

## آنالیز حساسیت مدل تحلیلی اکوبو به پارامترهای گسل

فرزام فتح الله زاده<sup>۱</sup>، مهدی روفیان نایینی<sup>۲</sup>، بهزاد وثوقی<sup>۳</sup>، محمود محبی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
<sup>۴</sup> کارشناس ارشد، معاون سازمان جغرافیایی کشور

### چکیده :

در این مطالعه، به مدل سازی تحلیلی جاذبه و گرادیان جاذبه به کمک مدل تحلیلی اکوبو ۱۹۹۲ در یک نیم فضای الاستیک همگن ناشی از یک گسلش برای یک منبع مستطیلی با ابعاد و لغزش دلخواه می پردازیم. همچنین به آنالیز حساسیت این مدل تحلیلی به پارامترهای گسل پرداخته و تغییرات جاذبه و گرادیان جاذبه را در انواع مختلف گسل و مقادیر مختلف پارامترهای گسل بدست می آوریم. نتایج نشان می دهد که جاذبه و گرادیان جاذبه با تغییر نوع گسل (امتداد لغز یا تراستی) و تغییر مقادیر پارامترهای گسل (زاویه شیب) تغییر می کند. همچنین نتایج بدست آمده نشان می دهد که میزان تغییرات جاذبه و همین طور گرادیان جاذبه برای گسل تراستی نسبت به گسل امتداد لغز بیشتر است و در بین مولفه های تغییرات گرادیان جاذبه، مؤلفه  $T_{33}$  دارای بیشترین تغییرات گرادیان جاذبه می باشد.

واژه های کلیدی : مدل تحلیلی اکوبو، تغییرات جاذبه، تغییرات گرادیان جاذبه، آنالیز حساسیت



## ۱- مقدمه

هرساله پدیده زلزله هزاران مرگ و میر و میلیاردها دلار خسارت مالی در سرتاسر جهان به بار می‌آورد. این خسارات مالی و جانی در مناطقی مانند خطوط ساحلی که در آن‌ها تراکم جمعیت بالاست بیشتر نمایان می‌گردد. زلزله به‌عنوان یکی از مهمترین بلایای طبیعی همواره نه تنها در زندگی جوامع بشری تاثیرگذار بوده‌است بلکه گاهی باعث تغییرات در شرایط اقلیمی و بومی یک منطقه خواهد شد. لذا مطالعه‌ی آن به منظور کاهش خسارات و تلفات ناشی از آن، از دیرباز مورد توجه بوده است.

اغلب زمین‌لرزه‌ها در طول مناطقی که پوسته زمین دستخوش تغییر شکل می‌شود، روی می‌دهند. تغییرشکلی که در حالت کلی در نتیجه یک زلزله رخ می‌دهد در مناطقی که شکستگی سنگ‌ها باعث ایجاد گسل می‌شود، ایجاد می‌گردد. اغلب زمین‌لرزه‌های طبیعی در اثر لغزش ناگهانی در طول منطقه‌ای گسلی ایجاد می‌گردند. تئوری الاستیک بیان می‌کند که در اثر حرکت و لغزش گسل انرژی آزاد گردیده و زمین‌لرزه اتفاق می‌افتد. لذا مطالعه گسل‌های فعال امری حیاتی محسوب می‌شود. گسل‌ها شکستگی‌هایی در پوسته زمین همراه با تغییر مکان نسبی هستند که به موازات سطح گسل انجام گرفته‌اند و در طول آن‌ها تغییر شکل‌های قابل توجهی ایجاد شده است. بعضی از گسل‌ها فقط چند سانتی-متر طول دارند و جابجایی آنها در حدود سانتی‌متر است، در صورتی که گسل‌هایی هم با صدها کیلومتر جابجایی در حدود چند کیلومتر و حتی ده‌ها کیلومتر دیده می‌شوند.

پدیده زلزله ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی در مرز بین صفحات تکتونیکی است. صفحات تکتونیکی زمین همواره به آرامی در حال حرکت و جابجایی می‌باشند. معمولاً حرکت این صفحه‌ها در امتداد یکدیگر به صورت لغزشی حدود ۲۰۰ سال طول می‌کشد تا باعث حرکت ناگهانی و شدیدی شود که عامل بسیاری از زلزله‌ها همین حرکت ناگهانی می‌باشد [۱]. در حالی که این صفحه‌ها به آرامی در امتداد هم حرکت می‌کنند باعث ایجاد کشش در لایه‌های زیرین می‌شوند و بعد از گذشت مدت زمانی در حدود ۲۰۰ سال این لایه‌های زیرین به آستانه مقاومت کششی خود رسیده و ناگهان از هم گسیخته می‌شوند. این فعالیت‌های تکتونیکی منجر به رفتارهای مختلف مکانی و زمانی در پوسته زمین می‌شود. همچنین تغییر موقعیت و جابجایی این صفحات باعث تغییر در نحوه توزیع جرم درون زمین خواهد شد و متناسب با آن میدان ثقل زمین نیز تغییر می‌کند. در سال ۱۹۸۷ آقایان چاو و گراس نشان دادند که زلزله‌های بزرگ بر دوران زمین و همین‌طور بر ضرائب هارمونیک درجه پایین میدان ثقل زمین تاثیرگذار است [۲].

