

# افراز آهنگ لغزش بین گسل‌های فعال بخش جنوبی البرز مرکزی با وارد کردن برهمکنش مکانیکی بین گسل‌ها

اصغر راست‌بود<sup>۱</sup>، بهزاد ووثوقی<sup>۲\*</sup> و هانیه طباطبائی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۲</sup>دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۲۲)

## چکیده

برای یک گسل ایده‌آل در محیط کشسان، توزیع لغزش حول یک مقدار مرکزی بیشینه، متقارن و بیضی‌شکل است، ولی در طبیعت این توزیع نه به شکل بیضی و نه متقارن است. توزیع آهنگ لغزش در صفحه گسل به برهمکنش پارامترهای متعددی از جمله هندسه خود گسل و گسل‌های مجاور، شرایط مرزی روی گسل‌ها و مناطق دور و معادله رفتاری محیط اطراف بستگی دارد. از طرفی بررسی این توزیع، نقش مهمی در بررسی انتقال لرزه‌خیزی از یک گسل به گسل‌های دیگر دارد. باتوجه به واقع شدن کلان‌شهر تهران در بخش جنوبی البرز مرکزی، بررسی برهمکنش مکانیکی بین گسل‌های فعال شمال تهران، اهمیت ویژه‌ای در تحلیل خطر لرزه‌ای در پایتخت دارد.

در این تحقیق با در نظر گرفتن یک نیم‌فضای کشسان همگن و همسان برای منطقه مورد بررسی اطلاعات هندسی گسل و پارامترهای رئولوژیکی منطقه از منابع متفاوت انتخاب و ثابت فرض شد. در ادامه شرایط مرزی تنش با استفاده از مشاهدات GPS محاسبه شد که عامل ایجادکننده لغزش در گسل است. بر این اساس جهت بیشینه کوتاه‌شدگی در منطقه مورد بررسی دارای امتداد  $N36.5^{\circ}E$  است که دامنه آن بزرگ‌تر از جهت بیشینه کششی است. سپس گسل‌ها در راستای عمود برهم قفل و در راستای مماسی به‌صورت آزاد رها شدند. با اعمال شرایط مرزی به سامانه گسلی، آهنگ لغزش بین گسل‌ها افزاز شد. برای افزاز از روش المان‌های مرزی استفاده شد. مدل نابرجایی تحلیلی اکادا (۱۹۸۵) نیز درحکم حل اساسی انتخاب شد.

نتایج حاصل، نشانگر خروج آهنگ لغزش توزیع شده روی گسل‌ها از حالت متقارن و بیضی‌شکل است و از وجود برهمکنش بین گسل‌ها تحت تأثیر تنش منطقه‌ای و هندسه گسل‌های مجاور حکایت می‌کند. همچنین اکثر گسل‌ها دارای رفتار چپ‌گرد و معکوس‌اند و آهنگ لغزش‌های چپ‌گرد عموماً بیشتر از آهنگ لغزش‌های معکوس است. علت بیشتر بودن آهنگ لغزش چپ‌گرد نسبت به آهنگ لغزش معکوس در مورد اکثر گسل‌ها ناشی از دو عامل برهمکنش مکانیکی بین گسل‌ها و تمایل محورهای اصلی جهت بیشینه کوتاه‌شدگی و کشیدگی تانسور آهنگ تنش منطقه‌ای نسبت به امتداد گسل‌ها است، به‌نحوی که تصویر مؤلفه‌های اصلی تنش در امتداد اکثر گسل‌ها بیشتر از تصویر مؤلفه‌های متناظر در امتداد عمود بر آنها است. از طرفی در مدل‌سازی صورت گرفته شیب گسل‌ها ثابت در نظر گرفته شده است، درحالی‌که به‌ویژه در مورد گسل‌های معکوس، شیب گسل با عمق تغییر می‌کند.

واژه‌های کلیدی: برهمکنش مکانیکی، افزاز آهنگ لغزش، روش المان‌های مرزی، ناپیوستگی جا بجایی، GPS، تانسور آهنگ تنش

## Slip rate partitioning among the southern central Alborz active faults by considering mechanical interactions among faults

Asghar Rastboud<sup>1</sup>, Behzad Voosoghi<sup>1\*</sup> and Haniye Tabatabaei<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Tabriz University, Tabriz, Iran

<sup>2</sup>*K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran*

(Received: 24 December 2011, accepted: 12 March 2013)

## Summary

For an idealized fault, slip distributions are symmetrical about a central slip maximum and follow an elliptical distribution in an elastic material. However, slip distributions in nature are neither symmetric nor elliptical. The distribution of slip along a fault depends on its geometry and that of neighboring structures, the remote boundary conditions and boundary conditions along the fault(s), and the constitutive behavior of the surrounding host rock (Bürgmann et al., 1994). In fact, an interaction among the mentioned parameters determines the manner of the slip distribution on the fault(s).

On the other hand, fault slip distributions play an important role in earthquake studies. Because faults are loaded at very slow rates in continental interiors, interactions among them and the resulting slip distribution can give rise to earthquakes on other faults after a long period of quiescence and seismicity can migrate from one fault to the other (Landgraf et al., 2009).

The Alborz Mountains accommodate about one-third of the Arabian-Eurasian convergence (e.g., Priestley et al., 1994; Berberian and Yeats, 1999; Jackson et al., 2002). The Moshafasham Fault, the Northern Tehran Thrust and the Taleghan Fault are active faults of the North of Tehran in Southern Central Alborz. It is necessary to analyze the seismic hazard in this area by considering the mechanical interaction among faults.

In this research, a slip partitioning is done among the faults in the North of Tehran. First, an elastic and homogeneous half-space was considered for the study area. Then the geometric data of faults are gathered from geological and geophysical references including the fault length, width, dip, upper and lower locking depths. For Lamé coefficients, we used average global values. Both mentioned geometrical and physical data were kept fixed in the modeling process.

Then, a displacement gradient tensor that best fitted the study area is calculated using GPS data by least squares method. The strain-rate tensor and finally stress rate tensor were then estimated using the generalized Hook's law. It is necessary to note that the orientation of the regional stress field (N36.5°E) was kept fixed in modeling for all of the study area. The stress rate tensor acts as a boundary condition in the model. As another boundary condition, the faults were locked in a normal direction but they were allowed to slip freely in strike and dip directions under the influence of stress boundary conditions.

Our problem involved a medium containing faults. Each fault had two surfaces or boundaries, one effectively coinciding with the other. A boundary element method called "the displacement discontinuity method" can cope with this problem. It is based on the analytical solution (Green function) to the problem of a constant discontinuity in a displacement over a finite line segment in a plane of a half-space elastic solid. Okada (1985) analytical solutions were used as Green functions for modeling.

Regarding the strike and dip changes of the selected active faults, fault surfaces were divided into different segments in strike and dip directions with constant strike and dip. In this way, we had 22 fault segments in total. Then the fault segment surfaces were divided into 1×1 km elements. Finally, we had 8248 free slipping elements in strike and dip directions as input for modeling.

In most cases, the results showed that the partitioned slips did not have an elliptical shape. Also, they were not symmetric around a central maximum.

The modeling results showed that most of the faults in the study area were left-lateral strike slip and reverse dip slip faults. Also, the left-lateral strike slip rate magnitudes were often greater than the reverse dip slip ones. This was due to the obliquity of the horizontal

principal stress axis relative to the fault strike, so that the along strike of the fault component of the principal stress was greater than the fault normal component.

**Keywords:** Mechanical interaction, slip rate partitioning, boundary element method, displacement discontinuity, GPS, stress rate tensor

## ۱ مقدمه

بدون در نظر گرفتن برهمکنش بین یک گسل با هر عامل خارجی، باید توزیع آهنگ لغزش در طول گسل به صورت متقارن و بیضی شکل باشد (پلارد و سگال، ۱۹۸۷). تحقیقات صورت گرفته نشان می دهد که عواملی همچون تغییر شرایط مرزی مثل تنش مناطق دور، ویژگی های کشسانی ناهمگن، فرایند دگرشکلی ناکشسان و برهمکنش مکانیکی بین گسل های مجاور باعث خروج آهنگ لغزش افزایشی در طول یک گسل از حالت متقارن بیضی شکل می شوند (بورقمن و همکاران، ۱۹۹۴).

چون آهنگ بارگذاری گسل ها در مناطق دگرشکلی داخل قاره ای بسیار کم است، برهمکنش گسل ها در این مناطق می تواند باعث انتقال لرزه خیزی از یک گسل به گسل های دیگر شود و با فواصل زمانی زیاد پس از طی دوره سکون لرزه ای به بروز زمین لرزه های بزرگ در این گسل ها بیانجامد. از این رو بررسی برهمکنش گسل ها و افزایش آهنگ لغزش براساس آن در چنین مناطقی، اهمیت ویژه ای دارد.

ایران در منطقه برخورد صفحه های زمین ساختی عربستان و اوراسیا قرار دارد و دچار تغییر شکل داخل قاره ای است. این منطقه شاهد زمین لرزه های تاریخی و دستگاهی متعدد بزرگ و ویرانگری بوده است. کوه های البرز در ایران از نظر زمین ساختی فعال اند و برهمکنش گسل ها در محدوده گسل هایی با طول چند ده کیلومتر که این رشته کوه ها را دربر گرفته اند قابل بررسی است. باتوجه به واقع شدن کلان شهر تهران در بخش جنوبی البرز مرکزی، بررسی برهمکنش مکانیکی گسل ها در گسل های

فعال شمال تهران اهمیت ویژه ای برای تحلیل خطر لرزه ای

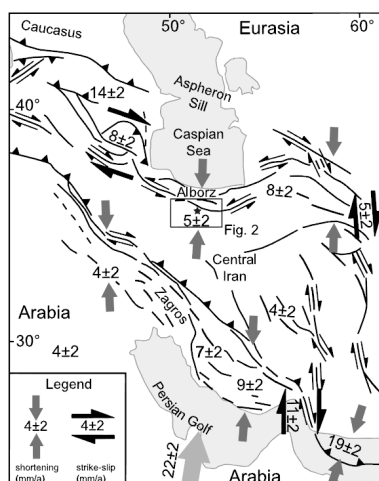
در پایتخت دارد.

در این تحقیق آهنگ لغزش در گسل های فعال شمال تهران با در نظر گرفتن برهمکنش مکانیکی بین این گسل ها براساس آهنگ تنش استخراج شده از مشاهدات GPS افزایش شده است.

## ۲ منطقه مورد بررسی

حدود یک سوم دگرشکلی داخل قاره ای ناشی از همگرایی صفحه های زمین ساختی عربستان و اوراسیا در کوه های البرز اتفاق می افتد (پریستلی و همکاران، ۱۹۹۴؛ بربریان و یتز، ۱۹۹۹؛ جکسون و همکاران، ۲۰۰۲).

