

تعیین نرخ لغزش بلندمدت گسل‌های پهنه شرقی فلات ایران با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود کینماتیک

حسین نوری زاده^۱، علیرضا خداوردیان^۲، مهدی روفیان نائینی^۳، زهرا موسوی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی، دانشکده ژئوزی و ژئوماتیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- محقق پسادکتری، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۴- استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۰۴

چکیده

قرارگیری فلات ایران در کمربند لرزه‌خیز آلپ-همالیا باع شده تا خطرپذیری لرزه‌ای برای اکثر مراکز جمعیتی ایران بسیار بالا برآورد شود؛ بنابراین تعیین نرخ لغزش گسل‌ها، تعیین میدان‌های سرعت و کرنش فلات ایران به منظور تعیین خطر لرزه‌ای فلات ایران از اهمیت بالایی برخوردار است. به همین جهت، هدف اصلی در این مقاله، برآورد نرخ لغزش بلند مدت گسل‌های پهنه‌ای شرقی فلات ایران با استفاده از تلفیق مشاهدات میدان سرعت ایستگاه‌های شبکه ژئودینامیک کشور، توزیع جهت تنش‌های اصلی حاصل از مدل‌های جهانی و نرخ لغزش‌های بدست آمده از مشاهدات زمین‌شناسی قرار گرفته است. به منظور تلفیق داده‌های ذکر شده و تعیین مقدار نرخ لغزش، از مدل‌سازی اجزا محدود کینماتیکی (Neokinema) استفاده شده است. برای بدست آوردن بهترین مدل، سه پارامتر تنظیم‌کننده (μ, L_0, A_0) در نظر گرفته شد و در نهایت با انجام آنالیز حساسیت برای سه معیار خطای N_2^{geodic} , N_2^{stress} , $N_2^{potency}$ که متناسب با سه دسته ورودی (نرخ لغزش، مشاهدات ژئودتیکی و جهت تنش‌های اصلی) می‌باشند؛ مدل بهینه انتخاب شد. برای این مدل انتخابی، معیارهای خطا به حدود انحراف معیار داده‌های ورودی محدود شد و نرخ لغزش گسل‌های پهنه شرقی با عدم قطعیت ۱ میلی‌متر در سال محاسبه شد. همچنین به منظور صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از مدل، مقادیر نرخ لغزش برای گسل‌های کوه‌بنان، دشت بیاض، نه‌غربی و نایبند، با نتایج به دست آمده از مطالعات زمین‌شناسی دارای سازگاری مطلوبی است به‌طوری‌که اختلاف نتایج بدست آمده کمتر از ۱ میلی‌متر در سال است.

کلید واژه‌ها: نرخ لغزش، جهت تنش‌های اصلی، مدل‌سازی اجزا محدود کینماتیکی.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک.

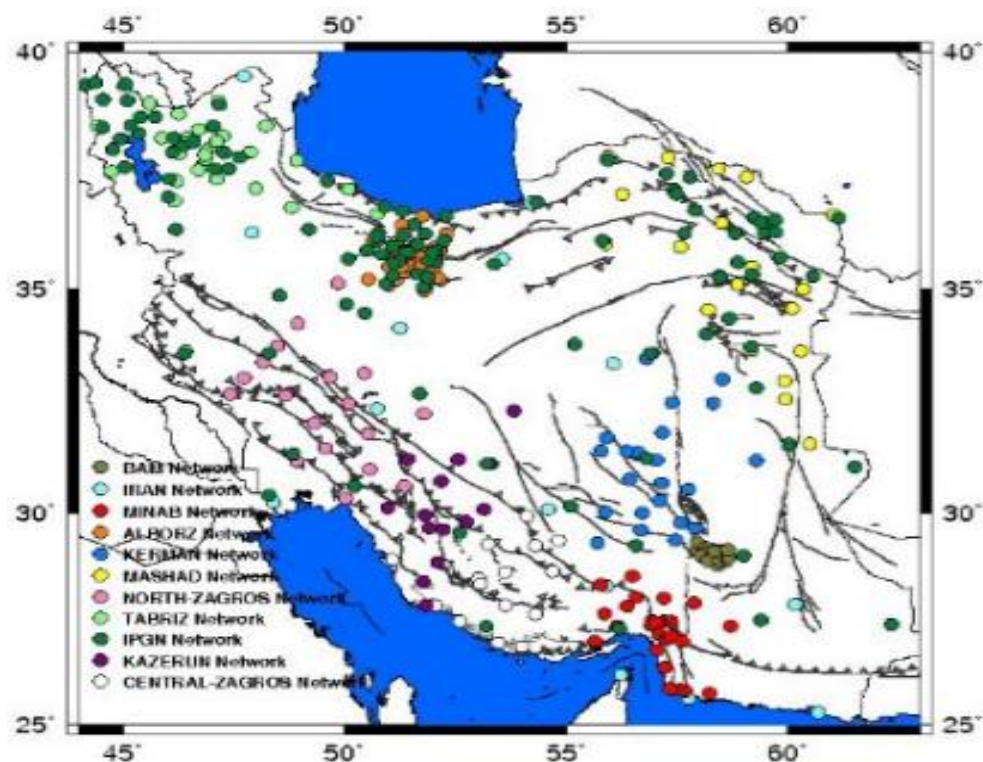
تلفن: ۰۹۳۸۲۸۶۲۸۳۷

Email: mraoofian@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

قرارگیری فلات ایران در کمربند لرزه خیز آلپ-همالیا، وقوع زلزله‌های فراوان و وجود گسل‌های متعدد در این منطقه، نشان‌دهنده‌ی آن است که این منطقه از لحاظ تکتونیکی فعال است و این خود بیانگر خطر لرزه‌ای برای اکثر مراکز جمعیتی ایران می‌باشد. وجود زمین-لرزه‌های تاریخی و همچنین زلزله‌های ثبت شده توسط لرزه‌نگارها نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که ایران همواره دستخوش زمین‌لرزه‌های بسیار ویرانگری بوده که نمونه‌های اخیر آن زلزله ۵ دی ۱۳۸۲ بم و ۴ اسفند ۱۳۸۳ زرنند هستند که وقوع آنها توجه مسئولان امر را

به ایجاد یک شبکه سراسری برای مطالعات ژئودینامیکی جلب نمود. بدین منظور در سال ۱۳۸۳ فاز اولیه شبکه دائم سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) ایران متشکل از ۱۰۷ ایستگاه مطابق شکل (۱) طراحی و راه اندازی شد. این شبکه سراسری اکنون دارای بیش از ۱۲۰ ایستگاه و همچنین ۱۰ شبکه محلی می‌باشد. پهنه شرقی ایران به عنوان منطقه مورد مطالعه این تحقیق، دارای شبکه‌های محلی کرمان، بم و تعدادی از ایستگاه‌های شبکه محلی مشهد و شبکه ژئودینامیک ایران می‌باشد.



