

# مدل سازی میدان جابجایی سه بعدی حین وقوع زلزله یک گسل، مطالعه خاص: گسل بم

سینا نوری

خیابان ولیعصر، گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

Email : sina\_noori@yahoo.com

بهباد وثوقی

استاد یار گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

Email : vosoghi@kntu.ac.ir

امیر مسعود ابوالقاسم

استاد یار گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

Email : abolghasem@geowi.uni-hannover.de

آدرس : خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، روبروی ساختمان اسکان.

دورنگار: ۸۷۸۶۲۱۳

تلفن: ۵-۸۷۷۹۴۷۳

## چکیده

شناخت حرکات گسل و نتایج حاصل از این حرکات نظیر تغییر شکل سطحی در کشور ما که دارای گسل های فعال و مناطق زلزله خیزی می باشد دلیل اصلی انجام این تحقیق می باشد. این تحقیق بر روی مدله کردن سه بعدی تغییر شکل های هم لرزه ایجاد شده در اثر حرکت گسل در یک نیم فضای الاستیک هموزن می باشد. این مدل سازی اغلب بر اساس تئوری جداشدگی صورت می پذیرد و بیشتر مدل های تحلیلی تغییر شکل گسل بر پایه تئوری جداشدگی Okada پایه ریزی شده اند. در اینجا نیز از این تئوری استفاده کرده ایم تا بتوانیم تغییر شکل های

ایجاد شده در گسل های امتداد لغز و شیب لغز را بدست آوریم. با استفاده از این مدل جابجایی حاصل از وقوع حرکت در یک گسل (زلزله) را می توانیم با استفاده از داده های در دسترس بدست آورده و نتایج حاصل را تحت عنوان تغییر شکل حاصل از زلزله ارائه کنیم.

این مدل قابلیت بدست آوردن تغییر شکل و جابجایی در هر عمقی نسبت به سطح آزاد (سطح زمین) را دارا می باشد که در اینجا هدف اصلی بدست آوردن این مقادیر برای سطح زمین می باشد. این مدل را برای گسل بم، که عامل اصلی ایجاد زلزله سال ۱۳۸۲ بم با بزرگی ۶/۵ بوده است، که یک گسل تقریباً قائم امتداد لغز می باشد بکار برده و نتایج حاصل از آن را با میدان های جابجایی حاصل از تصاویر راداری موجود مقایسه کردیم و مشاهده شد که از هر دو روش به حداکثر مقدار جابجایی مسطحاتی ۴۰ سانتیمتر و قائم ۱۱ سانتیمتر می رسیم. نکته مهمی که در خاتمه می توان به آن اشاره کرد این است که این مدل را می توان برای هر گسل دیگری در کشور و در هر منطقه ای با هر خصوصیات هندسی بکار برده و میزان جابجاییها و تغییر شکل را برای نقاط واقع در حوزه حرکت گسل یا یک زلزله مشخص نمود.

## ۱- مقدمه

زمین لرزه پدیده ای است که از رها شدن ناگهانی انرژی انباشته شده در پوسته یا گوشته بالایی زمین ایجاد می شود و در واقع بازتاب یک رویداد زمین شناختی است. مطالعه زمین لرزه ها موضوع بسیار مهمی می باشد و در واقع در این مطالعه به طور عمده به هندسه و فیزیک گسل بیشتر توجه می شود. همان طور که در چکیده این مقاله عنوان شد هدف اصلی این تحقیق بدست آوردن میزان جابجاییها و تغییر شکل ها در زمان وقوع زلزله می باشد. با این اطلاعات می توان بلا فاصله بعد از وقوع یک زلزله یا حرکت در یک گسل به محاسبه جابجاییهای صورت گرفته پرداخت به کمک این مدل می توان جابجاییها را برای نقاط مختلف که می تواند در آن نقاط سازه های بزرگ و پر اهمیت و یا شریان های حیاتی یک منطقه واقع باشند پرداخت و از بروز فجایع جدید و وخیم تر جلوگیری نمود.

