

تحلیل حساسیت مدل‌های کشسان تغییرات همالرزهای شتاب گرانی در سطح پوسته زمین به پارامترهای ورودی

اصغر راست‌بود^۱ و بهزاد ووشوقی^{*}

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۲/۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۱۶)

چکیده

فرایند زمین‌لرزه دربردارنده متغیرهای متعددی است که برخی از آنها با دقت بیشتری نسبت به بقیه با روش‌هایی غیر از مدل‌سازی تعیین می‌شوند. هدف از این تحقیق بررسی اثر تک‌تک پارامترهای ورودی هندسی و فیزیکی در مدل‌های کشسان تغییرات هم‌لرزه شتاب گرانی در سطح پوسته زمین است. با بررسی‌های صورت گرفته در مورد روش‌های متفاوت تعیین پارامترهای هندسی گسلش و پارامترهای فیزیکی منطقه گسلش، تحلیل حساسیت روی پارامترهایی که با دقت کمتری از اطلاعات مربوط به عملیات صحرایی تعیین می‌شوند، توصیه می‌شود. از بین این پارامترها می‌توان به زاویه شیب یا عمق قفل‌شدگی بالای گسلش اشاره کرد. با این حال در این تحقیق نقش کلیه پارامترهای گسلش روی داده‌های حاصل از گرانی‌سنجی مورد بررسی قرار گرفته است. برای عملی ساختن این تحلیل از مدل تحلیلی اکوبو (۱۹۹۲) استفاده شده است. از اندازه‌گیری‌های دقیق شتاب گرانی در سطح زمین، می‌توان برای استخراج جزئیات بیشتری از پارامترهای گسلش پوسته‌ای ناشی از زمین‌لرزه استفاده کرد. در این تحقیق، تغییرات شتاب گرانی سطحی در سه نوع گسلش امتدادلغز، شیب‌لغز و کششی در محیطی که از یک نیم‌فضای کشسان تشکیل شده است مدل‌سازی شده و تحلیل حساسیت روی همه پارامترهای هندسی و فیزیکی آن صورت می‌گیرد. براساس نتایج تحلیل حساسیت صورت گرفته ملاحظه می‌شود که بیشترین حساسیت و تغییر در شتاب گرانی نسبت به پارامتر نابرجایی و کمترین آن نسبت به طول گسل است. همچنین این مدل هیچ حساسیتی به ضرایب لامه نیم‌فضا در حالت جامد پواسون نشان نمی‌دهد. از طرفی از بین پارامترهایی که با دقت کمتری از اطلاعات مربوط به عملیات صحرایی تعیین می‌شوند، تعیین زاویه شیب صفحه گسل و عمق قفل‌شدگی بالا در هر سه نوع گسلش با استفاده از این مدل توصیه می‌شود. با استفاده از تحلیل حساسیت می‌توان مکان مناسب‌ترین اطلاعات تغییرات شتاب گرانی حاصل از مدل را در به‌دست آوردن مقادیر پارامترهای مورد بررسی گسلش، تعیین کرد. براین اساس در مورد همه پارامترها از جمله شیب صفحه گسل و عمق قفل‌شدگی بالا، تصویر سطحی صفحه گسلش واقع در یک انتهای گسل در حالت امتدادلغز و وسط صفحه گسلش در حالت شیب‌لغز و کششی، بهترین مکان برای تعیین این پارامترها است. با توجه به احداث شبکه چندمنظوره ژئودزی فیزیکی و ژئودینامیک ایران، حل مسئله معکوس، یعنی تعیین پارامترهای گسلش ناشی از زمین‌لرزه‌ها در محدوده احداثی این شبکه که کل ایران را دربرمی‌گیرد به‌مثابه یک نتیجه کاربردی مهم این تحقیق برای این شبکه پیشنهاد می‌شود. افزایش تعداد ایستگاه‌های این شبکه در مناطق لرزه‌خیز نیز به حل بهتر مسئله معکوس با استفاده از مشاهدات این شبکه کمک خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: نظریه نابرجایی، تحلیل حساسیت، مدل‌سازی تحلیلی، گسل مرجع، تغییرات همالرزهای شتاب گرانی، نیم‌فضای کشسان

Sensitivity analysis of elastic models of coseismic gravity changes on the surface of Earth's Crust to input parameters

Asghar Rastbood¹ and Behzad Voosoghi^{*}

¹Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 25 April 2011, accepted: 6 March 2012)

Summary

Earthquake process involves different variables some of which are determined more accurately than the others with non-modeling approaches. The scope of this research is to investigate the effect of individual geometrical and physical input parameters in coseismic gravity change models on the Earth surface. Among different physical and geometrical parameters, performing sensitivity analysis on less accurately determined parameters by field work is recommended. Among these parameters we can refer to fault dip and upper locking depth of the fault. Nevertheless in this research the role of all faulting parameters on gravity obtained data have been surveyed. To do this analysis the elastic model of Okubo (1992) was used. In this research, surface gravity change was modeled in three strike-slip, dip-slip and tensile slip reference faults, in a medium composed of an elastic half-space and a sensitivity analysis was performed on all geometrical and physical parameters. From the variability analysis, the location of the most appropriate gravity data was determined to obtain values for the studied parameters. To do sensitivity analysis, we considered areas with maximum and minimum gravity changes. These areas were located on one end of the surface projection of the reference fault plane in a strike slip case and middle of the surface projection of fault plane in dip slip and tensile slip cases. In all cases the characteristic horizontal length scales were fault dimensions. Maximum and minimum gravity changes were principally by the magnitude of slip or dislocation. On the other hand, fault size has a much smaller effect upon them. According to results obtained from the analysis, coseismic gravity changes showed a high dependency to fault slip above rupture surface of the fault; however it showed the least sensitivity to the fault length as well. Therefore, this model was not an appropriate tool to determine the fault length. Analyzing the coseismic gravity changes revealed a strong dependency on the dip angle of the fault plane. Observation points with large gravity changes also showed a large variability as the dip angle of fault varied. The area over the rupture plane was the one where the largest gravity changes occurred. Therefore, surface measurements in this area were the most suitable to ascertain the most likely value for the dip angle. In the analysis of the coseismic gravity changes it was found that, on average, deviations from a reference model were large above the rupture plane when varying the upper locking depth of the fault. on the other hand, varying the elastic half-space density led to small differences, in general. It means that coseismic gravity change analysis shows a small sensitivity to the elastic half-space density. This, in turn, indicates that coseismic gravity measurements are not recommendable for trying to ascertain an accurate value for this parameter. This model does not show any sensitivity to Lamé coefficients for Poisson Solid. Earthquake parameter determination specially dip angle and upper locking depth using Multi-purpose Physical Geodesy and Geodynamics Network of Iran (MPGGVI) was an important applicable result of this research. Densifying of this network in seismic zones of Iran is recommended for better inverse problem solution using these network observations.

Sensitivity analysis of Soldati (1998) model for viscoelastic half-space is recommended. The results of this analysis could be used for fault parameters determination by gravity network set up in postseismic mode.

Key words: Dislocation theory, sensitivity analysis, analytic modeling, reference fault, coseismic gravity change, elastic half-space

۱ مقدمه

زیادی به شبکه‌های ترازایی دارد. در این زمینه می‌توان به مراجعی نظیر نجفی و راست‌بود (۱۳۸۶) و هوانگ و همکاران (۲۰۰۲) مراجعه کرد.

همچنین، در حال حاضر امکان استفاده از نتایج حاصل از مشاهدات ماهواره‌های Grace و Goce که اخیراً راه‌اندازی شده است جهت آشکارسازی تغییرات شتاب گرانی در اثر زمین‌لرزه و حل مسئله معکوس در دست بررسی است ولی با توجه به میزان تفکیک کم حاصل از این ماهواره‌ها که برابر ۳۰۰ الی ۴۰۰ کیلومتر برای ماهواره‌های Grace و ۱۰۰ کیلومتر برای ماهواره Goce است، این ماهواره‌ها در حال حاضر صرفاً قادر به نشان دادن تغییرات شتاب گرانی برای زمین‌لرزه‌های خیلی بزرگ هستند. با مشخص کردن حد بزرگی زمین‌لرزه‌هایی که حل مسئله معکوس برای آنها مهم است می‌توان مأموریت‌های فضایی جدیدی را برای گرانی‌سنجی فضا برد به منظور حل مسئله معکوس با این روش تعریف کرد.

از اطلاعات با کیفیت زیاد شتاب گرانی می‌توان برای استخراج جزئیات بیشتری از تغییرات زمانی - مکانی زمین‌ساخت، به‌ویژه تغییرات هم‌لرزه شتاب گرانی و پارامترهای رئولوژیکی پوسته بهره جست. پارامترها یا متغیرهایی که این فرایندها را تحت تأثیر قرار می‌دهند زیاد و نحوه تأثیر آنها روی فرایند تغییر شتاب گرانی بسیار متفاوت است، بنابراین بررسی اثر تغییر تک‌تک پارامترهای ورودی، قبل از مدل‌سازی تغییر شتاب گرانی با بهره‌گیری از اطلاعات واقعی بسیار مهم است که این بحث تحت عنوان تحلیل حساسیت مطرح است.

هدف از 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 به عبارت بهتر تغییرات کدام پارامتر در مدل، خروجی مدل یعنی

اندازه‌گیری تغییرات شتاب گرانی به روش‌های نوین امروزی تأثیرات مهمی در تحقیقات زمین‌ساخت زمان حاضر دارند. با وجود اینکه این اندازه‌گیری‌ها اطلاعات بارزشی در مورد چگونگی تغییر شکل کنونی زمین در اختیار محققان قرار می‌دهند، جوابی برای علت این تغییر شکل‌ها ندارند. علاوه بر این، این اندازه‌گیری‌ها نمی‌توانند رفتار زمین‌ساختی آینده زمین و یا رفتار گذشته آن را تعیین و توجیه کنند. به همین دلیل شاخه‌های گوناگون علوم زمین از مدل‌هایی برپایه ریاضیات و فیزیک استفاده می‌کنند. در بررسی تغییرات شتاب گرانی، مدل‌های گسلی که براساس اطلاعات زمین‌شناسی، ژئودتیکی و لرزه‌ای مشخص شده‌اند، دید بارزشی از ویژگی‌های یک گسل و رفتار آن در طول زمان فراهم می‌کنند. مدل‌ها براساس مشاهدات گذشته برآوردهایی از تغییرات آینده شتاب گرانی در اختیار محققان علوم زمین قرار می‌دهند.

حل مسئله معکوس و تعیین پارامترهای یک زمین‌لرزه بزرگ همواره با مجموعه‌ای از عدم قطعیت‌ها روبه‌رو است. در بسیاری از موارد روش‌های زلزله‌شناسی به‌تعمیهایی نمی‌توانند پارامترهای گسلش مربوط به یک زمین‌لرزه، نظیر طول، عرض، شیب و عمق قفل‌شدگی بالای گسلش و مقدار لغزش را با قطعیت تعیین کنند. برای این منظور می‌توان از داده‌های گرانی‌سنجی نیز استفاده کرد. امروزه داده‌های گرانی‌سنجی روزبه‌روز زیادتر شده و سهل‌الوصول‌تر می‌شوند. کشور ما هم در این زمینه پیشرفت‌های زیادی کرده و این نوع داده‌ها هم‌اکنون قابل دسترسی است. با استفاده از نتایج حاصل از سرشکنی شبکه‌های شتاب گرانی که بر پایه اندازه‌گیری‌های شتاب گرانی نسبی یا مطلق است می‌توان کمک شایانی به حل مسئله معکوس و برآورد دقیق‌تر پارامترهای گسلش کرد. شبکه‌های گرانی‌سنجی و نحوه سرشکنی آنها شباهت

زمین‌شناسی و ژئودتیکی به‌دست آورد که اطلاعات بیشتری را راجع به زمین‌لرزه‌ای که باعث تغییرشکل شده و سطحی که زمین‌لرزه در آن اتفاق افتاده فراهم می‌کند.