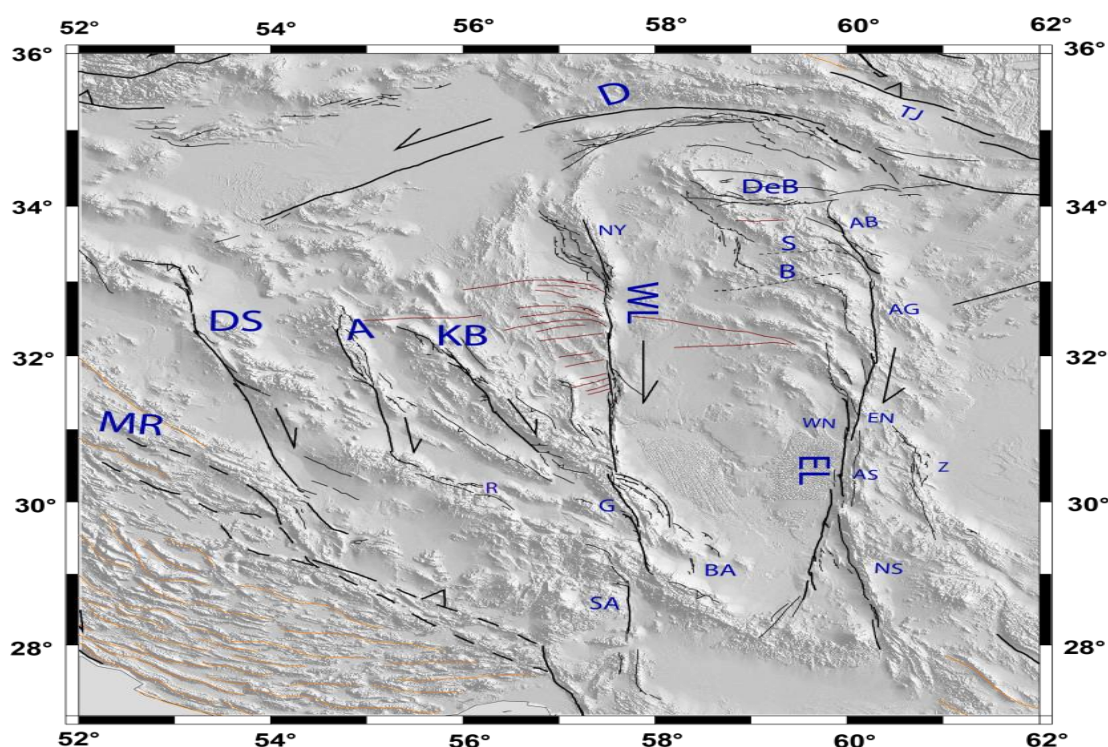
شکل ۱: شبکه ژئودینامیک سراسری ایران و شبکه‌های کمپین محلی موجود در فلات ایران (۱).

در یک نگاه کلی، فلات ایران شامل نوار تغییرشکلی آذربایجان، بلوک جنوب دریای خزر، رشته کوه‌های زاگرس، رشته کوه البرز، شمال شرق فلات ایران و نواحی مرکزی و شرقی فلات ایران می‌باشد. از نظر

زمین‌شناسی، حرکت تقریباً شمالی بخش مرکزی ایران سبب یک برش فعال در شرق ایران می‌شود که این تغییرشکل‌ها بر روی مجموعه‌ای از گسل‌های راست‌بر در اطراف کویر لوت متمرکز شده و کویر لوت به عنوان

به طور کلی سیستم گسلی لوت غربی شامل گسل-های نایبند و گوک است و همچنین سیستم گسلی لوت شرقی از گسل های نه غربی، نه شرقی، زاهدان و آبیز تشکیل شده است که این دو گسل به ترتیب در مرزهای غربی و شرقی کویر لوت قرار گرفته اند که علاوه بر این دو گسل، گسل های درونه، کوه بنان، انار و ده شیر (شکل ۲) مهمترین گسل های پهنه شرقی فلات ایران محسوب می شوند [۴ و ۲].

بلوک صلب غیرلرزه ای شناخته می شود (شکل ۲). این موارد به همراه لغزش چپ بر، در گسل های درونه و دشت-بیاض در شمال کویر لوت نشان از آن دارد که این بلوک صلب یک دوران ساعتگرد را تجربه می کند [۳ و ۲]. پهنه شرقی فلات ایران گسل های فعالی را در خود جای داده است. برای مثال گسل طبس و دشت بیاض مسبب زلزله های مخربی مانند زلزله با بزرگای ۷ سال ۱۹۶۸ و زلزله با بزرگای ۷/۳ سال ۱۹۷۹ بوده اند.



شکل ۲: پهنه شرقی فلات ایران. خطوط مشکی معرف گسل های فعال است. حروف اختصاری نشانگر نام گسل های منطقه به شرح زیر است: A: انار، AB: آبیز، AG: آواز-گازیک، AS: آساگی، B: بیرجند، BA: بم، D: درونه، DeB: دشت بیاض، DS: ده شیر، EL: لوت شرقی، EN: نه غربی، G: گوک، KB: کوه بنان، NS: نسترباد، NY: نایبند، R: رفسنجان، S: سده، SA: سبزواران، TJ: تربت جام، WL: لوت غربی، WN: نه شرقی، Z: زاهدان [۲].

زمینه انجام شده که در ادامه به آن ها اشاره می شود. والپرسدورف^۱ و همکاران، با مطالعه ۹۲ ایستگاه GPS

تحقیقات خداوردیان و همکاران و همچنین والپرسدورف و همکاران از جدیدترین مطالعات انجام شده برای برآورد نرخ لغزش در شرق ایران می باشند [۳ و ۲]. با وجود فعال بودن پهنه شرقی فلات ایران، مدل سازی های محدودی از حرکت گسل ها در این

^۱ Walpersdorf

بلوک‌های الاستیک قابل توصیف نیست و یک مدل‌سازی صحیح از منطقه، بایستی در برگرفته‌ی گسل‌های ثانویه نیز باشد.

خداوردیان و همکاران، با استفاده از داده‌های مربوط به رخنمون گسل‌ها، مشاهدات ژئودتیکی، جهت تنش‌های اصلی و نرخ جابجایی در مرز صفحات تکتونیکی، لغزش بلندمدت گسل‌ها را مورد مطالعه قرار داده و برآوردی از نرخ کرنش و احتمال وقوع زلزله انجام داده‌اند [۳]. ضعف مطالعه خداوردیان و همکاران برای پهنه شرقی را می‌توان عدم وجود داده‌های کافی در آن زمان دانست؛ به طوری که کل داده‌های GPS استفاده شده در این مطالعه برای پهنه شرقی فقط ۱۲ ایستگاه بوده است. به همین دلیل، نتایج به دست آمده در پهنه شرقی از دقت مطلوبی برخوردار نیست.

در این تحقیق، کل پهنه شرقی ایران در قالب یک سیستم واحد شامل گسل‌ها (ناپیوستگی‌ها در میدان جابجایی) و نواحی پیوسته مدل‌سازی می‌شود. در این مطالعه بیش از ۵۰ ایستگاه GPS و جدیدترین نرخ لغزش گسل‌ها بر اساس مطالعات زمین‌شناسی در نظر گرفته شد. در این تحقیق از تکنیک *substructure* استفاده شد و همان‌طور که در بخش شرایط تغییر مکانی ذکر شد، باندی مدل و همچنین سرعت در روی باندی از مدل خداوردیان و همکاران استخراج گردید. در این تحقیق از داده‌های جدیدتر با کمیت و کیفیت بهتر بهره گرفته شده است به طوری که بیش از ۵۰ ایستگاه GPS و ۱۲ داده زمین‌شناسی برای نرخ لغزش گسل‌ها استفاده شده است. از آنجایی که دقت تکنیک مدل‌سازی اجزا محدود کینماتیکی (*Neokinema*) به کمیت و کیفیت داده‌های اولیه وابسته می‌باشد، این افزایش اطلاعات نقش اساسی در بهبود نتایج مدل داشته و توصیف بهتری از رئولوژی منطقه ارائه داده است. این مدل جامع که دربرگیرنده تمامی نواحی دارای تغییر شکل در پهنه شرقی ایران است، کمک کرد تا برآورد دقیق‌تر از مقادیر تغییر شکل‌ها در این منطقه به دست آید.

طی ۱۱ سال در قسمت شرق ایران، این منطقه را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها مقدار نرخ لغزش برای گسل‌های شرق ایران را با استفاده از دو روش زیر برآورد نمودند [۲]:

- ۱) استفاده از مدل سویچ^۱ و برفورد^۲ برای تعیین میانگین سرعت ایستگاه‌های دو طرف بلوک گسل [۵]
- ۲) به کارگیری مدل بلوک‌های صلب ارائه شده در تحقیقات مک کافری^۳ و همکاران برای بیان نرخ لغزش گسل‌ها [۶]