این مدل در بسیاری از کشور های پیشرفته دنیا نظیر آمریکا و ژاپن که دارای مناطق لرزه خیز می باشند برای اکثر گسلهای موجود در این مناطق تهیه شده و اطلاعات مورد نیاز برای مدل به صورت پیوسته در حال جمع آوری می باشد ولی در کشور ما هنوز جهت مدل سازی حرکات گسل ها و بررسی جدی تر آنها اقدام مناسبی صورت نگرفته است. در اینجا لازم است که به برخی از کاربردهای مهم این مدل اشاره شود. با استفاده از این مدل در نواحی مرکزی ژاپن (Izo-Oshima, Off-Ito) [۹] توانسته اند به محاسبه جابجاییها پرداخته و یکی دیگر از نتایجی که بطور مستمر از این مدل در آنجا استفاده می شود گسل SAN-ANDREAS می باشد [۱۴]. از نمونه کاربردهای دیگر می توان به محاسبات انجام شده در زلزله Izmit ترکیه [۱۲] در سال ۱۹۹۹ و در سال ۱۹۰۶ در San Francisco اشاره کرد [۱۵].

مدل سازی تغییر شکل ایجاد شده تحت تاثیر زلزله و حرکت گسل بر پایه یک مدل هموزن الاستیک نیم فضا<sup>۱</sup> انجام می گیرد و در آن پارامتر زمان نقشی بر عهده ندارد و به محاسبه میزان جابجاییها در امتداد سه محور  $x, y, z$  برای یک منطقه (گسل) که در آن حرکت رخ داده باشد، می پردازد. یکی از بارزترین مشخصات این مدل توانایی

1- Homogeneous elastic half-space model

محاسبه جابجایی در هر عمقی می باشد و می توان توسط این روابط به محاسبه جابجاییها در سطح آزاد (سطحی که ما در روی آن به جمع آوری مشاهدات می پردازیم) نیز پرداخت که این نکته برای ما بسیار حائز اهمیت می باشد .

## ۲- مدل حرکت گسل

هدف عمده بررسی نواحی می باشد که در یک زلزله دچار جابجایی و از هم گسیختگی می شوند . این امر به طرق مختلفی امکان پذیر است. یکی از این روشها محاسبه این مساله توسط تئوری جداشدگی<sup>۱</sup> می باشد. تئوری جداشدگی قادر است تا به توضیح آن قسمت از تئوری الاستیسیته که مرتبط با میدان های جابجایی نا پیوسته است بپردازد .

جهت این مدل سازی نیازمند در نظر گرفتن چند فرض در روابط می باشیم . در اینجا از انحنای زمین ، گراویتی آن ، دما ، مغناطیس ، غیر هموزن بودن صرف نظر کرده و به یک جسم به صورت نیمه نا محدود که هم هموزن است و هم ایزوتروپ توجه می کنیم . علاوه بر این به این نکته نیز توجه داریم که قانون های تئوری الاستیسیته خطی بر قرار می باشد [۲] . در این زمینه مطالعات بسیاری انجام گرفته است که نشان می دهد تاثیر انحنای زمین برای رویدادهای کم عمق و سطحی قابل صرف نظر کردن است [۷] . حساسیت به توپوگرافی زمین ، هموزن بودن ، ایزوتروپی و فرض نیم فضا جزو شرایط و مطالعات موثر اخیر در این تئوری می باشد [۶] . در این قسمت ابتدا مختصری در خصوص روابط ریاضی مدل و خروجی های آن توضیح میدهم .