یکی از اساسی‌ترین و مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی جدید در ژئودزی، مدل‌سازی تحلیلی تغییر شکل‌های زمین در مقیاس‌های محلی و جهانی و نیز بررسی عوامل ایجادکننده تغییر شکل، و مطالعه روش‌های محاسباتی گوناگون به‌منظور تعیین جابجایی‌های پوسته زمین است. در این مدل‌ها، شتاب ثقل به‌عنوان ابزاری برای تعیین هندسه و ابعاد نابرجایی حاصل از زمین‌لرزه در منطقه وقوع زلزله در نظر گرفته می‌شود.

در این مقاله ابتدا به مدل‌سازی گسلی فرضی به کمک مدل تحلیلی اکوبو ۱۹۹۲ می‌پردازیم و سپس حساسیت این مدل را به پارامترهای مختلف گسل آنالیز کرده و متناسب با آن مولفه‌های جاذبه و تنسور گرادیان جاذبه را برای این گسل محاسبه خواهیم کرد.

## ۲- مدل‌سازی گسل بر مبنای مدل تحلیلی اکوبو

پدیده زمین‌لرزه با جابجایی و توزیع مجدد جرم همراه است لذا انتظار می‌رود که شتاب ثقل در اثر زمین‌لرزه تغییر کند. از جمله مدل‌های تحلیلی که تغییرات جاذبه ناشی از تغییر شکل را به دست می‌دهد مدل اکوبو<sup>۱</sup> (۱۹۹۱) و (۱۹۹۲)

<sup>۱</sup>Okubo



می‌باشد. اکوبو (۱۹۹۱) تغییرات پتانسیل جاذبه را در یک نیم‌فضای الاستیک همگن برای یک ناپیوستگی نقطه‌ای بدست آورد [۳]. اکوبو (۱۹۹۲) تئوری خود را به حالت منبع مستطیلی در نیم‌فضا برای یک گسل تعمیم داد [۴]. سپس در سال ۱۹۹۸ سولداتی<sup>۲</sup> روابط مدل اکوبو را برای یک گسل در نیم‌فضای ویسکوالاستیک تعمیم داد [۵]. در سال ۱۹۹۳ انحنای زمین در نظر گرفته شد و مدل‌سازی تغییرات شتاب ثقل در اثر ناهم‌جایی نقطه‌ای برای زمین کروی توسط سان و اکوبو<sup>۳</sup> مطرح شد و در سال ۱۹۹۸ به گسل مستطیلی شکل برای زمین کروی تعمیم داده شد و بعد از آن روش جدیدی برای شبیه‌سازی گسل امتدادلغز و شیب‌لغز در نیم‌فضای لایه لایه ارائه دادند [۶ و ۷]. سگال<sup>۴</sup> در سال ۲۰۱۰ یک جمع‌بندی از کل تحقیقات انجام شده را به عمل رساند [۸]. با این حال پیچیدگی‌های هندسی و تغییرات جانبی در لایه‌های پوسته، به خاطر محدودیت‌های موجود در مدل‌های تحلیلی نمی‌تواند بررسی شود. ما در این مقاله از مدل اکوبو (۱۹۹۲) استفاده می‌کنیم، البته در این مدل تغییرات جاذبه ناشی از گسل در یک نیم‌فضای هموزن و الاستیک مطرح شده که ما این روابط را برای گرادیان‌های جاذبه نیز بدست می‌آوریم.

