نشربه علمى بژو،شق مهندسي فناوري اطلاعات مكاني

سال هفتم، شمارہ چھارم، زمستان ۱۳۹۸ Vol.7, No.4, Winter 2020 ۲۱ – ۷۰ مقالہ پژوهشی

والف كدهج بريق بردار

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

حسین نوری زاده'، علیرضا خداوردیان^۲،مهدی روفیان نائینی^{۳®}، زهرا موسوی[†]

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

چکیدہ

قرار گیری فلات ایران در کمربند لرزه خیز آلپ-هیمالیا 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 پهنهی 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 تنظیم کننده (μ, L_0, A_0) در نظر گرفته شد و در نهایت با انجام آنالیز حساسیت برای سه معیار خطای ^{یورسور}، N²⁰⁰⁰, N²⁰⁰⁰, که متناسب با سه دسته ورودی (نرخ لغزش، مشاهدات ژودودی محدود شد و نرخ لغزش گسلهای است. به معیار خطای ²⁰⁰⁰, N²⁰⁰⁰, N²⁰⁰⁰, که متناسب با سه دسته ورودی (نرخ لغزش، مشاهدات ورودی محدود شد و نرخ لغزش گسلهای پهنه شرقی با عدم قطعیت ۱ میلی متر در سال محاسبه شد. همچنین به منظور صحتسنجی نتایج 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، نه زمری و نایبند، با نتایج به دستآمده از مطالعات زمین شناسی دارای سازگاری مطلوبی است به طوری که اختلاف نتایج بدست آمده کمتر از ۱ میلیمتر در سال است.

كليد واژهها : نرخ لغزش، جهت تنشهاي اصلي، مدلسازي اجزا محدود كينماتيكي.

^{*} نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک. تلفن: ۹۳۸۲۸۶۲۸۳۷

نشریه علمی پژوهشی – مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هفتم • شماره چهارم • زمستان ۱۳۹۸

۱– مقدمه

قرارگیری فلات ایران در کمربند لرزه خیز آلپ-هیمالیا، وقوع زلزلههای فراوان و وجود گسلهای متعدد در این منطقه، نشاندهنده یآن 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 نشاندهنده یاین مطلب است که ایران همواره دستخوش زمینلرزههای بسیار ویرانگری بوده که نمونههای اخیر آن زلزله ۵ دی ۱۳۸۲ بم و ۴ اسفند که تمونه 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].

زمین شناسی، حرکتِ تقریباً شمالی بخش مرکزی ایران سبب یک برش فعال در شرق ایران می شود که این تغییر شکل ها بر روی مجموعه ای از گسل های راست بر در اطراف کویر لوت متمرکز شده و کویر لوت به عنوان 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

Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-08-30

به طور کلی سیستم گسلی لوت غربی شامل گسل-های نایبند و گوک است و همچنین سیستم گسلی لوت شرقی از گسلهای نهغربی، نهشرقی، زاهدان و آبیز تشکیل شده است که این دو گسل به ترتیب در مرزهای غربی و شرقی کویر لوت قرار گرفتهاند که علاوه بر این دو گسل، گسلهای درونه، کوهبنان، انار و دهشیر (شکل (۲)) مهمترین گسلهای پهنه شرقی فلات ایران محسوب میشوند *[۴* و 7]. بلوک صلب غیرلرزهای شناخته می شود (شکل (۲)). این موارد به همراه لغزش چپبر، در گسلهای 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 گسلهای فعالی را در خود جای داده است. برای مثال گسل طبس و دشت بیاض مسبب زلزلههای مخربی مانند زلزله با بزرگای ۷ سال ۱۹۶۸ و زلزله با بزرگای ۳/۷ سال ۱۹۷۹ بودهاند.



شکل ۲: پهنه شرقی فلات ایران. خطوط مشکی معرف گسلهای فعال است. حروف اختصاری نشانگر نام گسلهای منطقه به شرح زیر است: A: انار، AB: آبیز، AG: آواز–گازیک، AS: آساگی، B: بیرجند، BA: بم، D: درونه، DeB: دشت بیاض، DS: دەشیر، EL: لوت شرقی ، EN: نهغربی، G: گوک، KB: کوهبنان، NS: نستر آباد، NY:نایبند، R: رفسنجان S: سده، SA: سبزواران TJ: تربتجام، WL: نهشرقی، Z: زاهدان [۲].