مشاهدات GPS نشان دهنده توزیع آهنگ همگرایی  $22 \pm 2$  mm/yr در راستای شمال شرقی نسبت به چارچوب اوراسیا، بین این دو صفحه در ایران است که حدود  $5 \pm 2$  mm/yr آن در راستای شمال شرقی در کوه های البرز اتفاق می افتد (ورنانت، ۲۰۰۴ الف، ب؛ ماسون ۲۰۰۷). علاوه بر این، حرکت امتداد لغز با آهنگ  $4 \pm 2$  mm/yr در این منطقه مشاهده می شود که با حرکت چپ گرد در ساختارهای با امتداد شرقی - غربی مرتبط است و علت آن حرکت دریای خزر با آهنگ  $6 \pm 2$  mm/yr به سمت شمال غرب نسبت به چارچوب مرجع اوراسیا است (ورنانت، ب ۲۰۰۴) (شکل ۱). محورهای اصلی افقی تانسور آهنگ کرنش با استفاده از مشاهدات GPS را ماسون (۲۰۰۷) محاسبه کرد. مطابق محاسبات صورت گرفته، جهت بیشینه کوتاه شدگی در منطقه مورد

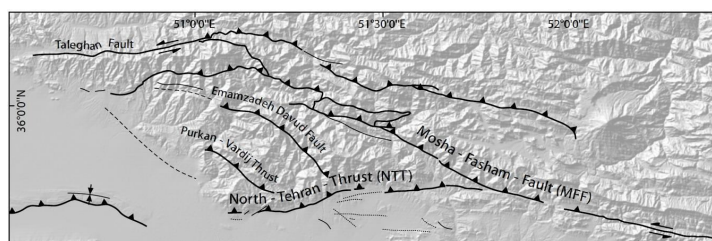


شکل ۱. نقشه زمین‌ساختی ساده شده ایران با بردارهایی که نشان‌دهنده جهت حرکت‌های نسبی هستند. جابه‌جایی‌های نسبی در کوه‌های البرز مرکزی به ترتیب با آهنگ  $2 \pm 5$  و  $2 \pm 4$  میلی‌متر در سال به صورت کوتاه‌شدگی و برشی رخ می‌دهند (با تغییر از ورنانت و همکاران ۲۰۰۴ الف). منطقه مورد بررسی در بخش جنوبی کوه‌های البرز مرکزی با مستطیل و محل تقریبی کلان‌شهر تهران با علامت ستاره مشخص شده است.

شده است. گسل‌های اصلی مورد بررسی در این تحقیق عبارت‌اند از گسل مشا-فشم (MFF)، گسل طالقان (TF) و راندگی شمال تهران (NTT). گسل‌های مشا-فشم و طالقان از نظر لرزه‌ای فعال هستند ولی لرزه‌خیزی کمی از راندگی شمال تهران ثبت شده است، در مقابل شواهد فراوانی از فعالیت کواترنری مشخص این گسل موجود است (لنقراف و همکاران، ۲۰۰۹). چنین به نظر می‌رسد که فعالیت‌های که لرزه‌ای به بخش شرقی گسل مشا-فشم محدود شده است (اشتری و همکاران، ۲۰۰۵). در مقابل، اطلاعات لرزه‌خیزی تاریخی زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیشتر از ۷ را برای این منطقه نشان می‌دهد (آمبراسیز، ۱۹۷۴؛ آمبراسیز و ملویل، ۱۹۸۲؛ بربریان و یتز، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۱).

بررسی مشابه اکثر مناطق ایران دارای امتداد  $N20^{\circ}E$  است. در مقابل، جهت بیشینه تنش افقی با استفاده از اطلاعات سازوکار ژرفی زمین‌لرزه‌ها برای کوه‌های البرز مرکزی حدود  $N45^{\circ}E$  برآورد شده است (هیدباخ و همکاران، ۲۰۰۸). علاوه بر این، سازوکار ژرفی زمین‌لرزه‌ها نشان‌دهنده افراز کرنش بین گسل‌های شیب‌لغز و امتداد لغز در منطقه است (پریستلی و همکاران، ۱۹۹۴؛ جکسون و همکاران، ۲۰۰۲). اکثر زمین‌لرزه‌ها در کوه‌های البرز مرکزی و شرقی در عمق‌های بیشتر از ۱۵ کیلومتر اتفاق می‌افتد (اندال و همکاران، ۲۰۰۶).

شکل ۲ گسل‌های مورد استفاده در مدل‌سازی را نشان می‌دهد که با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ ایران برای مناطق تهران، ساوه، آمل و قزوین-رشت تهیه



شکل ۲. گسل‌های مورد استفاده در مدل‌سازی که با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ ایران برای مناطق تهران، ساوه، آمل و قزوین-رشت تهیه شده است (با تغییرات از لنقراف و همکاران، ۲۰۰۹).

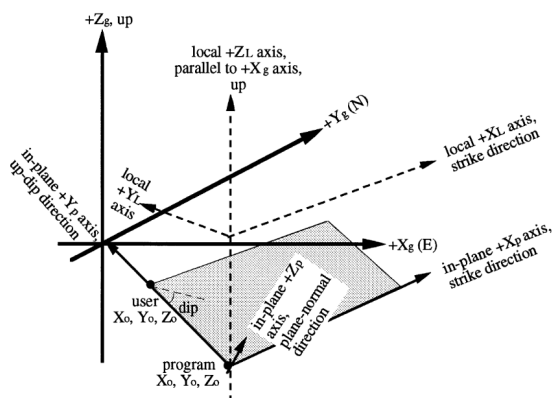
### ۳ روش مدل سازی

در این تحقیق برای افراز لغزش از مدل سازی به روش المان مرزی سه بُعدی استفاده شده است. سه روش عمده در مدل سازی با این روش وجود دارد که عبارت اند از: روش تنش مجازی، روش ناپیوستگی جا بجایی و روش انتگرال مرزی مستقیم (کراچ و استارفیلد، ۱۹۸۳). یک گسل، شبیه یک شکاف یا شکستگی، دو رویه یا مرز دارد که یکی به طور مؤثر بر دیگری منطبق است. روش های المان مرزی مرسوم، مانند روش انتگرال گیری مستقیم، در شبیه سازی این مسئله غیر مؤثر هستند. روش ناپیوستگی جا بجایی را کراچ در ۱۹۷۶ به منظور مقابله با مسائلی از این نوع ایجاد کرد. پس با توجه به اینکه گسلش با ناپیوستگی در جا بجایی همراه است لذا روش ناپیوستگی جا بجایی برای مدل سازی حرکت گسل ها در این مدل سازی انتخاب شد.

در مدل المان مرزی گسل ها به صورت نابرجایی های مستطیلی صفحه ای در نیم فضای کشسان همگن تحت عنوان المان شناخته می شوند. نابرجایی یا لغزش روی المان ها را می توان با روش های متعددی شامل اعمال تنش، گرنش یا تانسور گرادیان جابه جایی، با اعمال شرایط مرزی مناطق دور یا با اعمال جابه جایی یا تنش روی المان های دیگر ایجاد کرد. امکان استفاده از شرایط مرزی ترکیبی نیز وجود دارد.

مطابق شکل ۳ در مدل سازی به روش المان های مرزی سه بُعدی از سه دستگاه مختصات متفاوت استفاده می شود که عبارت اند از: ۱- دستگاه مختصات سراسری ۲- دستگاه مختصات محلی و ۳- دستگاه مختصات صفحه ای. دستگاه مختصات سراسری  $(X_g, Y_g, Z_g)$  بین همه المان ها مشترک است به نحوی که محور  $X$  آن افقی و به موازات سطح آزاد و جهت مثبت آن به سمت شرق است. محور  $Y$  این دستگاه نیز افقی بوده و جهت مثبت آن به سمت شمال است. محور  $Z$  نیز قائم و جهت مثبت آن

نسبت به سطح آزاد به سمت بالای نیم فضا است. از این دستگاه مختصات برای تعریف خروجی های مدل استفاده می شود.



شکل ۳. دستگاه های مختصات مورد استفاده در مدل سازی به روش المان های مرزی سه بُعدی (گمبرگ و الیس، ۱۹۹۴).

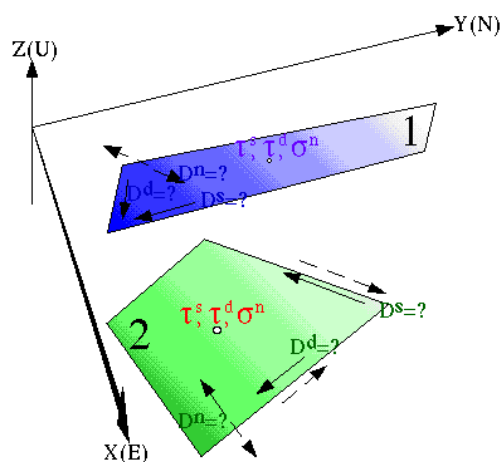
دستگاه مختصات محلی  $(X_L, Y_L, Z_L)$  برای هر صفحه یا المان تعریف شده و از آن برای محاسبه تابع های گرین استفاده می شود. محورهای  $X_L$  و  $Y_L$  یک صفحه افقی را تعریف می کنند که به موازات سطح آزاد است. محور  $X_L$  در راستای گسل و محور  $Y_L$  عمود بر آن و محور  $Z_L$  قائم بر صفحه دو محور است به نحوی که دستگاه مختصات حاصل به صورت راست گرد باشد یعنی با نگاه کردن در راستای امتداد گسل ( $X_L$ ) فرادیواره در سمت راست قرار گیرد و محور  $Y_L$  به سمت فرودیواره باشد.

دستگاه مختصات صفحه ای  $(X_p, Y_p, Z_p)$  نیز برای هر صفحه تعریف می شود، به نحوی که محور  $X_p$  در امتداد گسل ( $X_L = X_p$ ) و محور  $Y_p$  در راستای شیب گسل و به سمت بالا مثبت است. محور  $Z_p$  نیز عمود بر صفحه یا المان و جهت مثبت آن به نحوی است که دستگاه راست گرد باشد. از این دستگاه مختصات برای تعریف و معرفی شرایط مرزی به مدل استفاده می شود.

نابرجایی یک گسل همیشه به حرکت فرادیواره نسبت به فرودیواره اشاره می کند. بنابراین نابرجایی بُرشی منفی

برهمکنش یک المان که شامل یک گسل یا بخشی از یک گسل است با دیگر المان‌ها و دگرشکلی زمینه‌ای منطقه با حل دستگاه معادلات خطی به شرح زیر مدل‌سازی می‌شود.

(۱) یک مجموعه شرط مرزی شامل جابه‌جایی یا تنش در نقطه مرکزی هر المان مشخص می‌شود. شکل ۵ این مرحله را برای شرط مرزی تنش در دو المان نشان می‌دهد.



