

مدل‌سازی میدان جابه‌جایی هم‌لرزه یک گسل و تعیین حساسیت پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل به میدان جابه‌جایی آن

سینا نوری^۱، بهزاد وثوقی^{۲*} و امیر مسعود ابوالقاسم^۳

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

(دریافت: ۸۶/۵/۱، پذیرش نهایی: ۸۷/۷/۲)

چکیده

شناخت حرکات گسل و نتایج حاصل از این حرکات نظیر تغییر شکل سطحی، در کشور ما که دارای گسل‌های فعال و مناطق زلزله‌خیزی است ضرورت و اهمیت فراوانی دارد. این تحقیق روی مدل‌سازی سه‌بعدی تغییر شکل‌های هم‌لرزه ایجاد شده در اثر حرکت گسل در یک نیم‌فضای کشسان هم‌وزن است. این مدل‌سازی اغلب براساس نظریهٔ جداشتگی صورت می‌پذیرد و بیشتر مدل‌های تحلیلی تغییر شکل گسل نیز بر پایه همین نظریه که محقق ژاپنی اکادا در طول دهه هشتاد آن را بسط داد و در ۱۹۹۲ ارائه کرد، پایه‌ریزی شده‌اند. بر پایه این مدل، جابه‌جایی حاصل از وقوع حرکت در یک گسل امتدادلغز و یا شیب‌لغز (زلزله) را می‌توانیم با استفاده از داده‌های در دسترس مربوط به مشخصات گسل مورد نظر به‌دست آوریم و نتایج حاصل را تحت عنوان تغییر شکل حاصل از زلزله ارائه کنیم.

این مدل قابلیت به‌دست آوردن تغییر شکل و جابه‌جایی در هر عمقی نسبت به سطح آزاد (سطح زمین) را دارد که در اینجا هدف اصلی به‌دست آوردن این مقادیر برای سطح زمین است. یکی از نتایج حاصل از این مدل‌سازی را می‌توان تعیین میزان حساسیت مدل و تغییر شکل‌های مسطحاتی به پارامترهای متفاوت یک گسل بیان و این ویژگی‌ها را براساس میزان تأثیر آنها در خروجی مدل دسته‌بندی کرد. براساس نتایج حاصل از این آنالیز مشاهده می‌شود که بیشترین میزان حساسیت به تغییر در کمیت جداشتگی و کمترین آنها در ضرایب لامه هستند که جابه‌جایی به تغییرات اعمال شده در این ضرایب کمترین میزان حساسیت را نشان می‌دهد. با تعیین میزان حساسیت و مقدار تغییری که در جابه‌جایی در اثر تغییر در آن پارامتر ایجاد می‌شود می‌توان به تعیین پارامترهای یک گسل نا شناخته در منطقه‌ای که عامل ایجاد زلزله شده است پرداخت. این مدل قابلیت به‌کارگیری برای هر نوع گسل و با هر خصوصیات هندسی و در هر منطقه‌ای را دارد و میزان جابه‌جایی‌های هم‌لرزه‌ای برای نقاط واقع در حوزه حرکت گسل یا یک زلزله می‌توان بر پایه آن به‌دست آورد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی گسل، تئوری جداشتگی، تغییر شکل هم‌لرزه، مدل نیم‌فضای کشسان، آنالیز حساسیت

Modeling the co-seismic deformation field of a fault and determining the sensitivity of the geometrical and physical parameters of the model to this deformation field

Noori, S¹., Voosoghi, B². and Abolghasem, A. M³.

¹Graduate Student, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

²Assistant Professor, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

³Assistant Professor, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 23 Jul 2007, Accepted: 23 Sep 2008)

Abstract

The study of faulting and its resultant earth surface deformations is an essential research field in Iran. The major part of this large country is located in very active seismic zones. Any study in this field can enable us to mitigate the risk of earthquake hazards.

3D modeling of displacement and surface deformation caused by earthquake faulting based on a homogeneous, isotropic, elastic half space model is the main aim of this paper. The paper focuses on the modeling of a 3D co-seismic deformation field caused by stress accumulation and its release along seismogenic faults based on a homogeneous elastic half-space model. The most commonly used analytic models of fault deformations have been based on the dislocation solutions of Okada (1985, 1992). This dislocation model is used to investigate surface deformations which are generated by strike-slip and dip-slip faulting. A method of sensitivity analysis is applied to determine sensitivity of the model and its resultant displacement field with respect to the change of parameters of the model.

During the last decades, powerful new models have been developed and deployed with encouraging results for improving knowledge of fault system behavior and its consequent earthquake hazards. Fault displacement models based on elastic dislocation theory have been used to calculate displacements and strains due to co-seismic slip events. In the elastic dislocation theory, faults are considered as displacement discontinuities or dislocations in an otherwise continuous elastic medium. In this approach, faults are represented as surfaces across which there is a discontinuity in the elastic displacement field.

The elastic dislocation theory is conceptually valid for modeling co-seismic deformations. The elastic dislocation formulation of Okada is used in our models, which expresses the displacement field $U(x, y, z)$ at any given point as a function of fault parameters (slip, dip, strike, length, and width) and the elastic constants within the continuum, for rectangular fault panels with horizontal upper and lower edges. The Okada formulation is mathematically robust and tractable, and these attributes make it suitable for rapid, iterative, forward numerical modeling.

In the first section of the paper, the relationship between surface deformation and dislocation theory will be summarized using representation formula. The dislocation theory can be described as that part of the theory of elasticity dealing with surfaces across which the displacement field is discontinuous, the suggestion seems reasonable. As commonly done in mathematical physics, it is necessary for simplicity to make some assumptions. Here the curvature of the earth, its gravity, temperature, magnetism and non-homogeneity are neglected and a semi-infinite medium which is homogeneous and isotropic is considered. For this modeling, the fault parameters that must be considered, are dislocation amount, length, width, depth and dip angle for fault plane.

This model can calculate displacements at every depth and the free surface specially. Here, the first displacement field is calculated for a simulated fault and sensitivity analysis is carried out for model parameters. The dislocation model provides us with surface deformation fields generated by strike-slip and dip-slip faulting and the vector maps of horizontal and vertical displacement fields can be represented.

In the next step, the sensitivity analysis is done to determine the sensitivity of the model and its deformation behavior with respect to any fault parameters. Then the results of the analysis for both cases of strike and dip-slip faults are compared. The analysis shows that the model has maximum sensitivity to dislocation parameter and minimum sensitivity to lame coefficients.

The numerical results of the analysis show that when the amount of dislocation increases the range and area of the surface deformation are greater. The horizontal displacements are more sensitive to the change of the dislocation amount in comparison with the vertical displacements. The results of the analysis result are summarized in the following table.

Result of sensitivity analysis

No.	Parameters
1	Dislocation (U)
2	Depth of fault (c)
3	Dip Angle (δ)
4	Width of fault (w)
5	Length of fault (L)
6	Lame coefficient (λ, μ)

↓ Decrease of sensitivity

The model can be applied for simulating co-seismic deformation fields of faulting to prepare a hazard map for the investigated fault in case of any consequent earthquake due to fault motions and for use in any further planning. This knowledge will translate into tangible societal benefits by providing the basis for more effective hazard assessments and mitigation efforts.