تغییرات جاذبه در سطح آزاد  $x_3 = 0$  را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\Delta g(x_1, x_2) = \left\{ \rho G [U_1 S_g(\xi, \eta) + U_2 D_g(\xi, \eta) + U_3 T_g(\xi, \eta)] + \Delta \rho G U_3 C_g(\xi, \eta) \right\} \Big|_{x_3=0} - \beta \Delta h(x_1, x_2) \quad (1)$$

که در آن  $U_1$  و  $U_2$  و  $U_3$  جداولی حالت امتدادلغز، شیب‌لغز و کششی و  $\delta$  زاویه شیب گسل می‌باشد. ترم آخر رابطه فوق اثر هوای آزاد در تغییر ارتفاع سطح  $\Delta h$  را مشخص می‌کند.  $\beta = 0.309 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  گرادیان ثقل هوای آزاد است.  $(S_g, D_g, T_g, C_g)$  با اعمال اپراتور دیفرانسیلی  $\Gamma$  به صورت زیر بدست می‌آید:

$$(S_g, D_g, T_g, C_g) = \Gamma(S, D, T, C) \quad \Gamma = \left( -\frac{\partial}{\partial x_3} \quad -\frac{\partial q}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial q} \quad -\frac{\partial p}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \Big|_{x_3=0} \quad (2)$$

$$S_g(\xi, \eta) = -\frac{q \sin \delta}{R} + \frac{q^2 \cos \delta}{R(R + \eta)} \quad D_g(\xi, \eta) = 2I_2 \sin \delta - \frac{q\bar{d}}{R(R + \xi)} \quad (3)$$

$$T_g(\xi, \eta) = 2I_2 \cos \delta + \frac{q\bar{y}}{R(R + \xi)} + \frac{q\xi \cos \delta}{R(R + \xi)} \quad C_g(\xi, \eta) = 2I_2 \cos \delta - \sin \delta \cdot \log(R + \xi) \quad (4)$$

در روابط فوق:

$$\bar{y} = \eta \cos \delta + q \sin \delta \quad (5)$$

تغییر ارتفاع  $\Delta h$  با استفاده از روابط اکادا به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta h(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi} \left[ U_1 S_h(\xi, \eta) + U_2 D_h(\xi, \eta) + U_3 T_h(\xi, \eta) \right] \Big|_{x_3=0} \quad (6)$$

<sup>2</sup>Soldati

<sup>3</sup>Sun and Okubo

<sup>4</sup>Segall



که در آن:

$$S_h(\xi, \eta) = -\frac{\bar{d}q}{R(R+\eta)} - \frac{q \sin \delta}{R+\eta} - I_4 \sin \delta \quad D_h(\xi, \eta) = -\frac{\bar{d}q}{R(R+\eta)} - \sin \delta \cdot \tan^{-1}\left(\frac{\xi\eta}{qR}\right) + I_5 \sin \delta \cdot \cos \delta$$

$$I_4(\xi, \eta) = (1-2\nu) \left[ \log(R+\bar{d}) - \sin \delta \log(R+\eta) \right] \sec \delta \quad I_5(\xi, \eta) = 2(1-2\nu) I_1 \sec \delta \quad (7)$$

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

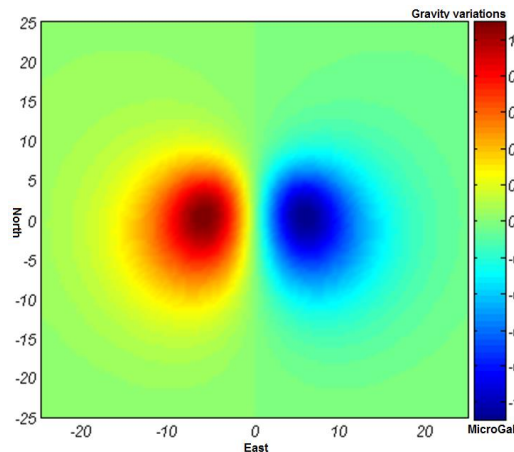
به همین ترتیب تغییرات گرادیان جاذبه در یک نقطه ثابت بیرون از نیم‌فضا ناشی از ناهم‌جایی در یک صفحه گسل مستطیل شکل با یک‌بار دیفرانسیل‌گیری از تغییرات جاذبه بدست می‌آید.

### ۳- نتایج عددی

در این بخش تغییرات جاذبه و گرادیان جاذبه برای گسل‌های مختلف با پارامتر زاویه شیب مختلف مدل شده است. در کلیه این مدل‌ها یک صفحه گسل مستطیلی شکل با طول  $L=10$  کیلومتر و عرض  $W=10$  کیلومتر استفاده شده است. حاشیه بالای صفحه گسل در عمق ۱ کیلومتر ثابت شده است. نسبت پواسون مقدار  $0.25$  فرض شده و چگالی سطح برابر  $2.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  مطابق با چگالی متوسط پوسته زمین فرض شده است.

