

## تعیین مناطق مناسب انجام مشاهدات ژئودتیکی به منظور رفتارسنجی و مطالعه مکانیک گسل شمال تبریز با آنالیز حساسیت مدل تحلیلی اکادا به روش HDMR

اصغر راست‌بود<sup>۱\*</sup>، بابک شاهنده<sup>۲</sup>، مهدی محمدزاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز  
<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۹/۹/۱۵، پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۷، نشر آنلاین: ۹۹/۱۰/۲۷)

### چکیده

با ظهور فناوری‌های جدید مانند GPS (Global Positioning System) و انجام مشاهدات باکیفیت بالا، می‌توان مطالعات بسیاری را در مورد مسائل زمین‌ساختی شروع کرده یا بهبود بخشید. با این حال کیفیت و قابلیت اطمینان نتایج حاصل از این مطالعات به محل ایستگاه‌ها یا به عبارت دیگر به طرح شبکه‌های ژئودینامیکی بستگی دارد. هدف این تحقیق بهینه‌سازی مکانیکی جهت تعیین بهترین محل برای ایستگاه‌های یک شبکه ژئودینامیکی به منظور رسیدن به مقادیر صحیح‌تر برای پارامترهای گسل با قابلیت اطمینان بالا و هزینه کم است به نحوی که با حل مسئله معکوس با قید مشاهدات آن ایستگاه‌ها بتوان به مقادیر صحیح‌تر برای برخی از پارامترهای گسل‌های فعال رسید. تحقیق حاضر به تعیین بهینه محل ایستگاه‌های شبکه ژئودزی ماهواره‌ای برای مطالعه مکانیک گسل شمال تبریز به منظور برآورد هرچه صحیح‌تر پارامترهای این گسل اختصاص دارد. عوامل محدودکننده‌ای نظیر توپوگرافی را نیز می‌توان در این فرایند مدنظر قرار داد. به منظور انجام تحلیل حساسیت مدل تحلیلی اکادا (Okada) انتخاب شد و تحلیل حساسیت میدان جابه‌جایی سطحی حاصل از این مدل نسبت به کلیه پارامترهای ورودی از جمله پارامترهای هندسی گسل و پارامترهای رئولوژیکی (Rheological Parameters) پوسته انجام شد. برای انجام تحلیل از فرامدل HDMR (High Dimensional Model Representation) استفاده شد. نخست یک شبکه‌بندی  $400 \times 500$  کیلومتر با فواصل نقاط ۱۰ کیلومتری در منطقه اطراف گسل ایجاد شده و تحلیل حساسیت جابه‌جایی‌های سطحی نسبت به کلیه پارامترهای ورودی مدل در هر نقطه شبکه انجام شد. بر اساس نتایج تحلیل صورت گرفته بیشترین حساسیت مدل مربوط به نرخ لغزش و عمق قفل‌شدگی و کم‌ترین آن مربوط به ضرایب لامه (Lamé coefficients) می‌باشد، به نحوی که برای رفتارسنجی و مطالعه نرخ لغزش ایستگاه‌ها باید دور از گسل و برای مطالعه عمق قفل‌شدگی باید نزدیک گسل احداث شوند.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل حساسیت، بهینه‌سازی مکانیکی، شبکه ژئودینامیکی، گسل شمال تبریز.

### ۱- مقدمه

تعیین پارامترهای گسلی همواره با یک سری عدم قطعیت‌هایی روبه‌روست. در بسیاری از موارد روش‌های زلزله‌شناسی به‌تنهایی نمی‌توانند پارامترهای هندسی مربوط به یک گسل نظیر طول، عرض، عمق، شیب و نرخ لغزش را با قطعیت تعیین کنند. در حالت کلی رسیدن از جابه‌جایی‌های سطح زمین به پارامترهای گسلی نیازمند حل مسئله معکوس است. روش‌های مختلفی برای حل مسئله معکوس وجود دارد که یکی از بهترین روش‌ها روش المان‌های مرزی با حل اساسی اکادا می‌باشد (Ellis و Gomberg، ۱۹۹۴؛ Okada، ۱۹۸۵). قبل از حل هر مسئله معکوسی بایستی تحلیل حساسیت انجام شود. مرور روش‌های مختلف تحلیل حساسیت توسط Saltelli و همکاران در سال ۲۰۰۸ انجام شده

با توسعه فنون پیشرفته تعیین موقعیت به‌ویژه سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) در دهه‌های گذشته، علاقه به طراحی بهینه شبکه‌های ژئودینامیکی جهت رفتارسنجی و مطالعه مکانیک گسل‌های فعال رشد چشم‌گیری پیدا کرده است. امروزه داده‌های ژئودتیکی<sup>۱</sup> روزبه‌روز زیاده‌تر شده و سهل‌الوصول‌تر می‌شوند. کشور ما هم در این زمینه پیشرفت‌های زیادی کرده و این نوع داده‌ها هم‌اکنون قابل دسترسی است. در حال حاضر تعیین پایداری و صحت نتایج حاصل از مشاهدات این شبکه‌ها به امر مهمی تبدیل شده است.

تعیین کند کدام ایستگاه‌ها باید انتخاب شوند تا صحیح‌ترین اطلاعات را در مورد رفتارسنجی یا مکانیک گسل ارائه دهد. به‌ندرت می‌توان تحقیقاتی در مورد بهینه‌سازی مکانیکی شبکه‌های ژئودینامیکی برای برآورد صحیح‌تر پارامترهای گسل پیدا کرد. مروری کوتاه بر اهداف و روند بهینه‌سازی یک شبکه ژئودینامیکی برای رفتارسنجی گسل San Jacinto در جنوب کالیفرنیا انجام گرفته است (Wyatt و Johnson، ۱۹۹۴). بهینه‌سازی مکانیکی شبکه‌های ژئودینامیکی GPS توسط Gerasimenko و همکاران در سال ۲۰۰۰ مورد مطالعه قرار گرفته است. تحقیق دیگری در قسمت غربی گسل آناتولی شمالی در منطقه İzmit با استفاده از MAGNET<sup>۲</sup> (شبکه GPS مرمه) توسط Taşkın و همکاران در سال ۲۰۰۳ به انجام رسیده است. مطالعه دیگری نیز توسط Halicioglu و Ozener برای گسل Tuzla در منطقه Izmir ترکیه در سال ۲۰۰۸ صورت گرفته است. نخستین بهینه‌سازی مکانیکی برای شبکه ژئودینامیکی به‌منظور مطالعه و رفتارسنجی آتشفشان‌های Agung و Batur واقع در اندونزی توسط Sarsito و همکاران در سال ۲۰۱۹ انجام شده است.

تحقیق حاضر تلاش می‌کند راهی را برای تحقیقات آینده جهت بهینه‌سازی درک ما از مکانیک گسل‌های فعال بگشاید. در این تحقیق برای نخستین بار مرحله اول بهینه‌سازی مکانیکی شبکه ژئودینامیکی ماهواره‌ای با تحلیل حساسیت جابه‌جایی‌های سطحی حاصل از مدل تحلیلی اکادا در نیم‌فضای کشسان با استفاده از فرامدل HDMR مطرح‌شده و به‌عنوان مطالعه موردی در محدوده گسل شمال تبریز به انجام رسیده است. در حالت کلی نتایج این تحقیق نشان داده است که بیش‌ترین حساسیت مدل اکادا مربوط به نرخ لغزش و عمق قفل‌شدگی و کم‌ترین آن مربوط به ضرایب لانه می‌باشد؛ به‌نحوی که برای مطالعه نرخ لغزش گسل شمال تبریز ایستگاه‌ها باید دور از گسل و برای تعیین عمق قفل‌شدگی ایستگاه‌ها باید نزدیک گسل احداث شوند.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- مدل‌سازی تغییرشکل ناشی از فعالیت گسل بر اساس

#### مدل تحلیلی اکادا

همان‌طور که در مقدمه نیز اشاره شد، به‌منظور تحلیل حساسیت جابه‌جایی‌های مسطحاتی ناشی از لغزش گسل در این تحقیق، از مدل تحلیلی اکادا (۱۹۸۵) استفاده شده است. مدل اکادا بر پایه تئوری نابرجایی<sup>۳</sup> بنا نهاده شده است. در این مدل ابتدا مدل‌سازی میدان تغییرشکل حاصل از یک تک‌نیرو (منبع نقطه‌ای) انجام می‌گیرد و سپس با انتگرال‌گیری از روابط منبع نقطه‌ای، میدان تغییرشکل حاصل از یک منبع مستطیلی (صفحه گسل)

است. همچنین کاربردهای تحلیل حساسیت در مدل‌سازی انواع مشاهدات مربوط به علوم زمین توسط Petropoulos و Srivastava در سال ۲۰۱۶ مطرح شده است. هدف از انجام تحلیل حساسیت، عملی ساختن یک بررسی کلی روی تک‌تک پارامترهای مؤثر در مدل است تا مشخص شود که حساسیت خروجی مدل نسبت به کدام پارامتر ورودی بیشتر از بقیه است و یا به‌عبارت بهتر تغییرات کدام پارامتر ورودی مدل، خروجی مدل یعنی جابه‌جایی‌ها را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگر مدل نسبت به یک پارامتر حساس‌تر باشد یعنی با تغییرات آن، جابه‌جایی‌ها بیشتر دچار تغییر شوند در منطقه‌ای که مشاهدات GPS در دسترس باشد، اگر مقدار آن پارامتر معلوم نباشد می‌توان از طریق تغییر در مقدار آن پارامتر و معرفی مقادیر متفاوت آن به مدل و مقایسه خروجی با نتایج حاصل از مشاهدات GPS به مقدار بهینه آن پارامتر پی برده و آن را برای گسل یا منطقه در نظر گرفت. انجام تحلیل حساسیت برای پاسخ به دو سؤال زیر ضروری است:

۱- چه مدلی یا چه روش حل مسئله معکوسی برای تعیین کدام پارامتر هندسی گسل یا پارامتر فیزیکی پوسته دربردارنده گسل مناسب است؟

۲- داده‌های ژئودینامیکی که به‌عنوان قید برای حل مسئله معکوس استفاده می‌شوند بهتر است از کدام قسمت سطح زمین جمع‌آوری شوند؟

کلاً در ارتباط با شبکه‌های ژئودینامیکی می‌توان دو نوع بهینه‌سازی ژئودینامیکی و مکانیکی انجام داد. هدف اصلی از بهینه‌سازی ژئودینامیکی یک شبکه ارائه طرحی برای شبکه جهت رسیدن به سطح مطلوبی از دقت برای موقعیت، قابلیت اطمینان بالا و هزینه کم است (Kuang، ۱۹۹۱؛ Schmitt، ۱۹۸۵). تحقیقات زیادی در زمینه بهینه‌سازی ژئودینامیکی شبکه‌ها انجام شده است ولی لازم به ذکر است که مسئله بهینه‌سازی ژئودینامیکی یک شبکه هنوز به‌طور کامل حل نشده است. اولین تحقیقات در این مورد توسط Gerasimenko (۱۹۹۰، ۱۹۹۱ و ۱۹۹۷) انجام گرفته است. هدف از بهینه‌سازی مکانیکی نیز رسیدن به صحیح‌ترین مقدار برای برخی از پارامترهای هندسی گسل از جمله عمق قفل‌شدگی و نرخ لغزش و همچنین رفتارسنجی صحیح گسل می‌باشد. بهینه‌سازی مکانیکی در دو مرحله انجام می‌شود. مرحله اول تعیین محل مناسب استقرار ایستگاه‌هاست، عوامل محدودکننده‌ای نظیر توپوگرافی و سایر شرایط مانند هزینه نصب و پشتیبانی ایستگاه‌ها و غیره را می‌توان در این مرحله مدنظر قرار داد. مرحله دوم نیز تصمیم‌گیری در مورد تعداد ایستگاه‌ها با توجه به توزیع اولیه آن-هاست. هیچ روش تحلیلی که مشکل تعداد ایستگاه‌های موجود در شبکه را حل کند، وجود ندارد. همچنین روشی وجود ندارد که