Key words: Fault modeling, Dislocation theory, Co-seismic deformation, Half space model, Sensivity analysis

۱ مقدمه

زلزله برای یک گسل در یک نیم‌فضا را نخستین بار کاواساکی و همکاران (۱۹۷۳ و ۱۹۷۵) استخراج کردند. سپس در ۱۹۸۰ نظریه کرنش‌های لرزه‌ای (seismic strains) و کاربردهای آنها را اکادا (۱۹۸۰) ارائه کرد و روابط کامل محاسبه تغییر شکل سطحی گسل در یک نیم‌فضا با استفاده از نظریه جدایش‌گی را اکادا

هدف اصلی این تحقیق مدلسازی میزان جابه‌جایی‌ها و تغییر شکل‌های حاصل از وقوع حرکت در گسل‌های امتدادلغز و شیب‌لغز است. با این مدلسازی می‌توان با فرض وقوع یک زلزله یا حرکت در یک گسل به محاسبه و برآورد جابه‌جایی‌های صورت گرفته پرداخت. روابط مربوط به جابه‌جایی‌های سطحی حاصل از

مدلی کشسانی است و در آن پارامتر زمان نقشی بر عهده ندارد و به محاسبه میزان جابه‌جایی‌ها در امتداد سه محور x, y, z برای یک منطقه (گسل) که در آن حرکت رخ داده باشد، می‌پردازد. یکی از بارزترین مشخصات این مدل توانایی محاسبه جابه‌جایی در هر عمقی است و می‌توان با این روابط به محاسبه جابه‌جایی‌ها در سطح آزاد (سطحی) که ما روی آن به جمع‌آوری مشاهدات می‌پردازیم) نیز پرداخت که این نکته بسیار حائز اهمیت است.

یکی دیگر از کاربردهای این مدل را می‌توان با آنالیز کردن حساسیت روی پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی به مثابه تعیین حساسیت مدل به پارامترها مطرح کرد که در این تحقیق این آنالیز را روی یک گسل شبیه‌سازی شده و همه پارامترهای مؤثر در مدل و جابه‌جایی انجام دادیم و میزان حساسیت را درجه‌بندی کرده و به این نتیجه رسیدیم که می‌توان با این روش به خصوصیات یک گسل که عامل وقوع تغییر شکل است، دست یافت.

۲ مدل حرکت گسل

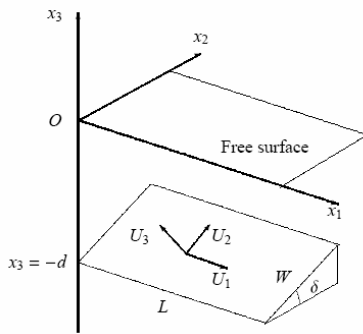
هدف عمده، بررسی و مدل‌سازی نواحی است که در یک زلزله دچار جابه‌جایی و از هم گسیختگی می‌شوند. این امر از راه‌های گوناگونی امکان‌پذیر است. یکی از این روش‌ها محاسبه این جابه‌جایی با نظریه جاداشدگی (dislocation theory) است. نظریه جاداشدگی قادر به توضیح آن قسمت از نظریه کشسانی که مرتبط با میدان‌های جابه‌جایی ناپیوسته است پردازد (دایاس و دوتیخ، ۲۰۰۶ و ورمان، ۱۹۶۵).

برای این مدل‌سازی نیازمند در نظر گرفتن چند فرض در روابط هستیم. در اینجا از انحنای زمین، گرانی آن، دما، مغناطیس و غیر هموزن بودن صرف نظر کرده و به یک جسم به صورت نیمه نامحدود که هم هموزن است و هم ایزوتروپ توجه می‌کنیم. علاوه بر این به این نکته نیز توجه داریم که قانون‌های نظریه کشسانی خطی برقرار

(۱۹۸۵) بیان کرد، این محقق سپس در ۱۹۹۲ با اضافه کردن روابطی به تحقیق قبلی ۱۹۸۵، توانست این نظریه و محاسبات مربوط به میدان‌های جابه‌جایی را به محاسبه میدان تغییر شکل داخلی در اثر یک گسل در نیم‌فضا تعمیم دهند، که این روابط، اساس مدل‌سازی صورت گرفته در این تحقیق است.

این مدل در بسیاری از کشورهای پیشرفته دنیا نظیر امریکا و ژاپن که مناطق لرزه‌خیز دارند برای اکثر گسل‌های موجود در این مناطق تهیه شده و اطلاعات مورد نیاز برای مدل به صورت پیوسته در حال جمع‌آوری است (تاچر، ۱۹۹۰ و تادا و هاشیموتو، ۱۹۸۷). در کشور ما هنوز برای مدل‌سازی حرکات گسل‌ها و بررسی جدی‌تر آنها اقدام کافی صورت نگرفته است. یکی از معروف‌ترین و کاربردی‌ترین مدل‌های حرکت گسل در دنیا مدل نیم‌فضا (اکادا، ۱۹۹۲) است که در اغلب نقاط دنیا برای مدل‌سازی حرکت گسل‌ها از آن استفاده می‌شود. توانایی‌های مدل بر پایه روش‌های نوین عددی را (ابولقاسم و گرافارند، ۲۰۰۳) مورد تحقیق و تأکید قرار داده‌اند. در اینجا لازم است به برخی از کاربردهای مهم این مدل در تعیین پارامترهای یک گسل و مدیریت بحران اشاره شود. با استفاده از این مدل در نواحی مرکزی ژاپن نظیر منطقه ایزو اوшіما (تادا و هاشیموتو، ۱۹۸۷) و منطقه آف ایتو (اکادا و یاماموتو، ۱۹۹۱) توانسته‌اند به محاسبه جابه‌جایی‌ها پردازند و از آنجا که این ناحیه ناحیه‌ای فعال است با استفاده از نتایج و خروجی‌های مدل به مدیریت بحران منطقه پردازند و تاکنون کلیه برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای را با استفاده از نتایج حاصل در نظر گرفته‌اند. یکی دیگر از مناطقی که از این مدل در آنجا استفاده می‌شود گسل سن‌آندریاس است (تاچر، ۱۹۹۰). از نمونه کاربردهای دیگر می‌توان به محاسبات صورت گرفته در زلزله ازمیت ترکیه (ریلینگر و همکاران، ۲۰۰۰) و در زلزله سان‌فرانسیسکو (تاچر، ۱۹۷۵) در اشاره کرد. این مدل

$$u_{iC}^j = \frac{F}{4\pi\mu} (1 - 2\delta_{i3}) \left[(2 - \alpha) \frac{R_i \delta_{j3} - R_j \delta_{i3}}{R^3} + \alpha \xi_3 \left[\frac{\delta_{ij}}{R^3} - 3 \frac{R_i R_j}{R^5} \right] \right] \quad (۴)$$



شکل ۱. دستگاه مختصات در نظر گرفته شده در این بخش و هندسه مدل مرجع.