شکل ۵. جهت مدل‌سازی به روش المان‌های مرزی مجموعه شرایط مرزی در نقاط مرکزی هر المان مشخص می‌شود (گمبرگ و ایس، ۱۹۹۴).

توجه به این نکته لازم است که شرایط مرزی فقط در نقطه مرکزی هر المان تعیین می‌شود و به کل صفحه المان اعمال نمی‌شود. با تقسیمات بیشتر المان‌ها می‌توان به نتایج دقیق‌تری رسید ولی این کار زمان محاسبات و میزان حافظه موردنیاز را افزایش می‌دهد.

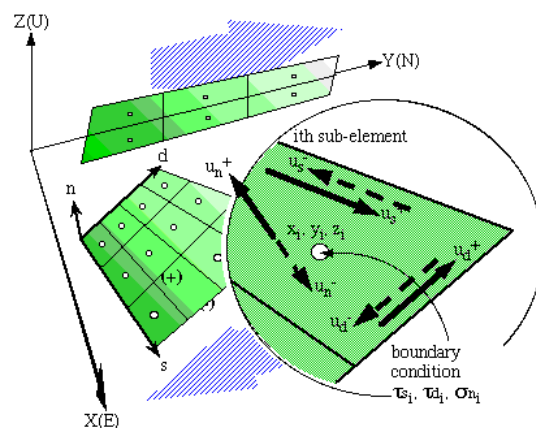
(۲) یک دستگاه معادلات خطی به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\tau_s(x_i, y_i, z_i) = \sum_{j=1}^J (A_{ij}^{ss} D_j^s + A_{ij}^{sd} D_j^d + A_{ij}^{sn} D_j^n) + \tau_s^b$$

$$\tau_d(x_i, y_i, z_i) = \sum_{j=1}^J (A_{ij}^{ds} D_j^s + A_{ij}^{dd} D_j^d + A_{ij}^{dn} D_j^n) + \tau_d^b$$

$$\sigma_n(x_i, y_i, z_i) = \sum_{j=1}^J (A_{ij}^{ns} D_j^s + A_{ij}^{nd} D_j^d + A_{ij}^{nn} D_j^n) + \sigma_n^b$$

به معنی حرکت فرادیواره در جهت مثبت امتداد گسل یا جهت مثبت محور  $X_p$  دستگاه مختصات صفحه‌ای است و این به منزله حرکت راست‌گرد است. به همین ترتیب ناپرجایی مثبت در راستای شیب گسل مشخص‌کننده جهت حرکت معکوس است.



شکل ۴. نمایش پارامترهای ورودی مورد استفاده در مدل‌سازی به روش المان‌های مرزی سه‌بعدی (گمبرگ و ایس، ۱۹۹۴).

مطابق شکل ۴ برای مشخص کردن شرایط مرزی، سطوح هر گسل به زیرالمان‌هایی تقسیم و شرایط مرزی در نقطه مرکزی هر زیرالمان مشخص می‌شود. این شرایط تعداد سه قید تنش یا جابه‌جایی را در سه راستای امتداد، شیب و عمود بر هر زیرالمان تعریف می‌کند؛ یعنی یک شرط مرزی به‌ازای هر راستا. شرایط مرزی می‌تواند دربرگیرنده مؤلفه‌های تنش، جابه‌جایی مطلق، نسبی و یا هر ترکیبی از آنها در هر زیرالمان باشد.

مؤلفه‌های جابه‌جایی نسبی برای هر زیرالمان (مؤلفه‌های آهنگ لغزش گسل) را می‌توان معلوم فرض و درحکم شرط مرزی به مدل معرفی کرد یا اینکه آنها را مجهول در نظر گرفت و از مدل‌سازی به‌دست آورد. مؤلفه‌های گسلس نسبی در زیرالمان‌ها با مدل‌سازی چنان برآورد می‌شوند که هم شرایط مرزی اولیه مشخص شده در مدل صدق کند و هم انرژی کرنش در محدوده مدل کمینه شود.

### ۳-۱ حل اساسی

به منظور مدل سازی جا بجایی های ناشی از آهنگ لغزش در گسل ها در این تحقیق، از مدل تحلیلی اکادا (۱۹۸۵) استفاده می شود. مدل اکادا بر پایه نظریه نابرجایی فرمول بندی شده است. در این مدل ابتدا مدل سازی میدان دگرشکلی حاصل از یک تک نیرو (منبع نقطه ای) صورت می گیرد و سپس با انتگرال گیری از روابط منبع نقطه ای، میدان دگرشکلی حاصل از یک منبع مستطیلی (صفحه گسلش) فرمول بندی می شود. به طور کلی پارامترهای ورودی مدل اکادا به دو دسته پارامترهای فیزیکی و هندسی تقسیم می شوند. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در این مدل، همان ضرایب لامه  $\mu$  و  $\lambda$  منطقه مورد بررسی است که بایستی به صورت تقریبی مشخص باشد، برای این منظور با توجه به اینکه مطابق نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل اکادا (نوری و وثوقی، ۱۳۸۸)، حساسیت مدل به تغییرات ضرایب لامه بسیار کم است و از طرفی مقادیر محلی دقیقی برای این ضرایب در منطقه مورد بررسی وجود ندارد می توان از مقادیر متوسط جهانی نیز استفاده کرد. تأثیر انتخاب مقدار متوسط جهانی و حتی فرض جامد پواسون ( $\mu = \lambda$ ) به جای مقادیر محلی برای ضرایب لامه در نتایج افراز لغزش بسیار ناچیز است.

پارامترهای هندسی مورد استفاده در مدل اکادا شامل طول، عرض، عمق قفل شدگی، شیب، راستا، میزان جدا شدگی یا آهنگ لغزش، مختصات نقطه ابتدایی گسل و همچنین مختصات نقاط مشاهداتی است. این مدل در واقع با توجه به هندسه گسلش و فیزیک منطقه مورد بررسی، نابرجایی گسل یا آهنگ لغزش را به میدان جابجایی یا میدان سرعت ناشی از آن تبدیل می کند.

در این معادلات  $\tau_s$ ،  $\tau_d$  و  $\sigma_n$  به ترتیب شرایط مرزی تنش در راستای آزیموت، شیب و عمود بر گسل و متغیرهای  $\tau_s^b$ ،  $\tau_d^b$  و  $\sigma_n^b$  نیز مؤلفه های تنش در سه راستای ذکر شده روی المان ها در ارتباط با میدان دگرشکلی یکنواخت منطقه ای است.  $D_j^s, D_j^d, D_j^n, j=1, \dots, J$  نشان دهنده مؤلفه های نابرجایی (لغزش گسل) در سه راستای آزیموت، شیب و عمود بر گسل در المان  $\Delta m$  هستند. ضرایب  $A_{ij}^{ss}, \dots, A_{ij}^{nn}$  نیز ضرایب تأثیر یا تابع های گرین اند که با استفاده از حل اساسی اکادا (۱۹۸۵) محاسبه می شوند. تابع های گرین تابع هایی هستند که میدان دگرشکلی (جا بجایی و گرادیان آن) را به نابرجایی یا گسلش در نیم فضای همگن (محیط نیمه بی نهایت محدود شده با یک سطح آزاد) ارتباط می دهند. به منظور برآورد تابع های گرین بایستی جواب تحلیلی را داشته باشیم. با در نظر گرفتن جواب تحلیلی مسئله و رابطه تبدیل بین دستگاه های مختصات می توان به تابع های گرین دست یافت. دستگاه معادلات فوق را می توان با استفاده از تابع های گرین مناسب برای شرایط مرزی مربوط به جا بجایی نیز نوشت. بدین ترتیب معادلات شرایط مرزی به کل  $J$  المان اعمال می شود.

(۳) با حل دستگاه معادلات خطی تشکیل شده می توان مؤلفه های نابرجایی مجهول (D) را به دست آورد.

(۴) با محاسبه جا بجایی های نسبی (مؤلفه های گسلش) میدان دگرشکلی در هر نقطه از محیط را می توان به صورت تحلیلی با استفاده از مدل تحلیلی اکادا محاسبه کرد.

در این روش، تقریب از این واقعیت ناشی می شود که شرایط مرزی به جای کل سطح المان فقط در نقطه مرکزی آن اعمال می شود. با بیشتر کردن تقسیمات المان می توان به نتایج دقیق تری نیز دست یافت.

نایبوستگی است، درحالی‌که راه حل جنبش‌شناختی مورد استفاده در جدادشدگی کشسان فقط از جدادشدگی یا شرط نایبوستگی جابه‌جایی روی المان‌ها استفاده می‌کند.

د- در روش‌های المان مرزی امکان استفاده از انواع شرایط مرزی و ترکیبات آنها وجود دارد. استفاده از تنش و کرنش درحکم شرایط مرزی برای توزیع آهنگ لغزش در سامانه‌ای از انواع گسل‌ها، این روش را به روشی مکانیکی برای توزیع آهنگ لغزش تبدیل می‌کند و بهتر از روش‌های جنبش‌شناختی مانند قطب اولر است. روش‌های مکانیکی دید بهتری از توزیع آهنگ لغزش عرضه شده و تحلیل خطر لرزه‌ای با استفاده از آهنگ‌های لغزش توزیع شده با این روش به واقعیت نزدیک‌تر است.

#### ۴ افراز آهنگ لغزش بین گسل‌ها

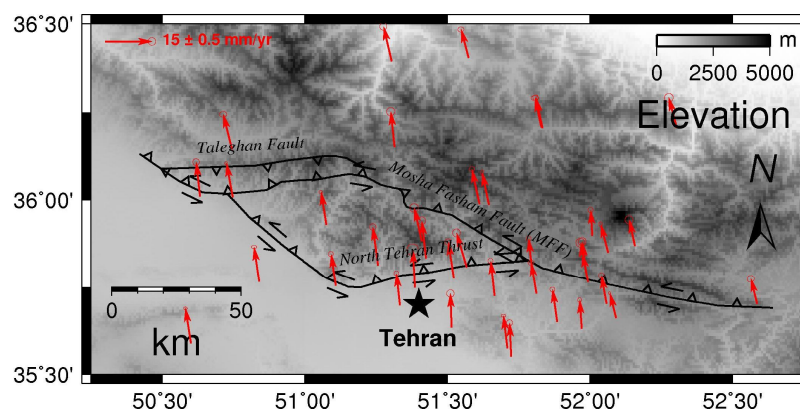
براساس تحلیل حساسیت صورت گرفته نوری و وثوقی (۱۳۸۸)، بیشترین حساسیت مدل تحلیلی اکادا به پارامتر نابرجایی است، یعنی با تغییر این پارامتر، بیشترین تغییر در خروجی‌های مدل یعنی جا بجایی‌ها مشاهده می‌شود، لذا در این تحقیق همه پارامترهای هندسی گسل و همچنین پارامترهای فیزیکی منطقه با لحاظ کردن مقادیر تقریبی موجود از شواهد زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی، ثابت در نظر گرفته شد و از روش المان مرزی با حل اساسی اکادا

#### ۳-۲ مقایسه مدل‌سازی به روش المان مرزی و روش نابرجایی

مدل‌سازی به روش المان مرزی و روش جدادشدگی کشسان را می‌توان در چهار مورد به شرح زیر مقایسه کرد: الف- تفاوت اصلی بین مدل‌سازی به روش المان مرزی و روش جدادشدگی کشسان مانند مدل اکادا این است که در روش المان مرزی مقادیر لغزش یا مقادیر مؤلفه‌های جدادشدگی درحکم مجهول در نظر گرفته شده است که ضمن صدق کردن در شرایط مرزی، تنش یا جابه‌جایی روی هر سطح جدادشدگی با کمینه‌سازی انرژی کرنش در محیط، محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه لغزش گسل باعث رهایی و کم شدن کرنش در پوسته بالایی زمین می‌شود، کمینه‌سازی انرژی کرنش در روش المان‌های مرزی از نظر فیزیکی فرض معقولی است. درحالی‌که در مدل اکادا مقدار جدادشدگی یا گسلس از قبل معلوم است و درحکم ورودی مدل در نظر گرفته می‌شود.