مدل تحلیلی مورد استفاده در این تحقیق را نخستین بار اکوبو در ۱۹۹۱ برای منبع نقطه‌ای مطرح ساخت و در ۱۹۹۲ به منبع مستطیلی در نیم‌فضا برای یک گسل تعمیم داد (اکوبو، ۱۹۹۱؛ اکوبو، ۱۹۹۲). بعداً در ۱۹۹۸ همین روابط را سلداتی برای یک گسل در نیم‌فضای گرانروی کشسان تعمیم داد (سلداتی، ۱۹۹۸). در ۱۹۹۳ مدل‌سازی تغییرات شتاب گرانی در اثر نابرجایی نقطه‌ای برای زمین‌کروی مطرح شد و در ۱۹۹۸ به گسلش مستطیلی برای زمین‌کروی تعمیم داده شد (سان و اکوبو، ۱۹۹۳؛ سان و اکوبو، ۱۹۹۸). مدل‌سازی تغییرات هم‌لرزه شتاب گرانی سطحی در اثر نابرجایی برای زمین‌سُبعی‌ناهمگن نیز در ۲۰۰۸ صورت گرفت (فو و سان، ۲۰۰۸). از کارهای قبلی صورت گرفته در زمینه تحلیل حساسیت می‌توان به تحقیق به انجام رسیده نوری و همکاران (۱۳۸۸) اشاره کرد که به تحلیل حساسیت در مورد پارامترهای هندسی و فیزیکی میدان جابه‌جایی هم‌لرزه یک گسل با استفاده از مدل تحلیلی اکادا (۱۹۸۵) پرداخته است. در مورد مدل‌سازی تغییرات هم‌لرزه شتاب گرانی نیز می‌توان به کار صورت گرفته راست‌بود و همکاران (۱۳۹۰) اشاره کرد که تغییرات هم‌لرزه شتاب‌گرانی زمین‌لرزه (۲۰۰۳/۱۲/۲۶) $M_w = 6.5$ بم را با استفاده از مدل تحلیلی اکوبو (۱۹۹۲) مدل‌سازی کرده‌اند.

انجام این تحلیل برای مدل زمین‌کروی متقارن و نامتقارن نیز توصیه می‌شود. همچنین تحلیل حساسیت برای مدل تغییرات شتاب‌گرانی در نیم‌فضای گران‌روی کشسان نیز بسیار مفید خواهد بود، زیرا از نتایج این تحلیل می‌توان برای تعیین پارامترهای گسلش حساس به مدل با استفاده از شبکه گرانی‌سنجی که بعد از وقوع زمین‌لرزه در منطقه مستقر شده است استفاده کرد. ولی بایستی توجه شود که

شتاب‌گرانی را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگر مدل نسبت به یک پارامتر حساس‌تر باشد، یعنی با تغییرات آن شتاب‌گرانی‌ها بیشتر دچار تغییر شوند در منطقه‌ای که مشاهدات شتاب‌گرانی 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 شتاب‌گرانی به مقدار بهینه آن پارامتر پی برد و آن را برای گسل یا منطقه در نظر گرفت.

در این تحقیق برای تحلیل حساسیت تغییرات شتاب‌گرانی از مدل نیم‌فضای کشسان اکوبو (۱۹۹۲) استفاده شده است. پارامترهای ورودی این مدل عبارت‌اند از: پارامترهای هندسی (میزان لغزش، زاویه شیب، طول، عرض و عمق قفل‌شدگی بالای گسل) و پارامترهای فیزیکی (ضرایب لامه و چگالی نیم‌فضای کشسان). سؤال مهمی که در اینجا مطرح می‌شود این است که تحلیل حساسیت روی کدام‌یک از پارامترهای ورودی هندسی یا فیزیکی مدل توصیه می‌شود؟

با استفاده از دانش زلزله‌شناسی می‌توان مقادیر دقیقی را برای بزرگی زلزله و ممان لرزه‌ای آن تعیین کرد. همچنین موقعیت و جهت صفحه گسیختگی را می‌توان از توزیع پس‌لرزه‌ها و حل صفحه گسلش به‌دست آورد (استین و همکاران، ۲۰۰۳). طول و عرض گسلش و متوسط جابه‌جایی روی صفحه گسل را نیز می‌توان با در نظر گرفتن بزرگی زمین‌لرزه با استفاده از روابط تجربی بین پارامترهای گسلش برآورد کرد (ولز و اسمیت، ۱۹۹۴؛ نوروزی، ۱۹۸۵). باین‌حال، اندازه و هندسه صفحه گسلش از جمله زاویه شیب صفحه گسل و عمق قفل‌شدگی بالا را نمی‌توان با همان دقت بزرگی، ممان لرزه‌ای یا نابرجایی متوسط روی صفحه گسل برآورد کرد.

اطلاعات در مورد سطح گسیختگی و تغییرشکل در نقاط خاص، روی سطح زمین را می‌توان از مشاهدات

با در نظر گرفتن دستگاه مختصات و گسل مرجع نمایش داده شده در شکل ۱ کلیات مدل اکوبو مطرح شده و از پرداختن به جزئیات آن خودداری می‌شود.

تغییرات شتاب گرانی، Δg ، در سطح آزاد یعنی $x_3 = 0$ را می‌توان با دیفرانسیل‌گیری از تغییرات پتانسیل نسبت به x_3 به دست آورد (اکوبو، ۱۹۹۲).

$$\Delta g(x_1, x_2) = \left\{ \rho G[A] + \Delta \rho G U_3 C_g(\xi, \eta) \right\} \left\| -\beta \Delta h(x_1, x_2) \right. \quad (1)$$

$$A = U_1 S_g(\xi, \eta) + U_2 D_g(\xi, \eta) + U_3 T_g(\xi, \eta),$$

ترم آخر رابطه فوق اثر هوای آزاد در تغییر ارتفاع سطح، Δh ، را مشخص می‌کند و $\beta = 0.309 \times 10^{-5} m/s^2$ گرادیان گرانی هوای آزاد است. S_g, D_g, T_g, C_g با اعمال عملگر دیفرانسیلی Γ روی تابع‌های گرین S, D, T, C به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$(S_g, D_g, T_g, C_g) \equiv \Gamma(S, D, T, C), \quad (2)$$

$$\Gamma \equiv \left(\frac{\partial}{\partial x_3} - \frac{\partial q}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial q} - \frac{\partial p}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \Bigg|_{x_3=0}, \quad (3)$$

یا

$$S_g(\xi, \eta) = -\frac{q \sin \delta}{R} + \frac{q^2 \cos \delta}{R(R + \eta)}, \quad (4)$$

$$D_g(\xi, \eta) = 2I_2 \sin \delta - \frac{q \bar{d}}{R(R + \xi)}, \quad (5)$$

$$T_g(\xi, \eta) = 2I_2 \cos \delta + \frac{q \bar{y}}{R(R + \xi)} + \frac{q \xi \cos \delta}{R(R + \xi)}, \quad (6)$$

$$C_g(\xi, \eta) = 2I_2 \cos \delta - \sin \delta \cdot \log(R + \xi), \quad (7)$$

که

$$\bar{y} = \eta \cos \delta + q \sin \delta, \quad (8)$$

در رابطه (۱) از علامت دو خط موازی چینری (۱۹۶۱)

استفاده شده است:

$$f(\xi, \eta) \equiv f(x_1, p) - f(x_1, p - W) - f(x_1 - L, p) + f(x_1 - L, p - W), \quad (9)$$

تغییرات بعدلرزه‌ای شتاب گرانی بیشتر در مورد زمین‌لرزه‌هایی مطرح است که بزرگ باشند و عمق کانونی زیادی داشته باشند تا زمین‌لرزه قسمت خمیری سنگ‌سپهر را تحت تأثیر قرار دهد. در مورد زمین‌لرزه‌هایی که بزرگ نباشند و یا دارای عمق کانونی زیادی نباشند، اثر بعدلرزه‌ای روی شتاب گرانی بسیار کم است. در حالت کلی اثرات بعدلرزه‌ای در مقایسه با اثرات هم‌لرزه از نظر دامنه خیلی کوچک‌ترند و بعد از وقوع زمین‌لرزه، با گذشت زمان کوچک‌تر نیز می‌شوند.

چون محاسبات در نیم‌فضای کشسان صورت می‌گیرد و مطابق اصول مکانیک محیط‌های پیوسته اصل برهم‌نهی (principle superposition) در محیط‌های کشسان برقرار است (میس، ۱۹۹۹)، پس مدل‌سازی برای زمین‌لرزه‌های متعددی که در یک گسل رخ می‌دهد و همچنین برای سامانه‌ای از گسل‌های گوناگون با جمع برداری نتایج قابل اعمال است. مدل‌سازی تغییرات شتاب گرانی در اثر زمین‌لرزه‌های متعدد رخ می‌دهد در سامانه‌ای از گسل‌ها منجر به محاسبه تصحیح بوگه در منطقه مورد بررسی می‌شود که با تصحیح بوگه محاسبه شده با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی قابل مقایسه است. انتظار می‌رود که تصحیح بوگه محاسبه شده با استفاده از اطلاعات لرزه‌ای بزرگ‌تر از تصحیح بوگه محاسبه شده با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی باشد که اختلاف آنها را می‌توان به اثر فرسایش و رسوب در منطقه مورد بررسی نسبت داد. با انجام محاسبات با هر دو روش و مقایسه آنها می‌توان به اثر فرسایش و رسوب در منطقه دست یافت.

۲ مدل‌سازی تغییرات شتاب گرانی روی سطح آزاد

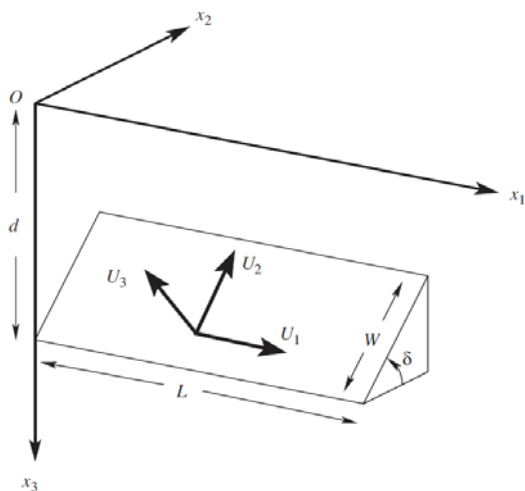
تابع‌های گرین شتاب گرانی برای یک گسل با ابعاد محدود و شیب و لغزش دلخواه در یک نیم‌فضای کشسان را اکوبو (۱۹۹۲) عرضه کرده است. با توجه به اینکه در این تحقیق هدف تحلیل حساسیت روی این مدل است لذا

$$D_g^*(\xi, \eta) = -I_5 \sin \delta \cos \delta, \quad (21)$$

$$T_g^*(\xi, \eta) = I_5 \sin^2 \delta, \quad (22)$$

$$C_g^*(\xi, \eta) = C_g(\xi, \eta) \quad (23)$$

اگر $\cos \delta = 0$ باشد، به روابط (۱۶) و (۱۷) خواهیم رسید.



شکل ۱. هندسه گسلش مرجع با دستگاه مختصات مورد استفاده در محاسبه تابع‌های گرین تغییرات شتاب گرانی. فرودپواره گسل نمایش داده شده و بردارها نشان‌دهنده حرکت فرادپواره هستند. U_1 , U_2 و U_3 با فرض $0 < \delta < \pi/2$ به ترتیب بیانگر لغزش چپ‌گرد، راندگی و کششی بازشونده‌اند. (اکوبو، ۱۹۹۲، با تغییرات).

