefficient of frictions is more sensitive in VARZ stations. The VARZ station is closer to the NTF than the KHOR station. With this treat it can be understood that the effect of variation in static coefficient of friction increases in near of the fault zone.

Keywords: Strike-Slip, Tabriz fault, frictional behavior, finite element method