در حالت اول زاویه شیب صفحه گسل را برابر  $30^\circ$  قرار داده‌ایم. تغییرات جاذبه و گرادیان جاذبه برای یک گسل امتدادلغز ( $U_1=5m, U_2=U_3=0$ ) بر روی این صفحه روی یک محدوده  $50km \times 50km$  روی سطح نیم‌فضا با نمونه‌برداری<sup>۵</sup> مکانی  $100m$  محاسبه شده است.

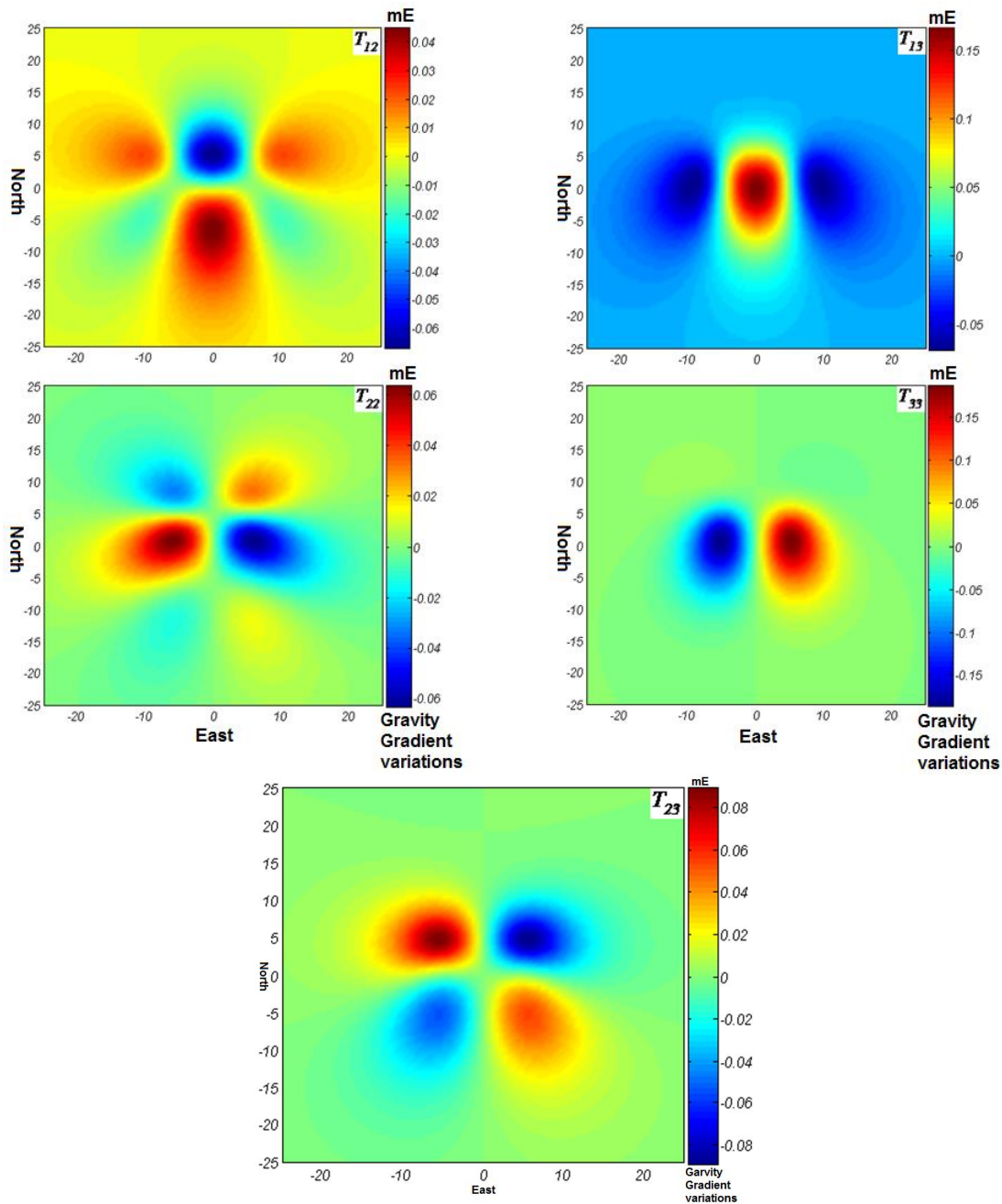
شکل (۱) تغییرات جاذبه مشخصه الگوهای مشابهی با تغییرات ارتفاعی آن‌ها را آشکار می‌کند.