۳ تحلیل حساسیت

در مدل‌سازی بایستی دو نکته مهم مدنظر قرار گیرد. اول اینکه نتایج حاصل از مدل‌سازی یعنی شتاب گرانی‌ها بایستی در محدوده‌ای باشند که قابل اندازه‌گیری باشد، یعنی دامنه کمیت مدل‌سازی شده بالاتر از حد دقت دستگاه اندازه‌گیری آن کمیت باشد. اگر نتایج حاصل از مدل‌سازی به قدری کوچک باشد که از دقت اندازه‌گیری‌ها کمتر شود تفسیر نتایج حاصل از مدل قابل استفاده نخواهد بود. دوم اینکه بایستی پایداری و منحصر به فرد بودن جواب به دست آمده برای هر پارامتر از

همچنین تغییر ارتفاع Δh در رابطه (۱) با استفاده از روابط اکادا (۱۹۸۵) به صورت زیر محاسبه می‌شود (اکوبو، ۱۹۹۲):

$$\Delta h(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi} [U_1 S_h(\xi, \eta) + U_2 D_h(\xi, \eta) + U_3 T_h(\xi, \eta)], \quad (10)$$

$$S_h(\xi, \eta) = -\frac{\bar{d}q}{R(R+\eta)} - \frac{q \sin \delta}{R+\eta} - I_4 \sin \delta, \quad (11)$$

$$D_h(\xi, \eta) = -\frac{\bar{d}q}{R(R+\eta)} - \sin \delta \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\xi \eta}{qR} \right) + I_5 \sin \delta \cdot \cos \delta, \quad (12)$$

$$T_h(\xi, \eta) = -\frac{\bar{d}q}{R(R+\eta)} + \cos \delta \cdot \left[\frac{\xi q}{R(R+\eta)} - \tan^{-1} \left(\frac{\xi \eta}{qR} \right) \right] - I_5 \sin^2 \delta, \quad (13)$$

که

$$(14)$$

$$I_4(\xi, \eta) = (1-2\nu) [\log(R+d) - \sin \delta \log(R+\eta)] \sec \delta,$$

$$I_5(\xi, \eta) = 2(1-2\nu) I_1 \sec \delta, \quad (15)$$

اگر $\cos \delta = 0$ باشد، خواهیم داشت:

$$I_4(\xi, \eta) = -(1-2\nu) \frac{q}{R+d}, \quad (16)$$

$$I_5(\xi, \eta) = -(1-2\nu) \frac{\xi \sin \delta}{R+d}, \quad (17)$$

تغییر شتاب گرانی بدون در نظر گرفتن اثر توزیع جرم سطحی $\rho \Delta h$ از رابطه زیر به دست می‌آید (اکوبو، ۱۹۹۲):

$$\Delta g^*(x_1, x_2) = \left\{ \rho G [A] + \Delta \rho G U_3 C_g^*(\xi, \eta) \right\} \quad (18)$$

$$A = U_1 S_g^*(\xi, \eta) + U_2 D_g^*(\xi, \eta) + U_3 T_g^*(\xi, \eta),$$

که

$$(S_g^*, D_g^*, T_g^*, C_g^*) = \Gamma(S^*, D^*, T^*, C^*), \quad (19)$$

یا

$$S_g^*(\xi, \eta) = I_4 \sin \delta, \quad (20)$$

۳-۱ مدل مرجع

به منظور تحلیل حساسیت و تجزیه و تحلیل خروجی‌ها، نخست مدل‌سازی برای گسلش مرجع شبیه‌سازی شده صورت گرفت. مشخصات این گسل در جدول ۱ آورده شده است. جهت تغییر پارامترهای هندسی و فیزیکی گسل مرجع، محدوده خطایی فرضی در برآورد آنها مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شد. شکل‌های ۲-الف تا ۲-ج تغییرات شتاب گرانی ناشی از سه نوع گسلش را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها تصویر عمق قفل‌شدگی بالای گسل در سطح آزاد با خط سیاه پُررنگ و تصویر عمق قفل‌شدگی پایین با خط چین نمایش داده شده است. خط نقطه‌چین هم نشان‌دهنده محل عبور نیم رخ تغییرات شتاب گرانی مدل‌سازی شده در شکل‌های ۳ تا ۹ است. مطابق این شکل‌ها در هر سه حالت گسلش، دامنه تغییرات شتاب گرانی بیشتر از حد دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری شتاب گرانی است. از طرفی تغییرات عمده شتاب گرانی در اثر زمین‌لرزه، در محدوده ابعاد گسل است. همچنین دامنه تغییرات شتاب گرانی مدل‌سازی شده در گسلش امتدادلغز متقارن، ولی در دو حالت دیگر نامتقارن است. علاوه بر این دامنه تغییرات در دو حالت شیب‌لغز و کششی بزرگ‌تر از حالت امتدادلغز است. مطابق نتایج حاصل از مدل‌سازی گسلش‌های مرجع در کلیه حالات لغزش یک گسل شتاب گرانی در بالای مناطق انقباضی (مناطق که در اثر زلزله دچار افزایش چگالی می‌شوند) افزایش، و در مناطق اتساعی (مناطق که در اثر زلزله دچار کاهش چگالی می‌شوند) کاهش می‌یابد.

برای تعیین مکان مناسب روی نیم‌فضا برای تحلیل حساسیت مکانی نیم رخی در منطقه گسلش در نظر گرفته شد به نحوی که مناطق حداقل و حداکثر تغییرات شتاب گرانی مدل‌سازی شده را قطع کند. با توجه به نتایج مدل‌سازی در شکل ۲-الف این نیم رخ در حالت امتدادلغز عمود بر راستای گسلش و گذرنده از یک انتهای

اطلاعات اندازه‌گیری مورد آزمون قرار گیرد. بایستی نشان داد که می‌توان مدلی را در حکم بهترین برآورد به دست آورد و بنابراین به محتمل‌ترین مقادیر برای مجموعه پارامترها رسید. همچنین بایستی دانست که کدام پارامتر و به چه میزان در مدل‌سازی تأثیرگذار است.

بهتر است پارامترهایی که با روش‌هایی غیر از مدل‌سازی با دقت تعیین می‌شوند در تحلیل حساسیت ثابت در نظر گرفته شوند که برای مثال می‌توان از ممان لرزه‌ای، میزان لغزش یا نبرجایی روی صفحه گسل و ویژگی‌های فیزیکی نیم‌فضای کشسان نام برد. لازم به ذکر است که در این تحقیق تغییرات شتاب گرانی در محیطی به صورت نیم‌فضای کشسان مدل‌سازی می‌شوند. چنین محیطی در کارهای انتشار یافته قبلی به کرات استفاده شده است. از طرفی جایگزینی نیم‌فضای کشسان به جای زمین واقعی با استفاده از اصل تناظر (correspondence principle) امکان‌پذیر است (سگال، ۲۰۱۰).

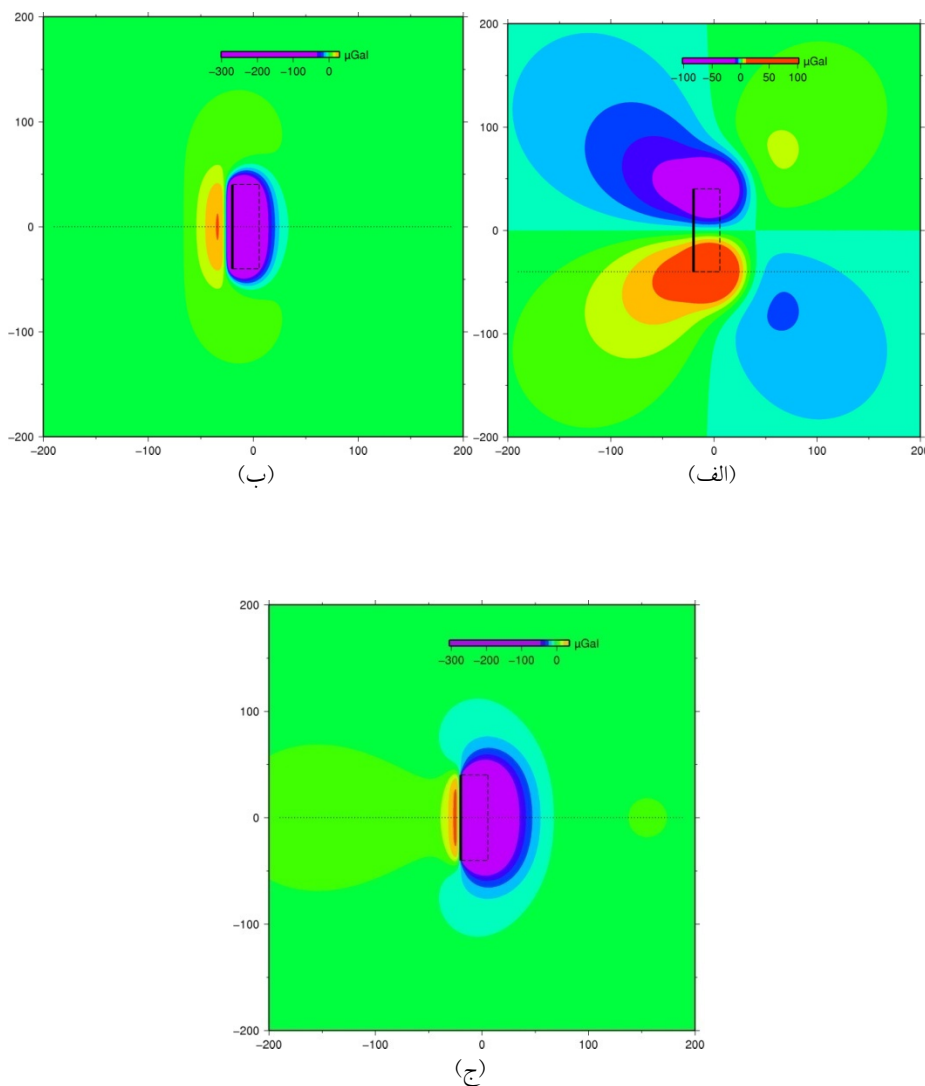
از جمله پارامترهایی که عموماً با استفاده از اطلاعات مربوط به عملیات صحرایی با دقت تعیین نمی‌شوند می‌توان به زاویه شیب صفحه گسل یا عمق قفل‌شدگی بالا اشاره کرد که تحلیل حساسیت برای تعیین آنها با استفاده از روش‌های ژئودتیکی ضروری است. باین حال در این تحقیق کلیه پارامترها به صورت متغیر در نظر گرفته شده و اثر تغییرات کوچک آنها روی تغییرات شتاب گرانی منتج از مدل‌سازی مورد تحلیل قرار گرفته است. برای این منظور یک گسل مرجع با مقادیر متوسط ایجاد شده و با تغییر تک‌تک پارامترها اثر آنها در تغییرات شتاب گرانی با هم مقایسه شده است. تغییرات شتاب گرانی ایجاد شده ناشی از گسل مرجع نقش اطلاعات ژئودتیکی مصنوعی را بازی می‌کند که با مجموعه‌های متفاوت پارامترهای ورودی مدل‌سازی می‌شود. پارامترهای انتخابی برای گسل مرجع، شبیه‌سازی مقادیر مربوط به سه نوع گسلش امتدادلغز، شیب‌لغز و کششی است.

مورد تحلیل با توجه به مشخصات گسل مرجع در محدوده خطای فرضی برآورد آنها مطابق جدول ۱ تغییر داده شد و تغییرات شتاب گرانی حاصل از مدل سازی روی نیم رخ عمود بر محور گسل و گذرنده از یک انتهای آن در حالت امتداد لغز و گذرنده از وسط آن در حالت شیب لغز و کششی رسم شد. نتایج عددی حاصل از مدل سازی ها در حالت های گوناگون در جدول های ۲ تا ۸ آورده شده

آن در نظر گرفته شد. در دو حالت شیب لغز و کششی نیز با توجه به نتایج مدل سازی در شکل های ۲-ب و ۲-ج محل نیم رخ عمود بر راستای گسلش و گذرنده از وسط آن لحاظ شد.