همچنین در این شکل نابرجایی‌های  $U_1$  و  $U_2$  و  $U_3$  که متناظر با مؤلفه‌های امتداد لغز، شیب لغز و کش لغز یک نابرجایی اختیاری هستند نشان داده شده است. هر بردار نابرجایی حرکت فرادیواره را نسبت به فرودیواره نشان می‌دهد. در این شکل مؤلفه شیب لغز نابرجایی یعنی  $U_2$  نشان‌دهنده حرکت معکوس است که اگر  $0 < \sin 2\delta$  باشد نشانگر حرکت نرمال خواهد بود. در این سیستم مختصات، جابه‌جایی  $u_i^j$  در سطح زمین از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\begin{cases} u_1^1 = \frac{F}{4\pi\mu} \times \left\{ \frac{1}{R} + \frac{(x_1 - \xi_1)^2}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{R - \xi_3} - \frac{1}{R(R - \xi_3)^2} \right] \right\} \\ u_2^1 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_1 - \xi_1)(x_2 - \xi_2) \times \left\{ \frac{1}{R^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu R(R - \xi_3)^2} \right\} \\ u_3^1 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_1 - \xi_1) \left\{ \frac{\xi_3}{R^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu R(R - \xi_3)} \right\} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_1^2 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_1 - \xi_1)(x_2 - \xi_2) \times \left\{ \frac{1}{R^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu R(R - \xi_3)^2} \right\} \\ u_2^2 = \frac{F}{4\pi\mu} \times \left\{ \frac{1}{R} + \frac{(x_2 - \xi_2)^2}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{R - \xi_3} - \frac{(x_2 - \xi_2)^2}{R(R - \xi_3)^2} \right] \right\} \\ u_3^2 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_2 - \xi_2) \left\{ -\frac{\xi_3}{R^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu R(R - \xi_3)} \right\} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_1^3 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_1 - \xi_1) \left\{ -\frac{\xi_3}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu R(R - \xi_3)} \right\} \\ u_2^3 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_2 - \xi_2) \left\{ -\frac{\xi_3}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu R(R - \xi_3)} \right\} \\ u_3^3 = \frac{F}{4\pi\mu} \left\{ \frac{1}{R} + \frac{\xi_3^2}{R^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu R} \right\} \end{cases} \quad (4)$$

در این روابط داریم:

$$R^2 = (x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2$$

با استفاده از رابطه (۱)، سهم المان سطحی  $\Delta\Sigma$  در جابه‌جایی، ناشی از هر مؤلفه نابرجایی به صورت زیر می‌باشد:

برای مؤلفه امتداد لغز:

$$\frac{1}{F} \mu U_1 \Delta\Sigma \left[ -\left( \frac{\partial u_1^1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_1^2}{\partial \xi_1} \right) \sin \delta + \left( \frac{\partial u_1^1}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_1^3}{\partial \xi_1} \right) \cos \delta \right]. \quad (5)$$

برای مؤلفه شیب لغز:

$$\frac{1}{F} \mu U_2 \Delta\Sigma \left[ \left( \frac{\partial u_1^2}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_1^1}{\partial \xi_2} \right) \cos 2\delta + \left( \frac{\partial u_1^3}{\partial \xi_3} - \frac{\partial u_1^1}{\partial \xi_2} \right) \sin 2\delta \right]. \quad (6)$$

فرموله می‌شود. به‌طورکلی پارامترهای ورودی مدل اکادا به دو دسته پارامترهای فیزیکی و هندسی تقسیم‌بندی می‌شوند. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در این مدل، ضرایب لامه شامل مدول یانگ<sup>۴</sup> و نسبت پواسن<sup>۵</sup> در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. پارامترهای هندسی نیز شامل طول، عرض، عمق قفل‌شدگی، شیب، آزمون، میزان نابرجایی یا نرخ لغزش، مختصات نقطه ابتدایی گسل و همچنین مختصات نقاط مشاهداتی (ایستگاه‌های GPS) می‌باشد. مدل اکادا در واقع با توجه به هندسه گسلش و فیزیک منطقه مورد مطالعه، نابرجایی گسلش یا نرخ لغزش را به میدان جابه‌جایی یا میدان سرعت ناشی از آن تبدیل می‌کند.

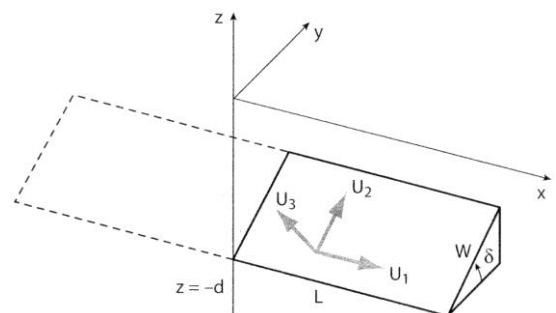
### ۲-۱-۱- مدل اکادا برای منبع نقطه‌ای

Steketee (۱۹۸۵) نشان داد که میدان جابه‌جایی  $u_i(x_1, x_2, x_3)$  ناشی از نابرجایی  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  به مساحت  $\Sigma$  در یک محیط همگن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[ \lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_l^n}{\partial \xi_n} + \mu \left( \frac{\partial u_l^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_k^j}{\partial \xi_l} \right) \right] v_k d\Sigma \quad (1)$$

در این رابطه،  $\delta_{jk}$  دلتای کرونکر<sup>۶</sup>،  $\lambda$  و  $\mu$  ضرایب لامه و  $v_k$  کسینوس هادی عمود بر المان سطحی  $d\Sigma$  بوده و قرارداد جمع نیز اعمال شده است.  $u_i^j$  مؤلفه  $i$ ام جابه‌جایی در نقطه  $(x_1, x_2, x_3)$  ناشی از جهت  $j$ ام نیروی نقطه‌ای به بزرگی  $F$  است که در نقطه  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  روی سطح اعمال می‌شود. رابطه (۱) به معادله ولتر<sup>۷</sup> معروف بوده و نشان می‌دهد که جابه‌جایی‌ها ناشی از منابعی به صورت کوپل<sup>۸</sup> مضاعف هستند (Segall, ۲۰۱۰).

در سیستم مختصات کارترین شکل (۱) محیط کشسان در منطقه  $z \leq 0$  قرار گرفته و محور  $X$  موازی با امتداد گسل می‌باشد.



شکل ۱- هندسه گسلش مرجع با سیستم مختصات مورد

استفاده در محاسبه توابع گرین جابه‌جایی فرودیواره گسل نمایش داده شده و بردارها نشان‌دهنده حرکت فرادیواره می‌باشند.  $U_1, U_2$  و  $U_3$  با فرض  $0 < \delta < \pi/2$  به ترتیب بیانگر لغزش چپ‌گرد، راندگی و کشش بازشونده می‌باشند (Okada, ۱۹۸۵)

7. Volterra's Equation

8. Couple

4. Young's modulus

5. Poisson's Ratio

6. Kronecker delta

$$\begin{cases} p = y \cos \delta + d \sin \delta \\ q = y \sin \delta - d \cos \delta \\ R^2 = x^2 + y^2 + d^2 = x^2 + p^2 + q^2 \end{cases} \quad (12)$$

### ۲-۱-۲- مدل اکادا برای گسل با ابعاد محدود

میدان تغییر شکل برای یک گسل مستطیلی محدود با طول  $L$  و عرض  $W$ ، با جایگزینی  $x - \xi'$ ،  $y - \eta' \cos \delta$  و  $d - \eta' \sin \delta$  به جای  $x$ ،  $y$  و  $d$  در روابط به دست آمده برای منبع نقطه‌ای و با انتگرال گیری زیر به دست می‌آیند:

$$\int_0^L d\xi' \int_0^W d\eta' \quad (13)$$

با تغییر متغیر از  $\xi'$  و  $\eta'$  به  $\xi$  و  $\eta$  به صورت  $\eta - \xi' = \xi$  و  $x - \xi' = \eta$  که در آن  $p = y \cos \delta + d \sin \delta$  خواهیم داشت:

$$\int_x^{x-L} d\xi \int_p^{p-W} d\eta \quad (14)$$

نتایج نهایی با استفاده از نماد چینی  $\int$  جهت نمایش جایگذاری به صورت زیر می‌باشد:

$$f(\xi, \eta) = f(x, p) - f(x, p - w) - f(x - L, p) + f(x - L, p - w) \quad (15)$$

اگر مطابق خطوط خط چین شکل (۱) گسل مستطیلی با طول  $2L$  در نظر گرفته شود، کافی است که در دو ترم اول و دوم سمت راست رابطه (۱۵)  $x$  با  $x+L$  جایگزین شود. مؤلفه‌های بردار جابه‌جایی برای گسلش امتداد لغز به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} u_x &= -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_1 \sin \delta \right] \\ u_y &= -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{y} q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \delta}{R+\eta} + I_2 \sin \delta \right] \\ u_z &= -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{d} q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_4 \sin \delta \right] \end{aligned} \quad (16)$$

همچنین برای گسلش شیب لغز خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} u_x &= -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{q}{R} - I_1 \sin \delta \cos \delta \right] \\ u_y &= -\frac{U_2}{2\pi} \times \left[ \frac{\tilde{y} q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_1 \sin \delta \cos \delta \right] \\ u_z &= -\frac{U_2}{2\pi} \times \left[ \frac{\tilde{d} q}{R(R+\xi)} + \sin \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_5 \sin \delta \cos \delta \right] \end{aligned} \quad (17)$$

برای گسلش کش لغز نیز خواهیم داشت:

برای مؤلفه کش لغز:

$$\frac{1}{F} U_3 \Delta \Sigma \left[ \lambda \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + 2\mu \left( \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_2} \sin^2 \delta + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_3} \cos^2 \delta \right) - \mu \left( \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_2} \right) \sin 2\delta \right] \quad (Y)$$

عبارت‌های (۵) و (۶) جفت نیروهای معادل کوپل مضاعف با گشتاور  $\mu U_2 \Delta \Sigma$  یا  $\mu U_1 \Delta \Sigma$  را در حالت گسل برشی نشان می‌دهند. همچنین رابطه (۷) مرکز اتساع با شدت  $\lambda U_3 \Delta \Sigma$  ترکیب شده با کوپل مضاعف بدون گشتاور و شدت  $2\mu U_3 \Delta \Sigma$  را برای گسل کش-لغز نمایش می‌دهد. با جایگذاری روابط (۲)، (۳) و (۴) در روابط (۵)، (۶) و (۷) و قرار دادن  $\xi_1 = \xi_2 = 0$  و  $\xi_3 = -d$ ، جابه‌جایی‌های سطحی ناشی از یک منبع نقطه‌ای که در موقعیت  $(0, 0, -d)$  قرار دارد به دست می‌آید.