در اینجا سیستم مختصات کارتزین نشان داده شده در شکل شماره ۱ را در نظر می گیریم ، جسم الاستیک در ناحیه  $Z \leq 0$  قرار دارد و محور  $x$  در جهت موازی با جهت لغزش گسل در نظر گرفته شده است. در این سیستم مختصات ،  $u_i^j(x_1, x_2, x_3; \xi_1, \xi_2, \xi_3)$  ،  $i$  امین مؤلفه جابجایی در  $(x_1, x_2, x_3)$  هستند که در نتیجه اعمال نیروی نقطه ای به بزرگی  $F$  در جهت  $j$  ام در  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  ایجاد شده است . این را می توان به شکل رابطه شماره ۱ بیان کرد و ترمهای این رابطه در روابط شماره ۲ ، ۳ و ۴ توضیح داده شده اند [۸] ، [۱۱] ، [۱۰] ، [۹] .

$$u_i^j(x_1, x_2, x_3) = u_{iA}^j(x_1, x_2, -x_3) - u_{iA}^j(x_1, x_2, x_3) + u_{iB}^j(x_1, x_2, x_3) + x_3 u_{iC}^j(x_1, x_2, x_3) \quad (1)$$

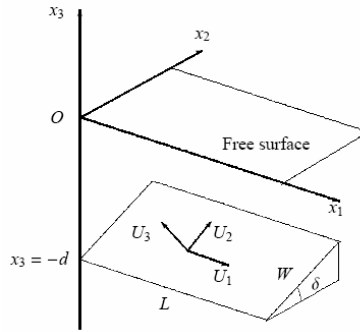
به طوریکه :

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

$$u_{iB}^j = \frac{F}{4\pi\mu} \left( \frac{\delta_{ij}}{R} + \frac{R_i R_j}{R^3} + \frac{1 - \alpha}{\alpha} \left[ \frac{\delta_{ij}}{R + R_3} + \right. \right. \quad (3)$$

$$\left. \left. \frac{R_i \delta_{j3} - R_j \delta_{i3} (1 - \delta_{j3})}{R(R + R_3)} - \frac{R_i R_j}{R(R + R_3)^2} (1 - \delta_{i3})(1 - \delta_{j3}) \right] \right) \quad (4)$$

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



شکل ۱: نمایش سیستم مختصات در نظر گرفته شده در این بخش و هندسه مدل مرجع.

در این عبارت ها  $R_1 = x_1 - \xi_1$  و  $R_2 = x_2 - \xi_2$  و  $R_3 = x_3 - \xi_3$  و  $R^2 = R_1^2 + R_2^2 + R_3^2$ . اولین ترم در رابطه شماره ۱،  $u_{iA}^j(x_1, x_2, x_3)$  بیانگر میدان جابجایی در نتیجه یک نیروی منفرد عمل کننده در  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  در یک جسم محدود است [۵]. ترم دوم متناظر است با تصویر نیروی نقطه ای عمل کننده در نقطه  $(\xi_1, \xi_2, -\xi_3)$  در جسم محدود. ترم سوم،  $u_{iB}^j(x_1, x_2, x_3)$  و  $u_{iC}^j(x_1, x_2, x_3)$  در ترم چهارم ذاتاً وابسته به عمق هستند. وقتی که  $x_3$  برابر با صفر باشد، در رابطه شماره ۱، اولین و دومین ترم همدیگر را حذف می کنند، و ترم چهارم صفر می شود. ترم باقی مانده،  $u_{iB}^j(x_1, x_2, 0)$  فرمول را برای یک میدان جابجایی سطحی منتج شده از یک نیروی نقطه ای در یک نیم فضا [۱۰] تبدیل می کند، که هدف اصلی نیز در این مطالعه بدست آوردن این میدان می باشد، چرا که مشاهدات در روی سطح آزاد (سطح زمین) انجام می شوند و این سطح برای ما قابل دسترس و ملموس می باشد. حال با توجه به توضیحات و تغییر متغیرهای فوق و رابطه شماره ۱ بازای مقادیر  $(i=1,2,3)$  و  $(j=1,2,3)$  به روابط شماره ۵، ۶ و ۷ می رسیم.