زمینه انجام شده که در ادامه به آنها اشاره می شود. والپرسدورف ⁽ و همکاران، با مطالعه ۹۲ ایستگاه *GPS*

Walpersdorf

تحقیقات خداوردیان و همکاران و همچنین والپرزدورف و همکاران از جدیدترین مطالعات انجام شده برای برآورد نرخلغزش در شرق ایران میباشند (۳ و ۲]. با وجود فعال بودن پهنه شرقی فلات ایران، مدلسازیهای محدودی از حرکت گسلها در این

Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-08-30

سال هفتم ● شماره چهارم ● زمستان ۱۳۹۸

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 سویج^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 گسل ها[۶]

در روش اول، اختلاف سرعت ثبت شده در ایستگاه-های GPS در دو سمت یک گسل به عنوان نرخ لغزش گسل گزارش می شود. اما مهم ترین محدودیت این روش آن است که از ایستگاههای نزدیک گسلها، به علت قفل شدگی گسل، نمی توان استفاده کرد. با استناد به مطالعات قبلی به عنوان یک عدد پذیرفته شده، داده-های ایستگاههای قرار گرفته در فاصلهای بزرگتر از دو برابر عمق قفل شدگی گسل (حدود ۱۵ کیلومتر) در این روش قابل استفاده خواهند بود. ولى به دليل يراكندگى 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 بلوكهاى الاستيك، 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 رخداده در بخش مرکزی فلات ایران با

بلوکهای الاستیک قابل توصیف نیست و یک مدلسازی صحیح از منطقه، بایستی در برگیرندهی 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 [7]. ضعف مطالعه خداوردیان و همکاران برای پهنه شرقی را میتوان عدم وجود دادههای کافی در آن زمان دانست؛ به طوری که کل دادههای کافی در آن زمان دانست. به هوری که کل دادههای GPS استفاده شده در این مطالعه برای پهنه شرقی فقط ۱۲ ایستگاه بوده است. به همین دلیل، نتایج بهدست 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 می شود. در این مطالعه بیش از ۵۰ ایستگاه GPS و جدیدترین نرخ لغزش گسلها بر اساس مطالعات زمین شناسی در نظر گرفته شد. در این تحقیق از تکنیک substructure استفاده شد و همان طور که در بخش شرایط تغییر مکانی ذکر شد، باندری مدل و همچنین سرعت در روی باندری از مدل خداوردیان و همکاران استخراج گردید. در این تحقیق از دادههای جدیرتر با کمیّت و کیفیت بهتر بهره گرفته شده است به طوری که بیش از ۵۰ ایستگاه GPS و ۱۲ داده زمینشناسی برای نرخلغزش گسلها استفاده شده است. از آنجایی که دقت تکنیک مدلسازی اجزا محدود کینماتیکی (Neokinema) به کمیّت و کیفیت دادههای اولیه وابسته میباشد، این افزایش اطلاعات نقش اساسی در بهبود نتایج مدل داشته و توصيف بهترى از رئولوژى منطقه ارائه داده است. این مدل جامع که دربرگیرنده تمامی نواحی دارای تغییرشکل در پهنه شرقی ایران است، کمک کرد تا برآورد دقیقتر از مقادیر تغییر شکلها در این منطقه بەدست آيد.

¹ Savage

² Burford

³ McCaffrey

۲- روش مدلسازی

تعیین نرخ لغزش بلندم دت گسال های پهنه شارقی ... حسین نوری زاده و همکار ان

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

۲-۲- اصول حاکم بر تکنیک مدلسازی اجزا محدود کینماتیکی

مدل فوق با دریافت منابع مشاهداتی مختلف و خطای هریک از آنها، از طریق بیشینهسازی یک تابع هدف، بهترین نرخ لغزش را برای گسلها برآورد می-کند. اگر مقادیر مشاهدات انجام شده درهر نقطه (مشاهدات ورودی) را با کمیّت اسکالر r و مقادیر مشاهدات ورودی) را با کمیّت اسکالر r و مقادیر برآورد شده متناظر با آنها توسط مدل را با کمیت اسکالر g نشان دهیم، و با فرض آنکه مقادیر کمیت-های مشاهداتی از توزیع نرمال با انحراف معیار σ_k مای مشاهداتی از توزیع نرمال با انحراف معیار پر مرای بدست آوردن بهترین تقریب از دادههای موجود، از برای بدست آوردن بهترین تقریب از دادههای موجود، از روش حداکثر تمایل (Maximum-likelihood) استفاده کرد. بر اساس این روش، باید چگالی احتمال آنکه تمامی کمیّتهای p_k برابر با r_k باشند را ماکزیم