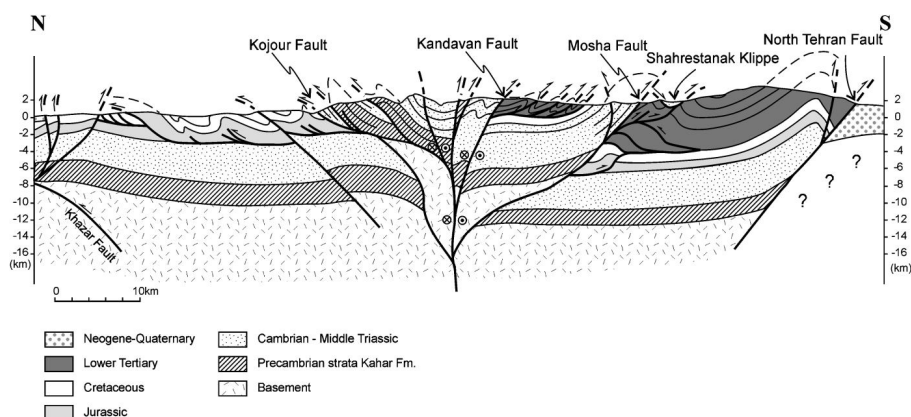
ب- مدل‌سازی به روش المان مرزی برهمکنش بین گسل‌ها را در نظر می‌گیرد، درحالی‌که مدل‌های جدادشدگی کشسان هم از برهمکنش گسل‌ها و هم از کمینه‌سازی انرژی کرنش صرف‌نظر می‌کنند.

ج- راه‌حل مکانیکی مورد استفاده در روش المان مرزی نیازمند استفاده از شرط مرزی تنش روی المان‌های



شکل ۶. بردارهای سرعت GPS انتخابی از مقاله جمور و همکاران (۲۰۱۰) مورد استفاده برای تعیین شرایط مرزی تنش به‌همراه گسل‌های اصلی در منطقه مورد بررسی.





شکل ۷. مقطع عرضی البرز در طول جغرافیایی کلان شهر تهران (۳۰° ۵۱' آلن و همکاران، ۲۰۰۳).

در نهایت با استفاده از قانون هوک تعمیم یافته، تانسور آهننگ تنش محاسبه شد.

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij}$$

در رابطه اخیر  $\mu$  ضریب برشی و  $\lambda$  ثابت لامه است که در حالت جامد پواسون ( $\mu = \lambda$ ) برابر ۳۰ گیگاپاسکال در پوسته فرض شده‌اند.

#### ۲-۴ پارامترهای ورودی مدل

با توجه به اینکه اطلاعات زیرسطحی از گسل‌های منطقه مورد بررسی در دسترس نیست و از طرفی تعداد کم زمین‌لرزه‌های بررسی شده اشتري و همکاران (۲۰۰۵) نیز برای مشخص کردن هندسه گسل‌ها در عمق کافی نیست، لذا به منظور شرکت دادن گسل‌ها در مدل‌سازی، از نقشه‌های زمین‌شناسی ایران (امینی و امامی، ۱۹۹۳)، نیم‌رخ‌های عرضی منتشر شده قست و همکاران (۲۰۰۶ الف و ب)، آلن و همکاران (۲۰۰۳) (شکل ۷) و زانچی و همکاران (۲۰۰۶) برای استخراج موقعیت، امتداد، شیب، طول، عرض و عمق قفل‌شدگی استفاده شد. گسل‌ها براساس تغییر امتداد و شیب به بخش‌های گسلی مجزا تقسیم شدند، به نحوی که هر بخش دارای راستا و شیب ثابت باشد. در نهایت تعداد ۲۲ قطعه از گسل‌ها برای مدل‌سازی در نظر

برای توزیع آهننگ لغزش (نابرجایی) بین گسل‌ها استفاده شد.

#### ۱-۴ مشاهدات GPS

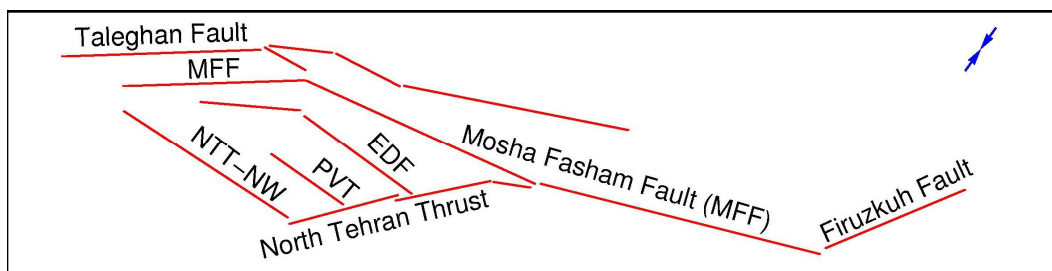
در این تحقیق از آهننگ تنش حاصل از مشاهدات دوره‌ای و دائم تعداد ۴۵ ایستگاه GPS برگرفته از مقاله جمور و همکاران (۲۰۱۰) در محدوده منطقه مورد بررسی به منظور تعیین شرط مرزی تنش برای مدل المان مرزی استفاده شد (جدول ۱).

از مشاهدات GPS در محدوده گسل‌های مورد بررسی (شکل ۶) در محاسبه شرط مرزی تنش با استفاده از روش کمترین مربعات استفاده شد. بر این اساس جهت بیشینه کوتاه‌شدگی در منطقه مورد بررسی دارای امتداد N36.5°E است که در مقایسه با جهت بیشینه کوتاه‌شدگی محاسبه شده با مشاهدات GPS با محاسبات ماسون (۲۰۰۷) یعنی N20°E به جهت بیشینه تنش افقی برآورد شده هیدباخ و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از اطلاعات سازوکار ژرفی زمین‌لرزه‌ها برای کوه‌های البرز مرکزی یعنی N45°E خیلی نزدیک‌تر است. توجه محورهای اصلی تنش در سراسر منطقه مورد بررسی ثابت فرض شده است.

به منظور محاسبه تانسور آهننگ تنش نخست تانسور گرادیان جابه‌جایی، سپس تانسور آهننگ کرنش و

جدول ۱. میدان سرعت GPS در منطقه مورد بررسی، ستون اول نام ایستگاه‌های GPS، ستون‌های دوم و سوم مختصات جغرافیایی ایستگاه‌ها، ستون‌های چهارم و پنجم مؤلفه‌های سرعت ایستگاه‌ها از مرجع جمور (۲۰۱۰) و ستون‌های ششم و هفتم دقت مشاهدات GPS در بخش جنوبی البرز مرکزی را نشان می‌دهد.