در این عبارت‌ها δ_{ij} دلتای کرونکر (Kronecker delta) در λ و μ ضرایب لامه (Lame's constants)، $R_2 = x_2 - \xi_2$ ، $R_1 = x_1 - \xi_1$ ، $\alpha = (\lambda + \mu) / (\lambda + 2\mu)$ و $R^2 = R_1^2 + R_2^2 + R_3^2$ و $R_3 = x_3 - \xi_3$ هستند.

اولین جمله در رابطه ۱، $u_{iA}^j(X_1, X_2, X_3)$ بیانگر میدان جابه‌جایی در نتیجه یک نیروی منفرد عمل‌کننده در (ξ_1, ξ_2, ξ_3) در یک جسم محدود است (لاو، ۱۹۴۴). جمله دوم متناظر است با تصویر نیروی نقطه‌ای عمل‌کننده در نقطه $(\xi_1, \xi_2, -\xi_3)$ در جسم محدود. جمله‌های سوم و چهارم، $u_{iB}^j(X_1, X_2, X_3)$ و $u_{iC}^j(X_1, X_2, X_3)$ جمله‌هایی هستند که وابستگی مدل به عمق را نشان می‌دهند. در صورتی که عمق که مؤلفه X_3 بیان‌کننده آن است را در روابط برابر صفر در نظر بگیریم، و گسل را به سطح آزاد منتقل کنیم، در رابطه (۱)، جمله‌های اول و دوم حذف و جمله چهارم نیز برابر با صفر می‌شود و تنها جمله باقی‌مانده، $u_{iB}^j(X_1, X_2, 0)$ است که مدل را به یک میدان جابه‌جایی سطحی منتج شده از یک نیروی نقطه‌ای

است (دایاس و دوتیخ، ۲۰۰۶). در این زمینه تحقیقات بسیاری صورت گرفته است که نشان می‌دهد تأثیر انحنای زمین برای رویدادهای کم‌عمق و سطحی قابل صرف نظر کردن است (مک‌گینلی، ۱۹۶۹). حساسیت به توپوگرافی زمین، هموژن بودن، ایزوتروپی و فرض نیم‌فضا جزء شرایط و بررسی‌های مؤثر اخیر در این نظریه است (مستر لارک، ۲۰۰۳). در این قسمت ابتدا مختصری در خصوص روابط ریاضی مدل و خروجی‌های آن توضیح می‌دهیم.

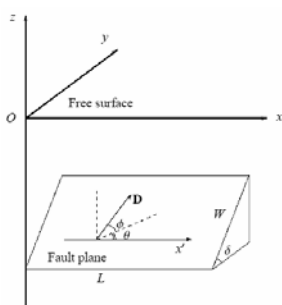
در این تحقیق دستگاه مختصات دکارتی نشان داده شده در شکل ۱ را در نظر می‌گیریم، جسم کشسان در ناحیه $X_3 \leq 0$ قرار دارد و محور X_1 در جهت موازی با جهت لغزش گسل در نظر گرفته شده است. در این دستگاه مختصات، $u_i^j(X_1, X_2, X_3; \xi_1, \xi_2, \xi_3)$ ، i امین مؤلفه جابه‌جایی در نقطه (X_1, X_2, X_3) هستند که در نتیجه اعمال نیروی نقطه‌ای به بزرگی F در جهت Z ام در (ξ_1, ξ_2, ξ_3) ایجاد شده است. این مسئله را می‌توان به شکل رابطه (۱) بیان کرد و جمله‌های این رابطه در روابط (۲، ۳ و ۴) توضیح داده شده‌اند (آکادا، ۱۹۸۵ و ۱۹۹۲؛ میندلین، ۱۹۳۶ و پرس، ۱۹۶۵).

$$u_i^j(X_1, X_2, X_3) = u_{iA}^j(X_1, X_2, -X_3) - u_{iA}^j(X_1, X_2, X_3) + u_{iB}^j(X_1, X_2, X_3) + X_3 u_{iC}^j(X_1, X_2, X_3) \quad (۱)$$

به طوری که:

$$u_{iA}^j = \frac{F}{8\pi\mu} \left[(2 - \alpha) \frac{\delta_{ij}}{R} + \alpha \frac{R_i R_j}{R^3} \right] \quad (۲)$$

$$\frac{R_i \delta_{j3} - R_j \delta_{i3} (1 - \delta_{j3})}{R (R + R_3)} - \frac{R_i R_j}{R (R + R_3)^2} (1 - \delta_{i3})(1 - \delta_{j3}) \quad (۳)$$



شکل ۲. هندسه مدل مرجع و توجیه (زوایا) بردار D .

برای یک گسل مستطیلی محدود با طول L و عرض W که در عمق c قرار گرفته است (شکل ۱)، میدان تغییر شکل می‌تواند به صورت تحلیلی با تغییر متغیرها و انتگرال‌گیری روی مستطیل محاسبه شود. این روش را افراد گوناگونی بررسی و تکمیل کرده‌اند (چاینری، ۱۹۶۳؛ ایواساکی و ساتو، ۱۹۷۹ و ساتو و ماتسوئورا، ۱۹۷۴). در اینجا از نتایج محاسبات آنها استفاده خواهیم کرد. نتیجه نهایی در شکل فشرده (رابطه ۷) با استفاده از علائم تانسوری که بیانگر جای‌گذاری‌ها هستند نمایش داده شده است.

$$f(\xi, \eta) = f(x, p) - f(x, p - W) - f(x - L, p) + f(x - L, p - W) \quad (7)$$

حال به معرفی کمیت‌های فوق در رابطه (۸) می‌پردازیم:

$$\begin{aligned} d &= c - z & \tilde{d} &= \eta \sin \delta - q \cos \delta \\ p &= y \cos \delta + d \sin \delta & q &= y \sin \delta - d \cos \delta, \\ \tilde{y} &= \eta \cos \delta + q \sin \delta, & X^2 &= \xi^2 + q^2 \\ R^2 &= \xi^2 + \eta^2 + q^2 \end{aligned} \quad (8)$$

کمیت‌های u_1 و u_2 و u_3 همان‌طور که در رابطه (۹) نشان داده شده است با بردار برگر مرتبط هستند:

$$\begin{aligned} U_1 &= |\vec{D}| \cos \varphi \cos \theta, & U_2 &= |\vec{D}| \cos \varphi \sin \theta, \\ U_3 &= |\vec{D}| \sin \varphi. \end{aligned} \quad (9)$$

بنابراین برای یک جداشدگی امتدادلغز، رابطه (۱۰) را به

در یک نیم‌فضا (اکادا، ۱۹۸۵) تبدیل می‌کند. هدف اصلی نیز در این تحقیق، به دست آوردن این میدان است، چرا که اگر چه جابه‌جایی در هر عمقی از گسل رخ می‌دهد، مشاهدات آن در روی سطح آزاد (سطح زمین) صورت می‌گیرد و این سطح برای ما قابل دسترس و ملموس است.