۲-۱- تکنیک مدلسازی اجزا محدود کینماتیکی مدلسازی اجزاء محدود کینماتیکی از تغییر شکلهای سطح زمین (Neokinema) برای اولین بار توسط برد و ليو ارائه شد و پس از آن در تحقيقات متعددي مورد استفاده قرار گرفت (۷، ۸ و ۱۱]. در این مدل، مولفه افقى سرعت بلندمدت نقاط روى سطح پوسته زمين با استفاده از روشهای درونیابی کروی برآورد میشوند. این مدل کینماتیکی، مانند هر مدل کینماتیکی دیگر با پذیرش قیدهای تغییر مکانی، بهترین تقریب از میدان سرعت در محدوده مدلسازی شده را ارائه خواهد داد. یکی از ویژگیهای منحصر به فرد این تکنیک مدلسازی آن است که با دریافت انواع مختلف اطلاعات با عدم قطعیتهای گوناگون، مقدار نرخ لغزش گسلها و نرخ کرنشها برای ناحیه مدلسازی شده را ارائه می-دهد. همچنین، نکته مهم در این تکنیک مدلسازی آن است که نرخ کرنشها و نرخ لغزش بلند مدت گسلها به طور سازگار برای ناحیه مورد بررسی محاسبه می-شود. این در حالی است که دیگر روشهای مدلسازی

$$s = \ln\left\{\prod_{k=1}^{K} \Phi(p_{k} = r_{k})\right\} - \sum_{k=1}^{K} \ln[\Phi(p_{k} = r_{k})] - \sum_{k=1}^{K} \frac{(p_{k} = r_{k})^{2}}{2\sigma_{k}^{2}} + \ln[\sigma_{k}] + \ln\sqrt{2\pi}$$
(1)

(تنها بردارهای سرعت GPS به صورت نقطهای می-باشند، در حالی که بردارهای لغزش موجود در واحد طول گسل بوده و تنشهای اصلی در واحد مساحت سطح گسل میباشند)، به همین جهت تابع تمایل را به نحوی بیان می کنیم که تمامی دادههای ورودی (نقطه، طول، سطح) را شامل شود (رابطه(۲)) [۷]. در رابطه (۱)، $\Phi(p_k)$ تابع چگالی احتمال متغیر p_k ، در رابطه (۱)، $\Phi(p_k)$ تابع چگالی احتمال متغیر K و K مشاهدات ورودی، p_k مقادیر برآورد شده و r_k تعداد مشاهدات انجام شده میباشد. 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 دادههای ورودی به صورت نقطهای نیستند،

$$\ddot{s} = -\sum_{k=1}^{K} \frac{(p_{k} - r_{k})^{2}}{2\sigma_{k}^{2}} - \frac{1}{L_{0}} \sum_{m=1}^{M} \int_{\text{Lengh}} \frac{(p_{m} - r_{m})^{2}}{2\sigma_{m}^{2}} dL - \frac{1}{A_{0}} \sum_{n=1}^{3} \iint_{\text{area}} \frac{(p_{m} - r_{m})^{2}}{2\sigma_{n}^{2}} da$$
(7)

در رابطه (۲)، L₀ و A₀ به ترتیب بیانگر طول و مساحت گسلی میباشند که بردار لغزش و تنش اصلی

نشریه علمی پژوهشی – مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هفتم ● شماره چهارم ● زمستان ۱۳۹۸

 ${
m L}_0$ آن در معادله بالا وارد می شود. به عبارت دیگر معرف طولی از گسل میباشد که قید مقدار لغزش بر روی آن طول، هم ارز با یک قید نقطه ای 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 مدلسازی از سه پارامتر تنظیم کننده ستفاده استفاده بهترین مدل استفاده $\left(\mu,L_{0},A_{0}\right)$ می شود. به عبارت دیگر تنظیم این پارامترها، كنترل كنندهى كيفت مدل برازش شده به نرخ لغزش بدست آمده از مطالعات زمینشناسی، دادههای ژئودتیکی و قیدهای جهت تنش اصلی میباشد. برای به دست آوردن بهترین مقادیر L₀ و A از آنالیز حساسیت و محاسبه سه معیار خطا متناسب با سه دسته دادهی ورودی استفاده می شود. این سه معیار به (۳) ابطه