شکل ۱: تغییرات جاذبه در واحد میکروگال برای یک گسل چپ‌گرد به کمک روش تحلیلی

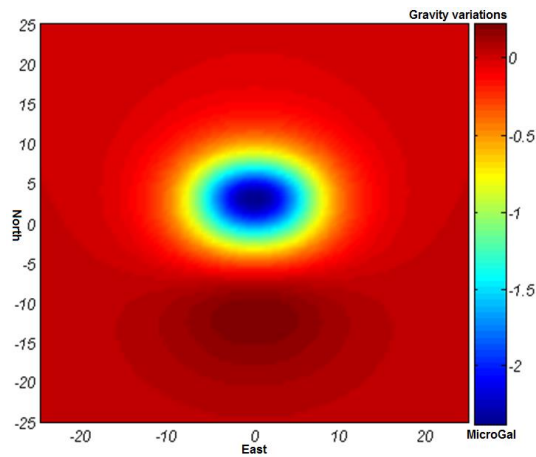
شکل (۲) تغییرات گرادیان جاذبه را برای همان گسل نشان می‌دهد.

<sup>5</sup>Sampling



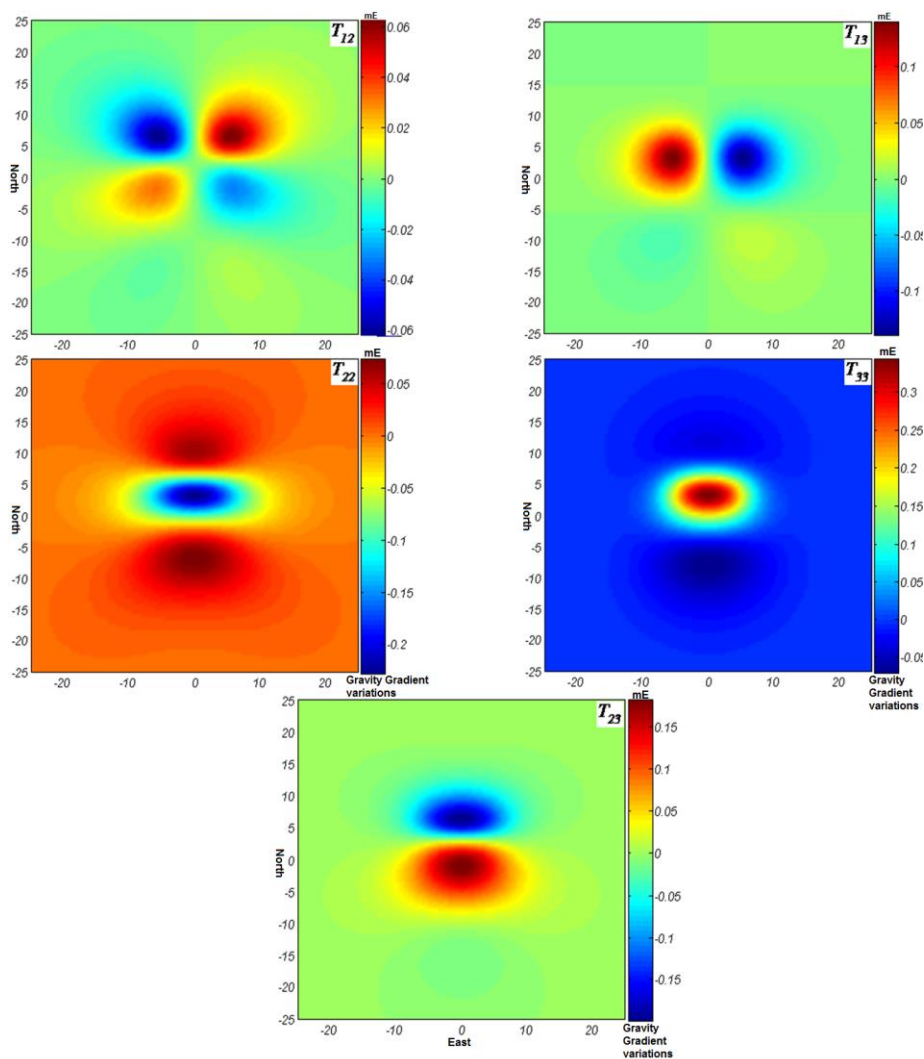
شکل ۲: مولفه‌های تغییرات گرادیان جاذبه در واحد میلی‌آتووش برای گسل چپ‌لغز به کمک مدل تحلیلی

در حالت دوم تغییرات جاذبه و گرادیان جاذبه را برای یک گسل تراستی ( $U_2 = 5m, U_1 = U_3 = 0$ ) بر روی همان صفحه گسل که در مرحله قبل استفاده شد، محاسبه می‌کنیم. همان‌طور که در شکل‌های زیر مشاهده می‌شود، تغییرات جاذبه محاسبه شده در این مرحله دامنه بزرگتری نسبت به حالت گسل امتدادلغز دارند در حالی که اندازه نابجایی نسبت به مرحله قبل تغییر نکرده است.