در روش اول، اختلاف سرعت ثبت شده در ایستگاه‌های GPS در دو سمت یک گسل به عنوان نرخ لغزش گسل گزارش می‌شود. اما مهم‌ترین محدودیت این روش آن است که از ایستگاه‌های نزدیک گسل‌ها، به علت قفل‌شدگی گسل، نمی‌توان استفاده کرد. با استناد به مطالعات قبلی به عنوان یک عدد پذیرفته شده، داده‌های ایستگاه‌های قرار گرفته در فاصله‌ای بزرگتر از دو برابر عمق قفل‌شدگی گسل (حدود ۱۵ کیلومتر) در این روش قابل استفاده خواهند بود. ولی به دلیل پراکندگی ایستگاه‌ها در شرق ایران، امکان استفاده از روش اول فقط برای چندین گسل ثانویه وجود دارد. در روش دوم، با بلوک‌بندی بخش شرقی فلات ایران به چندین بلوک که مرز این بلوک‌ها را گسل‌های اصلی تشکیل می‌دهند؛ نرخ لغزش را برای این گسل‌ها به دست آوردند. با توجه به نقص روش بلوک‌های الاستیک، امکان برآورد نرخ کرنش در داخل بلوک‌ها و یا نرخ لغزش در گسل‌های ثانویه وجود نداشته است. به طور کلی، نرخ لغزش‌های برآورد شده از دو روش برای گسل‌های اصلی، تقریباً در اکثر موارد اختلاف جزئی دارند؛ اما در بعضی از گسل‌ها تفاوت بارزی مشاهده شده است. این اختلاف نشان‌دهنده آن است که جابجایی‌هایی رخ داده در بخش مرکزی فلات ایران با

¹ Savage

² Burford

³ McCaffrey

۲- روش مدل سازی

۲-۱- تکنیک مدل سازی اجزا محدود کینماتیکی

مدل سازی اجزاء محدود کینماتیکی از تغییر شکل های سطح زمین (*Neokinema*) برای اولین بار توسط برد و لیو ارائه شد و پس از آن در تحقیقات متعددی مورد استفاده قرار گرفت [۷، ۸ و ۱۱]. در این مدل، مولفه افقی سرعت بلندمدت نقاط روی سطح پوسته زمین با استفاده از روش های درون یابی کروی برآورد می شوند.

این مدل کینماتیکی، مانند هر مدل کینماتیکی دیگر با پذیرش قیدهای تغییر مکانی، بهترین تقریب از میدان سرعت در محدوده مدل سازی شده را ارائه خواهد داد. یکی از ویژگی های منحصر به فرد این تکنیک مدل سازی آن است که با دریافت انواع مختلف اطلاعات با عدم قطعیت های گوناگون، مقدار نرخ لغزش گسل ها و نرخ کرنش ها برای ناحیه مدل سازی شده را ارائه می دهد. همچنین، نکته مهم در این تکنیک مدل سازی آن است که نرخ کرنش ها و نرخ لغزش بلند مدت گسل ها به طور سازگار برای ناحیه مورد بررسی محاسبه می شود. این در حالی است که دیگر روش های مدل سازی

(مانند مدل بلوک) در محاسبه کرنش ها در نواحی پیوسته داخل بلوک ها با خطاهای بسیار زیاد مواجه است.

۲-۲- اصول حاکم بر تکنیک مدل سازی اجزا محدود کینماتیکی

مدل فوق با دریافت منابع مشاهداتی مختلف و خطای هریک از آنها، از طریق بیشینه سازی یک تابع هدف، بهترین نرخ لغزش را برای گسل ها برآورد می کند. اگر مقادیر مشاهدات انجام شده در هر نقطه (مشاهدات ورودی) را با کمیت اسکالر r_k و مقادیر برآورد شده متناظر با آنها توسط مدل را با کمیت اسکالر p_k نشان دهیم، و با فرض آنکه مقادیر کمیت های مشاهداتی از توزیع نرمال با انحراف معیار σ_k تبعیت نموده و از منظر آماری مستقل باشند، می توان برای بدست آوردن بهترین تقریب از داده های موجود، از روش حداکثر تمایل (*Maximum-likelihood*) استفاده کرد. بر اساس این روش، باید چگالی احتمال آنکه تمامی کمیت های p_k برابر با r_k باشند را ماکزیمم کنیم [۷]. تابع هدف به صورت رابطه (۱) می باشد.

$$s = \ln \left\{ \prod_{k=1}^K \Phi(p_k = r_k) \right\} - \sum_{k=1}^K \ln[\Phi(p_k = r_k)] - \sum_{k=1}^K \frac{(p_k - r_k)^2}{2\sigma_k^2} + \ln[\sigma_k] + \ln\sqrt{2\pi} \quad \text{رابطه (۱)}$$

(تنها بردارهای سرعت *GPS* به صورت نقطه ای می باشند، در حالی که بردارهای لغزش موجود در واحد طول گسل بوده و تنش های اصلی در واحد مساحت سطح گسل می باشند)، به همین جهت تابع تمایل را به نحوی بیان می کنیم که تمامی داده های ورودی (نقطه، طول، سطح) را شامل شود (رابطه (۲)) [۷].

در رابطه (۱)، $\Phi(p_k)$ تابع چگالی احتمال متغیر p_k ، r_k مشاهدات ورودی، p_k مقادیر برآورد شده و K تعداد مشاهدات انجام شده می باشد. از آنجایی که دو جمله آخر در رابطه (۱) مقدار ثابتی است، لذا کافی است تنها جمله اول را ماکزیمم کنیم. با توجه به اینکه تمامی داده های ورودی به صورت نقطه ای نیستند،

$$\ddot{s} = - \sum_{k=1}^K \frac{(p_k - r_k)^2}{2\sigma_k^2} - \frac{1}{L_0} \sum_{m=1}^M \int_{\text{Length}} \frac{(p_m - r_m)^2}{2\sigma_m^2} dL - \frac{1}{A_0} \sum_{n=1}^3 \iint_{\text{area}} \frac{(p_n - r_n)^2}{2\sigma_n^2} da \quad \text{رابطه (۲)}$$

مساحت گسلی می باشند که بردار لغزش و تنش اصلی

در رابطه (۲)، L_0 و A_0 به ترتیب بیانگر طول و

صورت میزان خطا در نرم L^2 با روابط (۳) تا (۵) بیان می‌شوند [۷ و ۸].

در رابطه (۳)، r_b, p_b و σ_b به ترتیب معرف نرخ جابجایی برآورد شده، مشاهده شده و انحراف معیار آن در نقطه b می‌باشند. همچنین B تعداد کل ایستگاه‌های GPS می‌باشد. از طرفی در رابطه (۴)، $I, a_i, \sigma_i, r_i, p_i$ به ترتیب معرف آزمون بیشترین نرخ کرنش اصلی فشاری برآورد شده، مشاهده شده، انحراف معیار آن در المان i و تعداد کل المان‌ها می‌باشد.

در رابطه (۵)، $h_{im}, I_{im}, \sigma_m, r_m, p_{im}$ به ترتیب بیانگر نرخ لغزش برآورد شده‌ی گسل m در المان i ، نرخ لغزش مشاهده شده، انحراف معیار آن در گسل m ، طول گسل m در المان i ، بیشترین مقدار نرخ لغزش افقی بدست آمده از مدل و w_n برابر پهنای صفحه گسل m می‌باشد.

$$N_2^{geodetic} = \sqrt{\frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \left(\frac{P_b - r_b}{\sigma_b} \right)^2}$$

رابطه (۴)

$$N_2^{stress} = \sqrt{\frac{1}{\sum_i a_i} \sum_{i=1}^I a_i \left(\frac{P_i - r_i}{\sigma_i} \right)^2}$$

$$N_2^{potency} = \sqrt{\frac{1}{\sum_i \sum_m l_{im} w_m h_{im}} \sum_i \sum_{m=1}^M l_{im} w_m h_{im} \left(\frac{P_{im} - r_{im}}{\sigma_m} \right)^2}$$

رابطه (۵)

استفاده می‌شود. چرا که داده‌های GPS به طور مستقیم در مدل لحاظ شده و نقش به سزایی در مدل سازی و تعیین نرخ جابجایی بلند مدت پوسته زمین دارند. با توجه به محدود بودن تعداد مطالعات زمین شناسی برای گسل‌های پهنه شرقی فلات ایران، نرخ لغزش فقط برای تعداد محدودی از گسل‌های موجود در این ناحیه در اختیار است و مقادیر آن در جدول (۱) گردآوری شده است. شایان ذکر است از آنجایی که این