$$\begin{cases} u_1^1 = \frac{F}{4\pi\mu} \left( \frac{1}{R} + \frac{(x_1 - \xi_1)^2}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{R - \xi_3} - \frac{(x_1 - \xi_1)^2}{R(R - \xi_3)^2} \right] \right) \\ u_2^1 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_1 - \xi_1)(x_2 - \xi_2) \left( \frac{1}{R^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R(R - \xi_3)^2} \right) \\ u_3^1 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_1 - \xi_1) \left( -\frac{\xi_3}{R^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R(R - \xi_3)} \right) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_1^2 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_1 - \xi_1)(x_2 - \xi_2) \left( \frac{1}{R^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R(R - \xi_3)^2} \right) \\ u_2^2 = \frac{F}{4\pi\mu} \left( \frac{1}{R} + \frac{(x_2 - \xi_2)^2}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{R - \xi_3} - \frac{(x_2 - \xi_2)^2}{R(R - \xi_3)^2} \right] \right) \\ u_3^2 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_2 - \xi_2) \left( -\frac{\xi_3}{R^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R(R - \xi_3)} \right) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u_1^3 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_1 - \xi_1) \left( -\frac{\xi_3}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R(R - \xi_3)} \right) \\ u_2^3 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_2 - \xi_2) \left( -\frac{\xi_3}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R(R - \xi_3)} \right) \\ u_3^3 = \frac{F}{4\pi\mu} \left( \frac{1}{R} + \frac{\xi_3^2}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R} \right) \end{cases} \quad (7)$$

در این فرمول ها  $R^2 = (x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + \xi_3^2$  و  $\lambda$  و  $\mu$  ضرایب لامه می باشند. جابجایی در یک جسم محدود الاستیک در نتیجه یک جداشدگی، توسط رابطه شماره (۸) بدست می آید .

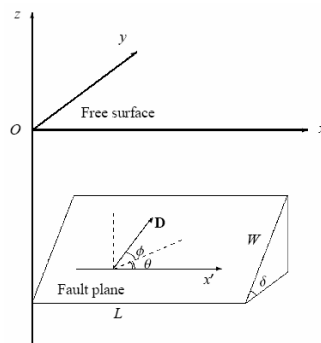
$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[ \lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left( \frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k dS \quad (8)$$

از این روبه منظور بدست آوردن جابجایی ، نیاز داریم تا مشتقات رابطه شماره (۱) را نسبت به  $\xi_k$  بدست آوریم و در رابطه شماره (۸) قرار دهیم.

اکنون ، به یک مسئله عملی تر توجه می کنیم . جدا شدگیهای ابتدایی  $u_1$  و  $u_2$  و  $u_3$  را تعریف می کنیم که به ترتیب متناظرند با مؤلفه های یک جدا شدگی اختیاری امتداد لغز ، عمود لغز و کششی . در شکل شماره ۱ هر بردار جهت گسل های ابتدایی را نشان می دهد . بردار  $\mathbf{D}$  بردار Burger نامیده می شود ، که چگونگی گسترش یافتن گسل به سمت بیرون را نشان می دهد رابطه شماره (۹).

$$\mathbf{D} = \mathbf{u}^+ - \mathbf{u}^- \quad (9)$$

یک جدا شدگی عموماً می تواند توسط سه زاویه مشخص شود : زاویه شیب  $\delta$  گسل ، زاویه لغزش  $\theta$  و زاویه  $\phi$  واقع بین صفحه گسل و بردار Burger ،  $\mathbf{D}$  . این مسئله به صورت گرافیکی در شکل شماره ۲ نشان داده شده است .



شکل ۲ : هندسه مدل مرجع و توجیه (زوایا) بردار  $\mathbf{D}$  .