شکل ۳: تغییرات جاذبه در واحد میکروگال برای یک گسل تراستی به کمک روش تحلیلی

مولفه‌های تغییرات گرادیان جاذبه از جمله  $T_{22}$  و  $T_{23}$  و  $T_{33}$  در این مرحله نسبت به تغییرات جاذبه خیلی خوب حاشیه صفحه گسل را نشان می‌دهند.



شکل ۴: مولفه‌های تغییرات گرادیان جاذبه در واحد میلی‌آتوش برای گسل تراستی به کمک مدل تحلیلی



حال برای یک گسل امتدادلغز، زاویه شیب گسل را از ۳۰ درجه به ۶۰ درجه و سپس به ۹۰ درجه افزایش می‌دهیم. جدول (۱) حداقل و حداکثر تغییرات جاذبه را با افزایش زاویه شیب گسل نشان می‌دهد. جدول (۲) نیز قدر مطلق تغییرات را برای مولفه‌های گرادیان جاذبه با افزایش زاویه شیب گسل نشان می‌دهد.

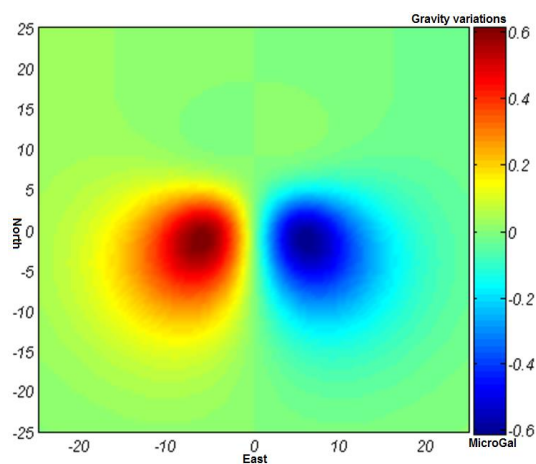
جدول ۱: حداقل و حداکثر تغییرات جاذبه محاسبه شده با افزایش زاویه شیب

زاویه شیب	حداکثر تغییرات جاذبه در واحد میکروگال	حداقل تغییرات جاذبه در واحد میکروگال
۳۰	۱	-۱
۶۰	۰.۶	-۰.۶
۹۰	۰.۲	-۰.۲

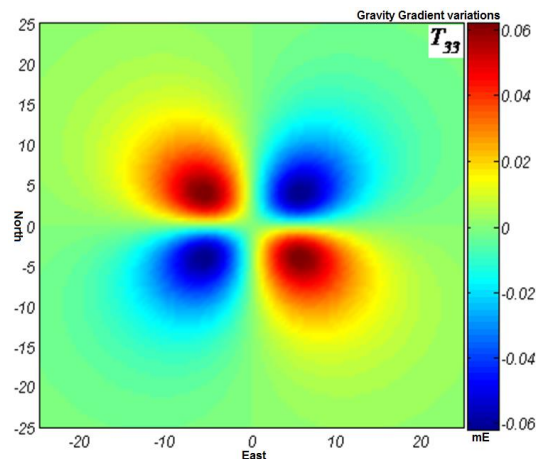
جدول ۲: قدرمطلق تغییرات برای گرادیان جاذبه محاسبه شده با افزایش زاویه شیب

زاویه شیب	$T_{33}$	$T_{22}$	$T_{23}$	$T_{13}$	$T_{12}$
۳۰	۰.۳۰	۰.۱۲	۰.۱۶	۰.۲۰	۰.۱۰
۶۰	۰.۲۰	۰.۰۸	۰.۱۴	۰.۱۰	۰.۰۷
۹۰	۰.۱۲	۰.۰۶	۰.۱۲	۰.۰۸	۰.۰۵

در حالت گسل امتدادلغز با افزایش زاویه شیب گسل از ۳۰ درجه به ۶۰ درجه دامنه تغییرات جاذبه و گرادیان جاذبه کوچک‌تر می‌شود ولی الگوهای مکانی این تغییرات تقریباً ثابت مانده و در آن‌ها تغییراتی ایجاد نشده است (شکل ۵) را ببینید). سپس با افزایش زاویه شیب گسل از ۶۰ درجه به ۹۰ درجه گرچه دامنه تغییرات جاذبه و گرادیان جاذبه نسبت به قبل کوچک‌تر می‌شود ولی دامنه تغییرات مثبت و منفی در تغییرات جاذبه و گرادیان جاذبه برابر شده و الگوهای این تغییرات به صورت مکانی شکل متقارنی به خود گرفته است (شکل ۶) را ببینید).