۲-۳ پارامترهای ورودی

برای تحلیل حساسیت در هر مرحله تحلیل، کلیه پارامترها به غیر از یکی ثابت در نظر گرفته شد و مقادیر پارامتر



شکل ۲. نتایج حاصل از مدل سازی تغییرات شتاب گرانی برای گسلش های مرجع. تصویر عمق قفل شدگی بالای گسل در سطح آزاد با خط سیاه پُررنگ و تصویر عمق قفل شدگی پایین با خط چین نمایش داده شده است. خط نقطه چین هم نشان دهنده محل عبور نیم رخ تغییرات شتاب گرانی مدل سازی شده در شکل های ۳ تا ۹ است، (الف) تغییرات شتاب گرانی در حالت گسلش مرجع امتداد لغز بین ۱۰۲/۰۲ تا ۱۰۲/۰۲ میکروگال است، (ب) تغییرات شتاب گرانی در حالت گسلش مرجع شیب لغز بین ۳۰۱/۲۲ تا ۲۹/۴۲ میکروگال است، (ج) تغییرات شتاب گرانی در حالت گسلش مرجع کششی بین ۳۰۵/۵۵ تا ۳۵/۶۰ میکروگال است.

عرض گسل انتخابی در سینوس زاویه شیب گسل به اضافه عمق قفل‌شدگی بالا به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل‌های ۴- الف تا ۴- ج مشاهده می‌شود، میزان تغییرات در شتاب گرانی نسبت به گسلش مرجع با هم مقداری کم ولی بیشتر از تغییرات شتاب گرانی مربوط به تحلیل طول گسل است. گستره مکانی تغییرات شتاب گرانی در این حالت بیشتر است که شامل تصویر سطحی و آن سوی عمق قفل‌شدگی پایین گسل می‌شود. میزان حساسیت مدل به پارامتر عرض گسل در هر سه حالت تقریباً یکسان است. مطابق جدول ۳ بازه تغییرات شتاب گرانی در حالت شیب‌لغز بیشینه و در حالت امتدادلغز کمینه است، همچنین با افزایش عرض گسلش بازه تغییرات شتاب گرانی بیشتر می‌شود.

حال تغییرات را در کمیت عمق قفل‌شدگی بالای گسل اعمال می‌کنیم. متناسب با تغییر در عمق قفل‌شدگی بالای گسل، عمق قفل‌شدگی پایین گسل هم دچار تغییر می‌شود که از حاصل ضرب عرض گسل در سینوس زاویه شیب گسل به اضافه عمق قفل‌شدگی بالای انتخابی به دست می‌آید. مطابق جدول ۴ با افزایش عمق قفل‌شدگی بازه تغییرات شتاب گرانی در سطح زمین کم می‌شود. بازه تغییرات شتاب گرانی در حالت شیب‌لغز بیشینه و در حالت امتدادلغز کمینه است. همچنین مطابق شکل‌های ۵- الف تا ۵- ج اثر حساسیت مدل روی تصویر سطحی گسل و طرفین آن قابل مشاهده، و روی تصویر سطحی گسل نزدیک عمق قفل‌شدگی بالا بیشتر از طرفین آن است. از طرفی میزان حساسیت مدل روی تصویر سطحی گسل به پارامتر عمق از دو پارامتر قبلی بیشتر است.

کمیت بعدی که تغییرات را در آن اعمال می‌کنیم، پارامتر شیب گسل است. در اعمال تغییرات مربوط به شیب گسل هم مانند پارامتر عرض گسل متناسب با تغییر در زاویه شیب گسل، عمق قفل‌شدگی پایین هم دچار تغییر می‌شود که مقدار آن در هر حالت از حاصل ضرب

اطلاعات مربوط به گسل مرجع در این جدول‌ها به صورت پُررنگ نوشته شده است. همچنین به منظور تعیین مکان حساسیت‌ها نسبت به موقعیت گسل مرجع، نتایج به صورت گرافیکی در شکل‌های ۳ تا ۹ رسم شده است، به نحوی که تغییرات شتاب گرانی ناشی از گسلش مرجع با رنگ سرخ و تغییرات شتاب گرانی ناشی از تغییرات پارامتر مورد تحلیل با رنگ آبی نمایش داده شده است. محدوده تصویر سطحی گسل در این شکل‌های بین خط سبز پُررنگ که نشان‌دهنده تصویر سطحی عمق قفل‌شدگی بالای گسل است و خط چین مشکی که نشان‌دهنده تصویر سطحی عمق قفل‌شدگی پایین گسل است قرار دارد. در ادامه به بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۳ اثر تک‌تک پارامترهای ورودی در تغییرات

هم‌لرزه شتاب گرانی

ابتدا تغییرات را در پارامتر طول گسل اعمال کردیم. مطابق شکل‌های ۳- الف تا ۳- ج تغییرات شتاب گرانی از گسلش مرجع نسبت به تغییر در پارامتر طول گسل بسیار کم است. میزان حساسیت در حالت کششی و امتدادلغز در محل تصویر سطحی گسل، نزدیک به عمق قفل‌شدگی بالا بیشتر از حالت شیب‌لغز است. مطابق نتایج عددی مدل‌سازی که در جدول ۲ آمده است بازه تغییرات شتاب گرانی در حالت کششی بیشینه و در حالت امتدادلغز کمینه است. در حالت کلی با بیشتر شدن طول گسل تغییرات کمی در نتایج مدل‌سازی نسبت به گسلش مرجع مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده استفاده از این مدل برای تعیین طول گسل با استفاده از تغییرات شتاب گرانی در منطقه وقوع زمین‌لرزه توصیه نمی‌شود.

پارامتر بعدی که آن را بررسی می‌کنیم، عرض گسل است. متناسب با تغییر در عرض گسل، عمق قفل‌شدگی پایین گسل هم دچار تغییر می‌شود که از حاصل ضرب

عرض گسل در سینوس زاویه شیب انتخابی گسل به اضافه عمق قفل شدگی بالا به دست می آید. جدول ۵ اثر تغییر زاویه شیب گسل در مدل سازی را نشان می دهد. مطابق نتایج حاصل، بازه تغییرات شتاب گرانی در حالت شیب لغز بیشینه و در حالت امتداد لغز کمینه است. مطابق شکل های ۶- الف تا ۶- ج در گسلش امتداد لغز میزان حساسیت مدل روی تصویر سطحی گسل بیشتر از طرفین آن است. در گسلش شیب لغز میزان حساسیت روی تصویر سطحی گسل و خارج از تصویر سطحی از سمت عمق قفل شدگی بالا بیشتر از آن سوی عمق قفل شدگی پایین است. در گسلش کششی نیز میزان حساسیت روی تصویر سطحی گسل و خارج از تصویر سطحی از سمت عمق قفل شدگی پایین بیشتر از آن سوی عمق قفل شدگی بالا است. مقایسه شکل ۵- الف و ۶- الف نشان می دهد که نوساناتی در میزان حساسیت گسلش امتداد لغز به دو پارامتر عمق قفل شدگی بالا و شیب گسل دیده می شود، به نحوی که نمی توان دقیقاً مشخص کرد که گسلش امتداد لغز به کدام یک از این دو پارامتر حساس تر است. همچنین مقایسه شکل های ۵- ب و ۶- ب نشان می دهد که حساسیت مدل به عمق قفل شدگی بالا در گسلش شیب لغز در بالای سطح گسیختگی گسل بیشتر از حساسیت این مدل به شیب گسل است؛ از طرفی حساسیت مدل به شیب گسل در گسلش شیب لغز خارج از تصویر سطحی گسیختگی از طرف عمق قفل شدگی بالا بیشتر از حساسیت این مدل به عمق قفل شدگی بالا است. مقایسه شکل های ۵- ج و ۶- ج نیز نشان می دهد که حساسیت مدل به شیب گسل در گسلش کششی در هر نقطه ای بیشتر از حساسیت مدل به عمق قفل شدگی بالا است.

حال به سراغ تغییر در پارامتر نابر جایی گسل می رویم. مقدار نابر جایی را برای هر کدام از حالت های امتداد لغز، شیب لغز و کششی به طور مجزا تغییر می دهیم. مطابق نتایج عددی آورده شده در جدول ۶ با افزایش مقدار نابر جایی،

بازه تغییرات شتاب گرانی در سطح زمین زیاد می شود. همچنین بازه تغییرات در حالت شیب لغز بیشینه و در حالت امتداد لغز کمینه است. اختلاف بین تغییرات شتاب گرانی های مدل سازی شده نسبت به گسل مرجع در این حالت به بیشترین مقدار می رسد. مطابق شکل های ۷- الف تا ۷- ج حساسیت مدل به پارامتر نابر جایی روی تصویر سطحی گسل و طرفین آن قابل مشاهده، و روی تصویر سطحی گسل به مراتب بیشتر از طرفین آن است. میزان اختلاف بین تغییرات شتاب گرانی های مدل سازی شده نسبت به گسل مرجع در هر کدام از حالت های گسلش از سایر پارامترها به مراتب بیشتر و محسوس تر است و مدل بیشترین حساسیت را به این پارامتر نشان می دهد.

بعد به سراغ تغییر در پارامتر چگالی نیم فضا می رویم. مطابق جدول ۷ با افزایش چگالی نیم فضای کشسان دامنه تغییرات شتاب گرانی کاهش می یابد. مطابق شکل های ۸- الف تا ۸- ج حساسیت کم مدل به چگالی نیم فضای کشسان مشاهده می شود. حساسیت کم مدل به چگالی نیم فضا روی تصویر سطحی هر سه نوع گسلش دیده می شود. از طرفی میزان حساسیت روی تصویر سطحی گسل بیشتر از طرفین آن است.

در خاتمه مدل را برای دو مقدار ضرایب لامه در حالت جامد پواسون $\lambda = \mu$ اجرا می کنیم. مطابق جدول ۸ و شکل های ۹- الف تا ۹- ج با تغییر ضرایب لامه تغییری در خروجی مدل نسبت به گسل مرجع مشاهده نمی شود، یعنی مدل هیچ حساسیتی به این پارامتر نشان نمی دهد. در نتیجه تعیین این ضرایب با استفاده از این مدل در حالت جامد پواسون در هیچ نوع گسلشی امکان پذیر نیست.

در حالت کلی با توجه به محاسبات و تحلیل صورت گرفته ملاحظه می شود که بیشترین حساسیت و تغییرات شتاب گرانی از گسلش مرجع، نسبت به پارامتر نابر جایی و کمترین آن نسبت به طول گسل است. همچنین

تغییرات عمده شتاب گرانی در اثر زمین‌لرزه، در محدوده ابعاد گسل است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که دامنه تغییرات شتاب گرانی در گسلش امتدادلغز کمتر از گسلش شیب‌لغز یا کششی است.

بیشترین حساسیت و تغییر در شتاب گرانی نسبت به پارامتر ناهمبندی و کمترین آن نسبت به طول گسل است. همچنین این مدل هیچ حساسیتی به ضرایب لامه نیم‌فضا در حالت جامد پواسون نشان نمی‌دهد.