در حالت امتداد لغز:

$$\begin{cases} u_x^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{3x^2 q}{R^5} + I_1^0 \sin \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_y^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{3xyq}{R^5} + I_2^0 \sin \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_z^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{3xdq}{R^5} + I_4^0 \sin \delta \right] \Delta \Sigma \end{cases} \quad (8)$$

در حالت شیب لغز:

$$\begin{cases} u_x^0 = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{3xpq}{R^5} - I_3^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_y^0 = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{3ypq}{R^5} - I_1^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_z^0 = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{3dpq}{R^5} - I_5^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma \end{cases} \quad (9)$$

در حالت کش لغز:

$$\begin{cases} u_x^0 = -\frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{3xq^2}{R^5} - I_3^0 \sin^2 \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_y^0 = -\frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{3yq^2}{R^5} - I_1^0 \sin^2 \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_z^0 = -\frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{3dq^2}{R^5} - I_5^0 \sin^2 \delta \right] \Delta \Sigma \end{cases} \quad (10)$$

در روابط (۸)، (۹) و (۱۰) داریم:

$$\begin{cases} I_1^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[ \frac{1}{R(R+d)^2} - x^2 \frac{3R+d}{R^3(R+d)^3} \right] \\ I_2^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} x \left[ \frac{1}{R(R+d)^2} - y^2 \frac{3R+d}{R^3(R+d)^3} \right] \\ I_3^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{x}{R^3} \right] - I_2^0 \\ I_4^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ -xy \frac{2R+d}{R^3(R+d)^2} \right] \\ I_5^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{R(R+d)} - x^2 \frac{3R+d}{R^3(R+d)^2} \right] \end{cases} \quad (11)$$

## ۲-۲- نمایش بعد بالای مدل (HDMR)

به طور کلی تحلیل حساسیت تلاش می کند رابطه بین ورودی-ها و خروجی های یک مدل را نشان دهد. این کار معمولاً با روش-های مونت کارلو یا با رویکردهای مبتنی بر واریانس انجام می شود. هدف این روش ها استنباط سهم پارامترهای ورودی در عدم قطعیت خروجی است. رویکرد دیگر تولید نگاشت جزئیات فضای پارامتر ورودی بر روی خروجی است که می تواند برای تحلیل کلی مدل مهم و اساسی باشد (Rabitz و Aliş، ۲۰۰۰). بدون ساده-سازی، شناسایی رابطه ورودی- خروجی یک سیستم با ورودی های زیاد از نظر محاسباتی بسیار سخت خواهد بود. فرامدل<sup>۱۱</sup> نمایش بعد بالای مدل (HDMR)<sup>۱۲</sup> معرفی شده توسط Rabitz و همکاران (۱۹۹۹) برای انجام آنالیز حساسیت سراسری می تواند حجم محاسباتی مورد نیاز برای نگاشت را به طور قابل ملاحظه ای کاهش دهد و عمدتاً برای بیان رابطه ورودی- خروجی یک مدل پیچیده با تعداد زیاد پارامترهای ورودی توسعه داده شده است. در واقع فرا مدل، مدلی با تقلید از مدل واقعی است که به جای مدل واقعی مورد استفاده قرار می گیرد. فرامدل HDMR بسطی با فرم سلسله مراتبی بر حسب پارامترهای ورودی است (Li و همکاران، ۲۰۰۰). مطابق این فرامدل، نگاشت مابین پارامترهای ورودی  $x_1, \dots, x_n$  و خروجی در مکعب واحد  $K^n = [0,1]^n$  یعنی  $f(x) = f(x_1, \dots, x_n)$  را می توان به صورت زیر نوشت:

$$f(x) \approx f_0 + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq n} f_{ij}(x_i, x_j) + \dots + f_{12 \dots n}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (22)$$

در این بسط  $f_0$  ترم مرتبه صفر و ثابت است که اثر متوسط را نشان می دهد. تابع  $f_i(x_i)$  ترم مرتبه اول است که اثر پارامتر  $x_i$  را که به طور مستقل (در حالت کلی غیرخطی) بر روی خروجی  $f(x)$  عمل می کند نشان می دهد. تابع  $f_{ij}(x_i, x_j)$  ترم مرتبه دوم است که اثر توأم پارامترهای  $x_i$  و  $x_j$  را بر روی خروجی  $f(x)$  توصیف می کند. ترم های مرتبه بالاتر اثرات توأم تعداد افزایشی پارامترهای ورودی را که باهم برای تأثیرگذاری بر خروجی  $f(x)$  عمل می کنند نشان می دهد. اگر اندرکنشی بین پارامترهای ورودی وجود نداشته باشد، فقط ترم مرتبه صفر  $f_0$  و ترم های مرتبه اول  $f_i(x_i)$  در بسط HDMR ظاهر می شوند. واریانس کل  $D$  را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$D = \int_{K^n} f^2(\vec{x}) d\vec{x} - f_0^2 \quad (23)$$

و واریانس های جزئی  $D_{i_1, \dots, i_k}$  را می توان از هر یک از ترم های موجود در معادله (۲۲) محاسبه کرد.

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{q^2}{R(R+\eta)} - I_3 \sin^2 \delta \right] \\ u_y &= \frac{U_3 \times}{2\pi} \left[ \frac{-\tilde{d}q}{R(R+\xi)} - \sin \delta \left\{ \frac{\xi q}{R(R+\xi)} - \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} \right\} - I_1 \sin^2 \delta \right] \\ u_z &= \frac{U_3 \times}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{y}q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \left\{ \frac{\xi q}{R(R+\xi)} - \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} \right\} - I_5 \sin^2 \delta \right] \end{aligned} \quad (18)$$

در روابط فوق داریم:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{-1}{\cos \delta} - \frac{\xi}{R + \tilde{d}} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_5 \\ I_2 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} [-\ln(R + \eta)] - I_3 \\ I_3 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{\cos \delta} \frac{\tilde{y}}{R + \tilde{d}} - \ln(R + \eta) \right] + \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_4 \\ I_4 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \delta} \times [\ln(R + \tilde{d}) - \sin \delta \ln(R + \eta)] \\ I_5 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos \delta} \times \frac{\tan^{-1} \frac{\eta(X + q \cos \delta) + X(R + X) \sin \delta}{\xi(R + X) \cos \delta}} \end{cases} \quad (19)$$

در حالتی که  $\cos \delta = 0$  باشد خواهیم داشت:

$$\begin{cases} I_1 = -\frac{\mu}{2(\lambda + \mu)} \frac{\xi q}{(R + \tilde{d})^2} \\ I_3 = \frac{\mu}{2(\lambda + \mu)} \left[ \frac{\eta}{R + \tilde{d}} + \frac{\tilde{y}q}{(R + \tilde{d})^2} - \ln(R + \eta) \right] \\ I_4 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{q}{R + \tilde{d}} \\ I_5 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{\xi \sin \delta}{R + \tilde{d}} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} p = y \cos \delta + d \sin \delta \\ q = y \sin \delta - d \cos \delta \\ \tilde{y} = \eta \cos \delta + q \sin \delta \\ \tilde{d} = \eta \sin \delta - q \cos \delta \\ R^2 = \xi^2 + \eta^2 + q^2 = \xi^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{d}^2 \\ X^2 = \xi^2 + q^2 \end{cases} \quad (21)$$

با اعمال اطلاعات همالرز<sup>۱۰</sup> گسل به مدل اکادا می توان جابه-جایی های همالرز و با اعمال اطلاعات بین لرزه ای به این مدل می-توان جابه جایی های بین لرزه ای را محاسبه نمود. در این تحقیق اطلاعات بین لرزه ای به مدل اعمال شده و تحلیل حساسیت روی جابه جایی های بین لرزه ای متناظر نسبت به کلیه پارامترهای ورودی انجام می شود.

Cut-HDMR را می‌توان در صورت امکان نمونه‌برداری مرتب از خروجی  $f(x)$  اعمال کرد. نخست بایستی نقطه مرجع  $\bar{x}$  انتخاب شود. برخی دستورالعمل‌ها در مورد نحوه تعیین نقطه مرجع توسط Ziehn (۲۰۰۸) ارائه شده است. توابع مؤلفه در امتداد خطوط، سطوح، زیرحجم‌ها و غیره با استفاده از یک شبکه تعریف شده برای هر یک از پارامترها محاسبه می‌شوند. مقادیر به‌صورت عددی در جداول جستجوی کم‌بعدی ذخیره می‌شوند. به‌منظور محاسبه پاسخ فرامدل به‌ازای یک نقطه دلخواه  $x$  بایستی یک درون‌یابی کم‌بعدی در داخل جداول انجام شود. تعداد موردنیاز اجزای مدل به‌شدت به تعداد پارامترهای ورودی بستگی دارد که یک اشکال قابل‌توجه برای این روش است، به‌ویژه اگر تحقیق در مورد اثرات مرتبه بالاتر یا مساوی دو مدنظر باشد که می‌تواند به اجرای تعداد زیاد مدل منجر شود. در مقابل RS-HDMR تنها به یک مجموعه نمونه تصادفی یا شبه تصادفی نیاز دارد. توابع مؤلفه را می‌توان با توابع پایه تحلیلی مانند چندجمله‌ای‌های متعامد یک‌تقریب زد. ضرایب بهینه (ضرایب بسط) برای این چندجمله‌ای‌ها از طریق انتگرال‌گیری مونت‌کارلو محاسبه می‌شود. دو روش کاهش واریانس، همبستگی و کنترل نسبت متغیر، به‌منظور کاهش خطای انتگرال‌گیری مونت‌کارلو معرفی شده است. محاسبه پاسخ فرامدل به‌ازای یک نقطه اختیاری  $x$ ، فقط نیاز به ذخیره ضرایب بسط و توابع تحلیلی دارد. تعداد نمونه‌های موردنیاز برای ساخت بسط RS-HDMR تا مرتبه دوم از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$N + nmN + \frac{n(n-1)m^2N}{2} \quad (30)$$

در این رابطه  $n$  تعداد پارامترهای ورودی،  $N$  حجم نمونه تصادفی و  $m$  تعداد مقادیر مجزای هر پارامتر ورودی است (Ziehn, ۲۰۰۸).

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- منطقه مورد مطالعه

زمین‌ساخت ایران عمده‌تاً نتیجه برخورد بین صفحه‌های زمین‌ساختی عربستان و اوراسیا با نرخ حدود ۲۰ میلی‌متر در سال است. این همگرایی بین کوتاه‌شدگی در کوه‌های زاگرس، تغییر شکل داخلی ایجادشده توسط گسل‌های عمده‌تاً امتداد لغز در مرکز و شمال غرب ایران و کوتاه‌شدگی در کوه‌های البرز توزیع شده است. (Vernant و همکاران، ۲۰۰۴). منطقه شمال غرب ایران به‌دلیل اندرکنش مابین صفحه عربستان، فلات آناتولی و صفحه اوراسیا و شامل گسل آناتولی شمالی، گسل آناتولی شرقی و کوه‌های قفقاز که محدوده‌کننده کوه‌های زاگرس هستند، بخشی از یک سیستم پیچیده زمین‌ساختی است (شکل (۲)). بخشی از حرکت رو به شمال صفحه عربستان توسط این سیستم پیچیده گسلی به فلات آناتولی منتقل می‌شود (Jackson, ۱۹۹۲) و مایل

$$D_i = \int_0^1 f_i^2(x_i) dx_i \quad (24)$$

$$D_{ij} = \int_0^1 \int_0^1 f_{ij}^2(x_i, x_j) dx_i dx_j \quad (25)$$

مربع‌سازی و انتگرال‌گیری از رابطه (۲۲) در کل دامنه  $K^n$  به رابطه زیر منجر می‌شود:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i + \sum_{1 \leq i < j < n} D_{ij} + \dots + D_{1,2,\dots,n} \quad (26)$$

شاخص‌های حساسیت به‌صورت زیر به‌صورت نسبت واریانس جزء به کل تعریف می‌شوند.

$$S_{i_1, \dots, i_s} = \frac{D_{i_1, \dots, i_s}}{D}, \quad 1 \leq i_1 < \dots < i_s \leq n \quad (27)$$

بنابراین جمع کلیه ترم‌های آن برابر یک است:

$$\sum_{i=1}^n S_i + \sum_{1 \leq i < j \leq n} S_{ij} + \dots + S_{1,2,\dots,n} = 1 \quad (28)$$