آن در معادله بالا وارد می‌شود. به عبارت دیگر L_0 معرف طولی از گسل می‌باشد که قید مقدار لغزش بر روی آن طول، هم ارز با یک قید نقطه‌ای و A_0 معرف مساحتی از سطح زمین می‌باشد که قید جهت تنش اصلی یا نرخ کرنش، هم ارز با یک قید نقطه‌ای است. M تعداد گسل‌ها و σ_m بیانگر مقدار میانگین و انحراف معیار مقدار لغزش افقی گسل شماره m می‌باشد. در این تکنیک مدل سازی از سه پارامتر تنظیم کننده (μ, L_0, A_0) برای به دست آوردن بهترین مدل استفاده می‌شود. به عبارت دیگر تنظیم این پارامترها، کنترل کننده‌ی کیفیت مدل برازش شده به نرخ لغزش بدست آمده از مطالعات زمین شناسی، داده‌های ژئودتیکی و قیدهای جهت تنش اصلی می‌باشد. برای به دست آوردن بهترین مقادیر L_0 و A_0 از آنالیز حساسیت و محاسبه سه معیار خطا متناسب با سه دسته داده‌ی ورودی استفاده می‌شود. این سه معیار به رابطه (۳)

۳-۲- داده های ورودی

۳-۲-۱- نرخ لغزش گسل‌ها بر اساس مطالعات زمین شناسی

یکی از ورودی‌های اصلی در مدل سازی کینماتیکی، نرخ لغزش زمین شناسی گسل‌ها است. در این مدل سازی، توجه به این نکته ضروری است که فقط نرخ لغزش به دست آمده از مطالعات زمین شناسی در مدل سازی

شرقی ماکزیمم نرخ لغزشی که انتظار داریم ۶ میلی-متر بر سال است و از آنجایی که بر اساس معادلات ریاضی این مدل سازی، نرخ لغزش گسل حداکثر می-تواند برابر با مثبت یا منفی دو برابر انحراف معیار بعلاوه میانگین گسل باشد $(\mu = \sigma_m \pm 2\sigma_n)$ و به دلیل اینکه ما میانگین این گسل ها را صفر در نظر گرفته ایم، بنابراین نرخ لغزش گسل هایی که به این صورت تعریف شده است می-توانند حداکثر ۶ میلی متر بر سال باشد. این مقدار بزرگ انحراف معیار باعث می-شود امکان لغزش آزادانه گسل ها براساس داده های ژئودتیکی و جهت تنش های اصلی فراهم شود و در نتیجه مدل، آزادی عمل بیشتری در تعیین نرخ لغزش گسل ها داشته باشد.

تکنیک مدلسازی یک مدل دوبعدی است؛ نرخ لغزش گسل های معکوس، بر اساس زاویه شیب گسل به نرخ لغزش افقی تبدیل شده است. با توجه به اینکه در تکنیک مدلسازی امکان در نظر گرفتن عدم قطعیت داده ها وجود دارد، میانگین و انحراف معیار نرخ لغزش به عنوان دو ورودی اصلی مدل در نظر گرفته شده و مقادیر آن براساس اصول زیر لحاظ شد:

۱) رای گسل هایی که مطالعات زمین شناسی موجود است، مقدار نرخ لغزش براساس نتایج این مطالعات استفاده شد (جدول ۱).

۲) برای گسل های که نرخ لغزش آنها براساس مطالعات زمین شناسی مشخص نمی باشد، مقدار میانگین نرخ لغزش و انحراف معیار آن به ترتیب صفر و 3 mm/year انتخاب شد. با توجه به اینکه ما برای گسل های پهنه

جدول ۱: نرخ لغزش براساس مطالعات زمین شناسی

نام گسل	نرخ لغزش براساس مطالعات زمین شناسی (mm / year)	منبع
انار	۰/۸ (RL)	[۱۲]
بم	۲ (RL)	[۱۳]
درونه	۲/۱-۲/۷ (RL)	[۱۴]
دشت بیاض	۲/۵ (RL)	[۱۵]
ده شیر	۲ (RL), ۹/۰-۱/۵ (RL)	[۱۶و۱۷]
زاهدان	۱/۷۵±۰/۴ (RL)	[۱۸]
سبزواران	۳±۱/۵ (RL)	[۱۹]
کوه بنان	۱-۲ (RL)	[۲۰]
	۳/۸±۰/۷ (RL)	
گوک	۴-۴/۹ (RL)	[۲۱و۲۲]
نایبند	۱/۸±۰/۷۵ (RL)	[۲۳]
نُه شرقی	۳±۱ (RL)	[۱۸]
نُه غربی	۲/۱۳±۰/۲ (RL)	[۱۸]

کلید: گسل راست بر (RL)، گسل چپ بر (LL)، گسل تراست (T)

می‌شود و در نهایت سبب افزایش دقت نتایج می‌گردد. همچنین، شایان ذکر است داده‌های خارج از ناحیه‌ی مدل‌سازی نیز برای درون‌یابی جهت تنش در هر المان مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، برای آن نواحی که اطلاعات کافی GPS و یا نرخ لغزش گسل‌های آن ناحیه موجود نیست، اطلاعات جهت تنش‌های اصلی در نواحی خارج از مدل نیز به بهبود نتایج کمک شایانی می‌کند.

۲-۳-۴- شرایط تغییر مکانی

منطقه مطالعاتی در این تحقیق، از غرب به چین-خوردگی‌های زاگرس و گسل ده‌شیر به نحوی محدود شده است که نوار تغییرشکلی ایران مرکزی را از نوار تغییرشکلی پهنه شرقی ایران جدا کرده است. این منطقه از شرق به مدار ۶۲ درجه، که تقریباً جداکننده مرزهای سیاسی ایران از سایر کشورهای همسایه می‌باشد؛ محدود بوده است و از شمال به کوه سرخ و گسل درونه که جداکننده قسمت شرقی از شمال شرقی ایران می‌باشد، متصل می‌گردد. محدوده انتخابی به گونه‌ای است که گسل‌های اصلی که دارای رژیم یکسانی با پهنه شرقی هستند، تماماً در این محدود قرار گرفته و از جنوب به ناحیه فرورانش مکران ختم شده است.

در حالت کلی ناحیه مدل‌سازی به نحوی انتخاب شده است که مرزهای منطقه مطالعاتی، هیچ گسلی را قطع نکنند. همان‌گونه که در شکل (۳) نشان داده شده است، همه گسل‌هایی که رژیم یکسانی با رژیم پهنه شرقی دارند، داخل مدل جای گرفته‌اند. همچنین سرعت نقاط بر روی مرزهای مدل که یکی از شروط این تکنیک مدل‌سازی می‌باشد؛ از مدل تغییرشکلی بزرگ مقیاس فلات ایران که توسط خداوردیان و همکاران در سال ۲۰۱۴ ارائه شده، اقتباس گردیده است [۳]. به منظور استفاده از این تکنیک مدل‌سازی، منطقه مطالعاتی به المان‌های کوچکتری افراز می‌شود و برای تمام نقاط گرهی، مقادیر جابجایی بلندمدت با استفاده از تکنیک المان محدود محاسبه می‌گردد. شکل (۳)

همان‌طور که در جدول (۱) می‌بینیم نرخ لغزش گسل‌های دشت بیاض، کوه بنان و نایبند و نه‌غربی با استفاده از مطالعات زمین‌شناسی محاسبه شده ولی ما در این مطالعه برای صحت سنجی نتایج این تحقیق، انحراف معیار گسل‌های مورد مطالعه را برابر با 3mm/year ، همانند گسل‌هایی که مقدار نرخ لغزش آنها براساس مطالعات زمین‌شناسی مشخص شده است، قرار داده‌ایم و در بخش نتایج، نرخ لغزش به دست آمده از این مطالعه برای گسل‌های دشت بیاض، کوه بنان و نایبند و نه‌غربی را با نتایجی که در جدول (۱) آمده است؛ مقایسه کردیم.