با توجه به روابط قبلی جابه‌جایی در یک جسم محدود کشسان در نتیجه یک جداشدگی، با رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k d\Sigma \quad (5)$$

به طوری که در این رابطه u_i میدان جابه‌جایی و Δu_j کمیت جداشدگی در سطح Σ است. از این رو با توجه به این رابطه به منظور به دست آوردن جابه‌جایی، نیاز داریم تا مشتقات رابطه (۱) را نسبت به ξ_k به دست آوریم و در رابطه (۵) قرار دهیم.

اکنون، به یک مسئله عملی‌تر توجه می‌کنیم. جدا شدگی‌های ابتدایی u_1 و u_2 و u_3 را تعریف می‌کنیم که به ترتیب متناظرند با مؤلفه‌های یک جداشدگی اختیاری امتدادلغز، عمودلغز و کششی. در شکل ۱ هر بردار جهت گسل‌های ابتدایی را نشان می‌دهد. بردار D بردار Burger نامیده می‌شود، که چگونگی گسترش یافتن گسل به سمت بیرون را نشان می‌دهد رابطه (۶).

$$D = u^+ - u^- \quad (6)$$

یک جداشدگی را عموماً می‌توان با سه زاویه مشخص کرد: زاویه شیب δ گسل، زاویه لغزش θ و زاویه ϕ واقع بین صفحه گسل و بردار Burger، D . این مسئله به صورت گرافیکی در شکل ۲ نشان داده شده است.

صورت زیر داریم:

مختصات نقطه محاسباتی واقع در میدان جابه‌جایی و همان‌طور که قبلاً اشاره شد μ , λ ضرایب لامه هستند که بیانگر مشخصات فیزیکی منطقه‌ای‌اند که گسل در آن واقع است و در روابط، آنها را عموماً با هم برابر می‌گیرند.

همان‌طور که قبلاً نیز در قسمت‌های مختلف مقاله به آن اشاره شد، خروجی اصلی و مهم این مدل میزان جابه‌جایی در امتداد سه محور X و Y و Z ، یعنی مقادیر $U_x(x, y, z)$ و $U_y(x, y, z)$ و $U_z(x, y, z)$ ، برای هر نقطه‌ای از سطح زمین و در هر عمقی (از جمله سطح آزاد) است.

حال با توجه به روابط ریاضی ذکر شده فوق برای گسل‌های متفاوت شامل گسل امتدادلغز و شیب‌لغز می‌توان در هر کدام از موارد فوق در یک منطقه که در آن حرکتی رخ داده باشد با در دست داشتن اطلاعات مورد نیاز به محاسبه جابه‌جایی در آن منطقه پرداخت. این روابط و فرمول‌ها در قالب یک برنامه محاسباتی نوشته شده است و قابل اجرا برای هر گسلی با مشخصات هندسی معلوم و در هر منطقه است.

۳ مدل‌سازی و آنالیز حساسیت

به منظور بررسی مدل و نحوه خروجی‌های آن و تجزیه و تحلیل آنها ابتدا برنامه را برای یک گسل شبیه‌سازی شده در حالت ایدئال اجرا و خروجی‌های حاصل از آن را ترسیم کردیم. خصوصیات گسل شبیه‌سازی شده مطابق جدول ۱ است. این گسل به گونه‌ای در نظر گرفته شده که قسمت فوقانی آن سطح زمین را قطع کند و مماس بر سطح زمین باشد. بردارها و مؤلفه‌های افقی و قائم جابه‌جایی سطحی حاصل از هر کدام از حرکت‌های امتدادلغز و شیب‌لغز به صورت مجزا برای گسل پیش‌گفته در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده‌اند.

$$\begin{aligned} u_1 &= -\frac{U_1}{2\pi} \left(\frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \arctan \frac{\xi \eta}{qR} + I_1 \sin \delta \right), \\ u_2 &= -\frac{U_1}{2\pi} \left(\frac{\tilde{y} q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \delta}{R+\eta} + I_2 \sin \delta \right), \\ u_3 &= -\frac{U_1}{2\pi} \left(\frac{\tilde{d} q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_4 \sin \delta \right). \end{aligned} \quad (10)$$

و برای یک جداشدگی شیب‌لغز داریم (رابطه ۱۱):

$$\begin{aligned} u_1 &= -\frac{U_2}{2\pi} \left(\frac{q}{R} - I_3 \sin \delta \cos \delta \right), \\ u_2 &= -\frac{U_2}{2\pi} \left(\frac{\tilde{y} q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \arctan \frac{\xi \eta}{qR} - I_1 \sin \delta \cos \delta \right), \\ u_3 &= -\frac{U_2}{2\pi} \left(\frac{\tilde{d} q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \arctan \frac{\xi \eta}{qR} - I_5 \sin \delta \cos \delta \right). \end{aligned} \quad (11)$$

به طوری که جمله‌های I_1 تا I_5 طبق روابط (۱۲) تا (۱۶) عبارت‌اند از:

$$I_1 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{\xi}{(R + \tilde{d}) \cos \delta} - \tan \delta I_5, \quad (12)$$

$$I_2 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \log(R + \eta) - I_3, \quad (13)$$

$$I_3 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{1}{\cos \delta} \frac{\tilde{y}}{R + \tilde{d}} - \log(R + \eta) \right] + \tan \delta I_4, \quad (14)$$

$$I_4 = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \frac{1}{\cos \delta} (\log(R + \tilde{d}) - \sin \delta \log(R + \eta)), \quad (15)$$

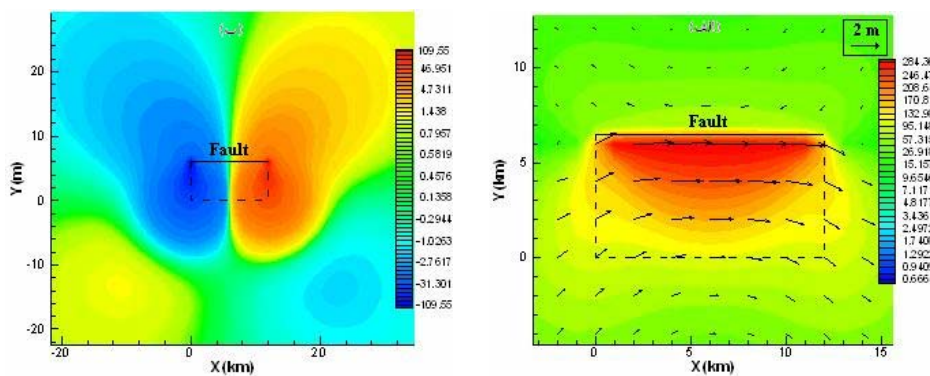
$$I_5 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos \delta} \arctan \frac{\eta(X + q \cos \delta) + X(R + X) \sin \delta}{\xi(R + X) \cos \delta} \quad (16)$$

در روابط فوق Z عبارت است از ارتفاع نقطه‌ای که میدان جابه‌جایی آن محاسبه می‌شود و Y عرض آن نقطه، η و