شاخص حساسیت مرتبه اول  $S_i$  اثر اصلی پارامتر ورودی  $x_i$  را در خروجی، یا به‌عبارت دیگر سهم  $x_i$  را در واریانس  $f(x)$  بیان می‌کند. شاخص حساسیت مرتبه دوم  $S_{ij}$  اثر متقابل  $x_i$  و  $x_j$  را بر روی خروجی نشان می‌دهند (Chan و همکاران، ۲۰۰۰). براساس شاخص‌های حساسیت محاسبه‌شده در رابطه (۲۷) می‌توان پارامترهای ورودی را با توجه به اهمیت آن‌ها رتبه‌بندی کرد. اگر اثرات پارامترهای ورودی با مرتبه بالاتر کم باشد، به‌نحوی که بتوان از آن صرف‌نظر کرد، بسط HDMR از نظر محاسباتی بسیار کارآمدتر خواهد بود. برای بسیاری از سیستم‌ها، بسط HDMR تا مرتبه دوم نتایج قابل‌قبول و تقریب خوبی از  $f(x)$  را فراهم می‌کند (Li و همکاران، ۲۰۰۱). بنابراین، تمرکز اصلی در این تحقیق بر بسط HDMR تا مرتبه دوم است.

$$f(x) \approx f_0 + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq n} f_{ij}(x_i, x_j) \quad (29)$$

دو بسط متداول و کارآمد HDMR برای محاسبه شاخص‌های حساسیت براساس واریانس ارائه شده است: Cut-HDMR، که به مقدار  $f(x)$  در یک نقطه مرجع خاص  $x$  بستگی دارد و RS-HDMR، که بستگی به مقدار متوسط  $f(x)$  در کل دامنه دارد. در روش اول توابع مؤلفه در محدوده متغیر خود از طریق نقطه مرجع محاسبه می‌شوند. این روش فقط برای مدل‌هایی با تعداد کمی از پارامترهای ورودی مناسب است. در روش دوم تعداد موردنیاز اجرای مدل به‌طور مستقیم به ابعاد فضای ورودی بستگی ندارد و تمامی واریانس‌های جزئی را می‌توان با استفاده از یک مجموعه از نمونه‌های تصادفی یا شبه تصادفی برآورد کرد.

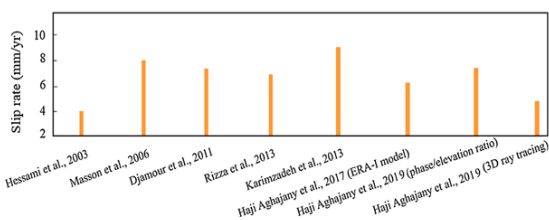
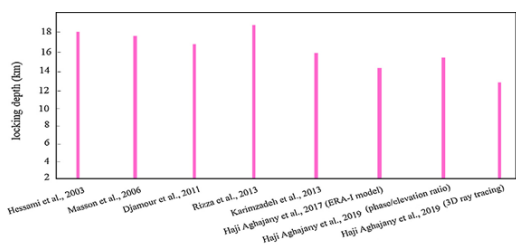
مقدار متوسط و محدوده تغییرات پارامترهای هندسی گسل مرجع از جمله عمق قفل‌شدگی و نرخ لغزش، با توجه به مطالعات و مراجع مختلف در نظر گرفته شد که در شکل (۳) نشان داده شده است. برای مدول یانگ و نسبت پواسن نیز حداقل و حداکثر مقادیر ممکن شناخته‌شده برای پوسته زمین لحاظ شد (Ukawa و Fukuo، ۱۹۸۱؛ Zhao و همکاران، ۲۰۰۴). جدول (۱) مقادیر متوسط و محدوده تغییرات در نظر گرفته‌شده برای انجام تحلیل را نشان می‌دهد.

#### جدول ۱- محدوده تغییرات در نظر گرفته‌شده برای انجام تحلیل

##### حساسیت جابه‌جایی‌های سطحی ناشی از فعالیت گسل شمال

##### تبریز نسبت به ورودی‌های مدل تحلیلی اکادا

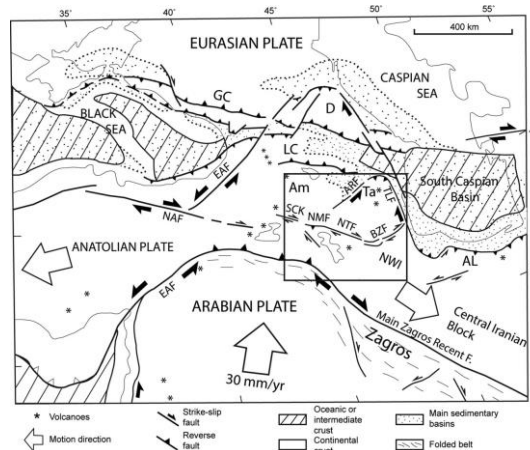
نام پارامتر	مقادیر متوسط	دامنه تغییرات
نسبت پواسن	۰/۲۵	۰/۲۳ ~ ۰/۲۸
مدول یانگ	$7 \times 10^{10}$ پاسکال	$14 \times 10^{10} \sim 1 \times 10^{11}$ پاسکال
عمق قفل‌شدگی	۱۵ کیلومتر	۵ ~ ۲۵ کیلومتر
آزیموت	۱۱۵ درجه	۱۰۵ ~ ۱۲۵ درجه
شیب	۹۰ درجه	۸۰ ~ ۹۰ درجه
طول	۱۲۵ کیلومتر	۱۰۰ ~ ۱۵۰ کیلومتر
عرض	۲۰ کیلومتر	۱۵ ~ ۳۵ کیلومتر
نرخ لغزش	۷ میلی‌متر در سال	۴ ~ ۱۰ میلی‌متر در سال



#### شکل ۳- مقادیر عمق قفل‌شدگی و نرخ لغزش برای گسل شمال تبریز حاصل از تحقیقات مختلف

در ادامه یک شبکه‌بندی در کل منطقه گسلی انجام شد. مطابق شکل (۴-الف) تعداد ۲۰۰۰۰۰ ایستگاه در یک شبکه چهارصد در پانصد کیلومتر، شبیه‌سازی شد به طوری که فاصله ایستگاه‌ها از هم ۱۰ کیلومتر است. سپس مدل‌سازی برای مقادیر مرجع گسل شمال تبریز انجام شد. مشخصات هندسی این گسل در شکل (۴-ب) و بردارهای جابه‌جایی سطحی در شکل (۴-ب)

بودن منطقه برخورد در کوه‌های زاگرس، منجر به افزایش حرکت بین کوتاه‌شدگی در قفقاز و حرکت امتداد لغز راست‌گرد در گسل شمال تبریز می‌شود (Jackson، ۱۹۹۲). گسل شمال تبریز گسلی با امتداد غربی شمال غربی- شرقی جنوب شرقی است که بیش از ۱۰۰ کیلومتر بین دریاچه ارومیه تا سیستم گسلی تالش امتداد دارد. این گسل خاتمه جنوب شرقی گسل گیلانو- سیه‌چشمه- خوی است (Karakhanian و همکاران، ۲۰۰۴)، که در آن مکان به گسل‌های امتداد لغز راست‌گرد ماکو و نخجوان می‌پیوندد و تا شرق ادامه می‌یابد. به سمت غرب نیز به گسل شرقی- غربی امتداد لغز راست‌گرد تسوج و گسل معکوس صوفیان با شیب به سمت شمال که مرزهای شمالی دریاچه ارومیه هستند، می‌پیوندد. به سمت شرق، با گسل شمال بزغوش و گسل معکوس جنوب بزغوش با شیب رو به شمال واقع در دو طرف رشته‌کوه بزغوش ادغام می‌شود.



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در چارچوب زمین‌ساختی فلات‌های ایران و آناتولی. ساختارهای اصلی زمین‌شناسی به صورت خلاصه به شرح زیر است: آناتولی، (AL) البرز، (CI) ایران مرکزی، (GC) قفقاز بزرگ، (LU) لوت، (NWI) شمال غربی ایران، (ZG) زاگرس (Su و همکاران، ۲۰۱۷)

#### ۲-۳- تهیه مدل مرجع برای گسل شمال تبریز

به منظور انجام آنالیز حساسیت و تجزیه و تحلیل خروجی‌ها نخست با توجه به این که مدل اکادا در محیط نیم‌فضا<sup>۱۳</sup> تهیه شده است، لذا محدوده مورد مطالعه نیز به داخل سیستم تصویر برده شد تا به نیم‌فضا تبدیل شود. جهت انتخاب سیستم تصویر مناسب با توجه به این که کل محدوده گسل شمال تبریز در داخل زون ۳۸ سیستم تصویر UTM قرار دارد، پس از این سیستم تصویر برای کل منطقه مورد مطالعه استفاده شد.

۱- تابع مؤلفه مرتبه صفر،  $f_0$ ، با میانگین گیری از خروجی‌ها (جابه‌جایی) به دست می‌آید.

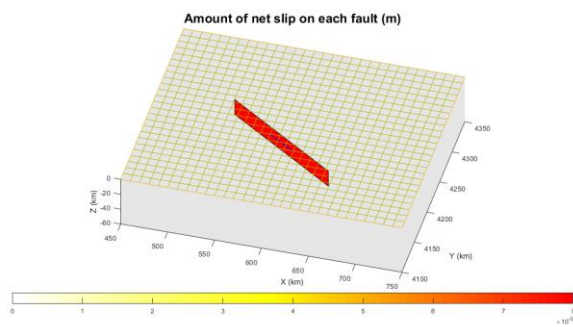
۲- برای محاسبه تابع مؤلفه مرتبه اول،  $f_1(x_i)$ ، یکی از پارامترهای را متغیر و بقیه پارامترهای گسل ثابت گرفته می‌شوند. برای پارامتری که متغیر گرفته می‌شود نمونه‌های تصادفی تولید می‌شود و به این صورت مؤلفه مرتبه اول به دست می‌آید. این کار برای کلیه پارامترها انجام می‌شود تا مؤلفه‌های مرتبه اول برای هر پارامتر به دست آید.

۳- برای محاسبه توابع مؤلفه مرتبه دوم  $f_{ij}(x_i, x_j)$ ، دو تا از پارامترها را متغیر و بقیه پارامترهای گسل ثابت گرفته می‌شوند. مجدداً برای پارامترهایی که متغیر گرفته می‌شوند نمونه‌های تصادفی برای هر کدام تولید می‌شوند و به این ترتیب توابع مؤلفه مرتبه دوم به دست می‌آید. این کار برای تمام پارامترهای گسلی انجام می‌شود تا توابع مؤلفه مرتبه دوم برای آن‌ها محاسبه شود.