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

در رابطه (۳)، p_b, p_b و σ_b به ترتیب معرف نرخ جابجایی برآورد شده، مشاهده شده و انحراف معیار آن در نقطه d میباشند. همچنین B تعداد کل ایستگاههای GPS میباشد. از طرفی در رابطه (۴)، ایستگاههای I,a_i,σ_i,r_i,p_i 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 شده یگسل m در المان i نرخ لغزش مشاهده شده، انحراف معیار آن در گسل m طول گسل mدر المان i بیشترین مقدار نرخ لغزش افقی بدست آمده از مدل و m برابر پهنای صفحه گسل m می باشد.

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

$$N_{2}^{stress} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i} a_{i}} \sum_{i=1}^{I} a_{i} \left(\frac{P_{i} - r_{i}}{\sigma_{i}}\right)^{2}}$$

$$N_{2}^{\text{potency}} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i} \sum_{m} l_{im} w_{m} h_{im}} \sum_{i}^{eleents} \sum_{m=1}^{M} l_{im} w_{m} h_{im} \left(\frac{P_{im} - r_{m}}{\sigma_{m}}\right)^{2}}$$

$$(\Delta)$$

۲-۳- داده های ورودی

۲–۳–۱– نرخ لغزش گسلها بر اساس مطالعات زمینشناسی

یکی از ورودیهای اصلی در مدل سازی کینماتیکی، نرخ لغزش زمین شناسی گسل ها 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

استفاده می شود. چرا که دادههای GPS به طور مستقیم در مدل لحاظ شده و نقش به سزایی در مدل-سازی و تعیین نرخ جابجای 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 تعیین نرخ لغزش بلندمـدت گسـل هـای پهنـه شـرقی ... حسین نوری زاده و همکاران

> تکنیک مدلسازی یک مدل دوبعدی است؛ نرخ لغزش گسلهای 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 دادهها وجود دارد، میانگین و انحراف معیار نرخ لغزش به عنوان دو ورودی اصلی مدل در نظر گرفته شده و مقادیر آنه ابراساس اصول زیر لحاظ شد:

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

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

شرقی ماکزیمم نرخی لغزشی که انتظار داریم ۶ میلی-متر بر سال است و از آنجایی که بر اساس معادلات ریاضی این مدلسازی، نرخ لغزش گسل حداکثر می-تواند برابر با مثبت یا منفی دو برابر انحراف معیار بعلاوه میانگین گسل باشد $(m = \sigma_m \pm 2\sigma_n)$ و به دلیل اینکه ما میانگین این گسل ها را صفر در نظر گرفته ایم، منابراین نرخ لغزش گسل هایی که به این صورت تعریف شده است میتوانند حداکثر ۶ میلی متر برسال باشد. شده است میتوانند حداکثر ۶ میلی متر برسال 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.

| منبع | نرخ لغزش براساس مطالعات زمین شناسی (mm / year) | نام گسل |
|---------|---|----------|
| [17] | • / A (RL) | انار |
| [17] | ۲ (RL) | نع |
| [14] | ۲/۱-۲/۷ (RL) | درونه |
| [16] | ۲/۵ (RL) | دشت بیاض |
| [۱۲و۶۲] | Υ (RL) , ٩/٠-١/Δ (RL) | دەشير |
| [\] | $1/V\Delta \pm \cdot / f(RL)$ | زاهدان |
| [١٩] | ۳±۱/۵ (RL) | سبزواران |
| [٢٠] | 1-7 (RL) | كوه بنان |
| | $\nu/\lambda \pm \cdot/\nu$ (RL) | |
| [77و17] | ۴-۴/۹ (RL) | گوک |
| [٣٣] | $1/\lambda \pm \cdot / \Delta \Lambda$ (RL) | نايبند |
| [\] | ۳±۱(RL) | نُەشرقى |
| [١٨] | ۲/۱۳±۰/۲ (RL) | نُەغربى |

جدول ۱: نرخ لغزش براساس مطالعات زمین شناسی

كليد: گسل راستبر (RL)، گسل چپبر (LL)، گسل تراست (T

نشریه علمی پژوهشی – مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هفتم ● شماره چهارم ● زمستان ۱۳۹۸