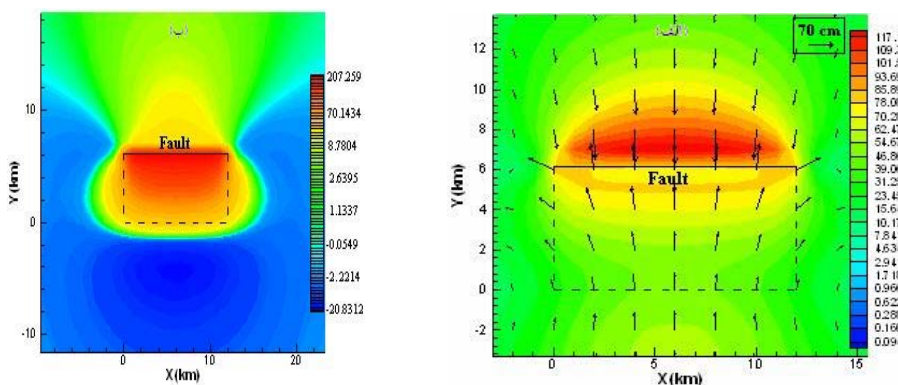
جدول ۱. مشخصات گسل مرجع.

گسل	L (km)	W (km)	C (km)	δ (deg.)	U(m)		دامنه تغییرات جابه‌جایی برحسب سانتی‌متر			
					Strike	Dip	Strike-slip		Dip-slip	
							افقی	قائم	افقی	قائم
گسل مرجع	۱۲	۸	۵٫۱۴	۴۰	۴	۳	۰ ~ ۲۸۴	-۱۰۹ ~ ۱۰۹	۰ ~ ۱۱۷	-۲۰ ~ ۲۰۷

$\lambda, \mu = 40 \text{ GPa}$



شکل ۳. الف- منحنی میزان مؤلفه‌های افقی جابه‌جایی سطحی و ب- منحنی میزان مؤلفه‌های قائم جابه‌جایی سطحی برای گسل امتدادلغز (خطوط نقطه‌چین نشان‌دهنده تصویر گسل روی سطح زمین هستند).



شکل ۴. الف- منحنی میزان مؤلفه‌های افقی جابه‌جایی سطحی و ب- منحنی میزان مؤلفه‌های قائم جابه‌جایی سطحی برای گسل شیب‌لغز (خطوط نقطه‌چین نشان‌دهنده تصویر گسل روی سطح زمین هستند).

شکل ۴- الف و ب (جابه‌جایی مسطحاتی و ارتفاعی) مقادیر جابه‌جایی در روی سطح زمین کاملاً وابسته به محل و نحوه قرارگیری گسل در زیر سطح زمین و محل برخورد یا تصویر قسمت فوقانی آن با سطح زمین، که ما از این به بعد به آن مرز گسل در روی سطح زمین خواهیم گفت، هستند.

هدف از آنالیز حساسیت عملی ساختن یک بررسی کلی روی تک تک پارامترهای مؤثر در برنامه و مدل است تا ببینیم که حساسیت خروجی مدل نسبت به کدام پارامتر بیشتر از بقیه است و به عبارتی تغییرات کدام پارامتر در مدل بیشتر خروجی مدل (یعنی جابه‌جایی) را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به عبارت دیگر اگر مدل نسبت به یک پارامتر حساس‌تر باشد و با تغییرات آن جابه‌جایی بیشتر دچار تغییر شود در یک منطقه که داده‌های سامانه تعیین موقعیت جهانی در دسترس باشد اگر آن پارامتر برای ما مجهول باشد می‌توان از طریق تغییر در میزان آن پارامتر و معرفی مقادیر متفاوت برای آن به مدل و مقایسه خروجی با نتایج حاصل از داده‌های سامانه تعیین موقعیت جهانی به مقدار بهینه آن کمیت پی برد و آن را برای آن گسل در نظر گرفت. برای عملی ساختن این آنالیز ابتدا یک گسل را در حکم گسل مرجع برای انجام مقایسه در نظر گرفتیم و مشخصات آن را در جدول ۱ ارائه کردیم.

سپس در هر کدام از پارامترهای گسل به‌طور جداگانه تغییراتی را ایجاد کردیم و نتایج آن را برای هر کدام از حالت‌های امتدادلغز و شیب‌لغز برای جابه‌جایی افقی و عمودی به صورت دامنه تغییرات نشان داده‌ایم تا بتوان آنها را با گسل مرجع مقایسه و نحوه تغییرات را به‌خوبی مشاهده کرد. ابتدا تغییرات را در پارامتر طول گسل اعمال می‌کنیم و نتایج را در جدول ۲ جمع‌آوری کرده‌ایم.

همان‌طور که از نتایج به‌خوبی پیداست می‌بینیم که مدل و جابه‌جایی به‌دست آمده نسبت به تغییر در طول

در روی هر کدام از شکل‌های ۳ و ۴ به‌خوبی نحوه حرکت یک گسل امتدادلغز و شیب‌لغز از روی بردارهای جابه‌جایی رسم شده و مقادیر تغییر شکل و جابه‌جایی به صورت طیفی در هر شکل و با یک راهنما برحسب سانتی‌متر در کنار هر شکل نشان داده شده است. می‌بینیم که در یک گسل امتدادلغز (شکل ۳-الف) بردارهای جابه‌جایی نسبت به تصویر قسمت فوقانی گسل در روی سطح آزاد قرینه هستند و یکی اشاره به سمت مثبت و دیگری به سمت منفی محور مختصات دارد. این نکته بیانگر خاصیت و نحوه حرکت در یک گسل امتدادلغز است، نکته دیگری که در این شکل می‌توان به آن توجه کرد نحوه تغییر مقادیر جابه‌جایی سطحی نسبت به موقعیت گسل است. اگر به خطوط خط‌چین در شکل که نشان‌دهنده محل قرارگیری صفحه گسل در زیر سطح زمین‌اند (و به نوعی تصویر صفحه گسل در روی سطح آزاد هستند) توجه کنیم می‌بینیم که جابه‌جایی سطحی کاملاً وابسته به محل قرارگیری گسل و شکل آن است به طوری که جابه‌جایی‌های صورت گرفته در ناحیه مستطیلی که محدود به خطوط خط‌چین و خط تصویر قسمت فوقانی گسل هستند تحت تأثیر صفحه گسل قرار می‌گیرند در زیر سطح زمین، نسبت به قسمت واقع شده در طرف دیگر، دارای مقادیر جابه‌جایی بزرگ‌تری هستند مرز گسل که دارای حرکت به سمت منفی محور مختصات است و می‌بینیم که بیشترین مقدار جابه‌جایی نیز در این ناحیه صورت می‌گیرد. این نکته در مورد تغییرات ارتفاعی در منطقه در ناحیه گسلس نیز از روی شکل ۳- ب به‌خوبی مشاهده می‌شود.