برای یک گسل مستطیلی محدود با طول  $L$  و عرض  $W$  که در عمق  $d$  قرار گرفته است (شکل شماره ۲) ، میدان تغییر شکل می تواند بصورت تحلیلی توسط تغییر متغیرها و انجام انتگرال روی مستطیل محاسبه شود . این روش توسط افراد مختلفی بررسی و تکمیل شده است [۱] ، [۱۳] و [۴] . در اینجا از نتایج محاسبات آنها استفاده خواهیم

کرد. نتیجه نهائی در فرم فشرده (رابطه شماره ۱۰) با استفاده از علائم تنسوری که بیانگر جایگذاریها هستند نمایش داده شده است.

$$f(\xi, \eta) = f(x, p) - f(x, p - W) - f(x - L, p) + f(x - L, p - W) \quad (10)$$

حال به معرفی کمیت‌های فوق در رابطه شماره (۱۱) می پردازیم :

$$\begin{aligned} p &= y \cos \delta + d \sin \delta, & q &= y \sin \delta - d \cos \delta, \\ \tilde{y} &= \eta \cos \delta + q \sin \delta, & \tilde{d} &= \eta \sin \delta - q \cos \delta, \\ R^2 &= \xi^2 + \eta^2 + q^2 = \xi^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{d}^2, & X^2 &= \xi^2 + q^2. \end{aligned} \quad (11)$$

کمیت های  $u_1$  و  $u_2$  و  $u_3$  همانطور که در رابطه شماره (۱۲) نشان داده شده است با بردار Burger مرتبط هستند :

$$U_1 = |\vec{D}| \cos \phi \cos \theta, \quad U_2 = |\vec{D}| \cos \phi \sin \theta, \quad U_3 = |\vec{D}| \sin \phi. \quad (12)$$

برای یک جداشدگی امتداد لغز رابطه شماره (۱۸) را به صورت زیر داریم :

$$\begin{aligned} u_1 &= -\frac{U_1}{2\pi} \left( \frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \arctan \frac{\xi \eta}{qR} + I_1 \sin \delta \right), \\ u_2 &= -\frac{U_1}{2\pi} \left( \frac{\tilde{y} q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \delta}{R+\eta} + I_2 \sin \delta \right), \\ u_3 &= -\frac{U_1}{2\pi} \left( \frac{\tilde{d} q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_4 \sin \delta \right). \end{aligned} \quad (1)$$

و برای یک جدا شدگی عمق لغز داریم (رابطه شماره ۱۴) :

$$\begin{aligned} u_1 &= -\frac{U_2}{2\pi} \left( \frac{q}{R} - I_3 \sin \delta \cos \delta \right), \\ u_2 &= -\frac{U_2}{2\pi} \left( \frac{\tilde{y} q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \arctan \frac{\xi \eta}{qR} - I_1 \sin \delta \cos \delta \right), \\ u_3 &= -\frac{U_2}{2\pi} \left( \frac{\tilde{d} q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \arctan \frac{\xi \eta}{qR} - I_5 \sin \delta \cos \delta \right). \end{aligned} \quad (14)$$

به طوریکه ترم های  $I_1$  تا  $I_5$  طبق روابط شماره (۱۶) تا (۲۰) عبارتند از :

$$I_1 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{\xi}{(R + \tilde{d}) \cos \delta} - \tan \delta I_5, \quad (16)$$

$$I_2 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \log(R + \eta) - I_3, \quad (17)$$

$$I_3 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{\cos \delta} \frac{\tilde{y}}{R + \tilde{d}} - \log(R + \eta) \right] + \tan \delta I_4, \quad (18)$$

$$I_4 = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \frac{1}{\cos \delta} \left( \log(R + \tilde{d}) - \sin \delta \log(R + \eta) \right), \quad (19)$$