همان طور که در جدول (۱) می بینیم نرخ لغزش گسل-های دشت بیاض، کوه بنان و نایبند و نُهغربی با استفاده از مطالعات زمین شناسی محاسبه شده ولی ما در این مطالعه برای صحت سنجی نتایج این تحقیق، انحراف معیار گسلهای مورد مطالعه را برابر با *Tmm/year*، همانند گسلهایی که مقدار نرخ لغزش آنها براساس مطالعات زمین شناسی مشخص شده است، قرار داده ایم و در بخش نتایج، نرخ لغزش به دست آمده از این مطالعه برای گسلهای دشت بیاض، کوه بنان و نایبند و نُهغربی 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، قفل شدگی 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 می-رسد.

۲-۳-۳- جهت اصلی تنشها

با توجه به اینکه در تکنیک مدلساز استفاده شده، محیط به صورت ایزوتروپ در نظر گرفته می شود؛ 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

می شود و در نهایت سبب افزایش دقت نتایج می گردد. همچنین، شایان ذکر است دادههای خارج از ناحیهی مدل سازی نیز برای درونیابی جهت تنش در هر المان مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین، برای آن نواحی که اطلاعات کافی GPS و یا نرخ لغزش گسل های آن ناحیه موجود نیست، اطلاعات جهت تنش های اصلی در نواحی خارج از مدل نیز به بهبود نتایج کمک شایانی می کند.

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 می-باشد؛ 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 گسل های 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 مدل سازی به نحوی انتخاب شده است که مرزهای منطقه مطالعاتی، هیچ گسلی را قطع نکنند. همان گونه 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 برروی مرزهای مدل که یکی از شروط این مرعت نقاط برروی مرزهای مدل که یکی از شروط این مرعت نقاط برروی مرزهای مدل که یکی از شروط این مرعت نقاط برروی مرزهای مدل که یکی از شروط این مرعت نقاط برروی مرزهای مدل که یکی از شروط این مرعت نقاط برروی مرزهای مدل که یکی از شروط این مرعت نقاط برروی مرزهای مدل که یکی از شروط این مرعت نقاط برروی مرزهای مدل که یکی از شروط این مطالعاتی به المانهای کوچکتری افراز می شود و برای مطالعاتی به المانهای کوچکتری افراز می شود و برای تمام نقاط گرهی، مقادیر جابجایی بلندمدت با استفاده از تکینیک المان محدود محاسبه می گردد. شکل (۳) منطقه را نشان میدهد.



پهنهی شرقی ایران به همراه گسلهای موجود در این

شکل ۳: گسلهای فعال پهنه شرقی فلات ایران. شبکه المانهای 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

همان طور که در شکل(۳) مشخص است، سطح ناحیه مورد نظر با استفاده از یک شبکه از المان های دوبعدی پوشانده شده است. همچنین برای افزایش دقت مدل-سازی، در آن نواحی که شبکه متراکم از ایستگاههای GPSدر اختیار بوده و تعداد گسل ها متعدد است، از

المانهایی با ابعاد کوچکتر استفادهشده 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].

سال هفتم • شماره چهارم • زمستان ۱۳۹۸

شکل ۴: مقادیر معیار خطا در مدل های با $10^{-6} {
m S}^{-1}$ و $10^{-6} {
m A}_0$ متغیر. خطوط نازک ، ضخیم و خطچین به ترتیب معرف معیار های از $10^{-6} {
m S}^{-1}$ و $10^{-6} {
m S}^{-1}$ و مربع $10^{-6} {
m S}^{-1}$ و مربع $10^{-6} {
m S}^{-1}$ و $10^{-6} {
m S}^{-1}$ میارهای قابل قبول و انتخاب شده به ترتیب به صورت مثلث و مربع نمون معیارهای معیارهای $10^{-6} {
m S}^{-1}$ و مربع نمان معیارهای معیارها معیارها معیارهای معیاره معیار معیار معیارهای معیاره معیاره معیارهای معیارهای معیارهای معیارهای معیارهای معیارهای معیاره معیاره