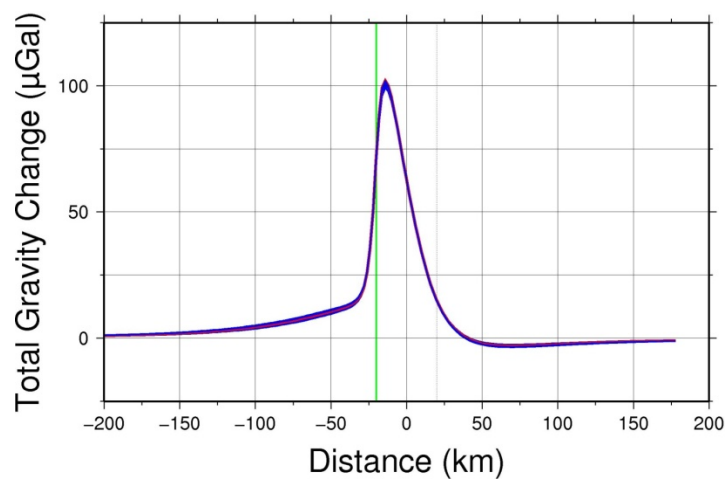
براساس نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در مورد همه پارامترها تصویر سطحی صفحه گسلش واقع در یک انتهای گسل در حالت امتدادلغز و وسط صفحه گسلش در حالت شیب‌لغز و کششی، حساس‌ترین مکان‌ها برای پارامترهای ورودی مدل هستند. این مکان‌ها برای تعیین پارامترهایی که مدل به آنها حساسیت دارد با استفاده از مدل‌سازی و حل مسئله معکوس توصیه می‌شود.

با توجه به احداث شبکه چندمنظوره ژئودزی فیزیکی و ژئودینامیک ایران که اهداف گوناگونی را دنبال می‌کند، حل مسئله معکوس یعنی تعیین پارامترهای گسلش زمین‌لرزه‌ها به‌ویژه زاویه شیب و عمق قفل‌شدگی بالا در محدوده احداثی این شبکه که کل ایران را دربرمی‌گیرد، به‌منزله یک نتیجه کاربردی مهم این تحقیق پیشنهاد می‌شود.

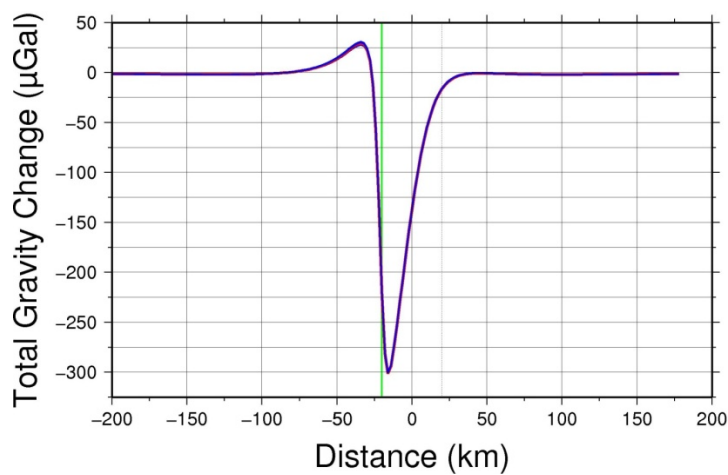
این مدل هیچ حساسیتی به ضرایب لامه نیم‌فضا در حالت جامد پواسون نشان نمی‌دهد. حساسیت مدل به تغییر در پارامترهای هندسی گسلش و پارامترهای فیزیکی نیم‌فضای کشسان مطابق جدول ۹ از بالا به پایین کاهش می‌یابد.

۴ نتیجه‌گیری

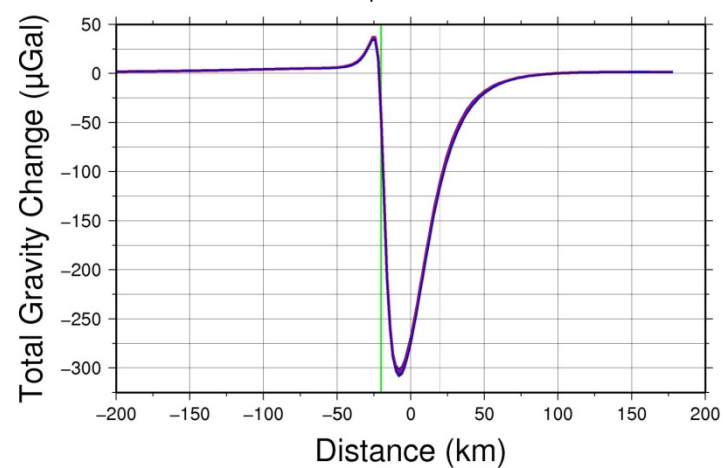
تغییرات مکانی فرایند تغییرات شتاب گرانی مرتبط با زمین‌لرزه تابع چندین پارامتر است، تحلیل حساسیت در مورد تک‌تک این پارامترها عملی است. برخی از این پارامترها با دقتی کمتر از بقیه با روش‌های دیگر تعیین می‌شوند و لذا تحلیل حساسیت روی این پارامترها اهمیت بیشتری دارد. از جمله این پارامترها می‌توان به زاویه شیب صفحه گسل و عمق قفل‌شدگی بالای گسل اشاره کرد. با توجه به حالات متنوعی که در انتخاب مشخصات هندسی گسلش‌های مرجع و مشخصات فیزیکی محیط مرجع وجود دارد پیشنهاد می‌شود که انتخاب مقدار برای آنها با توجه به مشخصات هندسی و فیزیکی محل مورد بررسی و با در نظر گرفتن مقادیر تقریبی و کم‌دقت حاصل از روش‌های غیرژئودتیکی برای پارامترهای ورودی و تغییر آنها در محدوده خطای برآورد روش‌های کم‌دقت صورت گیرد.



(الف)

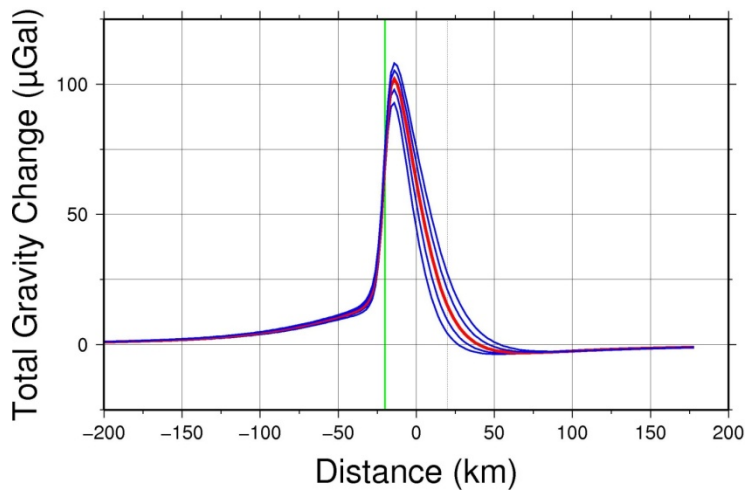


(ب)

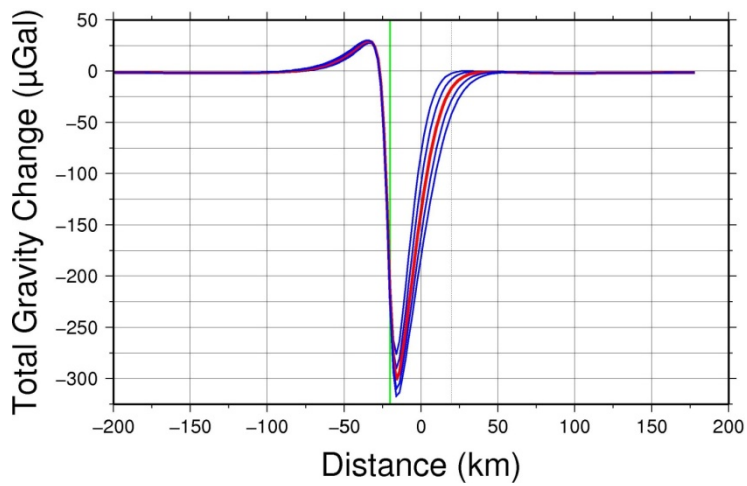


(ج)

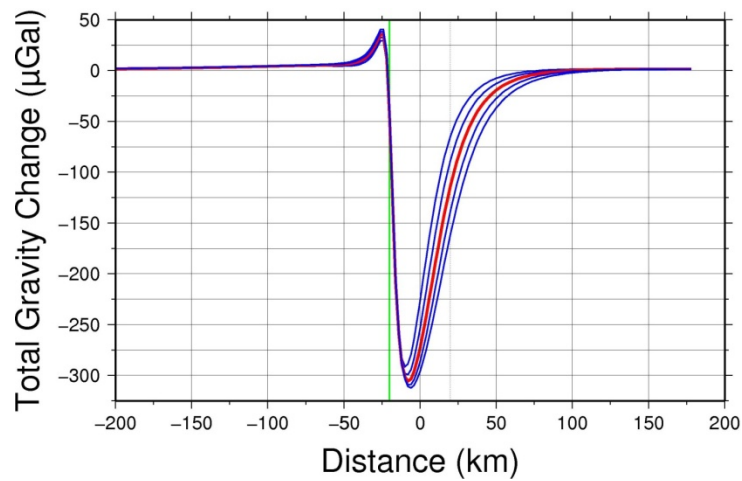
شکل ۳. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در پارامتر طول گسل در حالت کلی در هر سه حالت گسلش (الف) امتدادلغز، (ب) شیب‌لغز و (ج) کششی، حساسیت مدل به پارامتر طول گسل بسیار کم است.



(الف)

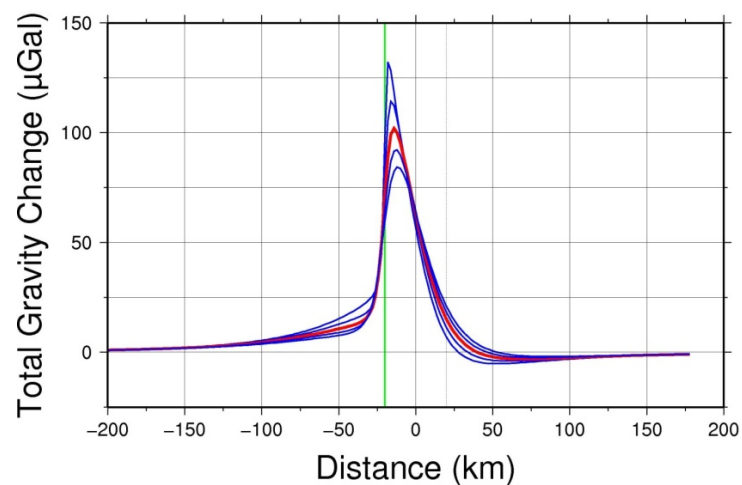


(ب)

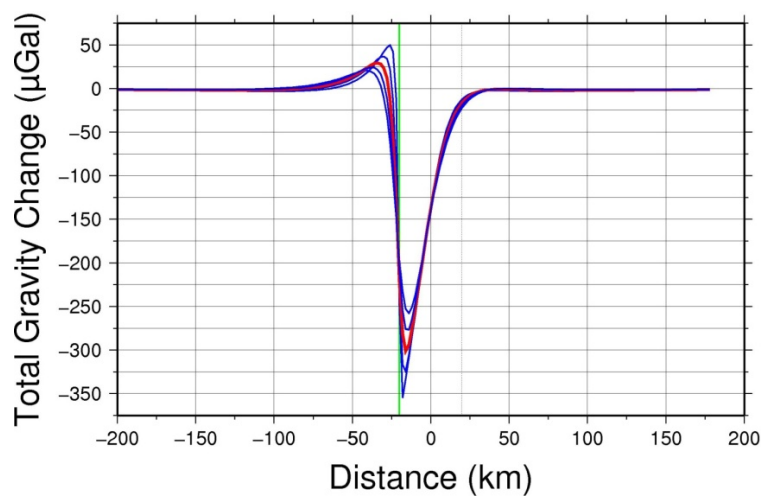


(ج)

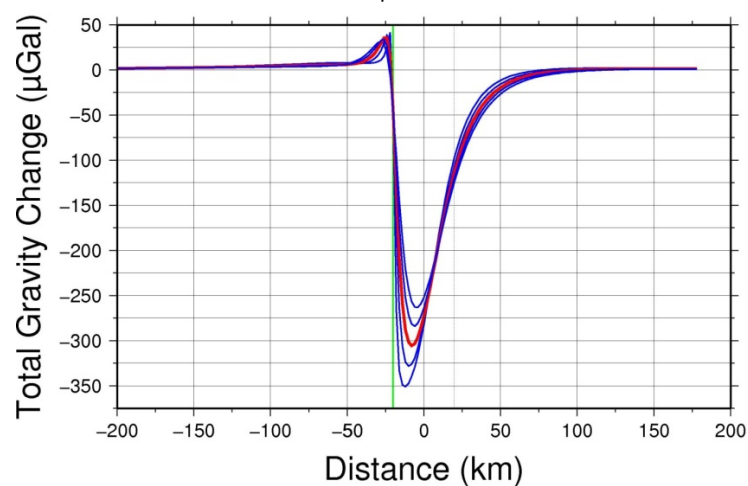
شکل ۴. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در پارامتر عرض گسل، میزان تغییرات در شتاب گرانی نسبت به گسل مرجع کم، و در هر سه حالت گسلش تقریباً یکسان است ولی گستره مکانی تغییرات شتاب گرانی در این حالت بیشتر و شامل تصویر سطحی و آن‌سوی عمق قفل‌شدگی پایین است، (الف) گسلش امتدادلغز، (ب) گسلش شیب‌لغز، (ج) گسلش کششی.