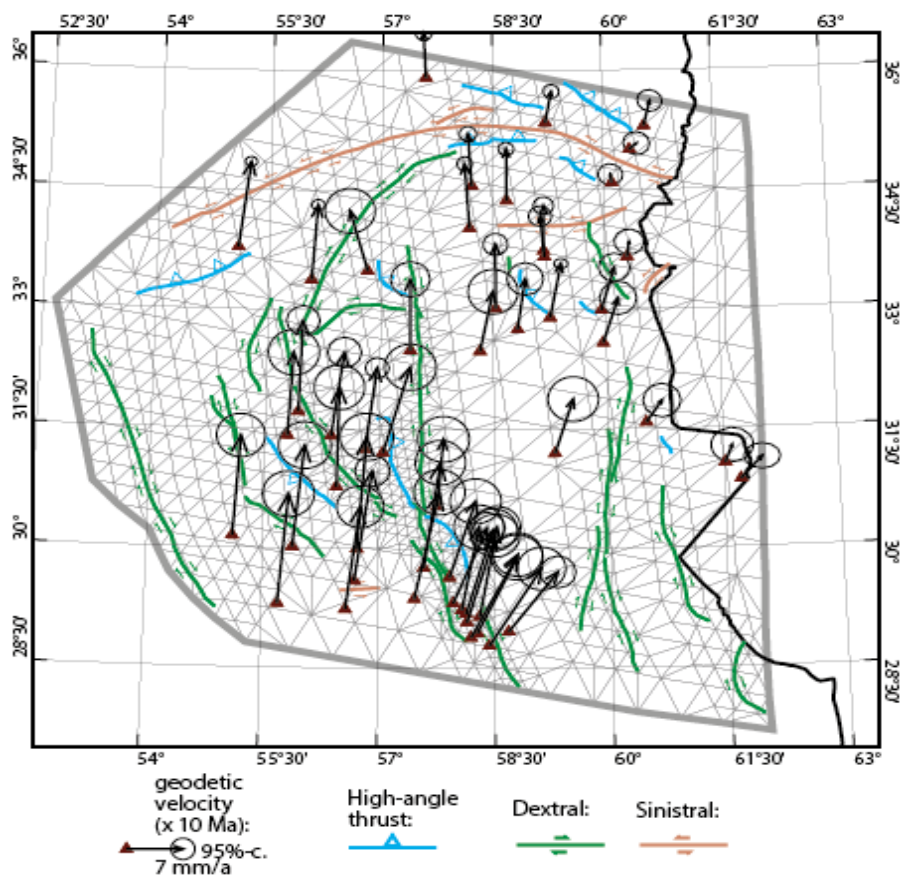
۲-۳-۲- داده‌های ژئودتیکی

داده‌های ژئودتیکی، شامل بردارهای سرعت شبکه ژئودینامیک کشور در پهنه شرقی بوده که از داده‌های یک پژوهش که در این زمینه کار شده بود استفاده شده است [۲۴]. شایان ذکر است که در مطالعه مذکور و سایر مطالعات مشابه، به منظور تعیین بردارهای سرعت، جابجایی‌های ناشی از زلزله‌های بزرگ لحاظ نگردیده‌اند. همچنین به دلیل ناپایداری عددی در روابط تحلیلی مورد استفاده در تکنیک مدل‌سازی کینماتیکی، میدان سرعت ایستگاه‌هایی که در فواصل نزدیکتر از ۲ کیلومتری گسل‌های فعال با نرخ لغزش بیشتر از ۱ میلی‌متر در سال قرار دارند، حذف شده‌اند. دلیل این امر، قفل‌شدگی گسل بوده و مقادیر نرخ لغزش در فواصل نزدیکتر از ۲ کیلومتر، کمتر از مقدار نرخ لغزش بلندمدت واقعی است و هرچه به گسل نزدیکتر شویم این مقدار کوچکتر شده و در روی گسل به صفر می‌رسد.

۲-۳-۲- جهت اصلی تنش‌ها

با توجه به اینکه در تکنیک مدل‌ساز استفاده شده، محیط به صورت ایزوتروپ در نظر گرفته می‌شود؛ جهت تنش اصلی در هر یک از المان‌ها با جهت کرنش اصلی یک سو می‌باشد. به همین جهت، جهت تنش‌های اصلی به عنوان یک قید در در مدل کینماتیکی منظور

پهنه‌ی شرقی ایران به همراه گسل‌های موجود در این منطقه را نشان می‌دهد.

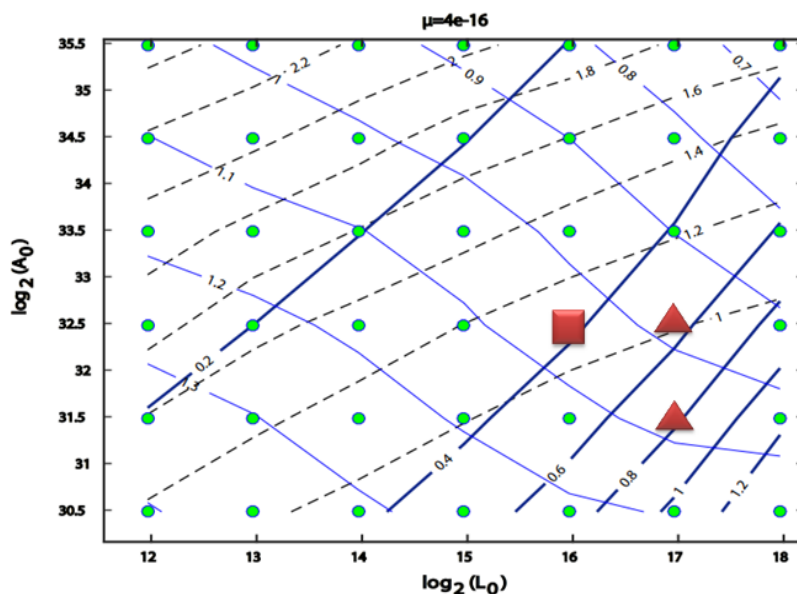


شکل ۳: گسل‌های فعال پهنه شرقی فلات ایران. شبکه‌المان‌های مثلثی با خطوط خاکستری باریک نمایش داده شده و مرز ناحیه مدل‌سازی شده با خط خاکستری ضخیم نشان داده شده است. علاوه بر آن بردارهای سرعت در ایستگاه‌های (GPS) به همراه بیضی خطای آنها در سطح ۹۵٪ اطمینان، با در نظر گرفتن چارچوب ثابت اوراسیا نشان داده شده است.

۲-۴- جزئیات مدل

همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است، سطح ناحیه مورد نظر با استفاده از یک شبکه از المان‌های دوبعدی پوشانده شده است. همچنین برای افزایش دقت مدل-سازی، در آن نواحی که شبکه متراکم از ایستگاه‌های GPS در اختیار بوده و تعداد گسل‌ها متعدد است، از

المان‌هایی با ابعاد کوچک‌تر استفاده شده است. مدل ارائه شده دارای ۱۳۵۰ المان مثلثی با ابعاد ۱۵ تا ۶۰ کیلومتر می‌باشد. کمینه و بیشینه عمق قفل‌شدگی گسل‌های بخش شرقی فلات ایران به ترتیب برابر ۴۰ و ۱۵ کیلومتر در نظر گرفته شده است [۳].



شکل ۴: مقادیر معیار خطا در مدل‌های با $\mu = 4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ و A_0, L_0 متغیر. خطوط نازک، ضخیم و خطچین به ترتیب معرف معیارهای N_2^{sterr} ، N_2^{potency} ، N_2^{geodetic} می‌باشند مدل‌های قابل قبول و انتخاب شده به ترتیب به صورت مثلث و مربع نشان داده شده است.