شکل ۵: تغییرات جاذبه در واحد میکروگال برای یک گسل تراستی با افزایش زاویه شیب به ۳۰ درجه



شکل ۶: تغییرات گرادیان جاذبه در واحد میلی آنوش برای گسل تراستی با افزایش زاویه شیب به ۹۰ درجه

حال برای یک گسل تراستی، زاویه شیب گسل را از ۳۰ درجه به ۶۰ درجه و سپس به ۹۰ درجه افزایش می‌دهیم. جدول (۳) حداقل و حداکثر تغییرات جاذبه را با افزایش زاویه شیب گسل نشان می‌دهد. جدول (۴) نیز قدر مطلق تغییرات را برای مولفه‌های گرادیان جاذبه با افزایش زاویه شیب گسل نشان می‌دهد. در حالت گسل تراستی با افزایش زاویه شیب گسل از ۳۰ درجه به ۶۰ درجه سیگنال‌های مثبت بیشتری در تغییرات جاذبه پیدا شده زیرا با افزایش زاویه شیب تغییرات ارتفاعی عمده‌تری روی سطح پیدا می‌شود، همچنین بعضی از مولفه‌های گرادیان جاذبه موقعیت مکانی حاشیه گسل را خیلی بهتر به معرض نمایش می‌گذارند با این‌که مقادیر آن‌ها نسبت به حالت قبل عوض نمی‌شود (شکل (۷) را ببینید). سپس با افزایش زاویه شیب گسل از ۶۰ درجه به ۹۰ درجه روند تغییرات سیگنال‌های مثبت جاذبه حفظ شده ولی همچنان تغییرات گرادیان جاذبه نسبت به حالت قبل ثابت می‌ماند، همچنین الگوی تغییرات جاذبه و گرادیان جاذبه نیز به صورت مکانی شکل مقارنی به خود گرفته است (شکل (۸) را ببینید).

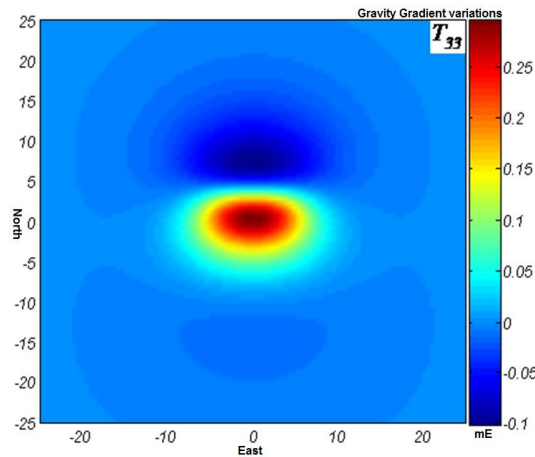
جدول ۳: حداقل و حداکثر تغییرات جاذبه محاسبه شده با افزایش زاویه شیب

زاویه شیب	حداکثر تغییرات جاذبه در واحد میکروگال	حداقل تغییرات جاذبه در واحد میکروگال
۳۰	۰.۳	-۲.۵
۶۰	۰.۵	-۲
۹۰	۱	-۱

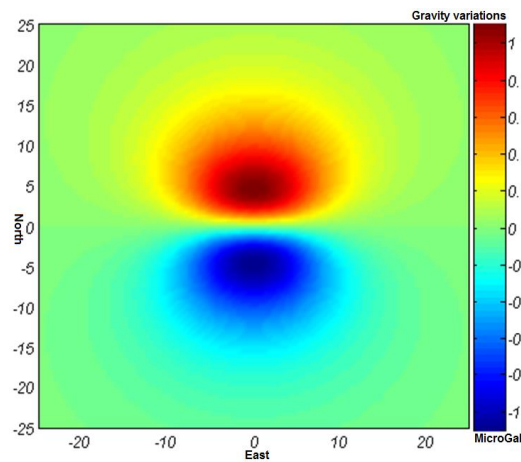
جدول ۴: قدر مطلق تغییرات برای گرادیان جاذبه محاسبه شده با افزایش زاویه شیب