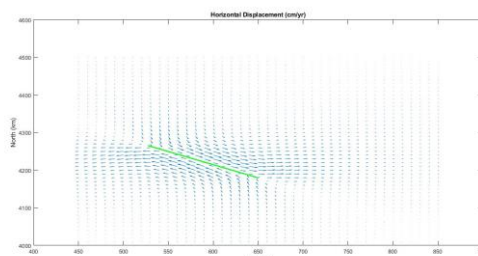
پس از به دست آوردن توابع مؤلفه بسط RS-HDMR واریانس‌های جزء و کل براساس روابط (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) محاسبه می‌شوند. سپس شاخص‌های حساسیت مرتبه اول، دوم و کل با استفاده از واریانس‌های جزء و کل با استفاده از رابطه (۲۷) به دست می‌آید. پارامترهایی که شاخص حساسیت مرتبه اول و کل آن‌ها بیشتر باشد به این معنی است که بیشترین تأثیر را بر روی خروجی مدل یعنی جابه‌جایی دارند. این کار برای ۲۰۰۰۰۰ ایستگاه شبکه‌بندی و بر روی تمام پارامترهای ورودی مدل اکادا انجام شده و شاخص‌های حساسیت مرتبه اول، دوم و کل برای کلیه پارامترها محاسبه شده و بین شاخص‌های حساسیت به دست آمده درون‌یابی انجام شده است تا مشخص شود که جابه‌جایی در هر ایستگاه به کدام پارامتر ورودی حساسیت بیشتری دارد. مناطقی که حساسیت جابه‌جایی به پارامتر ورودی در آنجا بیشتر باشد انجام مشاهدات ژئودتیکی مانند GPS یا InSAR در آن مناطق و استفاده از آن به عنوان قید برای حل مسئله معکوس جهت رسیدن به مقدار صحیح‌تر برای پارامتر مورد نظر پیشنهاد می‌شود. برای شاخص‌های حساسیت مرتبه دوم مقادیر بسیار جزئی به دست آمد و باعث شد که تفاوت شاخص‌های حساسیت مرتبه اول و شاخص حساسیت کل بسیار جزئی و قابل صرف نظر کردن باشد که نشان‌دهنده عدم اندرکنش پارامترهای گسل مرجع با یکدیگر است. نتایج تحلیل در شکل‌های (۵) تا (۱۲) برای شاخص حساسیت کل به صورت گرافیکی و با استفاده از منحنی-میزان نشان داده شده است. در کلیه شکل‌ها اثر سطحی گسل با رنگ سبز مشخص شده است.

مطابق شکل (۵) شاخص حساسیت کل مربوط به پارامتر نسبت پواسن در دو طرف ادامه امتداد گسل و در دو طرف امتداد عمود بر گسل مشاهده می‌شود. علی‌رغم تغییرات نسبت پواسن در مقادیر کمینه و بیشینه شناخته شده برای پوسته زمین، شاخص

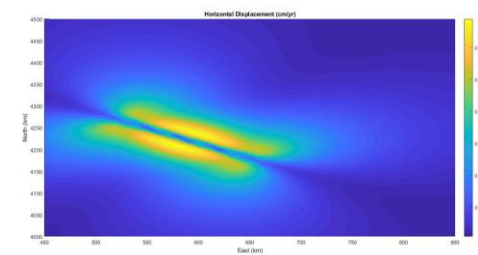
و دامنه جابه‌جایی‌ها در شکل (۴-ج) نشان داده شده است. سپس با فرض توزیع نرمال برای کلیه پارامترها نمونه برداری تصادفی به روش مونت کارلو با حجم ۱۰۲۳ برای تک تک پارامترها انجام شد. در ادامه مدل تحلیلی اکادا برای نمونه برداری‌ها اجرا شده و جابه‌جایی‌ها در کلیه نقاط شبکه محاسبه شدند.



(الف)



(ب)



(ج)

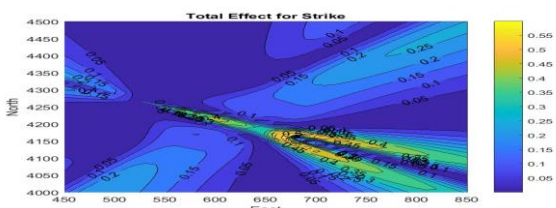
شکل ۴- مدل مرجع برای گسل شمال تبریز: (الف) شکل سه- بعدی مدل با نرخ لغزش، (ب) بردارهای جابه‌جایی مسطحاتی، (ج) دامنه جابه‌جایی‌های مسطحاتی

### ۳-۳ ساخت فرامدل HDMR و محاسبه شاخص‌های حساسیت

برای تحلیل حساسیت فرامدل نمایش بعد بالای مدل (HDMR) تا مرتبه دوم مورد استفاده قرار گرفت. از بین دو بسط متداول و کارآمد HDMR برای محاسبه شاخص‌های حساسیت براساس واریانس روش RS-HDMR مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای ورودی مدل به همراه جابه‌جایی‌های حاصل از مدل اکادا وارد بسط RS-HDMR شده و توابع مؤلفه آن به صورت زیر محاسبه می‌شوند:



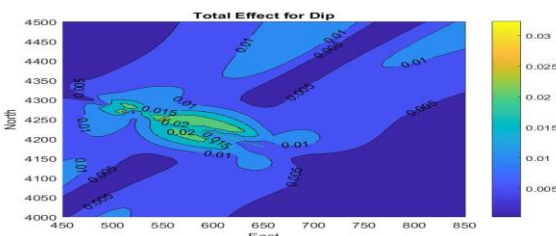
شمال تبریز با استفاده از مدل تحلیلی اکادا با انجام مشاهدات ژئودتیکی در اطراف این گسل پیشنهاد می‌شود.



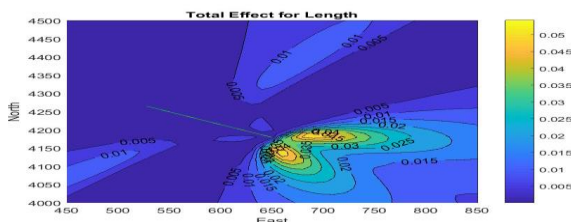
شکل ۸- شاخص حساسیت کل برای پارامتر آزیموت

برای انجام تحلیل حساسیت برای پارامتر آزیموت، گسل از سمت چپ ثابت گرفته شد و از سمت راست آزیموت گسل تغییر داده شد. مطابق شکل (۸) مقدار شاخص حساسیت کل قابل توجهی روی گسل و در امتداد سمت راست آن مشاهده می‌شود. با توجه به نتیجه حاصله وارد کردن صحیح آزیموت گسل در مدل‌سازی‌ها ضروری است چون خروجی مدل یعنی جابه‌جایی را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مطابق شکل (۹) شاخص حساسیت کل مربوط به پارامتر شیب با دامنه خیلی کم در اطراف گسل مشاهده می‌شود. به همین دلیل تعیین صحیح‌تر شیب گسل با استفاده از مدل تحلیلی اکادا توصیه نمی‌شود و در این مورد بهتر است از سایر روش‌های ژئوفیزیکی استفاده شود.



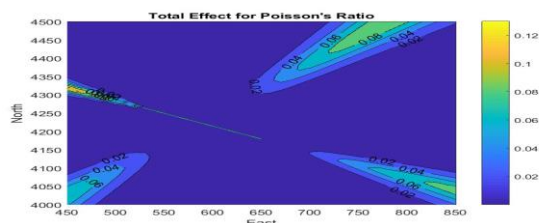
شکل ۹- شاخص حساسیت کل برای پارامتر شیب گسل



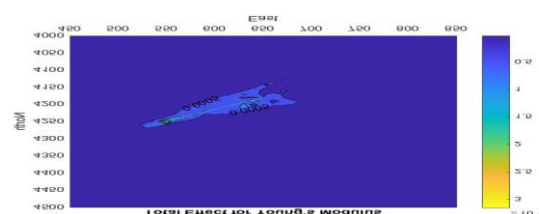
شکل ۱۰- شاخص حساسیت کل برای پارامتر طول گسل

جهت انجام تحلیل حساسیت برای پارامتر طول، گسل از سمت چپ ثابت گرفته شد و از سمت راست طول گسل تغییر داده شد. مطابق شکل (۱۰) شاخص حساسیت کل تا بالای حدود ۰/۰۵ در اطراف امتداد سمت راست گسل مشاهده می‌شود. با توجه به

حساسیت کل عدد کمی در مناطقی محدود می‌باشد. به همین دلیل تعیین نسبت پواسن با استفاده از مدل تحلیلی اکادا توصیه نشده و می‌توان برای آن در مدل‌سازی‌ها از مقدار متوسط جهانی استفاده کرد.

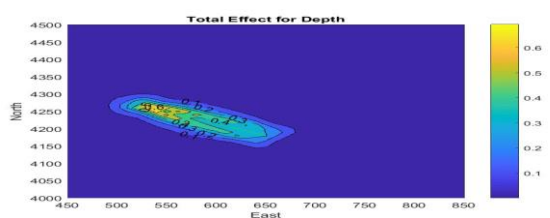


شکل ۵- شاخص حساسیت کل برای پارامتر نسبت پواسن، شاخص حساسیت کل عدد کمی در منطقه محدود می‌باشد



شکل ۶- شاخص حساسیت کل برای پارامتر مدول یانگ، شاخص حساسیت کل عدد کمی در منطقه محدود می‌باشد

مطابق شکل (۶) شاخص حساسیت کل مربوط به پارامتر مدول یانگ اطراف گسل مشاهده می‌شود و علی‌رغم تغییرات مدول یانگ با مقادیر کمینه و بیشینه شناخته‌شده در پوسته زمین شاخص حساسیت کل عدد خیلی کوچکی می‌باشد. به همین دلیل تعیین مدول یانگ نیز با استفاده از مدل تحلیلی اکادا توصیه نشده و استفاده از مقدار متوسط جهانی برای آن در مدل‌سازی‌ها کاملاً مجاز می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از شکل‌های (۵) و (۶) کلاً مطالعه رتولوژی زمین با استفاده از مدل اکادا توصیه نمی‌شود.



شکل ۷- شاخص حساسیت کل برای پارامتر عمق قفل‌شدگی که در اطراف گسل با مقدار بالای ۰/۶ مشاهده می‌شود

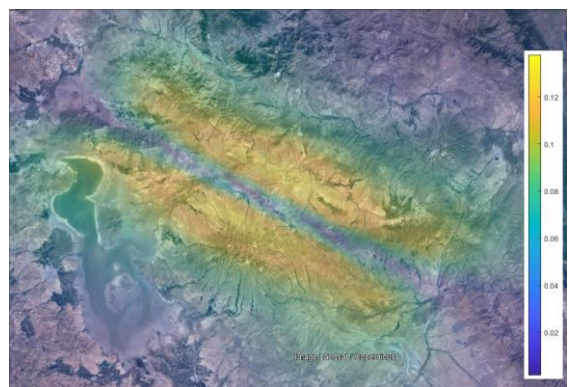
مطابق شکل (۷) شاخص حساسیت کل مربوط به پارامتر عمق قفل‌شدگی در اطراف گسل با مقدار قابل توجه بیش از ۰/۶ مشاهده می‌شود. به همین دلیل تعیین عمق قفل‌شدگی گسل

حساسیت به ویژه برای عمق قفل شدگی و نرخ لغزش روی عکس-های ماهواره‌ای در گوگل ارث (شکل‌های (۱۵) و (۱۶)) می‌توان با در نظر گرفتن عوامل مختلف از جمله دامنه جابه‌جایی‌ها و توپوگرافی منطقه مکان‌های مناسب جهت استقرار ایستگاه‌های دائمی GPS را برای انجام مشاهده جهت رفتارسنجی یا مطالعه مکانیک گسل انتخاب نمود.

حساسیت مدل به تغییر در پارامترهای هندسی گسلش و پارامترهای فیزیکی نیم‌فضای کشسان مطابق جدول (۲) از بالا به پایین کاهش می‌یابد. امکان تغییر در اولویت‌های حد وسط با توجه به مشخصات هندسی متوسط گسل و دامنه نوسان در نظر گرفته شده برای آن‌ها وجود دارد. در حالت کلی با توجه به محاسبات و تحلیل انجام شده ملاحظه می‌شود که بیشترین حساسیت و تغییرات جابه‌جایی ناشی از گسل مرجع، نسبت به پارامتر نابر جایی و کم‌ترین آن نسبت به ضرایب لامه (مدول یانگ و نسبت پواسن) می‌باشد. همچنین این مدل هیچ حساسیتی به ضرایب لامه نیم‌فضا در حالت جامد پواسن یعنی حالتی که مدول یانگ و نسبت پواسن مساوی باشند نشان نمی‌دهد.