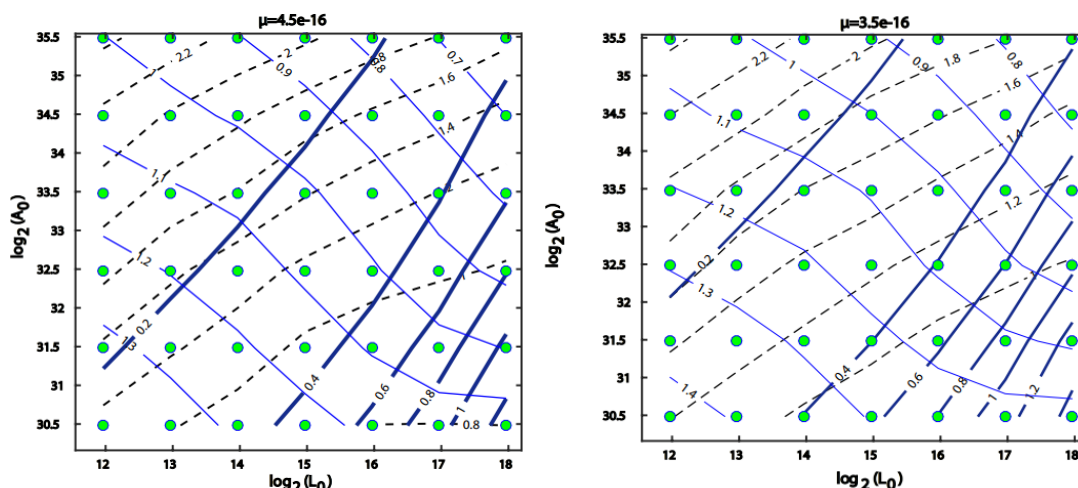
می‌باشد، حداکثر خطای میزان در مقادیر سرعت‌های برآورد شده برابر $1/9$ میلی‌متر در سال خواهد بود [۳]. همچنین در بین پنج مدل فوق، سه مدل دارای N_2^{potency} کمتر از 0.8 می‌باشند که در با علامت‌های مثلثی و مربع نشان داده شده‌اند. میدان نرخ جابجایی در این سه مدل دارای انحراف معیار 2 میلی‌متر در سال است؛ به عبارت دیگر، عدم قطعیت نرخ جابجایی در این سه مدل به میزان انحراف معیار داده‌های GPS محدود شده است. بنابراین این مدل‌ها را می‌توان به عنوان مدل‌های قابل قبول، در نظر گرفت. از بین سه مدل نهایی، مدل $(L_0 = 6.0 \times 10^4 \text{ m}, A_0 = 6 \times 10^3 \text{ m}^2)$ بهترین مدل تغییرشکلی محسوب می‌شود و مقادیر معیار خطا برای این مدل برابر $N_2^{\text{sterr}} = N_2^{\text{potency}} = 1, N_2^{\text{geodetic}} = 0.4$ می‌باشد.

در این مرحله از مدل‌سازی، هدف ما تعیین مقادیر A_0, L_0 از پارامترهای کنترل‌کننده مدل بود. بدین منظور پارامتر μ ثابت در نظر گرفته و خروجی‌های مدل را با تغییر پارامترهای A_0, L_0 بدست آوردیم و سپس با توجه به مقادیر خطای آنها، مقدار بهینه‌ی این

همان‌طور که در فرمولاسیون مدل‌سازی مطرح شد، این تکنیک مدل‌سازی دارای سه پارامتر تنظیمی برای حداقل کردن میزان خطا نسبت به مشاهدات است. از همین رو برای یافتن مقدار بهینه، از ساخت 42 مدل مختلف (یعنی اجرای این مدل‌سازی با 42 پارامتر ورودی متفاوت (یک شبکه از مقادیر مختلف A_0, L_0)) استفاده گردید. در تمامی این مدل‌ها پارامتر μ به میزان ثابت $4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ و مقادیر A_0, L_0 به ترتیب در محدوده $(4 \times 10^2 \text{ m} - 2.56 \times 10^5 \text{ m})$ و $(1.5 \times 10^4 \text{ m}^2 - 48 \times 10^4 \text{ m}^2)$ تغییر داده شده است. مقادیر معیار خطا $(N_2^{\text{sterr}}, N_2^{\text{potency}}, N_2^{\text{geodetic}})$ برای هریک از این مدل‌سازی‌ها محاسبه و در شکل (۴) نمایش داده شده است (دایره‌های نمایش داده شده در شکل (۴)، مقادیر A_0, L_0 به کار رفته برای مدل‌سازی را نشان می‌دهند و خطوط موجود مقادیر خطاها را بیان می‌کنند). بر اساس این شکل، مقادیر $(N_2^{\text{sterr}}, N_2^{\text{geodetic}})$ برای 5 مدل‌سازی مختلف کمتر از $1/1$ می‌باشد. با توجه به انحراف معیار داده‌های GPS به کار رفته که در محدوده $1/7 - 0/6$ میلیمتر در سال

مقادیر μ, μ^* می‌بایست تا حد امکان به هم نزدیک باشند [۳]. از این رو کنترل این سازگاری به عنوان آخرین کنترل به منظور انتخاب مدل بهینه باید در نظر گرفته شود.

دو پارامتر تعیین شدند. اکنون باید مقدار بهینه μ تعیین شود. یکی از خروجی‌های این مدل‌سازی، برآورد مدل از مقدار μ می‌باشد که در آنالیز قبل (شکل (۴)) آن را ثابت در نظر گرفتیم. این برآورد با μ^* نشان داده می‌شود. با استناد به پژوهشی در این زمینه،



شکل ۵: مقدار μ, μ^* (تصویر بالا (۵-الف)) و دو معیار خطای $N_2^{stres}, N_2^{geodic}$ به صورت تابعی از μ با در نظر گرفتن

$$L_0 = 6 \times 10^4 m, A_0 = 6 \times 10^9 m^2 \quad \text{(تصویر پایین (۵-ب))}$$

برای این کار مقادیر A_0, L_0 در این تکنیک مدل‌سازی برابر مقادیر بهینه به دست آمده در مرحله قبل در نظر گرفته می‌شود و مدل در این مرحله با مقادیر مختلف μ در بازه $1 \times 10^{-6} S^{-1}$ تا $6 \times 10^{-6} S^{-1}$ اجرا می‌شود (۱۲ مقدار مختلف در نظر گرفته می‌شود، و لذا ۱۲ مدل‌سازی مختلف انجام می‌دهیم). نتایج این مدل‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵-الف) به دو نکته اساسی می‌توان پی برد: اولاً μ, μ^* در محدوده $4 \times 10^{-6} S^{-1}$ تقریباً باهم برابرند. بهترین حالت در $4 \times 10^{-6} S^{-1}$ رخ می‌دهد که تقریباً مقادیر برابری دارند. از طرفی حساسیت μ^* نسبت به μ بسیار جزئی است. به طوری که تغییر پارامتر μ از $1 \times 10^{-6} S^{-1}$ تا $6 \times 10^{-6} S^{-1}$ فقط باعث تغییر $1/5 \times 10^{-6} S^{-1}$ در پارامتر μ^* می‌گردد. با توجه به شکل (۵-ب) مشاهده می‌شود که مقادیر بزرگتر از

نیز با توجه به مقادیر معیار خطا $(N_2^{stres}, N_2^{geodic})$ می‌توانند به عنوان مقدار بهینه انتخاب شوند، ولی با استناد به تفاسیر و شکل (۵-الف)، تنها مقداری که سازگاری μ, μ^* را ارضا می‌کند، $\mu = 4 \times 10^{-6} S^{-1}$ می‌باشد. با مقایسه مقدار $\mu = 4 \times 10^{-6} S^{-1}$ برای مدل جدید به دست آمده از این تحقیق و مقدار $\mu = 6 \times 10^{-6} S^{-1}$ برای مدل به دست آمده از مطالعات خداوردیان و همکاران، مشاهده می‌کنیم که دقت مدل جدید ارائه شده برای پهنه شرقی بالاتر از مدل ارائه شده توسط خداوردیان و همکاران می‌باشد. علت این امر می‌تواند ناشی از افزایش تعداد ایستگاه‌های GPS در ناحیه مورد مطالعه بوده که موجب مدل‌سازی دقیق‌تر و بهتر رئولوژی منطقه شده است. از طرفی در مطالعات خداوردیان و همکاران، جهت مدل‌سازی، یک رژیم

یکسان برای کل فلات ایران در نظر گرفته شده است. این در حالی است که قسمت‌های شمال شرقی، شمال غربی، زاگرس، البرز و مکران هرکدام دارای رژیم خاصی می‌باشند و همه آن‌ها را با یک مدل مشابه نمی‌توان با دقت یکسانی مورد مطالعه قرار داد. بنابراین از آنجایی که در این تحقیق، منطقه مورد مطالعه ما دارای رژیم خاص خود است، دقت مدل‌سازی آن نسبت به مطالعه خداوردیان و همکاران بیشتر شده است.