(الف)

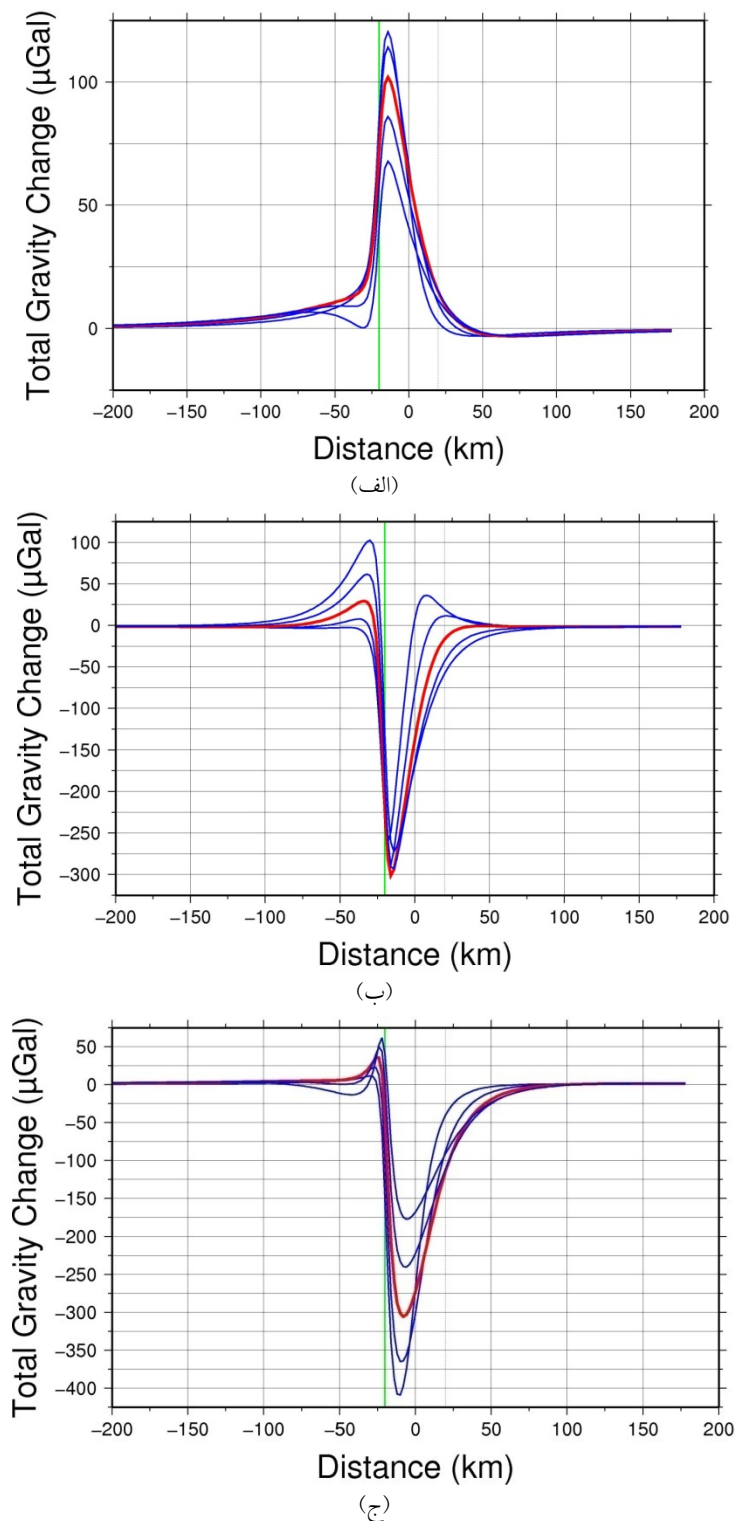


(ب)

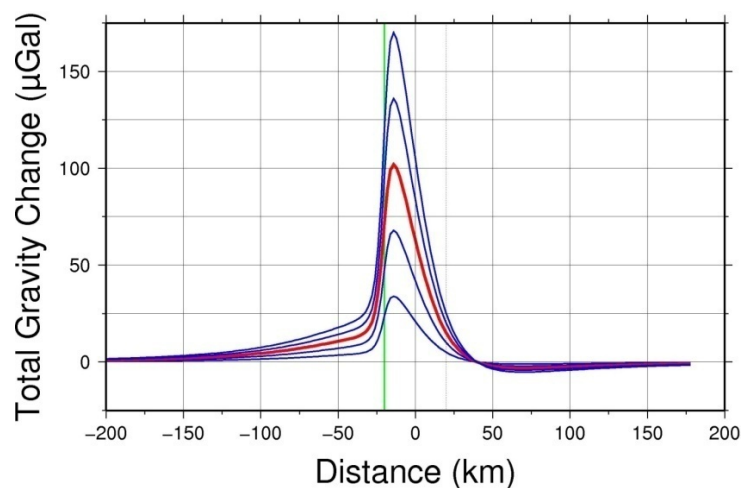


(ج)

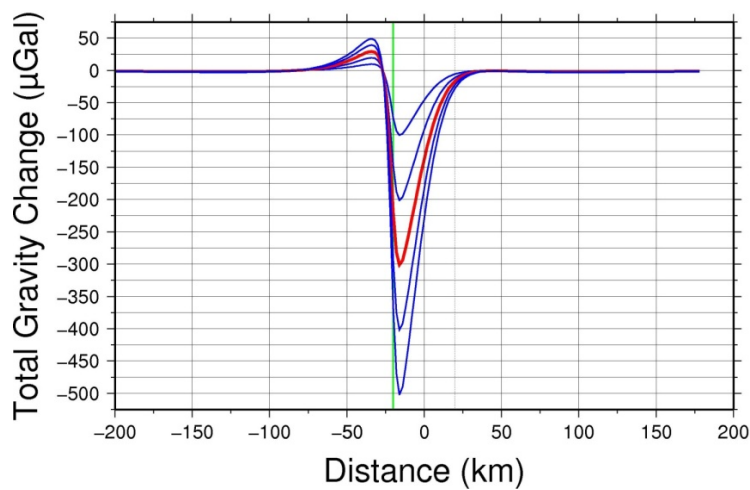
شکل ۵. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در پارامتر عمق قفل‌شدگی بالای گسل. حساسیت مدل روی تصویر سطحی هر سه نوع گسلش (الف) گسلش امتدادلغز، (ب) گسلش شیب‌لغز، (ج) گسلش کششی، نزدیک تصویر سطحی عمق قفل‌شدگی بالا بیشتر از طرفین تصویر سطحی گسلش است.



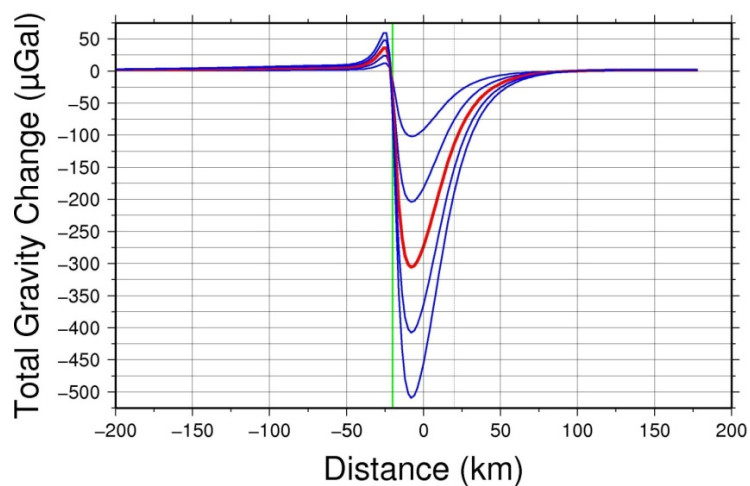
شکل ۶. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در پارامتر شیب گسل. (الف) در گسلش امتداد لغز میزان حساسیت مدل روی تصویر سطحی گسل بیشتر از طرفین آن است، (ب) در گسلش شیب لغز میزان حساسیت مدل روی تصویر سطحی گسل و خارج از تصویر سطحی از سمت عمق قفل‌شدگی بالا بیشتر از آن‌سوی عمق قفل‌شدگی پایین است، (ج) در گسلش کششی میزان حساسیت مدل روی تصویر سطحی گسل و خارج از تصویر سطحی از سمت عمق قفل‌شدگی پایین بیشتر از آن‌سوی عمق قفل‌شدگی بالا است.



(الف)

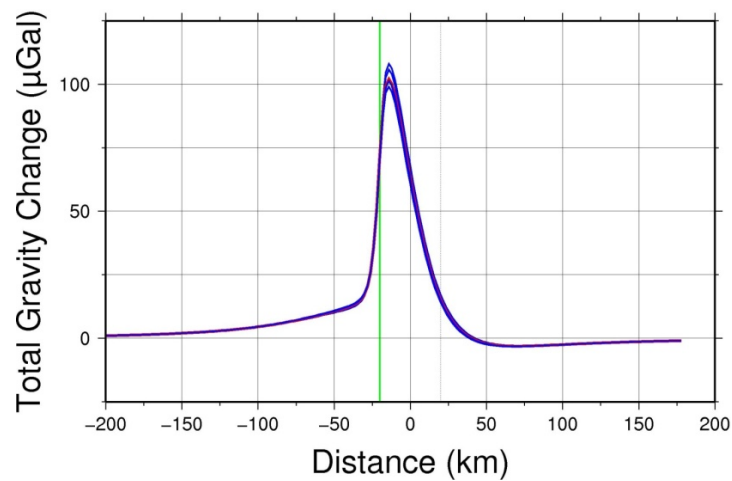


(ب)

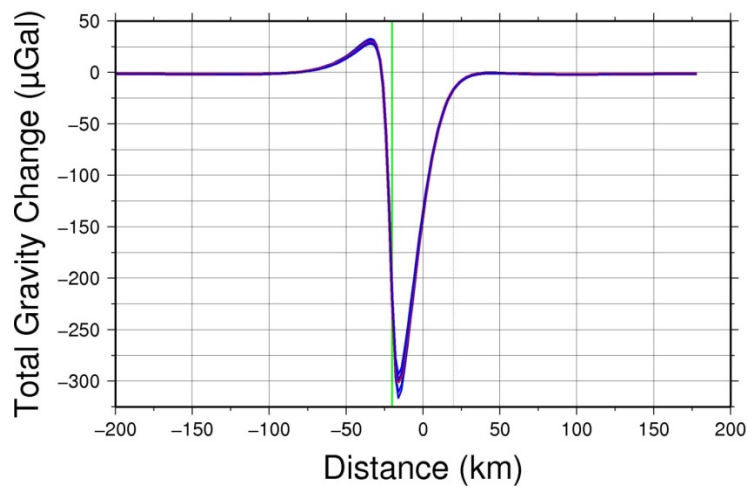


(ج)