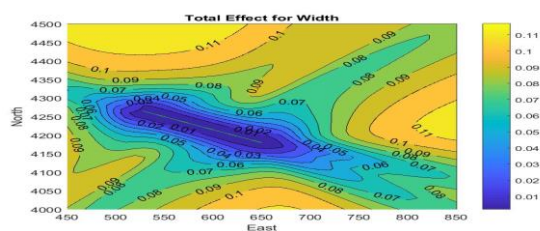
شکل ۱۳- جانمایی بردارهای جابه‌جایی‌های سطحی ناشی از فعالیت بین‌لرزه‌ای گسل شمال تبریز در عکس ماهواره‌ای که در اطراف گسل بیشینه است



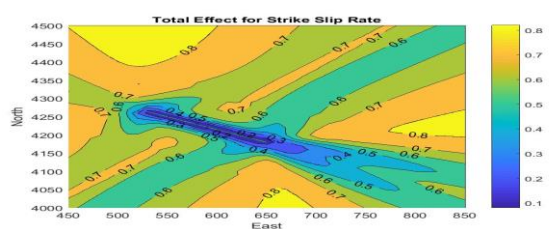
شکل ۱۴- جانمایی دامنه جابه‌جایی‌های سطحی ناشی از فعالیت گسل شمال تبریز در عکس ماهواره‌ای که در اطراف گسل بیشینه است

نتیجه حاصله وارد کردن هر چه صحیح‌تر طول گسل در مدل‌سازی‌ها توصیه می‌شود.

مطابق شکل (۱۱) شاخص حساسیت کل مربوط به پارامتر عرض در منطق دور از گسل با شاخص حساسیت کل کم‌تر از ۰/۲ مشاهده می‌شود. به همین دلیل اگر مجبور به مطالعه عرض گسل با استفاده از مشاهدات ژئودتیکی باشیم بهتر است از مشاهدات دور از منطقه اطراف گسل استفاده شود. با توجه به این که در روش‌های ژئوفیزیکی نیز تعیین عرض گسل با چالش‌هایی روبه‌روست لذا نتایج حاصله برای پارامتر عرض گسل قابل توجه است.



شکل ۱۱- شاخص حساسیت کل برای پارامتر عرض گسل



شکل ۱۲- شاخص حساسیت کل برای پارامتر نرخ لغزش امتداد لغز گسل، مقدار شاخص در مناطق دور از گسل به بیش از ۰/۸ می‌رسد

مطابق شکل (۱۲) شاخص حساسیت کل مربوط به پارامتر نرخ لغزش در مناطق دور از گسل با شاخص حساسیت کل بیشتر از ۰/۸ مشاهده می‌شود. به همین دلیل بهره‌گیری از مشاهدات ژئودتیکی در مناطق دور از گسل به منظور رفتارسنجی یا حل مسئله معکوس با استفاده از مدل تحلیلی اکادا جهت تعیین نرخ لغزش به شدت توصیه می‌شود. در مدل‌سازی بایستی حتماً به این نکته توجه شود که نتایج حاصل از مدل‌سازی یعنی جابه‌جایی‌ها بایستی در محدوده‌ای باشند که قابل اندازه‌گیری باشد. اگر نتایج حاصل از مدل‌سازی به قدری کوچک باشند که از دقت اندازه‌گیری‌ها کم‌تر شوند علی‌رغم افزایش شاخص حساسیت، تفسیر نتایج حاصل از مدل‌سازی قابل استفاده نخواهد بود. بنابراین جهت تعیین مناطق مناسب برای انجام مشاهدات ژئودتیکی علاوه بر شاخص حساسیت بایستی دامنه جابه‌جایی‌های سطحی مربوط به گسل مرجع را نیز مدنظر قرار داد.

با جانمایی عکس جابه‌جایی حاصل از مدل‌سازی گسل مرجع (شکل‌های (۱۳) و (۱۴)) و عکس درون‌یابی شده شاخص‌های

#### ۴- نتیجه گیری

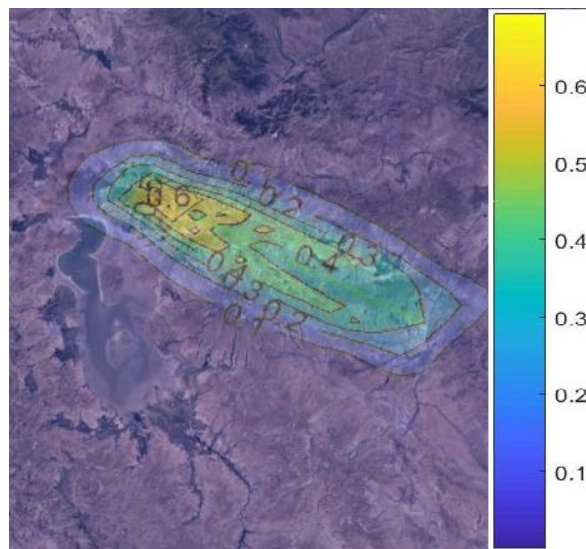
تحلیل حساسیت بخش مهمی از فرایند ارزیابی هر مدلی را تشکیل می‌دهد و بنابراین باید به‌منظور افزایش دقت، صحت و اعتبار مدل‌های رایانه‌ای در مدل‌سازی‌های ژئودینامیکی نیز مورد استفاده قرار گیرد. با بررسی روش‌های مرسوم برای تحلیل حساسیت سراسری، مانند آنالیز مونت کارلو، می‌توان دریافت که این روش‌ها تمام الزامات مورد نیاز را برآورده نمی‌کنند. زمان اجرای محاسباتی برای یک مدل می‌تواند زیاد باشد و بعد فضای ورودی برای پارامترهای نامشخص می‌تواند بسیار بالا باشد. علاوه بر این، رفتار مدل می‌تواند بسیار غیرخطی باشد و ممکن است اندرکنش پارامتری وجود داشته باشد. بنابراین، روش‌هایی لازم است که قادر به حل همه این مشکلات بوده و یک سنجه کمی را به‌منظور تولید یک رتبه‌بندی معتبر از پارامترهای مهم و اندرکنش‌های پارامتری ارائه دهند.

سنجه بسیار متداول برای تعیین اهمیت و اندرکنش پارامترها توسط شاخص‌های حساسیت مبتنی بر واریانس ارائه شده است. در این سنجه تعیین شاخص‌های حساسیت براساس تحلیل تجزیه واریانس استوار است، که در آن واریانس‌های جزئی، ناشی از خود پارامترهای نامعین یا اندرکنش پارامترها، با واریانس کل نرمال می‌شود.

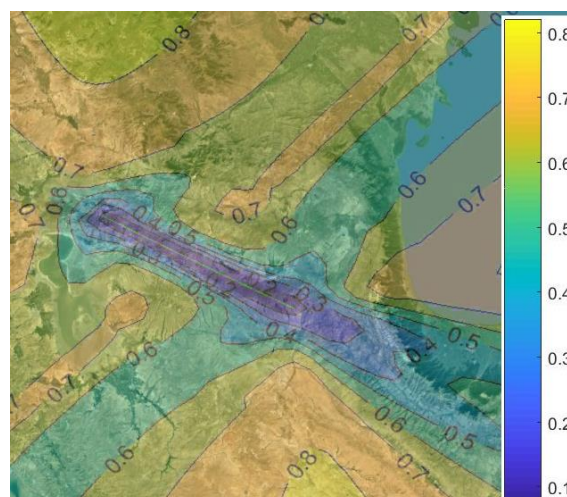
دو روش کارآمد در محاسبه شاخص‌های حساسیت مرتبه اول، دوم و کل براساس واریانس ارائه شده است: Cut-HDMR و RS-HDMR. در این تحقیق روش RS-HDMR به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای ارزیابی شاخص‌های حساسیت مبتنی بر واریانس استفاده شد. این روش می‌تواند برای مدل‌های غیرخطی و با ابعاد فضای ورودی بالا استفاده شود.

در بخش محاسبات روش RS-HDMR برای تحلیل حساسیت جابه‌جایی‌های سطحی حاصل از مدل اکادا نسبت به پارامترهای ورودی آن یعنی پارامترهای هندسی گسل شمال تبریز شامل طول، عرض، عمق قفل‌شدگی، شیب، نرخ لغزش و پارامترهای فیزیکی پوسته یعنی ضرایب لامه شامل مدول یانگ و نسبت پواسن مورد استفاده قرار گرفت. فرامدل HDMR به‌عنوان جایگزین مدل اصلی مورد استفاده قرار گرفته و شاخص‌های حساسیت مرتبه اول، دوم و کل محاسبه شد. در این تحقیق، بسط HDMR تنها تا مرتبه دوم برآورد گردید زیرا مطابق تحقیقات انجام شده برای بسیاری از مدل‌ها بسط HDMR تا مرتبه دوم نتایج رضایت‌بخش و تقریب خوبی از مدل اصلی (مدل اکادا در این تحقیق) را فراهم کرده است. لذا روش RS-HDMR برای ارزیابی شاخص‌های حساسیت مرتبه اول، دوم و کل به مدل تحلیلی اکادا اعمال شد.

فرامدل HDMR مرتبه اول نمی‌تواند به‌طور دقیق رفتار مدل مورد تحلیل را تقریب کرده و توزیع خروجی را بازتابی کند در صورتی که فرامدل HDMR مرتبه دوم شامل تعاملات مهم



شکل ۱۵- جانمایی مقادیر درون‌یابی شده شاخص‌های حساسیت کل مربوط به عمق قفل‌شدگی در عکس ماهواره‌ای



شکل ۱۶- جانمایی مقادیر درون‌یابی شده شاخص‌های حساسیت کل مربوط به نرخ لغزش در عکس ماهواره‌ای

جدول ۲- حساسیت مدل نیم‌فضای کشسان به تغییر در پارامترهای ورودی گسل شمال تبریز میزان حساسیت از بالا به

پایین کاهش می‌یابد	
ردیف	نام پارامتر
۱	نابرجایی
۲	عمق قفل‌شدگی
۳	آزیموت
۴	شیب
۵	طول
۶	عرض
۷	ضرایب لامه



مشاهده می‌شود. به همین دلیل تعیین صحیح‌تر شیب گسل با استفاده از مدل تحلیلی اکادا توصیه نمی‌شود و در این مورد استفاده از سایر روش‌های ژئوفیزیکی توصیه می‌شود. شاخص حساسیت کل مربوط به پارامتر عرض در مناطق دور از گسل با مقدار کم مشاهده می‌شود. به همین دلیل اگر مجبور به مطالعه عرض گسل با استفاده از مشاهدات ژئودتیکی باشیم بهتر است از مشاهدات ژئودتیکی دور از منطقه اطراف گسل استفاده کنیم.

در حالت کلی نتایج تحقیق نشان می‌دهد که برای مطالعه نرخ لغزش گسل شمال تبریز ایستگاه‌ها باید دور از گسل و برای تعیین عمق قفل‌شدگی ایستگاه‌ها باید نزدیک گسل احداث شوند. مطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها ایستگاه‌های GPS نباید در مناطق خیلی دور از اثر سطحی گسل واقع شوند زیرا ممکن است تحت تأثیر فعالیت‌های زمین‌ساختی غیر از گسل موردنظر قرار گیرند.

برای شاخص‌های حساسیت مرتبه دوم مقادیر بسیار جزئی و قابل صرف‌نظر کردن به دست آمد که نشان‌دهنده عدم اندرکنش پارامترهای گسل مورد مطالعه با یکدیگر است.

روند زیر برای تعیین صحیح‌تر پارامترهای هندسی گسل‌های فعال پیشنهاد می‌شود:

- ۱- تعیین پارامترهای هندسی متوسط گسل،
- ۲- تحلیل حساسیت،
- ۳- تعیین محل مناسب انجام مشاهدات ژئودتیکی،
- ۴- انجام مشاهدات و حل مسئله معکوس،
- ۵- جایگزینی پارامترهای حاصل با مقادیر متوسط در مرحله یک و شروع تکرار از مرحله دو.