۳- نتیجه مدل تغییرشکلی

در این بخش از مطالعات، نرخ لغزش بلند مدت برای تمامی گسل‌های شناخته‌شده پهنه شرقی با استفاده از تمامی اطلاعات کینماتیکی موجود ارائه می‌شود. این مقادیر در جدول (۲) نشان داده شده است. از آنجایی که نرخ لغزش مستقیماً از نرخ جابجایی برآورد می‌شود و عدم قطعیت نرخ جابجایی، همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد تقریباً برابر با انحراف معیار داده‌های ژئودتیکی برآورد شده است؛ بنابراین به طور کلی می‌توان عدم قطعی ۱۲ میلیمتر بر سال را برای نرخ لغزش‌ها بیان کرد. اما این مقدار برای گسل‌های بم، گوک، درونه و... که ایستگاه‌های GPS در این منطقه توزیع مناسب‌تری دارند، به ۰/۶ میلیمتر بر سال کاهش می‌یابد و به طور معکوس، این مقدار در گسل‌های ده‌شیر، زاهدان، نصرت آباد و... به دلیل عدم جود ایستگاه‌های GPS و یا توزیع نامناسب ایستگاه‌ها، به میزان ۱/۷-۲ میلیمتر بر سال افزایش می‌یابد.

نرخ لغزش بر اساس مطالعات زمین‌شناسی برای گسل‌های کوه بنان برابر ۱-۲ میلیمتر در سال، دشت بیاض ۲/۵ میلیمتر در سال و نایبند 0.75 ± 1.8 میلیمتر در سال گزارش شده است [۱۳، ۱۵ و ۲۰]. این کمیت‌ها در مدل ما به ترتیب برابر با ۱/۴۹ میلیمتر در سال، ۲/۴۴ میلیمتر در سال و ۲/۴۹ میلیمتر در سال برآورده شده و همچنین با بررسی سایر گسل‌ها در جدول (۱) با نتایج به دست آمده از مدل در جدول (۲)،

کاملاً مشهود است که مدل با نتایج زمین‌شناسی کاملاً مطابقت داشته و با این نتایج سازگاری خوبی دارد.

تحقیقات خداوردیان و همکاران و همچنین والپرزدورف و همکاران از جدیدترین مطالعات انجام شده برای برآورد نرخ لغزش در شرق ایران می‌باشند [۲ و ۳]. نتایج این دو مطالعه بهترین ابزار برای صحت‌سنجی مدل پیشنهادی به حساب می‌آید. نتایج به دست آمده از این مطالعات در جدول (۲) آورده شده است که برای ارزیابی دقت مدل پیشنهادی، به عنوان مثال نتایج به دست آمده از سه مدل را برای سیستم گسلی سیستان مقایسه می‌کنیم.

همان‌طور که قبلاً گفته شد، به علت ماهیت مدل‌سازی با بلوک‌های الاستیک، مجموعه‌ای از گسل‌های فعال به صورت یک مرز مدل می‌شوند. از همین رو در تحقیقات والپرزدورف و همکاران [۲]، نرخ لغزش برای کل شبکه گسل‌های سیستان (شامل گسل‌های نه-غربی، نه-شرقی، آبیژ و زاهدان) 0.6 ± 6.5 میلیمتر در سال ارائه شده است. در مطالعات خداوردیان که مدل‌سازی به وسیله مدل پیوسته برای کل ایران ارائه شده است؛ نرخ لغزش برای هریک از گسل‌های شبکه گسلی سیستان به طور جداگانه مدل شده که این مقادیر برای گسل‌های زاهدان، نه-غربی، نه-شرقی به ترتیب برابر با ۱/۶ میلیمتر در سال، ۲/۱ میلیمتر در سال و ۳ میلیمتر در سال می‌باشد.

نرخ لغزش‌های محاسبه شده توسط مدل پیشنهادی برای گسل‌های زاهدان، نه-غربی و نه-شرقی به ترتیب برابر ۱/۷۲ میلیمتر در سال، ۳ میلیمتر در سال و ۲/۱ میلیمتر در سال می‌باشد. همان‌گونه که از نتایج مشهود است با مقایسه نتایج به دست آمده از مطالعه خداوردیان و همکاران، نرخ لغزش مدل پیشنهادی برای گسل زاهدان به مقدار نرخ لغزش به دست آمده از نرخ لغزش زمین‌شناسی نزدیکتر است [۳].

جدول ۲: نرخ لغزش بلند مدت برای تمامی گسل های شناخته شده پهنه شرقی به دست آمده از مدل. در این جدول علائم گسل ها به ترتیب برابر هستند با: گسل راست بر (RL)، گسل چپ بر (LL)، گسل تراست (T)

نام گسل	نرخ لغزش محاسبه شده (میلیمتر در سال)	نرخ لغزش براساس مطالعات دیگران (میلیمتر در سال)	منبع
آبیز	۱٫۹۳ (RL)	۲٫۲۵	[۳]
انار	۰٫۹۶ (RL)	۱٫۲-۲٫۷ ، ۱±۰٫۴	[۳ و ۲]
بم	۱٫۸۳ (RL)	۲٫۱±۱ ، ۲٫۳۵	[۳ و ۲]
بیرجند	۰٫۶۴ (LL)	۰٫۳۲	[۳]
سبزواران	۱٫۹۳ (RL)	۲٫۳±۲٫۴ ، ۳٫۰۰	[۳ و ۲]
تربت جام	۰٫۲۹ (RL)	۰٫۶۵	[۳]
تربت جام	۰٫۵۸ (T)	۰٫۵۸	[۳]
درونه	۲٫۲۴-۲٫۴(LL)	۱٫۳±۰٫۸ ، ۲٫۱۳-۲٫۲۹	[۳ و ۲]
دشت بیاض	۲٫۴۴ (LL)	۳٫۴۲	[۳]
ده شیر	۱٫۹۴ (RL)	۱٫۴±۰٫۹ ، ۱٫۲۰	[۳ و ۲]
رفسنجان	۰٫۵۶ (RL)	۰٫۷۴	[۳]
زاهدان	۱٫۷۲ (RL)	۱٫۶۴	[۳]
شهداد	۰٫۷ (RL)	۱٫۰۲	[۳]
کوه بنان	۱٫۴۹ (RL)	۱-۲ ، ۱٫۲۰	[۳ و ۲]
گوک	۱٫۷۴ (RL)	۱٫۵	[۳]
گوک (گلپاف)	۳٫۶۳ (RL)	۴٫۲±۰٫۷ ، ۳٫۸۰	[۳ و ۲]
نابیند	۲٫۳۰ (RL)	۱٫۸±۰٫۷ ، ۲٫۰۰	[۳ و ۲]
نسترآباد	۲٫۱۸ (RL)	۲٫۱۰	[۳]
نه شرقی	۳٫۰۳ (RL)	۳٫۰۲	[۳]
نه غربی	۲٫۱۳ (RL)	۲٫۲۰	[۳]

۴- نتیجه گیری

مدل سازی حرکت گسل ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به همین جهت در این مقاله سه دسته داده کنیما تیکی شامل نرخ لغزش گسل ها که از مطالعات زمین شناسی به دست آمده، نرخ تغییر جابجایی

همان طور که در بخش های قبلی بیان شده، برآورد نرخ لغزش گسل ها و میدان های سرعت و کرنش به منظور

تکتونیکی برای شرق ایران از سایر فرآیندهای ژئودینامیکی در فلات ایران مجزا شده است. این مسأله در مورد ایران که از چندین رژیم مختلف تشکیل گردیده بسیار حائز اهمیت است زیرا هر رژیم می‌تواند دارای رئولوژی و پارامترهای تنظیم کننده خاص باشد و در نتیجه هریک از این رژیم‌ها ممکن است دارای معیار-های خطای مختلف و در نهایت مدل بهینه متفاوتی باشند. بنابراین مطالعه کل فلات ایران به صورت یکپارچه و با یک مدل خاص نمی‌تواند روند تغییر شکل را با دقت یکسانی برای همه رژیم‌های حاکم بر این منطقه نمایش دهد. در این پژوهش ما توانستیم با انجام فرآیندهای ذکر شده، نرخ لغزش گسل‌های پهنه شرقی ایران را با عدم قطعیت ۱ میلی‌متر در سال محاسبه کنیم.