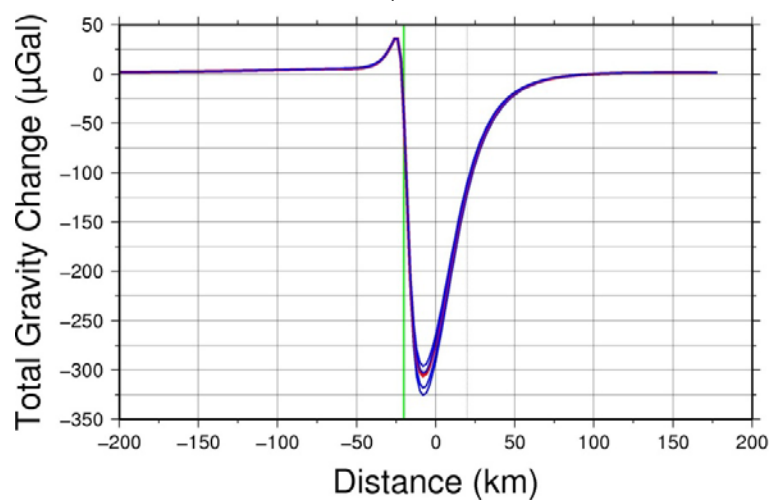
شکل ۷. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در پارامتر نابرجایی گسل، در هر سه حالت گسلش (الف) گسلش امتدادلغز، (ب) گسلش شیب‌لغز، (ج) گسلش کششی. حساسیت مدل به پارامتر نابرجایی روی تصویر سطحی گسل و طرفین آن قابل مشاهده و روی تصویر سطحی گسل به‌مراتب بیشتر از طرفین آن است. علاوه‌براین میزان حساسیت مدل به پارامتر نابرجایی از سایر پارامترها به‌مراتب بیشتر و محسوس‌تر است.



(الف)

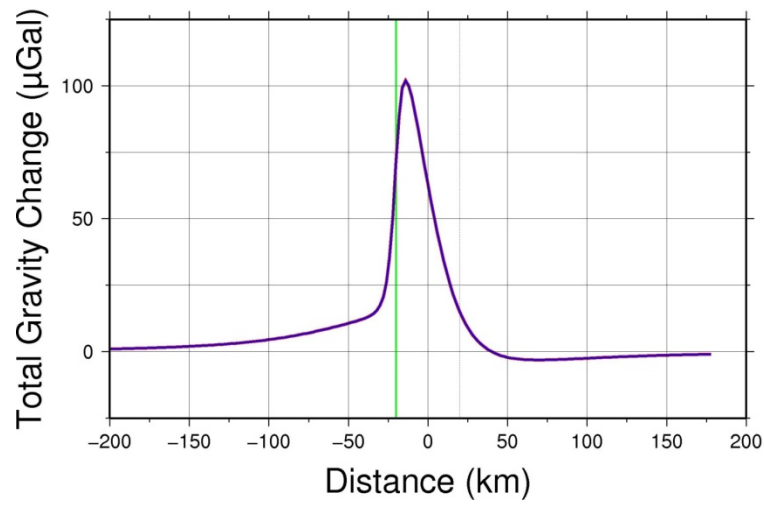


(ب)

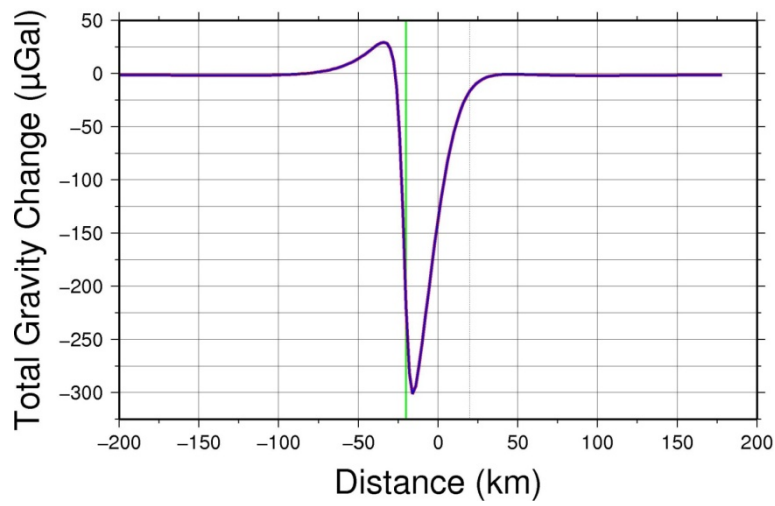


(ج)

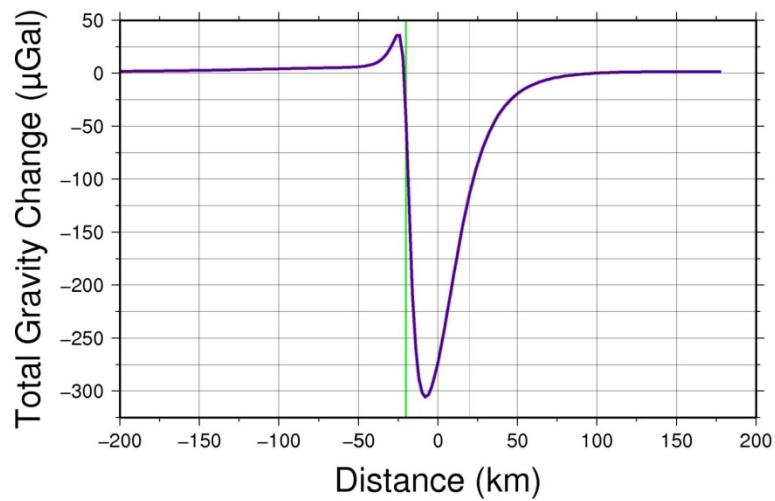
شکل ۸. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در پارامتر چگالی نیم‌فضای کشسان، در هر سه حالت (الف) گسلش امتداد لغز، (ب) گسلش شیب‌لغز، (ج) گسلش کششی، مدل حساسیت کمی به این پارامتر نشان می‌دهد. از طرفی میزان حساسیت روی تصویر سطحی هر سه نوع گسلش بیشتر از طرفین آن است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در ضرایب لامه نیم‌فضای کشسان، در هر سه حالت (الف) گسلش امتداد لغز، (ب) گسلش شیب‌لغز، (ج) گسلش کششی، مدل هیچ حساسیتی به ضرایب لامه نیم‌فضای کشسان نشان نمی‌دهد.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای ورودی هندسی و فیزیکی مورد استفاده در تحلیل حساسیت (مشخصات مربوط به گسلش مرجع به صورت پُررنگ نشان داده است).

چگالی نیم‌فضای کشسان (kg/m ³)	ضرایب لامه نیم‌فضای کشسان (GPa)	عمق قفل‌شدگی (km)	عرض (km)	طول (km)	شیب (deg.)	لغزش یا نابرجایی (m)
۲۴۰۰	۲۰	۲	۳۰	۷۰	۳۰	۱
۲۵۰۰	۳۰	۴	۳۵	۷۵	۴۰	۲
۲۶۷۰	۴۰	۶	۴۰	۸۰	۵۰	۳
۲۷۰۰	۵۰	۸	۴۵	۸۵	۶۰	۴
۲۸۰۰	۶۰	۱۰	۵۰	۹۰	۷۰	۵

جدول ۲. نتایج حاصل از اعمال تغییرات در طول گسل، ستون اول نشان‌دهنده طول گسل برحسب کیلومتر و سه ستون بعد نشان‌دهنده دامنه تغییرات سطحی شتاب گرانی در سه حالت گسلش برحسب میکروگال است. بازه تغییرات شتاب گرانی در حالت کششی بیشینه و در حالت امتدادلغز کمینه است.

طول گسل (km)	دامنه تغییرات سطحی شتاب گرانی برحسب μGal		
	کششی	شیب‌لغز	امتدادلغز
۷۰	-۳۰۱/۵۴ ~ ۳۷/۴۱	-۳۰۱/۹۲ ~ ۲۷/۷۳	-۱۰۰/۴۶ ~ ۱۰۰/۴۶
۷۵	-۳۰۳/۶۶ ~ ۳۶/۵۰	-۳۰۱/۶۴ ~ ۲۸/۶۰	-۱۰۱/۵۴ ~ ۱۰۱/۵۴
۸۰	-۳۰۵/۵۵ ~ ۳۵/۶۰	-۳۰۱/۲۲ ~ ۲۹/۴۲	-۱۰۲/۰۲ ~ ۱۰۲/۰۲
۸۵	-۳۰۷/۲۵ ~ ۳۴/۷۶	-۳۰۰/۷۲ ~ ۳۰/۲۱	-۱۰۲/۵۰ ~ ۱۰۲/۵۰
۹۰	-۳۰۸/۸۰ ~ ۳۳/۹۶	-۳۰۰/۱۵ ~ ۳۰/۹۷	-۱۰۲/۹۸ ~ ۱۰۲/۹۸

جدول ۳. نتایج حاصل از اعمال تغییرات در عرض گسل، ستون اول نشان‌دهنده عرض گسل برحسب کیلومتر و سه ستون بعد نشان‌دهنده دامنه تغییرات سطحی شتاب گرانی در سه حالت گسلش برحسب میکروگال است. بازه تغییرات شتاب گرانی در حالت کششی بیشینه و در حالت امتدادلغز کمینه است، همچنین با افزایش عرض گسلش بازه تغییرات شتاب گرانی بیشتر می‌شود.

عرض گسل (km)	دامنه تغییرات سطحی شتاب گرانی برحسب μGal		
	کششی	شیب‌لغز	امتدادلغز
۳۰	-۲۹۱/۲۳ ~ ۲۹/۴۵	-۲۷۶/۳۹ ~ ۲۷/۴۳	-۹۲/۸۹ ~ ۹۲/۸۹
۳۵	-۲۹۹/۴۱ ~ ۳۲/۶۷	-۲۹۰/۲۹ ~ ۲۸/۶۱	-۹۷/۹۶ ~ ۹۷/۹۶
۴۰	-۳۰۵/۵۵ ~ ۳۵/۶۰	-۳۰۱/۲۲ ~ ۲۹/۴۲	-۱۰۲/۰۲ ~ ۱۰۲/۰۲
۴۵	-۳۰۹/۰۳ ~ ۳۸/۲۷	-۳۱۰/۰۲ ~ ۲۹/۹۶	-۱۰۵/۳۳ ~ ۱۰۵/۳۳
۵۰	-۳۱۲/۲۸ ~ ۴۰/۶۷	-۳۱۷/۲۲ ~ ۳۰/۳۱	-۱۰۸/۰۸ ~ ۱۰۸/۰۸

جدول ۴. نتایج حاصل از اعمال تغییرات در عمق قفل‌شدگی بالای گسل، ستون اول نشان‌دهنده عمق قفل‌شدگی بالای گسل برحسب کیلومتر و سه ستون بعد نشان‌دهنده دامنه تغییرات سطحی شتاب گرانی در سه حالت گسلش برحسب میکروگال است. با افزایش عمق قفل‌شدگی بازه تغییرات شتاب گرانی در سطح زمین کم می‌شود. بازه تغییرات شتاب گرانی در حالت کششی بیشینه و در حالت امتدادلغز کمینه است.