$T_{12}$	$T_{13}$	$T_{23}$	$T_{22}$	$T_{33}$	زاویه شیب
۰.۱۲	۰.۳۰	۰.۳۰	۰.۳۰	۰.۴	۳۰
۰.۱۲	۰.۲۰	۰.۳۰	۰.۳۰	۰.۴	۶۰
۰.۱۲	۰.۱۲	۰.۳۰	۰.۳۰	۰.۴	۹۰





شکل ۷: تغییرات گرادیان جاذبه در واحد میلی آنوش برای گسل تراستی با افزایش زاویه شیب به ۶۰ درجه



شکل ۸: تغییرات جاذبه در واحد میکروگال برای یک گسل تراستی با افزایش زاویه شیب به ۹۰ درجه

با توجه به اشکال فوق، میزان تغییرات جاذبه و همین طور گرادیان جاذبه برای گسل تراستی نسبت به گسل امتدادلغز بیشتر است. این نتیجه با تغییر زاویه شیب گسل نیز تغییری نکرد. همچنین در گسل تراستی بیشترین تغییرات جاذبه مربوط به گسل با زاویه شیب کمتر است لذا در حالتی که گسل تراستی بوده و زاویه شیب آن کوچک باشد می تواند تغییرات جاذبه بیشتری تولید کرده و بحرانی باشد. همچنین در بین مولفه های تغییرات گرادیان جاذبه، مؤلفه  $T_{33}$  دارای بیشترین تغییرات گرادیان جاذبه می باشد.

#### ۴- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این تحقیق، به کمک مدل تحلیلی اکوبو ۱۹۹۲، از روش توابع گرین برای گسلش مدفون در نیم فضای الاستیک استفاده شد و توابع تحلیلی بسته مورد استفاده برای مدل سازی تغییرات هم لرزه جاذبه و گرادیان جاذبه در اثر ناهمگونی صفا ای معرفی شد. همچنین تغییرات جاذبه و گرادیان جاذبه ناشی از گسل روی این صفا مستطیلی شکل بدست آمد. همچنین به آنالیز حساسیت مدل تحلیلی به پارامترهای گسل پرداخته شد و دیدیم که چگونه تغییرات جاذبه و گرادیان جاذبه به تغییر پارامترهای گسل و تغییر نوع گسل حساس بوده و با تغییر آنها تغییر می کنند. به طور کلی می توان به نتایج و پیشنهادهای زیر حاصل از این تحقیق پرداخت:

۱- میزان تغییرات جاذبه و همین طور گرادیان جاذبه برای گسل تراستی نسبت به گسل امتدادلغز بیشتر است.



۲- در گسل تراستی بیشترین تغییرات جاذبه مربوط به گسل با زاویه شیب کمتر است.

۳- در بین مولفه‌های تغییرات گرادیان جاذبه، مؤلفه  $T_{33}$  دارای بیشترین تغییرات گرادیان جاذبه می‌باشد.

۴- در مدل تحلیلی اکوبو ۱۹۹۲ زمین به صورت نیم‌فضای الاستیک فرض شده و کرویت و ناهمگنی شعاعی آن در نظر گرفته نشده است لذا اعمال این موارد در کارهای آتی توصیه می‌شود.

### مراجع

- [1] P. Banerjee, F. F. Pollitz, R. Bürgmann, "The size and duration of the Sumatra-Andaman earthquake from far-field static offsets". *Sci*, 308, 1769 – 1772, 2005.
- [2] B. F. Chao, R. S. Gross, "Changes in the Earth's rotation and low-degree Gravitational field induced by earthquakes", *Geophys. J. R. aster. Soc.*, 91, 569-596, 1987.
- [3] S. Okubo, "Potential and gravity changes raised by point dislocations", *Geophys. J. Int.*, 105, 573-586, 1991.
- [4] S. Okubo, "Gravity and potential changes due to shear and tensile faults in a half space", *J. Geophys. Res.*, 97(B5), 7137, 1992.
- [5] G. Soldati, A. Piersanti, E. Boschi, "Global post-seismic gravity changes of a viscoelastic earth", *J. Geophys. Res.*, 103 (B12), 29867-29885, 1998.
- [6] W. Sun, S. Okubo, "Surface potential and gravity changes due to internal dislocations in a spherical Earth, I.Theory for a point dislocation", *Geophys. J. Int.*, 114, 569-592, 1993.
- [7] W. Sun, S. Okubo, "Surface potential and gravity changes due to internal dislocations in a spherical earth—II. Application to a finite fault". *Geophys. J. Int.*, 132, 79–88, 1998
- [8] P. Segall, *Earthquake and Volcano Deformation*, Stanford University, Princeton university press, 458, 2010.