همان طور که در فرمولاسیون مدل سازی 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 ۴۲ مدل مختلف (یعنی اجرای این مدلسازی با ۴۲ پارامتر ورودی متفاوت (یک شبکه از مقادیر مختلف (A_0, L_0))) استفاده گردید. در تمامی این مدلها پارامتر *µ* به میزان ثابت ${}^{-1}S^{-1} imes {}^*$ و مقادیر ${}^{A}{}_{0}, {}^{L}{}_{0}$ به ترتیب در \bullet ($\mathbf{f} \times \mathbf{i} \cdot \mathbf{m} - \mathbf{r} \cdot \mathbf{\Delta} \mathbf{f} \times \mathbf{i} \cdot \mathbf{m}$) محدوده است. (۱.۵×۱۰^۹ m^2 – ۴۸×۱۰^۱ m^2) تغییر داده شده است. مقادير معيار خطا $(N_2^{sterss}, N_2^{potency}, N_2^{geodetic})$ برای هریک از این مدلسازیها محاسبه و در شکل(۴) نمایش داده شده است (دایرههای نمایش داده شده در شکل(۴)، مقادیر A₀,L₀ به کار رفته برای مدلسازی را نشان میدهند و خطوط موجود مقادیر خطاها را بیان مي كنند). بر اساس اين شكل، مقادير ازی مختلف کمتر از ($N_2^{sterss}, N_2^{geodetic}$) برای $(N_2^{sterss}, N_2^{geodetic})$ ۱٫۱ میباشد. با توجه به انحراف معیار دادههای GPS به کار رفته که در محدوده ۱/۷–۱/۷ میلیمتر در سال

میباشد، حداکثر خطای میزان در مقادیر سرعتهای برآورد شده برابر ۱/۹ میلیمتر در سال خواهد بود [7]. همچنین در بین پنج مدل فوق، سه مدل دارای معچنین در بین پنج مدل فوق، سه مدل دارای مثلثی و مربع نشان داده شدهاند. میدان نرخ جابجایی در این سه مدل دارای انحراف معیار ۲ میلیمتر در سال است؛ به عبارت دیگر، عدم قطعیت نرخ جابجایی سال است؛ به عبارت دیگر، عدم قطعیت نرخ جابجایی محدود شده است. بنابراین این مدلها را میتوان به در این سه مدل به میزان انحراف معیار دادههای *GPS* عنوان مدل های قابل قبول، در نظر گرفت. از بین سه مدل نهایی، مدل ($^{2} n^{2} \cdot 1 \cdot 8 - 6 - 10^{2}$) مدل نهایی، مدل ($(L_{0} - 8 - 10^{2}) - 10^{2}$) معیار خطا برای این مدل برابر معیار خطا برای این مدل میباشد. $N_{2}^{sterss} = N_{2}^{potency} = 1, N_{2}^{geodetic}$

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

تعیین نرخ لغـزش بلندمـدت گسـل هـای پهنـه شـرقی ... حسین نوری زاده و همکار ان

مقادیر * μ, μ می ایست تا حدامکان به هم نزدیک باشند (π]. از این رو کنترل این سازگاری به عنوان آخرین کنترل به منظور انتخاب مدل بهینه باید در نظر گرفته شود.

شکل ۵: مقدار μ, μ^* (تصویر بالا (۵–الف)) و دو معیار خطای N_2^{gedetic} به صورت تابعی از μ, μ^* (۲ مخل گرفتن μ, μ^* شکل ۵: مقدار μ, μ^* (۲ منویر باین (۵–۱)) و دو معیار خطای $L = \rho \times 1.^{\circ} m, A = \rho \times 1.^{\circ} m^{\circ}$

برای این کار مقادیر A_0, L_0 در این تکنیک مدل سازی برابر مقادیر بهینه به دست آمده در مرحله قبل در نظر گرفته میشود و مدل در این مرحله با مقادیر مختلف μ در بازهی $^{-1}S^{-1} \times 1$ تا $^{-2}S^{-1} \times 7$ اجرا میشود (۱۲ مقدار مختلف در نظر گرفته میشود، و لذا ۱۲ مدل سازی مختلف در نظر گرفته میشود، و لذا ۱۲ مدل سازی مختلف انجام می دهیم). نتایج این مدل ها در شکل(۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵-الف) به دو نکته اساسی میتوان پی برد: اولا * μ, μ در محدوده $^{-1}S^{-1} \times 7$ تقریباً باهم برابرند. بهترین حالت محدوده $^{-1}S^{-1} \times 7$ می دهد که تقریباً مقادیر برابری دارند. از طرفی حساسیت * μ نسبت به μ بسیار جزئی است. به طوری که تغییر پارامتر μ از $^{-1}S^{-1} \times 1$ تا $^{-1}S^{-1} \times 7$ فقط باعث تغییر محکل (۵-ب) مشاهده میشود که مقادیر بزرگتر از