ایستگاه‌های GPS و جهت تنش‌های اصلی، با استفاده از یک مدل اجزای محدود با یکدیگر تلفیق شده و از آن برای مطالعه تکتونیک بخش شرقی فلات ایران استفاده شده است. در الگوریتم پیشنهادی یک تابع هدف با استفاده از روش آزمون و خطا تعریف و مقدار بهینه برای این تابع بدست می‌آید و با توجه به بهینه‌سازی تابع هدف، نرخ لغزش گسل‌ها را با بالاترین دقت از داده‌های حال حاضر برآورد می‌کند. مهمترین مزیت این روش در مقایسه با مطالعات قبلی که عمدتاً با استفاده از مدل بلوک بوده است؛ برآورد نرخ لغزش گسل‌های ثانویه موجود در منطقه مطالعاتی می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از این مدل در پهنه شرقی ایران نسبت به مطالعات قبلی انجام شده در این منطقه از دقت بالاتری برخوردارند، زیرا در این مطالعه، پهنه شرقی به طور مستقل مورد بررسی قرار گرفته و رژیم

مراجع

- [1] National Cartographic Center, (<http://ncc.org.ir/homepage.aspx?site=NC> CPortal&tabid=1&lang=fa-IR)
- [2] A. Walpersdorf, I. Manighetti, Z. Mousavi, F. Tavakoli, M. Vergnolle, A. Jadidi D. Hatzfeld, A. Aghamohammadi, A. Bigot, Y. Djamour, "Present-day kinematics and fault slip rates in eastern Iran, derived from 11 years of GPS data", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(2):1359-138, 2014
- [3] A. Khodaverdian, H. Zafarani, and M. Rahimian. "Long term fault slip rates, distributed deformation rates and forecast of seismicity in th Iranian plateau", 2190-2220, 2015, *Tectonics*.
- [4] K. Hessami, F. Mobayyen, H. Tabassi, "The map of active faults of Iran". In., 2 edn. Tehran: international institute of earthquake engineering and seismology, 2013.
- [5] J. Savage, R. Burford R, Geodetic determination of relative plate motion in central California. *Journal of Geophysical Research*, 78(5):832-845, 1973
- [6] R. McCaffrey, M. D. Long, C. Goldfinge, P. C. Zwick, J. L. Nabelek, Johnson CK, Smith C: "Rotation and plate locking at the southern Cascadia subduction zone", *Geophysical Research Letters*, 27(19):3117-3120, 2000
- [7] P. Bird, Z. Liu, "Seismic hazard inferred from tectonics: California", *Seismological Research Letters*, 78(1):37-48, 2007
- [8] Z. Liu, P. Bird, "Kinematic modelling of neotectonics in the Persia-Tibet-Burma orogeny", *Geophysical Journal International*, 172(2):779-797, 2008
- [9] P. Bird, "Long-term fault slip rates, distributed deformation rates, and forecast of seismicity in the western United States from joint fitting of community geologic, geodetic, and stress direction data sets", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 114(B11), 2009
- [10] T. M. Howe, P. Bird, "Exploratory models of long-term crustal flow and resulting seismicity across the Alpine-Aegean orogeny", *Tectonics*, 29, 1-19, 2010

- [11] W. K. Rucker, "Neotectonic kinematic analysis of the Philippines orogen: Regional strain-rates and a forecast of long-term seismicity", *American Geophysical Union, Fall Meeting*, 2009.
- [12] K. LeDortz, B. Meyer, M. Sébrier, H. Nazari, R. Braucher, M. Fattahi, L. Benedetti, M. Foroutan, L. Siame, D. Bourlès, "Holocene right-slip rate determined by cosmogenic and OSL dating on the Anar fault, central Iran", *Geophysical Journal International*, 179(2):700-710, 2009
- [13] M. Talebian, S. H. Tabatabaei, M. Fattahi, M. Ghorashi, A. Beitollahi, A. Ghalandarzadeh, M. A. Riahi, "Estimating slip rates of faults around bam and their application in evaluation of earthquake hazard", *Geosciences*, 19(74), 149-156, 2010.
- [14] Fattahi M, Walker R, Khatib M, Dolati A, Bahroudi A, "Slip-rate estimate and past earthquakes on the Doruneh fault, eastern Iran. *Geophysical Journal International*", 168(2):691-709, 2007
- [15] M. Fattahi, R. Walker M. Khatib, M. Zarrinkob, M. Talebian, "Determination of Slip-Rate by Optical Dating of Lake Bed Sediments from the Dasht-E-Bayaz Fault Ne Iran", *Geochronometrica*, 42, 148-157, 2015.
- [16] K. LeDort, B. Meyer, M. Sébrier, R. Braucher, H. Nazari, L. Benedetti, M. Fattahi, D. Bourlès, M. Foroutan, L. Siame, "Dating inset terraces and offset fans along the Dehshir Fault (Iran) combining cosmogenic and OSL methods", *Geophysical Journal International*, 185(3):1147-1174, 2011
- [17] B. Meyer, F. Mouthereau, O. Lacombe, P. Agard, "Evidence of Quaternary activity along the Deshir Fault: implication for the Tertiary tectonics of Central Iran", *Geophysical Journal International*, 192-201, 2005.
- [18] B. Meyer, H. LeDortz, "Strike-slip kinematics in Central and Eastern Iran: Estimating fault slip-rates averaged over the Holocene", *Tectonics*, 26(5), 1-20, 2007
- [19] V. Regard, O. Bellier, J. C. Thomas, D. Bourlès, S. Bonnet, M. Abbassi, R. Braucher, J. Mercier, E. Shabanian, S. Soleymani, "Cumulative right-lateral fault slip rate across the Zagros-Makran transfer zone: role of the Minab-Zendan fault system in accommodating Arabia-Eurasia convergence in southeast Iran", *Geophysical Journal International*, 162(1):177-203, 2005
- [20] F. Walker, F. Allen, "Offset Rivers, drainage spacing and the record of strike slip faulting: The Kuh Banan Fault", *Tectonophysics*, 530, 251-263, 2012.
- [21] R. Walker, J. Jackson, "Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran", *Tectonics*, 23(5), 1-24, 2004.
- [22] R. T. Fattahi, M. Walker, R. A. Talebian, A. Sloan, A. Rasheedi, "Late Quaternary active faulting and landscape evolution in relation to the Gowk Fault in the South Golbaf Basin, S.E, Iran", *Geomorphology*, 204, 334-343, 2005.
- [23] M. Foroutan, B. Meyer, M. Sébrier, H. Nazari, A. Murray, K. LeDortz, M. Shokri, M. Arnold, G. Aumaître, D. Bourlès, "Late Pleistocene-Holocene right slip rate and paleoseismology of the Nayband fault, western margin of the Lut block, Iran". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(4):3517-3560, 2014
- [24] R. Mohamma, Z. Zarifi, F. Nilfouroushan, S. Amini Boroujeni, and K. Tiampo, "uantitative Analysis of Seismicity in Iran", *Pure and Applied Geophysics*, 174, 793-833, 2017.



Determination of long-term slip rates of faults in the eastern part of Iran plateau using finite element kinematic model

Hossein Nourizadeh¹, Alireza Khodaverdian², Mehdi Raoofian-Naeeni^{3*}, Zahra Mousavi⁴

1- Msc Student, Departement of Geodesy and Geomatics, K. N. Toosi University of Technology.

2- Ph.D graduate, Faculty of civil engineering, University of Tehran.

3- Assistant Prof. Faculty of Geodesy and Geomatics engineering, K. N. Toosi University of Technology.

4- Assistant Prof. Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, University of Zanjan.

Abstract

Since Iran plateau is located in the Alpine-Himalayan Orogenic belt, it is recognized as a region with a high seismic risk. Thus, investigation of geodynamic activities of the faults, their slip rates and corresponding deformation fields is very important for quantification of possible seismic risk in this region. The aim of this study is to analyze the tectonic features of eastern part of Iran plateau and determine the long-term slip rates of active faults in this part. To do so, the velocity vectors of geodynamic stations, the directions of principal stresses from global models and fault slip rates derived from different geological sources are assimilated using kinematical finite element model (Neokinema) to derive the optimum slip rates on the fault surface. Neokinema uses three controlling parameters to run the model. These parameters are determined by sensitivity analysis. The final slip rates using this model are determined with the error of 1 mm/yr. To validate the results of Neokinema model, the slip rates of KouhBanan, Dasht-e Bayaz and Nayband faults computed from the model are compared with those of geological observations which illustrate a good consistency between model prediction and geologic observations.

Key words: Slip rates, direction of principal stresses, Neokinema model, Iran Plateau.