عمق قفل‌شدگی (km)	دامنه تغییرات سطحی شتاب گرانی برحسب μGal		
	امتدادلغز	شیب‌لغز	کششی
۲	-۱۳۲/۲۰ ~ ۱۳۲/۲۰	-۳۵۵/۲۲ ~ ۴۹/۶۶	-۳۵۰/۹۲ ~ ۴۳/۸۹
۴	-۱۱۴/۲۴ ~ ۱۱۴/۲۴	-۳۲۴/۳۲ ~ ۳۶/۹۶	-۳۲۸/۳۲ ~ ۳۸/۸۴
۶	-۱۰۲/۰۲ ~ ۱۰۲/۰۲	-۳۰۱/۲۲ ~ ۲۹/۴۲	-۳۰۵/۵۵ ~ ۳۵/۶۰
۸	-۹۲/۲۰ ~ ۹۲/۲۰	-۲۷۶/۶۰ ~ ۲۴/۳۱	-۲۸۳/۸۲ ~ ۳۴/۰۸
۱۰	-۸۴/۳۵ ~ ۸۴/۳۵	-۲۵۷/۵۶ ~ ۲۰/۵۶	-۲۶۳/۲۶ ~ ۳۱/۷۳

جدول ۵. نتایج حاصل از اعمال تغییرات در شیب گسل، ستون اول نشان‌دهنده شیب گسل برحسب درجه و سه ستون بعد نشان‌دهنده دامنه تغییرات سطحی شتاب گرانی در سه حالت گسلش برحسب میکروگال است. بازه تغییرات شتاب گرانی در حالت کششی بیشینه و در حالت امتدادلغز کمینه است.

شیب گسل (deg.)	دامنه تغییرات سطحی شتاب گرانی برحسب μGal		
	امتدادلغز	شیب‌لغز	کششی
۳۰	-۱۲۰/۴۳ ~ ۱۲۰/۴۳	-۲۶۰/۶۸ ~ ۳۶/۳۲	-۴۰۹/۰۹ ~ ۱۱/۵۴
۴۰	-۱۱۴/۱۹ ~ ۱۱۴/۱۹	-۲۸۸/۵۰ ~ ۱۱/۴۷	-۳۶۴/۷۴ ~ ۲۲/۶۵
۵۰	-۱۰۲/۰۲ ~ ۱۰۲/۰۲	-۳۰۱/۲۲ ~ ۲۹/۴۲	-۳۰۵/۵۵ ~ ۳۵/۶۰
۶۰	-۸۶/۰۴ ~ ۸۶/۰۴	-۲۹۳/۰۸ ~ ۶۱/۷۶	-۲۴۰/۲۶ ~ ۴۹/۶۵
۷۰	-۶۷/۷۹ ~ ۶۷/۷۹	-۲۷۲/۲۴ ~ ۱۰۲/۴۶	-۱۷۷/۳۱ ~ ۶۱/۷۲

جدول ۶. نتایج حاصل از اعمال تغییرات در نایرجایی گسل، ستون اول نشان‌دهنده لغزش یا نایرجایی گسل برحسب متر و سه ستون بعد نشان‌دهنده دامنه تغییرات سطحی شتاب گرانی در سه حالت گسلش برحسب میکروگال است. با افزایش مقدار نایرجایی، بازه تغییرات شتاب گرانی در سطح زمین زیاد می‌شود. همچنین بازه تغییرات در حالت کششی بیشینه و در حالت امتدادلغز کمینه است.

لغزش یا نایرجایی (m)	دامنه تغییرات سطحی شتاب گرانی برحسب μGal		
	امتدادلغز	شیب‌لغز	کششی
۱	۳۴/۰۱ ~ ۳۴/۰۱	-۱۰۰/۴۱ ~ ۰۹/۸۱	-۱۰۱/۸۵ ~ ۱۱/۸۶
۲	-۶۸/۰۱ ~ ۶۸/۰۱	-۲۰۰/۸۲ ~ ۱۹/۶۲	-۲۰۳/۷۰ ~ ۲۳/۷۳
۳	-۱۰۲/۰۲ ~ ۱۰۲/۰۲	-۳۰۱/۲۲ ~ ۲۹/۴۲	-۳۰۵/۵۵ ~ ۳۵/۶۰
۴	-۱۳۶/۰۲ ~ ۱۳۶/۰۲	-۴۰۱/۶۳ ~ ۳۹/۲۳	-۴۰۷/۴۰ ~ ۴۷/۴۶
۵	-۱۷۰/۰۳ ~ ۱۷۰/۰۳	-۵۰۲/۰۴ ~ ۴۹/۰۴	-۵۰۹/۲۵ ~ ۵۹/۳۳

جدول ۷. نتایج حاصل از اعمال تغییرات در چگالی نیم‌فضای کشسان، ستون اول نشان‌دهنده چگالی نیم‌فضای کشسان برحسب کیلوگرم بر مترمکعب و سه ستون بعد نشان‌دهنده دامنه تغییرات سطحی شتاب گرانی در سه حالت گسلش برحسب میکروگال است. با افزایش چگالی نیم‌فضای کشسان دامنه تغییرات شتاب گرانی کاهش می‌یابد.

چگالی نیم‌فضای کشسان (kg/m ³)	دامنه تغییرات سطحی شتاب گرانی برحسب μGal		
	امتدادلغز	شیب‌لغز	کششی
۲۴۰۰	-۱۰۸/۰۷ ~ ۱۰۸/۰۷	-۳۱۶/۶۵ ~ ۳۲/۷۰	-۳۲۵/۳۹ ~ ۳۵/۵۴
۲۵۰۰	-۱۰۵/۸۳ ~ ۱۰۵/۸۳	-۳۱۰/۹۴ ~ ۳۱/۴۸	-۳۱۸/۰۴ ~ ۳۵/۵۶
۲۶۷۰	-۱۰۲/۰۲ ~ ۱۰۲/۰۲	-۳۰۱/۲۲ ~ ۲۹/۴۲	-۳۰۵/۵۵ ~ ۳۵/۶۰
۲۷۰۰	-۱۰۱/۳۴ ~ ۱۰۱/۳۴	-۲۹۹/۵۱ ~ ۲۹/۰۶	-۳۰۳/۳۵ ~ ۳۵/۶۱
۲۸۰۰	-۹۹/۱۰ ~ ۹۹/۱۰	-۲۹۳/۸۰ ~ ۲۷/۸۵	-۲۹۶/۰۰ ~ ۳۵/۶۳

جدول ۸. نتایج حاصل از اعمال تغییرات در ضرایب لامه نیم‌فضای کشسان، ستون اول نشان‌دهنده ضرایب لامه نیم‌فضای کشسان برحسب کیلوگرم بر مترمکعب و سه ستون بعد نشان‌دهنده دامنه تغییرات سطحی شتاب گرانی در سه حالت گسلش برحسب میکروگال است. هیچ تغییری در خروجی مدل نسبت به گسلش مرجع مشاهده نمی‌شود.

ضرایب لامه نیم‌فضای کشسان (GPa)	دامنه تغییرات سطحی شتاب گرانی برحسب μGal		
	امتدادلغز	شیب‌لغز	کششی
۲۰	-۱۰۲/۰۲ ~ ۱۰۲/۰۲	-۳۰۱/۲۲ ~ ۲۹/۴۲	-۳۰۵/۵۵ ~ ۳۵/۶۰
۳۰	-۱۰۲/۰۲ ~ ۱۰۲/۰۲	-۳۰۱/۲۲ ~ ۲۹/۴۲	-۳۰۵/۵۵ ~ ۳۵/۶۰
۴۰	-۱۰۲/۰۲ ~ ۱۰۲/۰۲	-۳۰۱/۲۲ ~ ۲۹/۴۲	-۳۰۵/۵۵ ~ ۳۵/۶۰
۵۰	-۱۰۲/۰۲ ~ ۱۰۲/۰۲	-۳۰۱/۲۲ ~ ۲۹/۴۲	-۳۰۵/۵۵ ~ ۳۵/۶۰
۶۰	-۱۰۲/۰۲ ~ ۱۰۲/۰۲	-۳۰۱/۲۲ ~ ۲۹/۴۲	-۳۰۵/۵۵ ~ ۳۵/۶۰

جدول ۹. حساسیت مدل اکوبو (۱۹۹۲) به تغییر در پارامترهای هندسی گسلش و پارامترهای فیزیکی نیم‌فضای کشسان، میزان حساسیت از بالا به پایین کاهش می‌یابد.

پارامتر	ردیف
لغزش یا نابرجایی گسل	۱
شیب گسل	۲
عمق قفل‌شدگی بالای گسل	۳
عرض گسل	۴
چگالی نیم‌فضای کشسان	۵
طول گسل	۶

- منابع
- راست‌بود، ا.، وثوقی، ب. و کاردر، ف.، ۱۳۹۰، مدل‌سازی تغییرات هم‌لرزه شتاب گرانی در اثر زمین‌لرزه، مطالعه موردی: زمین‌لرزه (۲۰۰۳/۱۲/۲۶) $M_w = 6.5$ بم: هجدهمین همایش و نمایشگاه ملی ژئوماتیک ۹۰، سازمان نقشه‌برداری کشور.
- نجفی علمداری، م. و راست‌بود، ا.، ۱۳۸۶، درس‌هایی از مبحث ژئودزی فیزیکی: سازمان نقشه‌برداری کشور، ۲۷۷.
- نوری، س.، وثوقی، ب. و ابوالقاسم، ا. م.، ۱۳۸۸، مدل‌سازی میدان جابه‌جایی هم‌لرزه یک گسل و تعیین حساسیت پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل به میدان جابه‌جایی آن: مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۵(۱)، ۵۹-۷۳.
- Chinnery, M. A., 1961, The deformation of ground around surface faults: *Bull. Seis. Soc. Am.*, **51**, 355-372.
- Fu, G., Sun, W., 2008, Surface coseismic gravity changes caused by dislocations in a 3-D heterogeneous Earth: *Geophys. J. Int.*, **172**, 479-503.
- Hwang, C., Wang, C. G., and Lee, L. H., 2002, Adjustment of relative gravity measurements using weighted and datum-free constraints: *Computers and Geosciences*, **28**(9), 1005-1015.
- Mase, G. T., and Mase, G. M., 1999, *Continuum mechanics for engineers*: CRC Press, 400.
- Nowroozi, A. A., 1985, Empirical relations between magnitudes and fault parameters for earthquakes in Iran: *Bull. Seis. Soc. Am.*, **75**, 1327-1338.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space: *Bull. Seis. Soc. Am.*, **75**, 1135-1154.
- Okubo, S., 1991, Potential and gravity changes raised by point dislocations: *Geophys. J. Int.*, **105**, 573-586.
- Okubo, S., Gravity and potential changes due to shear and tensile faults in a half-space, 1992: *J. Geophys. Res.*, **97**, B5, 7137-7144.
- Segall, P., 2010, *Earthquake and volcano deformation*: Stanford University, Princeton University Press, 458.
- Soldati, G., Piersanti, A., and Boschi, E., 1998, Global post-seismic gravity changes of a viscoelastic Earth: *J. Geophys. Res.*, **103**, B12, 29867-29885.
- Stein, S., and Wysession, M., 2003, *An introduction to seismology, earthquakes, and Earth structure*: Blackwell Publishing, 498.
- Sun, W., and Okubo, S., 1993, Surface potential and gravity changes due to internal dislocations in a spherical Earth - I. Theory for a point dislocation: *Geophys. J. Int.*, **114**(3), 569-592.
- Sun, W., and Okubo, S., 1998, Surface potential and gravity changes due to internal dislocations in a spherical Earth - II. Application to a finite fault: *Geophys. J. Int.*, **132**(1), 79-88.
- Wells, L., Donald and Coppersmith J. Kevin, August 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: *Bull. Seis. Soc. Am.*, **84**(4), 974-1002.