 μ دو پارامتر تعیین شدند. اکنون باید مقدار بهینه

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 می شود. با استناد به پژوهشی در این زمینه،

خاب $^{-1}$ نیز با توجه به مقادیر معیار خطا $(N_2^{sterss}, N_2^{gcodetic})$ میتوانند به عنوان مقدار بهینه ($N_2^{sterss}, N_2^{gcodetic}$) انتخاب شوند، ولی با استناد به تفاسیر و شکل (Δ -الف)، تنها مقداری که سازگاری * μ, μ را ارضا میکند، $\mu = F \times 1 \cdot {}^{s} S^{-1}$

با مقایسه مقدار $^{I-1}S^{-1} \times 1 + \mu$ برای مدل جدید به دست آمده از این تحقیق و مقدار $^{I-2}S^{-1} \times 8 = \mu$ برای مدل به دست آمده از مطالعات خداوردیان و همکاران، مشاهده می کنیم که دقت مدل جدید ارائه شده برای پهنه شرقی بالاتر از مدل ارائه شده توسط خداوردیان و همکاران می باشد. علت این امر می تواند ناشی از افزایش تعداد ایستگاههای GPS در ناحیه مورد مطالعه بوده که موجب مدل سازی دقیق تر و بهتر رئولوژی منطقه شده است. از طرفی در مطالعات خداوردیان و همکاران، جهت مدل سازی، یک رژیم

سال هفتم • شماره چهارم • زمستان ۱۳۹۸

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 تمامى اطلاعات كينماتيكي موجود ارائه مىشود. اين مقادیر در جدول(۲) نشان داده شده است. از آنجایی که نرخ لغزش مستقيماً از نرخ جابجایی برآورد می شود و عدم قطعیت نرخ جابحایی، همان طور که در بخش قبل ذکر شد تقریباً برابر با انحراف معیار دادههای ژئودتیکی برآورد شده است؛ بنابراین به طورکلی می توان 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 ۶/ ۰ میلیمتر بر سال کاهش مییابد و به طور معکوس، این مقدار در گسلهای دهشیر، زاهدان، نصرت آباد و... به دلیل عدم جود ایستگاهای GPS و یا توزیع نامناسب ایستگاهها، به میزان ۱/۷-۲ میلمتر بر سال افزايش مي يابد.

نرخ لغزش بر اساس مطالعات زمین شناسی برای گسل-های کوه بنان برابر ۲-۱ میلیمتر در سال ، دشت بیاض ۲/۵ میلیمتر در سال و نایبند ۲/۵ $+\pm$ ۱/۸ میلیمتر در سال گزارش شده است/۱۳۱، ۱۵ و ۲۰]. این کمیّت-ها در مدل ما به ترتیب برابر با ۱/۴۹ میلیمتر در سال ، ۹ ترا 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)،

کاملا 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.

همان طور که قبلاً گفته شد، به علت ماهیت مدل سازی با بلوکهای الاستیک، مجموعهای از گسل های فعال به صورت یک مرز مدل می شوند. از همین رو در تحقیقات والپرزدورف و همکاران [۲]، نرخ لغزش برای کل شبکه گسل های سیستان (شامل گسل های نه_غربی، نه_ شرقی،آبیز و زاهدان) ۲۰۶ ± ۵٫۵ میلی متر در سال ارائه شده است. در مطالعات خداوردیان که مدل سازی به شده است. در مطالعات خداوردیان که مدل سازی به فسیله مدل پیوسته برای کل ایران ارائه شده است؛ نرخ لغزش برای هریک از گسل های شبکه گسلی سیستان به طور جداگانه مدل شده که این مقادیر برای گسل-های زاهدان، نه-غربی، نه-شرقی به ترتیب برابر با ۲٫۶ میلی متر در سال ۲٫۱۰ میلی متر در سال و ۳ میلی متر در سال می باشد.