با این چرخه تکرار پارامترهای گسل شامل عمق قفل‌شدگی و نرخ لغزش به تدریج صحیح و صحیح‌تر برآورد می‌شوند. در این تحقیق آنالیز حساسیت برای جابه‌جایی‌های مسطحاتی ناشی از مدل نیم‌فضای کشسان اکادا انجام شد. انجام این تحلیل برای جابه‌جایی‌های ناشی از مدل زمین کروی متقارن و نامتقارن و همچنین نیم‌فضای گرانی‌کشی کشسان نیز پیشنهاد می‌شود. از نتایج این آنالیزها می‌توان برای تعیین پارامترهای گسل حساس به مدل با استفاده از شبکه‌های ژئودینامیکی سراسری و محلی و شبکه چندمنظوره فیزیکال ژئودزی<sup>۱۴</sup> استفاده کرد.

##### ۵- مراجع

- Chan K, Tarantola S, Saltelli A, Sobol IM, "Variance-based methods. In: Saltelli A, Chan K, Scott EM (Eds.), Sensitivity Analysis", John Wiley & Sons, 2000.
- Djamour Y, Vernant P, Nankali H-R, Tavakoli F, "Nw Iran-Eastern Turkey Present-Day Kinematics: Results from the Iranian Permanent GPS Network",

پارامترها نیز می‌باشد. اثرات مرتبه سه و بالاتر نیاز به تعداد زیاد اجرای مدل دارند.

مطابق بررسی انجام‌شده در بخش محاسبات نمونه‌برداری با حجم ۱۰۲۳ برای ساخت یک فرامدل HDMR دقیق و ارزیابی شاخص‌های حساسیت مرتبه اول، دوم و کل کافی تشخیص داده شد. جهت انجام تحلیل‌ها در تمام مطالعات موردی در این تحقیق فرض شده است که پارامترهای ورودی دارای توزیع نرمال هستند. تعیین دامنه نوسان پارامترها در نتایج تحلیل حساسیت بسیار مهم است. لذا مطالعه مقالات انتشار یافته در مورد گسل یا گسل‌های منطقه مورد مطالعه از اهمیت خاصی جهت تعیین دامنه نوسان پارامترها برخوردار است.

موقعیت ایستگاه‌های ژئودتیکی برای تعیین پارامترهای گسلی مهم است. براساس نتایج تحلیل حساسیت صورت گرفته ملاحظه می‌شود که بیشترین حساسیت مدل مربوط به نرخ لغزش گسل و کم‌ترین آن مربوط به ضرایب لامه پوستره است. شاخص حساسیت کل مربوط به پارامتر نسبت پواسن در دو طرف ادامه امتداد گسل و در دو طرف امتداد عمود بر گسل مشاهده شد. علی‌رغم تغییرات نسبت پواسن در مقادیر کمینه و بیشینه شناخته‌شده پوستره زمین، شاخص حساسیت کل عدد کمی و در منطقه محدود می‌باشد. به همین دلیل تعیین نسبت پواسن با استفاده از مدل تحلیلی اکادا توصیه نمی‌شود. شاخص حساسیت کل مربوط به پارامتر مدول یانگ اطراف گسل مشاهده می‌شود. علی‌رغم تغییرات مدول یانگ با مقادیر کمینه و بیشینه شناخته‌شده، شاخص حساسیت کل عدد خیلی کوچکی می‌باشد. به همین دلیل باز تعیین مدول یانگ با استفاده از مدل تحلیلی اکادا توصیه نمی‌شود. نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهند که در مدل‌سازی‌ها می‌توان برای دو پارامتر نسبت پواسن و مدول یانگ از مقدار متوسط جهانی استفاده کرد بدون این‌که خروجی جابه‌جایی‌ها را خیلی تحت تأثیر قرار دهد. با توجه به نتایج حاصله کلاً مطالعه رئولوژی زمین با استفاده از مدل تحلیلی اکادا توصیه نمی‌شود.

شاخص حساسیت کل مربوط به پارامتر عمق قفل‌شدگی در اطراف گسل با مقدار قابل توجه مشاهده می‌شود. به همین دلیل تعیین عمق قفل‌شدگی گسل با استفاده از مدل تحلیلی اکادا با انجام مشاهدات ژئودتیکی در اطراف گسل پیشنهاد می‌شود. با توجه به نتایج حاصله از آنالیز حساسیت برای پارامترهای طول و آزیموت و مشاهده حساسیت مدل به این دو پارامتر وارد کردن هرچه صحیح‌تر طول و آزیموت گسل که از سایر روش‌های ژئوفیزیکی استخراج شده‌اند در مدل‌سازی‌ها ضروری است. شاخص حساسیت کل مربوط به پارامتر شیب با دامنه کم در اطراف گسل

- Li G, Wang S-H, Rabitz H, "High Dimensional Model Representations (HDMR): Concepts and Applications", IMA Workshop: Atmospheric Modeling, 2000.
- Li G, Wang S-W, Rosenthal C, Rabitz H, "High Dimensional Model Representations generated from low dimensional data samples. I. mp-cut-HDMR", *Journal of Mathematical Chemistry*, 2001, 30 (1), 1-30.
- Masson F, Djamour Y, Van-Gorp S, Chéry J, Tatar M, Tavakoli F, Nankali H, Vernant P, "Extension in Nw Iran Driven by the Motion of the South Caspian Basin", *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 252 (1-2), 180-188.
- Okada Y, "Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75 (4), 1135-1154.
- Petropoulos GP, Srivastava PK, "Sensitivity Analysis in Earth Observation Modelling", Elsevier, 2016.
- Rabitz H, Aliş OF, Shorter J, Shim K, "Efficient input-output model representations", *Computer Physics Communications*, 1999, 117, 11-20.
- Rabitz H, Aliş OF, "Managing the Tyranny of Parameters in Mathematical Modelling of Physical Systems", in Saltelli A, Chan K, Scott E, eds, "Sensitivity Analysis", John Wiley & Sons, chapter 9, 2000, 199-224.
- Rizza M, Vernant J, Ritz F, Peyret M, Nankali H, Nazari H, Djamour Y, Salamati R, Tavakoli F, Chery J, Mahan S, Masson F, "Morphotectonic and geodetic evidence for a constant slip-rate over the last 45 kyr along the Tabriz fault (Iran)", *Geophysical Journal International*, 2013, 199 (1), 25-37.
- Sarsito DA, Kriswati E, Meilano I, Andreas H, Pradipta D, "Volcano deformation monitoring using geodetic method: optimal network design", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 389, Geomatics International Conference, Surabaya, Indonesia, 21-22 August, 2019.
- Schmitt G, "Review of Network Design: Criteria, Risk Functions, Design Ordering", in "Optimization and Design of Geodetic Network", edited by Grafarend E, and Sanco F, Springer, Berlin etc., 1985, 6-10.
- Segall P, "Earthquake and Volcano Deformation", Princeton University Press, 2010.
- Steketee JA, "On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium", *Canadian Journal of Physics*, 1958, 36, 192-205.
- Saltelli A, Ratto M, Andres T, Campolongo F, Cariboni J, Gatelli D, Saisana M, Tarantola S, "Global Sensitivity Analysis: The Primer", Wiley-Interscience, 2008.
- Su Z, Wang EC, Hu JC, Talebian M, Karimzadeh S, "Quantifying the Termination Mechanism Along the North Tabriz-North Mishu Fault Zone of Northwestern Iran via Small Baseline PS-InSAR and GPS Decomposition", *IEEE Journal of selected topics in applied Earth observations and remote sensing*, 2017, 10 (1), 130-144.
- Taşkın G, Üsküplü, S, Saygın H, Ergintav, S, "Optimization of GPS observation strategy for improvement of tectonic measurements", The IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, Spain, 2003, 3-5 September.
- Ukawa M, Fukao Y, "Poisson's ratios of the upper and lower crust and the sub-moho mantle beneath Earth and Planetary Science Letters, 2011, 307 (1-2), 27-34.
- Gerasimenko MD, "About problems of optimal design of geodetic networks, in State and Outlook of Engineering Geodetic and photogrammetric Works", TsNIIGAiK, Moscow, 1990, 11-15.
- Gerasimenko MD, "First order design of geodetic networks", *Geodesy and Cartography*, 5, 4-7, 1991.
- Gerasimenko MD, "Optimal Design and Adjustment of Geodetic Networks", Nauka, Moscow, 1992.
- Gerasimenko MD, Shestakov NV, Kato T, "On Optimal Geodetic Network Design for Fault-Mechanics Studies", *Earth Planets Space*, 2000, 52, 985-987.
- Gerasimenko, MD, "First order design of the deformation networks with the minimal number of geodetic points and their optimal allocation", *Far Eastern Mathematical Reports*, 1997, 4, 86-94.
- Gomberg JS, Ellis MA, "Topography and tectonics of the central New Madrid Seismic zone: results of numerical experiments using a three-dimensional boundary-element program", *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99, 20299-20310.
- Haji-Aghajany SH, Voosoghi B, Yazdian A, "Estimation of north Tabriz fault parameters using neural networks and 3D tropospherically corrected surface displacement field", *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2017, 918-932.
- Haji-Aghajany SH, Voosoghi B, Yazdian, A, "Estimating the slip rate on the north Tabriz fault (Iran) from InSAR measurements with tropospheric correction using 3D ray tracing technique", *Advances in Space Research*, 2019, 64, 2199-2208.
- Halıcıoğlu K, Özener H, "Geodetic Network Design and Optimization on the Active Tuzla Fault (Izmir, Turkey) for Disaster Management", *Sensors*, 2008, 8, 4742-4757; DOI: 10.3390/s8084742.
- Hessami K, Pantosti D, Tabassi H, Shabaniyan E, Abbassi M-R, Feghhi K, Solaymani S, "Paleoearthquakes and Slip Rates of the North Tabriz Fault, Nw Iran: Preliminary Results", *Annals of Geophysics*, 2003, 46 (5), 903-915.
- Jackson J, "Partitioning of Strike-Slip and Convergent Motion between Eurasia and Arabia in Eastern Turkey and the Caucasus", *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97 (B9), 12471-12479.
- Johnson HO, Wyatt FK, "Geodetic network design for fault-mechanics studies", *Manuscripta Geodaetica*, 1994, 19, 309-323.
- Karakhanian A, Trifonov G, Philip H, Avagyan A, Hessami K, Jamali F, Bayraktutan M, Bagdassarian H, Arakelian S, Davtian V, Adilkhanyan A, "Active faulting and natural hazards in Armenia, eastern Turkey and Northern Iran", *Tectonophysics*, 2004, 380, 189-219.
- Karimzadeh S, Cakir Z, Osmanoglu B, Schmalzle G, Miyajima M, Amiraslanzadeh R, Djamour Y, "Interseismic strain accumulation across the North Tabriz Fault (NW Iran) deduced from InSAR time series", *Journal of Geodynamics*, 2013, 66, 53-58.
- Kuang SL, "Optimization and Design of Deformation Monitoring Scheme", PhD Thesis, Department of Surveying Engineering, Technical Report No. 157, University of New Brunswick, Fredericton, Canada, 1991.

- central honshu, Japan", *Tectonophysics*, 1981, 77, 233-256.
- Vernant P, Nilforoushan F, Hatzfeld D, Abbassi MR, Vigny C, Masson F, Nankali H, Martinod J, Ashtiani A, Bayer R, Tavakoli F, Chéry J, "Present-Day Crustal Deformation and Plate Kinematics in the Middle East Constrained by Gps Measurements in Iran and Northern Oman", *Geophysical Journal International*, 2004, 157 (1), 381-398.
- Wyatt, F, "Displacements of surface monuments: vertical motion", *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94, 1655-1664.
- Zhao S, Müller RD, Takahashi Y, Kaneda Y, "3-D finite-element modelling of deformation and stress associated with faulting: effect of inhomogeneous crustal structures", *Geophysical Journal International*, 2004, 157, 629-644.
- Ziehn T, "Development and Application of Global Sensitivity Analysis Methods in Environmental and Safety Engineering", PhD Thesis, the University of Leeds, School of Process, Environmental and Materials Engineering, UK, 2008.