در مورد حالت شیب‌لغز نیز به‌خوبی با توجه به شکل ۴- الف نیز می‌توان به نحوه حرکت در دو طرف مرز گسل که در دو جهت مخالف همدیگر (یکی به سمت مثبت محور Y ها و دیگری به سمت منفی این محور) هستند اشاره کرد و می‌بینیم که در این حالت هم در هر دو

زمین مماس باشد. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌کنیم میزان تغییرات در جابه‌جایی باز هم مقدار کمی است ولی از تغییرات طول گسل بیشتر است و در حد چندین سانتی‌متر در هر کدام از مؤلفه‌ها است.

حال تغییرات را در کمیت عمق گسل اعمال می‌کنیم و نتایج حاصل از آن را در جدول ۴ نشان داده‌ایم و می‌بینیم که با اعمال دو تغییر در عمق گسل هر چه عمق بیشتر می‌شود مقدار جابه‌جایی‌ها به سرعت کاهش می‌یابد، این تغییر در هر دو حالت امتداد لغز و شیب لغز برای مؤلفه افقی و قائم رخ می‌دهد پس مشاهده می‌شود که مقدار حساسیت مدل به پارامتر عمق از دو پارامتر قبلی به مراتب بیشتر است و در حد چند ده سانتی‌متر است.

گسل حساسیت زیادی نداشته است و مقدار جابه‌جایی چندان دستخوش تغییر نمی‌شود ولی در کل مشاهده می‌شود که هر چه طول گسل بیشتر می‌شود مقدار جابه‌جایی افقی و قائم در هر دو حالت رو به افزایش می‌رود. پارامتر بعدی که آن را بررسی می‌کنیم، عرض گسل است. در این حالت برای اینکه بتوانیم مقایسه را عملی کنیم و شرایط با گسل مرجع تغییری نکند، متناسب با تغییر در عرض گسل، کمیت عمق هم دچار تغییر می‌شود، چون گسل مرجع به گونه‌ای در نظر گرفته شده که قسمت فوقانی آن با سطح آزاد زمین مماس شود، پس مقدار عمق را برای هر عرض جدید از رابطه $W \times \sin \delta$ به دست می‌آوریم تا همچنان قسمت فوقانی گسل با سطح

جدول ۲. نتایج حاصل از اعمال تغییرات در کمیت طول گسل.

گسل	L (km)	W (km)	C (km)	δ (deg.)	U(m)		دامنه تغییرات جابه‌جایی برحسب سانتی‌متر			
					Strike	Dip	Strike-slip		Dip-slip	
							افقی	قائم	افقی	قائم
گسل ۱	۱۳	۸	۵٫۱۴	۴۰	۴	۳	۰ ~ ۲۸۴	-۱۰۹ ~ ۱۰۹	۰ ~ ۱۱۷	-۲۰ ~ ۲۰۷
گسل ۲	۱۴	۸	۵٫۱۴	۴۰	۴	۳	۰ ~ ۲۸۵	-۱۰۹ ~ ۱۰۹	۰ ~ ۱۱۸	۰ ~ ۲۰۶
گسل ۳	۱۵	۸	۵٫۱۴	۴۰	۴	۳	۰ ~ ۲۸۵	-۱۱۰ ~ ۱۱۰	۰ ~ ۱۱۹	۰ ~ ۲۰۶

$$\lambda, \mu = 40 \text{ GPa}$$

جدول ۳. نتایج حاصل از اعمال تغییرات در کمیت عرض گسل.

گسل	L (km)	W (km)	C (km)	δ (deg.)	U(m)		دامنه تغییرات جابه‌جایی برحسب سانتی‌متر			
					Strike	Dip	Strike-slip		Dip-slip	
							افقی	قائم	افقی	قائم
گسل ۱	۱۲	۹	۵٫۷۸	۴۰	۴	۳	۰ ~ ۲۶۲	-۹۲ ~ ۹۲	۰ ~ ۱۵۴	-۱۷ ~ ۱۷۹
گسل ۲	۱۲	۱۰	۶٫۴۲	۴۰	۴	۳	۰ ~ ۲۶۹	-۹۶ ~ ۹۶	۰ ~ ۱۳۷	-۱۷ ~ ۱۸۷
گسل ۳	۱۲	۱۱	۷٫۰۷	۴۰	۴	۳	۰ ~ ۲۷۳	-۱۰۰ ~ ۱۰۰	۰ ~ ۱۲۷	-۱۴ ~ ۱۹۵

$$\lambda, \mu = 40 \text{ GPa}$$

جدول ۴. نتایج حاصل از اعمال تغییرات در کمیت عمق گسل.

گسل	L (km)	W (km)	C (km)	δ (deg.)	U(m)		دامنه تغییرات جابه‌جایی برحسب سانتی‌متر			
					Strike	Dip	Strike-slip		Dip-slip	
							افقی	قائم	افقی	قائم
گسل ۱	۱۲	۸	۶٫۱۴	۴۰	۴	۳	۰٫۶ ~ ۱۴۹	-۷۷ ~ ۷۷	۰ ~ ۴۸	-۱۷ ~ ۱۹۰
گسل ۲	۱۲	۸	۷٫۱۴	۴۰	۴	۳	۰٫۶ ~ ۹۴	-۶۴ ~ ۶۴	۰ ~ ۴۰	-۱۲ ~ ۱۵۳

$$\lambda, \mu = 40 \text{ GPa}$$

حاصل را در جدول ۶ ارائه کرده‌ایم. ملاحظه می‌شود که میزان تغییر در جابه‌جایی‌ها در هر کدام از حالت‌ها از سایر کمیت‌ها به مراتب بیشتر و محسوس‌تر است و در حدود چندین ده سانتی‌متر است.

در خاتمه مدل را برای دو مقدار ضرایب لامه اجرا می‌کنیم و می‌بینیم که تغییرات اعمال شده در این کمیت با آن که مقدار تغییر اعمال شده از لحاظ عددی قابل ملاحظه است ولی جابه‌جایی‌ها دچار تغییر چندانی نمی‌شوند و این تغییر در جابه‌جایی از حد چند دهم میلی‌متر فراتر نمی‌رود. می‌توان با توجه به جدول ۷ تأیید کرد که مدل، نسبت به تغییرات لامه حساسیتی از خود نشان نمی‌دهد.

حال نتایج حاصل از این آنالیز را که در جدول‌های ۲ تا ۷ ارائه شد را می‌توان به صورت جدول‌های ۸ و ۹ بیان کرد:

جدول ۵. نتایج حاصل از اعمال تغییرات در زاویه شیب گسل.