Site	long. (°E)	lat. (°N)	Ve (mm/yr)	Vn (mm/yr)	$\sigma_e$ (mm/yr)	$\sigma_n$ (mm/yr)
ABAL	۵۱/۹۸۶	۳۵/۷۹۳	-۱/۱۷	۰/۹۹۶	-/۵۲	۰/۵۱
ABAP*	۵۱/۹۸۷	۳۵/۷۹۳	-۱/۸۴	۰/۹۵۸	-/۵۸	۰/۵۸
AMIN	۵۲/۵۸۶	۳۵/۷۰۱	-۲/۰۱	۸/۲۰	-/۴۷	۰/۴۶
BLDH*	۵۱/۸۲۹	۳۶/۲۰۸	-۲/۰۲	۰/۹۳۶	-/۴۹	۰/۳۱
GARM*	۵۱/۶۴۶	۳۵/۹۸۵	-۲/۱۸	۱۰/۴۱	-/۲۰	۰/۳۶
HELI	۵۲/۳۰۵	۳۶/۲۰۶	-۲/۵۷	۰/۹۶۸	-/۵۸	۰/۵۶
MEHR	۵۲/۱۵۷	۳۵/۸۶۸	-۱/۷۹	۰/۸۵۲	-/۵۲	۰/۵۲
MF02	۵۱/۷۹۷	۳۵/۸۰۱	-۱/۰۴	۱۰/۰۰	-/۳۳	۰/۳۳
MF07	۵۲/۰۰۸	۳۵/۸۹۷	-۰/۴۸	۰/۸۳۷	-/۳۳	۰/۳۴
MF09	۵۱/۸۳۳	۳۶/۲۰۵	-۲/۱۵	۰/۹۸۷	-/۳۶	۰/۳۶
MF10	۵۱/۳۰۴	۳۶/۳۹۴	-۲/۶۲	۱۱/۰۸	-/۴۶	۰/۴۷
MF12	۵۱/۳۱۵	۳۶/۱۵۰	-۱/۲۳	۱۱/۶۳	-/۵۴	۰/۵۴
MF15	۵۱/۶۱۳	۳۵/۹۸۸	-۲/۴۶	۱۱/۲۶	-/۳۳	۰/۳۳
PLOR	۵۲/۰۶۴	۳۵/۸۵۰	-۲/۳۹	۰/۹۱۲	-/۲۳	۰/۲۹
POOL*	۵۱/۵۷۴	۳۶/۴۰۳	-۲/۴۲	۰/۹۱۲	-/۳۹	۰/۳۳
TN07	۵۱/۹۹۴	۳۵/۷۶۳	-۱/۸۳	۰/۹۳۴	-/۴۷	۰/۴۸
ABSD*	۵۲/۰۹۱	۳۵/۶۶۱	-۲/۰۰	۰/۷۹۵	-/۱۴	۰/۱۹
AKHT*	۵۰/۶۰۱	۳۵/۵۸۸	-۱/۷۷	۱۱/۳۱	-/۲۴	۰/۱۸
ARNG*	۵۱/۰۷۵	۳۵/۹۲۸	-۱/۶۹	۱۰/۶۱	-/۲۳	۰/۲۱
BOOM	۵۱/۸۱۲	۳۵/۷۲۰	-۱/۷۰	۱۰/۲۲	-/۳۶	۰/۳۴
DAMA	۵۲/۰۵۹	۳۵/۷۰۱	-۱/۷۰	۰/۹۲۶	-/۳۸	۰/۳۸
FOIM*	۵۱/۱۶۶	۳۵/۴۰۹	-۱/۶۰	۱۲/۸۲	-/۷۲	۰/۷۴
FOPM*	۵۰/۸۴۰	۳۵/۷۶۵	-۱/۶۶	۱۱/۳۶	-/۳۷	۰/۲۰
GTCL*	۵۱/۴۱۰	۳۵/۸۸۲	-۲/۴۳	۱۰/۷۶	-/۵۵	۰/۵۵
HSGD*	۵۰/۷۴۷	۳۶/۰۰۷	-۲/۰۵	۱۱/۰۱	-/۱۸	۰/۲۱
MF03	۵۱/۸۸۵	۳۵/۶۴۹	-۱/۴۸	۱۰/۵۰	-/۳۲	۰/۳۲
MF04	۵۲/۱۱۷	۳۵/۲۵۸	-۱/۹۸	۱۱/۲۷	-/۳۶	۰/۳۶
MF05	۵۱/۲۷۷	۳۵/۴۹۳	-۰/۷۴	۱۱/۷۸	-/۴۴	۰/۴۳
MF13	۵۰/۶۳۲	۳۶/۰۰۹	-۱/۳۱	۱۱/۱۲	-/۴۴	۰/۴۴
MF16	۵۱/۶۶۵	۳۵/۷۲۴	-۱/۲۵	۱۱/۵۳	-/۳۳	۰/۳۳
MF17	۵۱/۱۰۸	۳۵/۷۵۳	-۱/۵۱	۱۰/۴۷	-/۳۲	۰/۳۳
PLZI*	۵۱/۹۷۱	۳۵/۶۳۰	-۰/۶۳	۰/۹۲۵	-/۲۵	۰/۳۱
RTCL*	۵۱/۷۱۱	۳۵/۵۷۴	-۱/۲۸	۱۰/۵۱	-/۳۰	۰/۱۹
TANG	۵۲/۰۴۳	۳۵/۴۹۲	-۰/۹۰	۰/۹۵۹	-/۳۶	۰/۳۶
TEHN*	۵۱/۳۳۴	۳۵/۶۹۷	-۱/۱۵	۱۰/۵۲	-/۳۱	۰/۳۰
TEHR	۵۱/۳۸۶	۳۵/۷۴۷	-۰/۷۲	۱۲/۵۳	-/۷۹	۰/۷۵
TF01	۵۱/۲۵۷	۳۵/۸۱۲	-۱/۶۸	۱۲/۴۸	-/۴۲	۰/۴۲
TF09	۵۱/۴۲۵	۳۵/۸۳۳	-۱/۳۳	۱۲/۱۶	-/۵۰	۰/۵۰
TF16	۵۱/۵۲۲	۳۵/۷۷۴	-۱/۷۷	۱۱/۹۶	-/۴۱	۰/۴۱
TF20	۵۱/۵۶۸	۳۵/۸۰۸	-۳/۲۷	۱۱/۰۴	-/۵۱	۰/۵۲
TLGN*	۵۰/۷۴۵	۳۶/۱۴۴	-۲/۸۴	۱۱/۴۳	-/۴۸	۰/۳۷
TN01	۵۱/۰۰۰	۳۵/۴۹۳	-۱/۱۰	۱۲/۷۹	-/۷۰	۰/۷۰
TN04	۵۱/۴۰۹	۳۵/۴۹۵	-۱/۳۴	۱۲/۸۹	-/۴۶	۰/۴۷
TN05	۵۱/۵۱۵	۳۵/۶۳۳	-۰/۳۸	۱۱/۰۱	-/۴۹	۰/۵۰
TN06	۵۱/۷۲۴	۳۵/۵۵۰	-۰/۵۲	۱۰/۹۱	-/۴۰	۰/۴۰



شکل ۸. قطعه‌های گسلی با فرض امتداد و شیب ثابت برای هر امتداد، جهت تنش فشارشی تعیین شده با استفاده از مشاهدات GPS در منطقه با بردارهای آبی‌رنگ در این شکل نشان داده شده است.

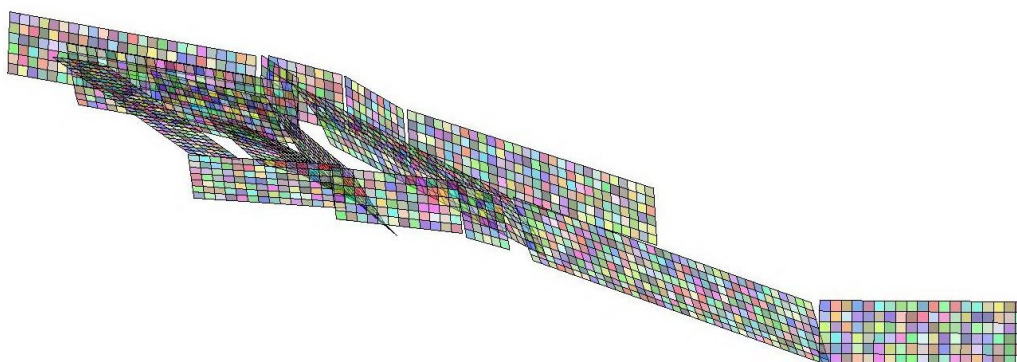
بررسی ایجاد شد. با توجه به معلوم بودن شرایط مرزی تنش در مرکز هر المان در دو راستای امتداد و شیب و مجهول بودن نابرجایی در این دو راستا، در نهایت دستگاه معادلات با ماتریس طرحی با ابعاد  $16496 \times 16496$  برای تعیین مجهولات با استفاده از مقادیر مرزی معلوم تشکیل و حل شد. نتایج آهنگ‌های لغزش افزاز شده بین گسل‌ها برای گسل انتخابی مشا- فشم در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ به صورت گرافیکی قابل مشاهده و برای بقیه گسل‌ها به صورت توصیفی توضیح داده شده است. در این شکل‌ها محور افقی نشان‌دهنده فاصله در امتداد گسل و محور قائم نشان‌دهنده عمق در راستای شیب گسل است. مطابق شکل ۸ گسل مشا- فشم به سه بخش شرقی، مرکزی و غربی و به دو صفحه در راستای شیب تقسیم شده است. نتیجه

گرفته شد (شکل ۸). روی صفحه‌های گسلی شبکه‌بندی با ابعاد  $1 \times 1$  کیلومتر صورت گرفت که مشخصات آنها در شکل ۹ و جدول ۲ آمده است.

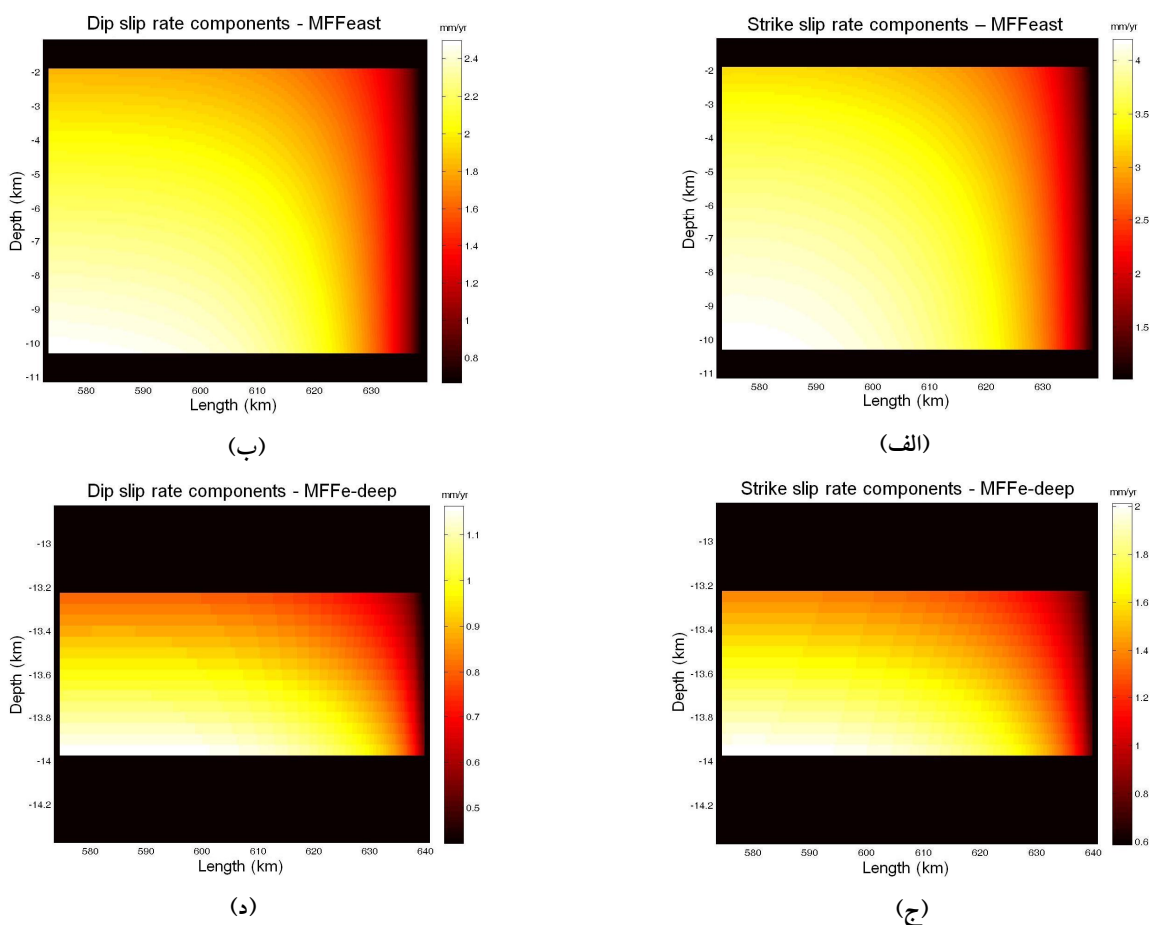
#### ۳-۴ مراحل مدل‌سازی و افزاز آهنگ لغزش

با توجه به استفاده از تابع‌های گرین و محاسبات در محیط نیم‌فضا، بایستی قبل از شروع محاسبات، منطقه مورد بررسی به محیط نیم‌فضا تصویر شود. با توجه به واقع شدن کل منطقه موردنظر در زون ۳۹ شمالی UTM، از این دستگاه تصویر برای تبدیل محیط کروی به محیط نیم‌فضا استفاده شد.