## EXTENDED ABSTRACT

# Determination of Appropriate Geodetic Observational regions to Monitor the Mechanical behavior of NTF by Sensitivity Analysis of Okada Model Using HDMR Method

Asghar Rastbood\*, Babak Shahanden, Mehdi Mohammad-Zadeh

Civil Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 06 December 2021; Accepted: 17 January 2022

### Keywords:

Sensitivity Analysis, Mechanical Optimization, Geodynamic Network, North Tabriz Fault.

## 1. Introduction

The faulting phenomenon involves different variables. Some of these variables are determined more accurately than others using non-modeling approaches. The main subject of this paper is to investigate the influence of both individual geometrical and physical input parameters involved in the Earth surface displacement models. For different physical and geometrical parameters, it is recommended to use sensitivity analysis on parameters that are determined from a field study with less accuracy. Both slip rate and locking depth of the fault are major parameters, in this aspect.

In this paper, the role of all faulting parameters on surface displacement data has been investigated. To do this analysis, the elastic half-space model of Okada (1985) was used. As a case study, the surface displacements model was applied to the North Tabriz Fault. The medium is composed of an elastic half-space. Sensitivity analysis was conducted on all geometrical and physical parameters. Finally, the regions of the most appropriate surface displacements were determined to obtain the most accurate values for the studied parameters. According to the obtained results, the model parameters, i.e., locking depth and slip rate, could be determined more effectively in the regions near and away from the fault trace, respectively.

## 2. Methodology

### 2.1. Okada model

The 3D dislocation that occurs at point  $i$  is stated by (Okada, 1985) as follows, for the Green function  $u_j^i(x_1, x_2, x_3)$  from a rectangular field  $\Sigma$  half-space isotropic, the deformation due to dislocation is  $\Delta u_j(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  centered on a point  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  with  $j$  direction.

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[ \lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left( \frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k d\Sigma \quad (1)$$

where  $\lambda$  and  $\mu$  are Lamé constants,  $\delta_{jk}$  is delta Kronecker and  $v_k$  is normal cosines w.r.t  $d\Sigma$ .

### 2.2. High Dimensional Model Representation (HDMR)

Sensitivity analysis in general tries to reveal the relationship between the model inputs and the model outputs. The high dimensional model representation (HDMR) method introduced by Rabitz et al. (1999) can dramatically reduce the computational effort needed for the mapping and was mainly developed to express the input-output relationship of a complex model with a large number of input parameters.

\* Corresponding Author

E-mail addresses: arastbood@tabrizu.ac.ir (Asghar Rastbood), babak.shahandeh95@ms.tabrizu.ac.ir (Babak Shahandeh), m.mohammadzadeh96@ms.tabrizu.ac.ir (Mehdi Mohammad-Zadeh).

HDMR is an expansion with a hierarchical form in terms of the input parameters (Rabitz et al. 1999, Rabitz & Aliş 1999, Li et al. 2000). The mapping between the input parameters  $x_1 \dots x_n$  and the output  $f(x) = f(x_1 \dots x_n)$  in the domain  $K^n$  can be written in the following form:

$$f(x) \approx f_0 + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq n} f_{ij}(x_i, x_j) + \dots + f_{12 \dots n}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

Here  $f_0$  denotes the mean effect (zeroth-order), which is a constant. The function  $f_i(x_i)$  is a first-order term giving the effect of parameter  $x_i$  acting independently (although generally non-linearly) upon the output  $f(x)$ . The function  $f_{ij}(x_i, x_j)$  is a second-order term describing the cooperative effects of the parameters  $x_i$  and  $x_j$  upon the output  $f(x)$ . The higher-order terms reflect the cooperative effects of increasing numbers of input parameters acting together to influence the output  $f(x)$ . If there is no interaction between the input parameters, then only the zeroth-order term  $f_0$  and the first-order terms  $f_i(x_i)$  will appear in the HDMR expansion.

The HDMR expansion is computationally very efficient if higher-order input parameter effects are weak and can therefore be neglected. For many systems a HDMR expression up to second-order already provides satisfactory results and a good approximation of  $f(x)$  (Li et al. 2001b). Therefore, the main focus in this work will be on an up to second-order HDMR expansion.

$$f(x) \approx f_0 + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq n} f_{ij}(x_i, x_j) \quad (3)$$

There are two commonly used HDMR expansions: cut-HDMR, which depends on the value of  $f(x)$  at a specific reference point  $x$  as described in the next section, and RS-HDMR, which depends on the average value of  $f(x)$  over the whole domain.

### 3. Results and discussion

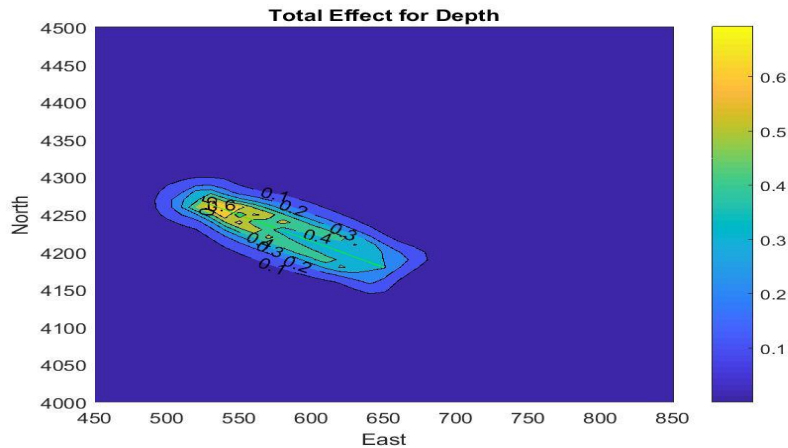
Since the Okada model is for half-space media, so the NTF region becomes a half-space using a map projection. Because the whole area of the North Tabriz Fault is located within zone 38 of the UTM map projection, so the same map projection was used for the entire of the study area. Then a network included 200,000 nodes with 10 KMs distance between them was applied to the whole model with 400 \* 500 square kilometers area. Then modeling was done for the reference values of the North Tabriz Fault. To determine the range of geometric parameters of the reference fault, including locking depth and slip rate, the error range was considered according to various studies (Haji-Aghajany, et al. 2019). For the Young modulus and the Poisson's ratio, the minimum and maximum possible values known for the Earth's crust were considered. Then, assuming a Normal distribution for all parameters, random sampling was performed by the Monte Carlo method with a sample size of 1023 for each parameter. Okada model was performed for all samples and displacements were calculated in all nodes of the network. To do the sensitivity analysis, the HDMR meta-model was used up to second order. Between the two common and efficient HDMR expansions, the RS-HDMR method was used to calculate the sensitivity indices based on variance. Input parameters of the model, together with the displacements, are entered into the RS-HDMR expansion, and its component functions were calculated. After obtaining the RS-HDMR expansion component functions, the partial and total variances were calculated. Then the first, second and total order sensitivity indices were obtained using partial and total variances. Parameters with a higher value of first-order and total sensitivity indices have the greatest effect on the output (i.e. displacement). This was done for 200,000 grid nodes on all input parameters of the Okada model and the first, second and total sensitivity indices were calculated for all parameters. Interpolation was performed between the obtained sensitivity indices to determine which input parameter is more sensitive to displacements in each node. It is recommended that to perform geodetic observations (GPS or InSAR) in regions where the displacements are more sensitive to the input parameter and use it as a constraint to solve the inverse problem to achieve a more accurate value for the considered parameter. Very small values were obtained for the second-order sensitivity indices. This caused the difference between the first-order and total sensitivity indices to be very small and negligible. It is evidence for no interaction among the reference fault parameters. The results of the analysis for fault locking depth and slip rate are shown in Fig. 1 and 2 for the total sensitivity index using contours. The trace of the fault is marked in green.

According to Fig. 1, the total sensitivity index related to the fault locking depth around the fault is observed with high values. Therefore, it is suggested to determine the locking depth of the North Tabriz Fault using the Okada analytical model by geodetic observations around it.

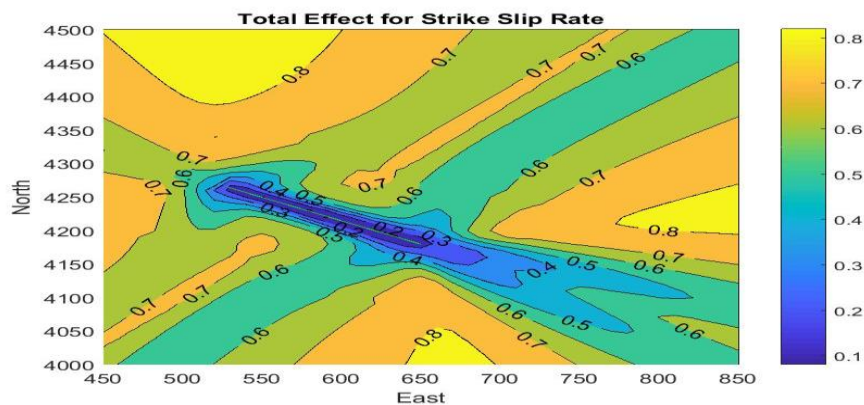
According to Fig. 2, the total sensitivity index related to the slip rate parameter is observed in areas far from the fault with values greater than 0.8. So, the use of geodetic observations in regions far from the fault to monitor or solve the inverse problem using the Okada analytical model is strongly recommended to determine the fault slip rate.



In modeling, it must be noted that the results of modeling, i.e. displacements, must be in a range that could be measured. If the results of the modeling be so small and less than the precision of the measurements, the interpretation of the results will not be usable despite of the increase in the sensitivity index. So, in order to determine the appropriate regions for geodetic observations, in addition to the sensitivity index, the amplitude of surface displacements related to the reference fault should be considered.



**Fig. 1.** Total sensitivity index for the locking depth parameter that is observed with significant values around the North Tabriz Fault



**Fig. 2.** Total sensitivity index for the fault slip rate parameter, the value of the index in areas away from the fault reaches more than 0.8

#### 4. Conclusions

In this paper, we developed a more practical new method for the optimal design of geodetic monitoring schemes. This method can be used to estimate the fault-model parameters, such as slip rate and locking depth, with high accuracy. The simulation was done to model the real-world state. The stations should not be located in the distances far away from the studied fault trace; otherwise, they may be affected by other tectonic activities rather than the fault of interest. The position of the geodetic stations is important to estimate fault model parameters. The model parameters locking depth and slip rate can be determined more effectively at the locations near and away from the fault trace, respectively. Limiting factors such as topography, installation cost, support of stations and etc., could be considered at this stage. In this study, sensitivity analysis for surface displacements resulted from the Okada elastic half-space model was done. This analysis is recommended for surface displacements caused by symmetric and asymmetric spherical as well as for the viscoelastic half-space Earth model.

#### 5. References

- Haji-Aghajany S, Voosoghi B, Yazdian, A, "Estimating the slip rate on the north Tabriz fault (Iran) from InSAR measurements with tropospheric correction using 3D ray tracing technique", *Advances in Space Research*, 2019, 64, 2199-2208.
- Li G, Wang S-H, Rabitz H, "High Dimensional Model Representations (HDMR): Concepts and Applications", IMA Workshop: Atmospheric Modeling, 2000.
- Okada Y, "Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75 (4), 1135-1154.