نرخ لغزش های 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 مطالعهی خداوردیان و همکاران، نرخ لغزش مدل پیشنهادی برای گسل زاهدان به مقدار نرخ لغزش به دست آمده از نرخ لغزش زمین شناسی نزدیکتر است[۳].

| منبع | نرخ لغزش براساس مطالعات دیگران (میلیمتر در سال) | نرخ لغزش محاسبه شده (میلیمتر در سال) | نام گسل |
|--------|--|---|------------|
| [٣] | ۲٫۲۵ | ۱٫۹۳ (RL) | آبيز |
| ۲ و ۲ | 1,7-7,7,1±•, <i>*</i> | • _/ ٩۶ (RL) | انار |
| ۲ و ۳] | ۲,۱±۱ ,۲,۳۵ | ۱ _/ ۸۳ (RL) | بع |
| [٣] | ٠,٣٢ | ۰ _/ ۶۴ (LL) | بيرجند |
| ۲ و ۳] | ۲,۳±۲,۴ ,۳,۰۰ | ۱ _/ ۹۳ (RL) | سبزواران |
| [٣] | <i>۵۶</i> ٬ + | •/۲۹ (RL) | تربت جام |
| [٣] | ۰,۵۸ | • _/ ۵۸ (T) | تربت جام |
| ۲ و ۳] | ۱٫۳±۰٫۸ ۲٫۱۳-۲٫۲۹ | ۲,۲۴-۲,۴(LL) | درونه |
| [٣] | ۲۶,۳۲ | ۲٫۴۴ (LL) | دشت بياض |
| ۲ و ۳] | ヽ,を±・,٩ 、ヽ,Y・ | ۱ _/ ۹۴ (RL) | ده شير |
| [٣] | ۰ _/ ۷۴ | • _/ ۵۶ (RL) | رفسنجان |
| [٣] | ۱٫۶۴ | ۱/۲۲ (RL) | زاهدان |
| [٣] | ١/٠٢ | • _/ ¥ (RL) | شهداد |
| ۲ و ۳] | ۱-۲ ٬۱٬۲۰ | ۱ _/ ۴۹ (RL) | كوه بنان |
| [٣] | ۱,۵ | ۱ _/ ۷۴ (RL) | گوک |
| ۲ و ۳] | ۴,۲±•,۷ ^۲ ,۸۰ | ۳ _/ ۶۳ (RL) | گوک(گلباف) |
| ۲ و ۳] | ۱,۸±۰,۷ ,۲,۰۰ | ۲٫۳۰(RL) | نايبند |
| [٣] | ۲,۱۰ | ۲٫۱۸ (RL) | نسترآباد |
| [٣] | ٣,•٢ | Ψ _/ •Ψ (RL) | نە_شرقى |
| [٣] | ۲٫۲۰ | ۲,۱۳ (RL) | نه غربي |

جدول ۲ : نرخ لغزش بلند مدت برای تمامی گسلهای شناختهشده پهنه شرقی به دست آماده از مدل. در این جدول علائم گسلها به ترتیب برابر هستند با: گسل راستبر (RL)، گسل چپبر (LL)، گسل تراست (T)

۴- نتیجهگیری

همان طور که در بخشهای قبلی بیان شده، بر آورد نرخ لغزش گسلها و میدانهای سرعت و کرنش به منظور

مدل سازی حرکت گسلها از اهمیت ویژهای برخوردار است. به همین جهت در این مقاله سه دسته داده کنیماتیکی شامل نرخ لغزش گسلها که از مطالعات زمینشناسی بهدست آمده، نرخ تغییر جابجایی

نشریہ علمی پژوهشی – مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هفتم ● شماره چهارم ● زمستان ۱۳۹۸

تکتونیکی برای شرق ایران از سایر فرآیندهای ژئودینامیکی در فلات ایران مجزآ 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، نرخلغزش گسلهای پهنه شرقی ایران را با عدم قطعیت ۱ میلیمتر در سال محاسبه کنیم.

- [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

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

- [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

تعیین نرخ لغزش بلندمـدت گسـل هـای پهنـه شـرقی ...

حسین نوری زاده و همکار ان

- [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. Brauche, 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.

Journal of Geospatial Information Technology Vol.7 No.4, Winter 2020

Research Paper

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.

Correspondence Address: Departement of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics engineering, K. N. Toosi University of Technology, Valiasr St, Mirdamad Crossing Tehran, Iran. Tel: +982188888445 Email: mraoofian@kntu.ac.ir