گسل	L (km)	W (km)	C (km)	δ (deg.)	U(m)		دامنه تغییرات جابه‌جایی برحسب سانتی‌متر			
					Strike	Dip	Strike-slip		Dip-slip	
							افقی	قائم	افقی	قائم
گسل ۱	۱۲	۸	۴	۳۰	۴	۳	۰ ~ ۲۸۷	-۱۰۲ ~ ۱۰۲	۰ ~ ۱۳۳	-۳۰ ~ ۱۵۳
گسل ۲	۱۲	۸	۵٫۶۵	۴۵	۴	۳	۰ ~ ۲۵۸	-۸۸ ~ ۸۸	۰ ~ ۱۴۹	-۱۲ ~ ۱۸۹
گسل ۳	۱۲	۸	۶٫۱۲	۵۰	۴	۳	۰ ~ ۲۶۸	-۹۴ ~ ۹۴	۰ ~ ۱۴۱	-۶۷ ~ ۲۱۵
گسل ۴	۱۲	۸	۶٫۵۵	۵۵	۴	۳	۰ ~ ۲۳۷	-۷۵ ~ ۷۵	۰ ~ ۱۶۵	-۶ ~ ۱۹۵
گسل ۵	۱۲	۸	۷٫۸۸	۸۰	۴	۳	۰ ~ ۱۹۲	-۴۰ ~ ۴۰	۰ ~ ۱۶۸	-۸۱ ~ ۱۵۵

$$\lambda, \mu = 40 \text{ GPa}$$

کمیت بعدی که تغییرات را در آن اعمال می‌کنیم پارامتر شیب گسل است. این تغییرات و نتایج حاصل از آنها در جدول ۵ ارائه شده است. مقدار اثر تغییرات این پارامتر در میزان جابه‌جایی‌ها نسبت به کمیت عمق تدریجی‌تر است و برای مؤلفه‌های ارتفاعی میزان آن از تغییرات ایجاد شده در مؤلفه مسطحاتی بیشتر است و حساسیت جابه‌جایی قائم به تغییر در زاویه شیب گسل بیشتر است. در اعمال این تغییرات این نکته لازم به ذکر است که در این حالت هم مانند پارامتر عرض گسل با تغییر در کمیت زاویه باید مجدداً عمق گسل را از رابطه $W \times \sin \delta$ محاسبه کرده و مقدار جدید را برای عرض گسل در نظر گرفت.

حال به سراغ تغییر در پارامتر جداسازی گسل می‌رویم. مقدار آن را برای هر کدام از حالت‌های امتدادلغز و شیب‌لغز به طور مجزا تغییر می‌دهیم و نتایج

جدول ۶. نتایج حاصل از اعمال تغییرات در کمیت جدانشدگی.

گسل	L (km)	W (km)	C (km)	δ (deg.)	U(m)		دامنه تغییرات جابه‌جایی برحسب سانتی‌متر			
					Strike	Dip	Strike-slip		Dip-slip	
							افقی	قائم	افقی	قائم
گسل ۱	۱۲	۸	۵٫۱۴	۴۰	۳	۲	۰ ~ ۲۱۳	-۸۲~۸۲	۰ ~ ۷۸	-۱۳ ~ ۱۳۸
گسل ۲	۱۲	۸	۵٫۱۴	۴۰	۴	۳	۰ ~ ۲۸۴	-۱۰۹~۱۰۹	۰ ~ ۱۱۷	-۲۰ ~ ۲۰۷
گسل ۳	۱۲	۸	۵٫۱۴	۴۰	۵	۴	۰ ~ ۳۵۵	-۱۳۶~۱۳۶	۰ ~ ۱۵۶	-۲۷ ~ ۲۷۶

جدول ۷. نتایج اعمال تغییرات در ضرایب لامه.

گسل	L (km)	W (km)	C (km)	δ (deg.)	U(m)		دامنه تغییرات جابه‌جایی برحسب سانتی‌متر			
					Strike	Dip	Strike-slip		Dip-slip	
							افقی	قائم	افقی	قائم
گسل ۱ $\lambda, \mu = 20 \text{ Gpa}$	۱۲	۸	۵٫۱۴	۴۰	۴	۳	۰ ~ ۲۸۴	-۱۰۹~۱۰۹	۰ ~ ۱۱۷	-۱۶ ~ ۲۰۷
گسل ۲ $\lambda, \mu = 30 \text{ Gpa}$	۱۲	۸	۵٫۱۴	۴۰	۴	۳	۰ ~ ۲۸۴	-۱۰۹~۱۰۹	۰ ~ ۱۱۷	-۱۵ ~ ۲۰۷

جدول ۸. نتایج آنالیز حساسیت در گسل امتدادلغز.

ردیف	نام پارامتر	میزان تغییرات	تغییرات جابه‌جایی	
			مسطحاتی	ارتفاعی
۱	جدانشدگی	۱ متر	۷۰cm	۲۰cm
۲	عمق گسل	۱ کیلومتر	۵۰cm	۱۳cm
۳	زاویه شیب	۵ درجه	۱۵cm	۱۴cm
۴	عرض گسل	۱ کیلومتر	۵cm	۴cm
۵	طول گسل	۳ کیلومتر	۱cm	۰/۵cm
۶	ضرایب لامه	۱۰ GPa	۰	۰

جدول ۹. نتایج آنالیز حساسیت در گسل شیب‌لغز.

ردیف	نام پارامتر	میزان تغییرات	تغییرات جابه‌جایی	
			مسطحاتی	ارتفاعی
۱	جداشدگی	۱ متر	۳۹cm	۶۹cm
۲	عمق گسل	۱ کیلومتر	۳۵cm	۳۵cm
۳	زاویه شیب	۵ درجه	۱۵cm	۳۰cm
۴	عرض گسل	۱ کیلومتر	۱۰cm	۶cm
۵	طول گسل	۳ کیلومتر	۲cm	۱cm
۶	ضرایب لامه	۱۰ GPa	۰	۰

سطح زمین، که در شکل‌ها با خط ممتد نمایش داده شده است، بیشتر از سایر نواحی است و همچنین قسمتی که واقع در محدوده صفحه گسل که در روی سطح زمین تصویر شده است، محدوده خط‌چین در شکل‌ها، قرار دارد دارای جابه‌جایی و تغییر شکل سطحی بیشتر از مناطق دیگر ولی کمتر از قسمت واقع در اطراف ناحیه بالایی گسل است.

در ادامه این تحقیق با توجه به پی‌بردن به حساسیت مدل به مشخصات و ضرایب گسل (پارامترهای مدل)، آنالیز حساسیت برای سنجش میزان حساسیت میدان جابه‌جایی و مدل به کمیت‌ها و پارامترهای مؤثر در مدل صورت گرفت. به این صورت که جابه‌جایی‌ها را با تغییر در پارامترهای متفاوت محاسبه و نتایج حاصل را برای هر کمیت در جدولی جداگانه جمع‌آوری کردیم، به گونه‌ای که بتوان آنها را مقایسه کرد. نتیجه‌ای که از این آنالیز به دست آمد این بود که مدل و جابه‌جایی به تغییرات ایجاد شده در کمیت جداشدگی بیشترین واکنش را نشان داده و برعکس با تغییر در ضرایب لامه تغییر چندان محسوس و قابل توجهی در جابه‌جایی‌های مسطحاتی ایجاد نمی‌شود. با توجه به نتایج این آنالیز می‌توان اظهار کرد که برای