مقادیر آهنگ لغزش در دو راستای امتداد و شیب در مرکز هر شبکه محاسبه می‌شود. با اجرای شبکه‌بندی در نهایت تعداد ۸۲۴۸ المان در کل گسل‌های منطقه مورد



شکل ۹. هندسه سه‌بعدی بخش‌های گسلی مدل به همراه المان‌بندی صورت گرفته روی آنها در بخش جنوبی البرز مرکزی. برای وضوح بیشتر المان‌بندی به صورت  $2 \times 2$  کیلومتر در این شکل نشان داده شده است.



شکل ۱۰. توزیع آهنگ لغزش در صفحه گسل مشا- فشم، (الف) آهنگ لغزش امتدادلغز در بخش شرقی، (ب) آهنگ لغزش شیب‌لغز در بخش شرقی، (ج) آهنگ لغزش امتدادلغز در عمق بخش شرقی، (د) آهنگ لغزش شیب‌لغز در عمق بخش شرقی.

غربی راندگی شمال تهران دو نوع لغزش چپ‌گرد و معکوس مشاهده می‌شود که آهنگ لغزش معکوس بیشتر از آهنگ لغزش چپ‌گرد است. راندگی پورکان - وردیج به دو صفحه گسل در راستای عمق تقسیم شد. آهنگ‌های لغزش مدل‌سازی شده نشان‌دهنده توزیع لغزش به صورت چپ‌گرد و معکوس در بخش بالایی راندگی و راست‌گرد و معکوس در بخش پایینی گسل و در هر دو صفحه راندگی آهنگ لغزش معکوس بزرگ‌تر از آهنگ لغزش امتدادلغز است. گسل امامزاده داوود به دو صفحه در راستای امتداد و دو صفحه در

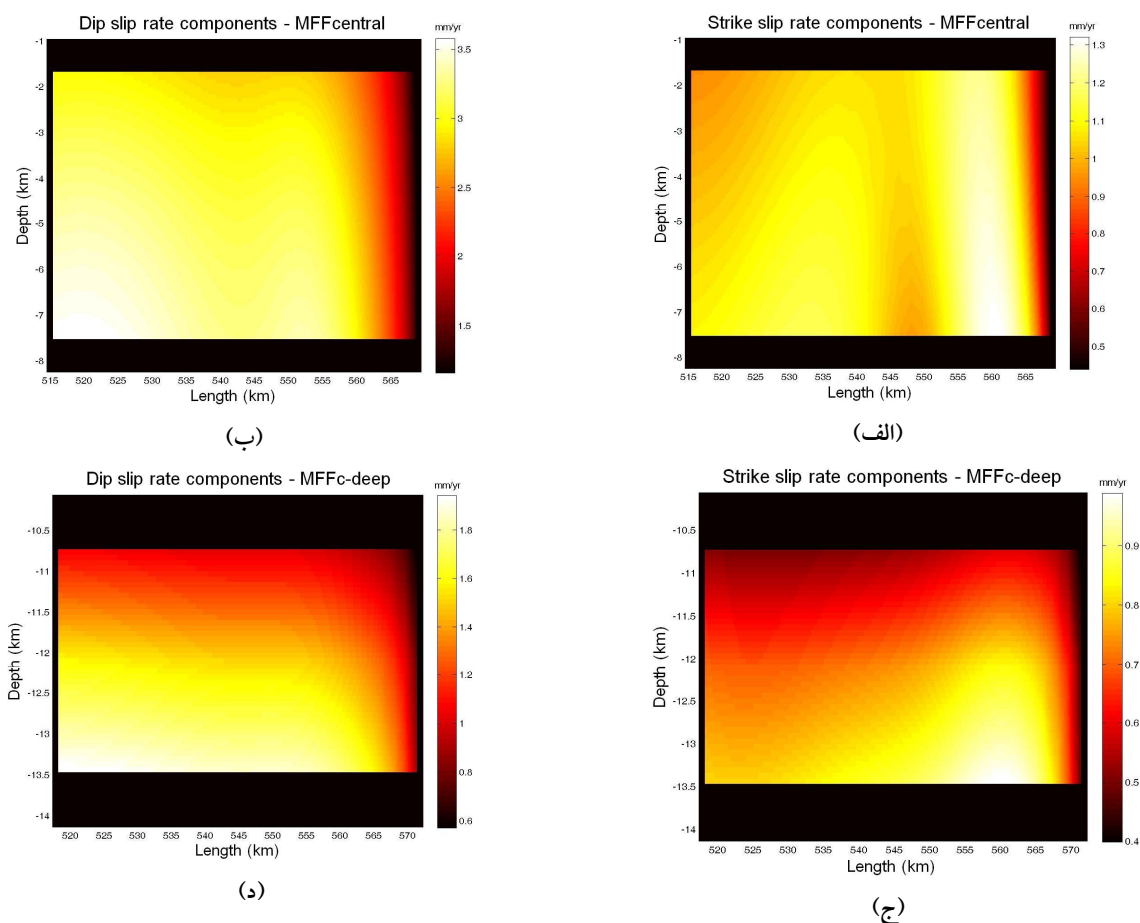
مدل‌سازی نشانگر توزیع لغزش به صورت چپ‌گرد و معکوس در کلیه المان‌های این گسل است، به نحوی که آهنگ لغزش چپ‌گرد در دو بخش شرقی (شکل ۱۰- الف و ج) و غربی (شکل ۱۲- الف و ج) این گسل بزرگ‌تر از آهنگ لغزش معکوس (شکل ۱۰- ب و ج و شکل ۱۲- ب و ج) و در بخش مرکزی کوچک‌تر از آهنگ لغزش معکوس است (شکل ۱۱). آهنگ لغزش توزیع شده روی گسل فیروزکوه دارای سه مؤلفه چپ‌گرد، نرمال و معکوس است، به نحوی که آهنگ لغزش چپ‌گرد بسیار بیشتر از دو مؤلفه دیگر و مؤلفه نرمال نیز بزرگ‌تر از مؤلفه معکوس است. در شاخه شمال

**جدول ۲.** پارامترهای هندسی قطعات گسل‌های مورد استفاده در مدل‌سازی. ستون اول نام قطعه گسل، ستون‌های دوم و سوم مختصات جغرافیایی نقطه شروع قطعه گسل، ستون چهارم عمق مرکز صفحه گسل از سطح زمین، ستون‌های پنجم و ششم به ترتیب آزیموت و شیب گسل، ستون‌های هفتم و هشتم طول و عرض قطعه گسل و در نهایت ستون‌های نهم و دهم شبکه‌بندی قطعه‌های گسلی را به ترتیب در راستای طول و شیب نشان می‌دهد.

Segment	Long.(°N)	Lat.(°E)	Z_center (fault plane) (km)	Azimuth (deg.)	Dip (deg.)	Fault length (km)	Fault width (km)	#l	#w
MFFeast	۵۲/۵۵۳	۳۵/۶۴۵	-۶/۱۰۰	۲۸۵	۷۰	۷۱/۶۰۰	۱۲/۷۷۰	۷۲	۱۲
MFFe-deep	۵۲/۵۶۶	۳۵/۶۸۳	-۱۳/۶۰۰	۲۸۵	۶۵	۷۱/۶۰۰	۳/۳۱۰	۷۲	۴
MFFcentral	۵۱/۷۷۸	۳۵/۸۱۹	-۴/۶۰۰	۲۹۶	۵۵	۶۳/۰۰۰	۱۰/۹۸۷	۶۴	۱۰
MFFc-deep	۵۱/۸۰۹	۳۵/۸۷۰	-۱۲/۱۰۰	۲۹۶	۶۵	۶۳/۰۰۰	۶/۶۲۰	۶۴	۶
MFFwest	۵۱/۱۵۰	۳۶/۰۷۱	-۶/۱۰۰	۲۶۸	۷۰	۴۵/۰۰۰	۱۲/۷۷۰	۴۶	۱۲
MFFw-deep	۵۱/۱۴۸	۳۶/۱۱۰	-۱۳/۶۰۰	۲۶۸	۶۵	۴۵/۰۰۰	۳/۳۱۰	۴۶	۴
Firuzkuh F.	۵۲/۹۵۲	۳۵/۷۹۳	-۶/۱۰۰	۶۶	۸۰	۳۸/۰۰۰	۱۲/۱۸۵	۳۸	۱۲
NTT NW	۵۱/۱۰۳	۳۵/۷۵۱	-۲/۱۰۰	۳۰۴	۲۰	۴۹/۰۰۰	۱۱/۶۹۵	۵۰	۱۲
PVT	۵۱/۲۵۴	۳۵/۷۶۴	-۲/۱۰۰	۳۰۹	۲۵	۲۳/۰۰۰	۹/۴۶۵	۲۴	۱۰
PVT deep	۵۱/۳۱۴	۳۵/۸۲۴	-۸/۱۰۰	۳۰۹	۳۵	۲۳/۰۰۰	۱۳/۹۴۸	۲۴	۱۴
EDF	۵۱/۴۴۰	۳۵/۷۹۸	-۶/۱۰۰	۳۰۸	۶۰	۳۳/۷۵۳	۱۳/۸۵۶	۳۴	۱۴
EDF deep	۵۱/۴۸۸	۳۵/۸۴۷	-۱۳/۶۰۰	۳۰۸	۵۰	۳۳/۷۵۳	۳/۹۱۶	۳۴	۴
EDF west	۵۱/۱۳۸	۳۶/۰۰۰	-۶/۱۰۰	۲۷۵	۶۰	۲۵/۰۰۰	۱۳/۸۵۶	۲۶	۱۴
EDF w-deep	۵۱/۱۴۵	۳۶/۰۶۲	-۱۳/۶۰۰	۲۷۵	۵۰	۲۵/۰۰۰	۳/۹۱۶	۲۶	۴
Taleghan- MFF	۵۱/۱۵۳	۳۶/۰۹۴	-۶/۱۰۰	۱۲۱	۸۸	۱۲/۱۲۱	۱۲/۰۰۷	۱۲	۱۲
Taleghan-east	۵۲/۰۳۴	۳۵/۹۴۷	-۶/۱۰۰	۲۸۲	۸۵	۵۶/۸۱۸	۱۲/۰۴۶	۵۶	۱۲
Taleghan- central-e	۵۱/۴۱۰	۳۶/۰۵۵	-۶/۱۰۰	۲۹۹	۸۵	۱۸/۱۸۲	۱۲/۰۴۶	۱۸	۱۲
Taleghan- central-w	۵۱/۲۲۷	۳۶/۱۳۶	-۶/۱۰۰	۲۷۷	۸۵	۱۵/۹۰۹	۱۲/۰۴۶	۱۶	۱۲
Taleghan- west	۵۱/۰۲۹	۳۶/۱۴۳	-۶/۱۰۰	۸۸	۸۵	۴۹/۲۴۲	۱۲/۰۴۶	۵۰	۱۲
NTT-west	۵۱/۴۰۵	۳۵/۸۱۴	-۶/۱۰۰	۲۵۴	۶۰	۲۸/۲۴۴	۱۳/۸۵۶	۲۸	۱۴
NTT-center	۵۱/۶۵۷	۳۵/۸۳۷	-۶/۱۰۰	۲۶۰	۷۵	۲۴/۰۰۰	۱۲/۴۲۳	۲۴	۱۲
NTT-east	۵۱/۷۶۶	۳۵/۸۱۱	-۶/۱۰۰	۲۷۹	۷۵	۰۹/۶۰۰	۱۲/۴۲۳	۱۰	۱۲

است. گسل طالقان در راستای امتداد به چهار صفحه گسلی تقسیم شد (شکل ۸). لغزش افزایشی در صفحه گسل طالقان شرقی نشان‌دهنده دو لغزش چپ‌گرد و معکوس به‌نحوی که آهنگ لغزش چپ‌گرد بیشتر از آهنگ لغزش راست‌گرد است. لغزش افزایشی در بخش شرقی صفحه گسل طالقان مرکزی نشان‌دهنده دو نوع لغزش چپ‌گرد و نرمال با دامنه‌های تقریباً مساوی است. در بخش غربی صفحه گسل طالقان مرکزی، هر دو نوع لغزش امتداد لغز چپ‌گرد و راست‌گرد و شیب لغز معکوس و نرمال مشاهده می‌شود ولی لغزش چپ‌گرد در بخش بیشتری از صفحه گسل توزیع شده است. لغزش افزایشی در صفحه گسل طالقان غربی نیز نشان‌دهنده لغزش چپ‌گرد، معکوس و

راستای شیب تقسیم شد. در هر دو صفحه بالا و پایین گسل امامزاده داوود دو لغزش امتداد لغز چپ‌گرد و راست‌گرد به ترتیب در سمت راست و چپ صفحه گسل و همچنین لغزش معکوس مشاهده می‌شود، به‌نحوی که آهنگ لغزش معکوس بزرگ‌تر از آهنگ لغزش امتداد لغز است. در دو صفحه غربی گسل امامزاده داوود نیز دو لغزش چپ‌گرد و معکوس مشاهده می‌شود که از نظر دامنه تقریباً باهم مساوی‌اند. در گسل ارتباط‌دهنده گسل‌های مشا- فشم و طالقان (شکل ۸) لغزش چپ‌گرد در راستای امتداد و معکوس و نرمال به ترتیب در سمت چپ و راست صفحه گسل توزیع شده است به‌نحوی که آهنگ لغزش امتداد لغز بیشتر از آهنگ لغزش شیب لغز



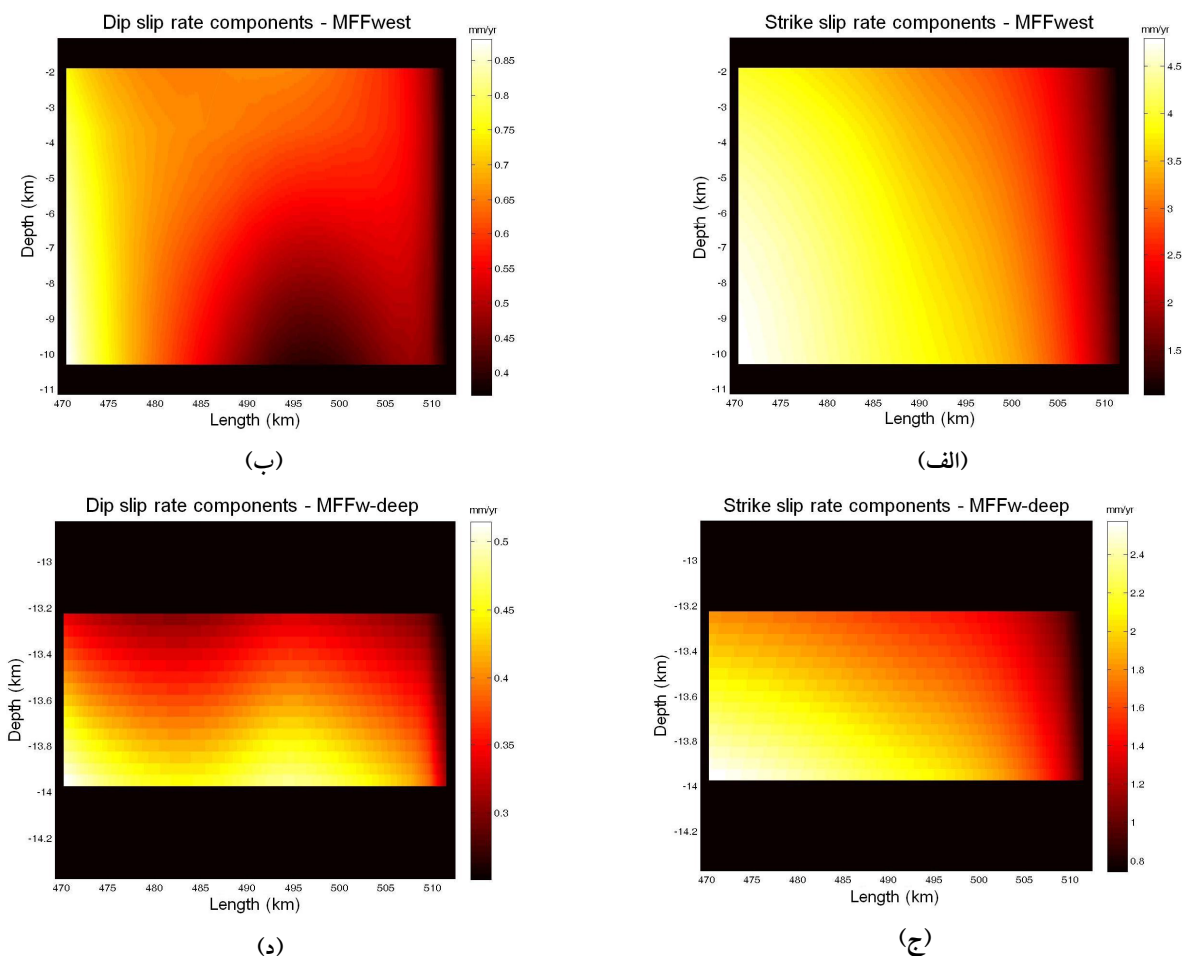
شکل ۱۱. توزیع آهنگ لغزش در صفحه گسل مشا- فشم، (الف) آهنگ لغزش امتدادلغز در بخش مرکزی، (ب) توزیع آهنگ لغزش شیب‌لغز در بخش مرکزی، (ج) آهنگ لغزش امتدادلغز در عمق بخش مرکزی، (د) آهنگ لغزش شیب‌لغز در عمق بخش مرکزی.

بین گسل‌ها ناشی از تنش منطقه‌ای و هندسه موجود گسل‌ها است.

لغزش امتدادلغز چپ‌گرد بیشتر از راست‌گرد و لغزش شیب‌لغز معکوس بیشتر از نرمال بر رفتار گسل‌های منطقه مورد بررسی حاکم است. همچنین عموماً آهنگ‌های لغزش چپ‌گرد بزرگ‌تر از آهنگ‌های لغزش معکوس هستند. در مدل‌سازی صورت گرفته، عامل ایجادکننده لغزش در گسل، تنش منطقه‌ای محاسبه شده با استفاده از مشاهدات GPS است که درحکم شرط مرزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر این اساس جهت بیشینه

نرمال است، به‌نحوی که آهنگ لغزش معکوس و نرمال تقریباً باهم مساوی و آهنگ لغزش چپ‌گرد از هردوی آنها بیشتر است. راندگی شمال تهران نیز به سه صفحه غربی، مرکزی و شرقی تقسیم شد (شکل ۸). آهنگ‌های لغزش افرازی با مدل در هر سه بخش گسل نشان‌دهنده دو نوع لغزش چپ‌گرد و معکوس است، به‌نحوی که آهنگ لغزش چپ‌گرد بیشتر از آهنگ لغزش معکوس است.

مدل‌سازی صورت گرفته نشان می‌دهد که در مورد اکثر بخش‌های گسلی آهنگ لغزش افرازی حالت بیضی‌شکل و متقارن ندارد که این امر به‌سبب برهمکنش



شکل ۱۲. توزیع آهنگ لغزش در صفحه گسل مشا- فشم، (الف) آهنگ لغزش امتدادلغز در بخش غربی، (ب) آهنگ لغزش شیب‌لغز در بخش غربی، (ج) آهنگ لغزش امتدادلغز در عمق بخش غربی، (د) آهنگ لغزش شیب‌لغز در عمق بخش غربی.

مؤلفه‌های متناظر در امتداد عمود بر آنها است. از سوی دیگر در مدل‌سازی صورت گرفته شیب گسل‌ها ثابت در نظر گرفته شده است، درحالی‌که به‌ویژه در مورد گسل‌های معکوس، شیب گسل با عمق تغییر می‌کند. بعد از افزایش لغزش، به‌منظور محاسبه پارامترهای تغییرشکل در یک نقطه اختیاری می‌توان با استفاده از مدل نابرجایی اکادا، بردارهای جا بجایی مربوط به تک‌تک المان‌ها را در نقطه موردنظر محاسبه کرد و با توجه به برقرار بودن اصل برهم‌نهی در محیط‌های کشسان (میس، ۱۹۹۹) نتایج را باهم جمع برداری کرد و به پارامتر موردنظر برای میدان دگرشکلی رسید.

کوتاه‌شدگی در منطقه مورد بررسی دارای امتداد  $N36.5^{\circ}E$  است که دامنه آن بزرگ‌تر از جهت بیشینه کششی است. عامل افزایش لغزش به مؤلفه‌های امتدادلغز و شیب‌لغز نیز وضعیت هندسی گسل نسبت به توجیه مؤلفه‌های اصلی تنش منطقه‌ای است. علت بیشتر بودن آهنگ لغزش چپ‌گرد نسبت به آهنگ لغزش معکوس در مورد اکثر گسل‌ها ناشی از دو عامل برهم‌کنش مکانیکی بین گسل‌ها و تمایل محورهای اصلی افقی جهت بیشینه کوتاه‌شدگی و کشیدگی تانسور آهنگ تنش منطقه‌ای نسبت به امتداد گسل‌ها است به‌نحوی که تصویر مؤلفه‌های اصلی تنش در امتداد اکثر گسل‌ها بیشتر از تصویر

مکانیکی بین گسل‌ها می‌توان برای مدل‌سازی توپوگرافی منطقه مورد بررسی استفاده کرد (میعز و همکاران، ۲۰۰۸).