به صورت یک نتیجه‌گیری، با توجه به نتایج حاصل از جدول‌های و محاسبات تغییر شکل می‌توان به این نکته اشاره کرد که حساسیت مدل به تغییر در پارامترهای متفاوت به ترتیب از چپ به راست به شکل زیر است:

$$U, C, \delta, W, L, (\mu, \lambda)$$

و ملاحظه می‌شود که بیشترین حساسیت و تغییر در جابه‌جایی نسبت به پارامتر جداشدگی و کمترین آن نسبت به ضرایب لامه است:

۴ نتیجه‌گیری

در بخش ۳ مدل‌سازی برای یک گسل شبیه‌سازی شده با مشخصات هندسی و ضرایب معلوم در دو حالت متفاوت حرکت امتدادلغز و شیب‌لغز بر مبنای روابط ریاضی ذکر شده در بخش ۲ صورت گرفت. در هر دو حالت ذکر شده مشاهده می‌شود که نحوه جابه‌جایی چه در بعد مسطحاتی و چه ارتفاعی وابسته به نوع گسل و مشخصات آن است. برای نمونه برای گسل شبیه‌سازی شده پیش‌گفته میزان جابه‌جایی (مسطحاتی و ارتفاعی) در محدوده اطراف تصویر قسمت بالایی گسل (لبه بالایی) در روی

مقایسه نتیجه حاصل از آن با نتایج حاصل از داده‌های سامانه تعیین موقعیت جهانی مقدار آن پارامتر مجهول را برای گسل ذکر شده تعیین می‌کند و از این راه می‌توان مشخصات یک گسل را تعیین کرد تا بتوان از آن در انجام کارهای تحلیلی دیگر استفاده کرد.

منابع

- Abolghasem, A. M., and Grafarend, E. W., 2003, Finite element analysis of quasi-static earthquake displacement fields observed by GPS: *J. Geodesy*, **77**, 529-536.
- Chinnery, M. A., 1963, The stress change that accompany strike-slip faulting, *B. Seismol. Soc. Am.*, **53**, 921-932.
- Dias, F., and Dutykh, D., 2006, Dynamics of tsunami waves, Springer, Germany.
- Iwasaki, T., and Sato, R., 1979, Strain field in a semi-infinite medium due to an inclined rectangular fault, *J. Phys. Earth*, **27**, 285-314.
- Kawasaki, I. Y. Suzuki, and Sato, R., 1973, Seismic waves due to a shear fault in a semi-infinite medium, Part 1, point source, *J. Phys. Earth*, **21**, 251-284.
- Kawasaki, I. Y. Suzuki, and Sato, R., 1975, Seismic waves due to a shear fault in a semi-infinite medium, Part 2, moving source, *J. Phys. Earth*, **23**, 43-61.
- Love, A. E. H., 1944, A treatise on the mathematical theory of elasticity, Dover Publications, New York, USA.
- McGinley, J. R., 1969, A comparison of observed permanent tilts and strains due to earthquakes with those calculated from displacement dislocations in elastic earth models, Ph.D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA.
- Masterlark, T., 2003, Finite element model predictions of static deformation from dislocation sources in a Res. pp. subduction zone: Sensivities to homogeneous, isotropic, Poisson-solid, and half-space assumptions, *J. Geophys.*, **108**, 2540.
- Mindlin, R. D., 1936, Force at a point in the interior of a semi-infinite medium, *Physics*, **7**, 195-202.
- Okada, Y., 1980, Theoretical strain seismogram and its applications, *Bull. Earthq. Res. Ins. Tokyo Uni. Vol*, **55**, 101-168.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due t shear and tensile faults in a half-space, *B. Seismol.*

مدلسازی یک گسل نیاز است تا کمیت‌های جداشدگی، عمق گسل، زاویه شیب و عرض با دقت نسبتاً خوب و قابل ملاحظه‌ای در دسترس باشند تا بتوان به نتیجه خوب و قابل قبولی دست یافت.

درحکم یک نتیجه کلی می‌توان با توجه به آنالیز صورت گرفته اعلام کرد که حساسیت مدل به تغییر در پارامترهای متفاوت با توجه به جدول ۱۰ از بالا به پایین، رو به کاهش است:

جدول ۱۰. حساسیت مدل به تغییر در پارامترها.

ردیف	نام پارامتر
۱	جداشدگی U
۲	عمق گسل C
۳	زاویه شیب δ
۴	عرض گسل W
۵	طول گسل L
۶	ضرایب لامه λ, μ

کاهش حساسیت

و با توجه به جدول مشاهده می‌شود که بیشترین حساسیت مدل و تغییر در مقادیر عددی جابه‌جایی‌ها نسبت به پارامتر جداشدگی و کمترین آن نسبت به ضرایب لامه (در هر دو حالت امتداد لغز و شیب لغز) است.

همچنین می‌توان این پیشنهاد را مطرح کرد که جمع‌آوری داده‌های GPS برای مناطق پر خطر و ترکیب نتیجه این داده‌ها با مدل و تعیین مشخصات هندسی گسل‌های فعال منطقه درحکم یک کاربرد مدل توصیه می‌شود. به این صورت که برای کمیت‌های مؤثر در مدل که مدل و میدان جابه‌جایی حاصل از آن نسبت به آنها حساس‌تر است، اگر در منطقه داده‌های سامانه تعیین موقعیت جهانی و در نتیجه جابه‌جایی به دست آمده از این داده‌ها در دسترس باشد، اگر یکی از پارامترهای پیش‌گفته (که مدل به آن حساس است) مجهول باشد با تغییر در مقدار آن پارامتر و معرفی مقادیر متفاوت آن به مدل و

- Soc. Am, **75**, 1135-1154.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, B. Seismol. Soc. Am., **82**, 1018-1040.
- Okada, Y., and Yamamoto, E., 1991, Dyke intrusion model for the 1989 seismovolcanic activity Off-Ito, central JAPAN, J. Geophys. Res., **96**, 10361-10376.
- Press, F., 1965, Displacements, strains and tilts at tele-seismic distances, J. Geophys. Res., **70**, 2395-2412.
- Reilinger, R. E., Ergintav, S., Brgmann, R., McClusky, S., Lenk, O., Barka, A., Gurkan, O., Hearn, L., Feigl, K. L., Cakmak, R., Aktug, B., Ozener, H., and M. N., 2000, Tksöz Coseismic and Post seismic Fault Slip for the 17August 1999, M=7.5 ,Izmit, Turkey Earthquake, Sciences, **289**, 1519-1524.
- Sato, R., and Matsu'ura, M., 1974, Strain and tilts on the surface of a semi-infinite medium, J. Phys. Earth, **22**, 213-221.
- Tada, T., and Hashimoto, M., 1987, Izu-Oshima eruption in 1986 and related crustal deformations, Earth Mont., **9**, 396-403.
- Thatcher, W., 1975, Strain accumulation and release mechanism of the 1906 SanFrancisco earthquake, J. Geophys. Res., **80**, 4862-4872.
- Thatcher, W., 1990, Present-day crustal movements and the mechanics of cyclic deformation, In the San Andreas Fault System, U.S. Geological Survey Professional Paper 1515, U.S. Government Printing Office, Washington, 189-205. USA.
- Weertman, J., 1965, Elementary Dislocation Theory, Macmillan Company, USA.