##### ۵ نتیجه‌گیری

در این تحقیق آهنگ لغزش بین گسل‌های بخش جنوبی البرز مرکزی با در نظر گرفتن برهمکنش مکانیکی بین گسل‌ها با استفاده از روش المان‌های مرزی با حل اساسی اکادا توزیع شد. از میدان تنش حاصل از مشاهدات GPS درحکم شرط مرزی در مدل‌سازی استفاده شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان‌دهنده خروج آهنگ لغزش توزیع شده روی گسل‌ها از حالت متقارن و بیضی‌شکل است که این امر از وجود برهمکنش بین گسل‌ها تحت تأثیر تنش منطقه‌ای و هندسه گسل‌های مجاور در منطقه مورد بررسی حکایت دارد.

نتایج افراز لغزش نشان می‌دهد که اکثر گسل‌های منطقه مورد بررسی دارای رفتار امتدادلغز چپ‌گرد و شیب‌لغز معکوس هستند و آهنگ لغزش‌های چپ‌گرد عموماً بیشتر از آهنگ لغزش‌های معکوس است.

##### منابع

نوری، س.، وثوقی، ب. و ابوالقاسم، ا. م.، ۱۳۸۸، مدل‌سازی میدان جابجایی هم‌لرزه یک گسل و تعیین حساسیت پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل به میدان جابجایی آن: مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۵(۱)، ۵۹-۷۳.

Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M., and Qorashi, M., 2003, Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran: *J. Struct. Geology*, **25**, 659-672.

Ambraseys, N. N., 1974, Historical seismicity of north-central Iran, Material for the Study of Seismotectonics of Iran: North-central Iran: Geological Survey of Iran, Report 29, 47-96.

به‌منظور مدل‌سازی، هندسه گسل‌ها با در نظر گرفتن اطلاعات زمین‌شناسی موجود ثابت در نظر گرفته شد، برای ضرایب لامه نیز از مقدار متوسط جهانی استفاده شد. بررسی زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه برای مشخص کردن دقیق‌تر هندسه گسل‌ها در عمق و همچنین تعیین ضرایب لامه به‌صورت محلی به‌منظور بهبود آهنگ‌های لغزش افزایی پیشنهاد می‌شود.

در این تحقیق با توجه به وسعت منطقه مورد بررسی و تعداد زیاد گسل‌ها، از یک تانسور آهنگ کرنش برای کل گسل‌ها که از مشاهدات GPS استخراج شده بود استفاده شد. برای بهبود نتایج، تفکیک منطقه مورد بررسی به مناطقی که از نظر تنشی وضعیت پایداری داشته باشند (رجبی و همکاران، ۲۰۱۱) و همچنین مدل‌سازی به‌صورت جداگانه برای چنین مناطقی با شرایط مرزی تنشی جداگانه پیشنهاد می‌شود.

برای توزیع آهنگ لغزش بین گسل‌ها از تابع‌های گرین مربوط به نیم‌فضا استفاده شد. استفاده از تابع‌های گرین کروی به‌جای تابع‌های گرین نیم‌فضا برای اعمال اثر کروی بودن زمین برای بهبود آهنگ‌های لغزش افزایی بین گسل‌ها پیشنهاد می‌شود. همچنین در مدل‌سازی صورت گرفته، زمین به‌صورت جسم کُشسان همگن فرض شده است. استفاده از مدل لایه‌ای برای زمین و اعمال اثر ناهمگنی زمین، به بهبود نتایج مدل‌سازی کمک خواهد کرد (سان و همکاران، ۱۹۹۶؛ سان و اکوبو، ۲۰۰۲). همچنین برای اعمال انحناهای سطح گسل، استفاده از المان‌های مثلثی به‌جای المان‌های مستطیلی در بررسی اثر انحناهای سطح گسل در آهنگ‌های لغزش افزایی توصیه می‌شود (توماس، ۱۹۹۳؛ مارتن و همکاران، ۲۰۰۵؛ مارشال و همکاران، ۲۰۰۸). اعمال اثر گرانث زمین به‌صورت شرط مرزی با استفاده از مدل ونگ و همکاران (۲۰۰۶) نیز باعث توزیع واقعی‌تر آهنگ‌های لغزش خواهد شد. از آهنگ‌های لغزش افزایی با لحاظ کردن برهمکنش



- Thermal histories from the central Alborz Mountains, northern Iran: Implications for the spatial and temporal distribution of deformation in northern Iran: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **118** (11/12), 1507-1521.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., and Müller, B. (eds.), 2008, *The World Stress Map: Commission for the Geological Map of the World*, Paris, 1:46M.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M. and Berberian, M., 2002, Active Tectonics of the South Caspian Basin: *Geophys. J. Int.*: **148**, 214-245.
- Landgraf, A., Ballato, P., Strecker, M. R., Friedrich, A., and Tabatabaei, S. H., Shahpasandzadeh, M., 2009, Fault-kinematic and geomorphic observations along the North Tehran Thrust and Mosha Fasham Fault, Alborz mountains Iran: implications for fault-system evolution and interaction in a changing tectonic regime: *Geophys. J. Int.*, **177**(2), 676-690.
- Maerten, F., Resor, P., Pollard, D., and Maerten, L., 2005, Inverting for slip on three-dimensional fault surfaces using angular dislocations: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**(5), 1654-1665.
- Marshall, S. T., Cooke, M. L., and Owen S. E., 2008, Effects of nonplanar fault topology and mechanical interaction on fault-slip distributions in the Ventura Basin, California: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **98**(3), 1113-1127.
- Mase, G. T., Mase, G. M., 1999, *Continuum Mechanics for Engineers*: CRC Press, 400 pp.
- Masson, F., Anvari, M., Djamour, Y., Walpersdorf, A., Tavakoli, F., Daignieres, M., Nankali, H., and Van Gorp, S., 2007, Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation: *Geophys. J. Int.*, **170**, 436-440.
- Meigs, A. J., Cooke, M. L., and Marshall, S. T., 2008, Using vertical rock-uplift patterns to constrain the three-dimensional fault configuration in the Los Angeles Basin, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **98**(2), 106-123.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**(4), 1135-1154.
- Pollard, D. D., and Segall, P., 1987, Theoretical displacements and stresses near fractures in rock: with applications to faults, joints, veins, dikes, and solution surfaces. in: Ambraseys, N. N., and Melville, C. P., 1982, *A History of Persian Earthquakes*: Cambridge University Press, London, 219pp.
- Amini, B., and Emami, M. H., 1993, *Geological Map of Iran*, 100000 Series, Sheet Tehran, GSI.
- Ashtari, M., Hatzfeld, D., and Kamalian, N., 2005, Microseismicity in the region of Tehran: *Tectonophysics*, **395**, 193-208.
- Berberian, M., and Yeats, R. S., 1999, Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 120-139.
- Berberian, M., and Yeats, R. S., 2001, Contribution of archaeological data to studies of earthquake history in the Iranian Plateau: *J. Struct. Geology*, **23**, 563-584.
- Bürgmann, R., Pollard, D. D., and Martel, S. J., 1994, Slip distributions on faults: effects of stress gradients, inelastic deformation, heterogeneous host-rock stiffness, and fault interaction: *J. Struct. Geology*, **16**(12), 1675-1690.
- Crouch, S. L., 1976, Solution of plain elasticity problems by the displacement discontinuity method: *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **10**(2), 301-343.
- Crouch, S. L., and Starfield, A. M., 1983, *Boundary Element Methods in Solid Mechanics*: George Allen & Unwin publication, 322 pp.
- Djamour, Y., Vernant, Ph., Bayer, R., Hamid Reza Nankali, H. R., Ritz, J. F., Hinderer, J., Hatam, Y., Luck, B., Moigne N. L., Sedighi, M., and Fateme Khorrami, F., 2010, GPS and gravity constraints on continental deformation in the Alborz mountain range, Iran: *Geophys. J. Int.*, **183**(3), 1287-1301.
- Engdahl, E. R., Jackson, J. A., Myers, S. C., Bergman, E. A., and Priestley, K., 2006, Relocation and assessment of seismicity in the Iran region: *Geophys. J. Int.*: **167**(2), 761-778.
- Gomberg, J., and Ellis, M., 1994, Topography and tectonics of the central New Madrid seismic zone: Results of numerical experiments using a three-dimensional boundary-element program: *J. Geophys. Res.*, **99**(B10), 20299-20310.
- Guest, B., Axen, G. J., Lam, P. S., and Hassanzadeh, J., 2006a, Late Cenozoic shortening in the west-central Alborz Mountains, northern Iran, by combined conjugate strike-slip and thin-skinned deformation: *Geosphere*, **2**, 35-52.
- Guest, B., Stockli, D. F., Grove, M., Axen, G. J., Lam, P. S., and Hassanzadeh, J., 2006b,

- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abassi, M.R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., and Chery, J., 2004a, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman: *Geophys. J. Int.*, **157**, 381-398.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Chery, J., Bayer, R., Djamour, Y., Masson, F., Nankali, H., Ritz, J. F., Sedighi, M. and Tavakoli F., 2004b, Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic data: *Earth and Planetary Science Letters*, **223**, 177-185.
- Wang, R., Martin, L. F., and Roth F., 2006, PSGRN/PSCMP - a new code for calculating co-postseismic deformations and geopotential changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory: *Computers and Geosciences*, **32**, 527-541.
- Zanchi, A., Berra, F., Mattei, M., Ghassemi, M. R., and Sabouri, J., 2006, Inversion tectonics in central Alborz, Iran: *J. Struct. Geology*, **28**(11), 2023-2037.
- Fracture Mechanics of Rock, ed: B. K. Atkinson, 277-349.
- Priestley, K., Baker, C., and Jackson, J., 1994, Implications of earthquake focal mechanism data for the active tectonics of the South Caspian Basin and surrounding regions: *Geophys. J. Int.*, **118**, 111-141.
- Rajabi, S., Eliassi, M., and Saidi, A., 2011, Statistic and genetic investigation of faults in North Tehran tectonic wedge (South Central Alborz): *Arabian Journal of Geosciences*, doi 10.1007/s12517-010-0270-7.
- Sun, W., Okubo, S., and Vanicek, P., 1996, Global displacements caused by point dislocations in a realistic Earth model: *J. Geophys. Res.*, **101**, B4, 8561-8577.
- Sun, W., Okubo, S., 2002, Effects of earth's spherical curvature and radial heterogeneity in dislocation studies—for a point dislocation: *Geophys. Res. Lett.*, **29**(12), 1605, 4 PP.
- Thomas, A. L., 1993, POLY3D: A Three-Dimensional, Polygonal Element, Displacement Discontinuity Boundary Element Computer Program with Applications to Fractures, Faults, and Cavities in the Earth's Crust: A thesis submitted to the department of geology and the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science, 69 pp.