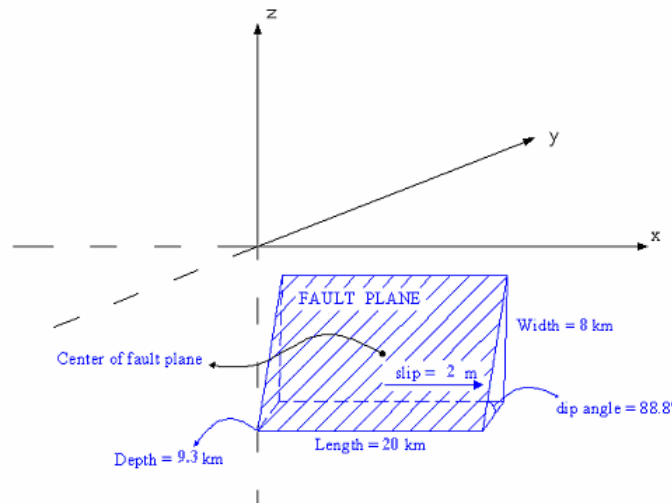
$$I_5 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos \delta} \arctan \frac{\eta(X + q \cos \delta) + X(R + X) \sin \delta}{\xi(R + X) \cos \delta} \quad (20)$$

همانطور که قبلاً نیز بارها در قسمت های مختلف مقاله به آن اشاره شد خروجی اصلی و مهم این مدل میزان جابجایی 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 نقطه ای از سطح زمین و در هر عمقی (از جمله سطح آزاد) می باشد.

حال با توجه به روابط ریاضی ذکر شده فوق برای گسله های مختلف شامل گسل امتداد لغز و عمق لغز می توان در هر کدام از موارد فوق که در یک منطقه که در آن حرکتی رخ داده باشد با در دست داشتن اطلاعات مورد نیاز به محاسبه جابجایی 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 ای می باشد.

### ۳- مدل سازی گسل بم

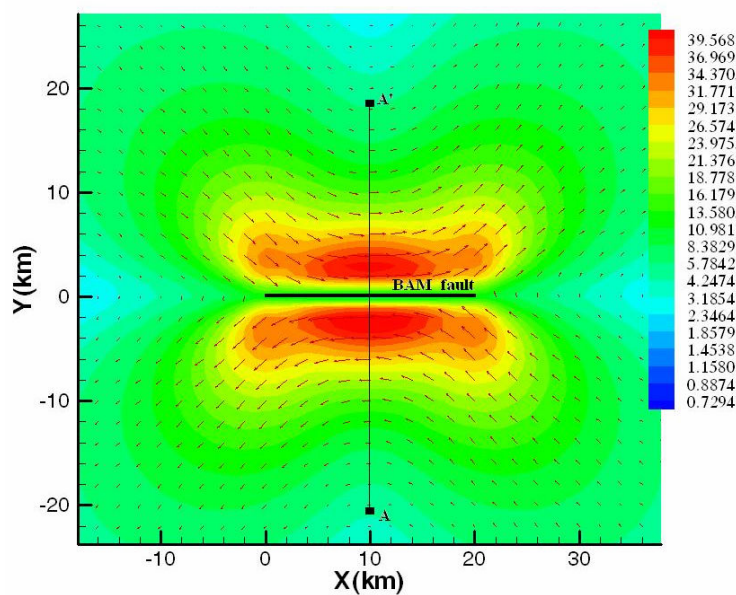
در این مرحله از کار مدل نوشته شده را برای یک گسل با داده های واقعی تست کردیم. برای این منظور به سراغ منطقه بم و گسل بم رفتیم، این گسل در سال ۲۰۰۳ عامل به وقوع پیوستن یک زلزله با بزرگای ۶/۵ در نزدیکی شهر بم شده است و بر روی آن از طریق تصاویر ماهواره ای (InSAR) کارهای تحلیلی بسیاری انجام شده که برخی از آنها در دسترس می باشد. از این جهت این گسل را انتخاب نمودیم که می توانیم نتایج حاصل از مدل را با میدان های جابجایی حاصل از داده های راداری مقایسه کنیم و به صحت مدل پی ببریم. این گسل دارای مشخصات هندسی نشان داده شده در شکل شماره ۵ و یک گسل امتداد لغز می باشد.



شکل ۳: مشخصات هندسی گسل بم.

حال در این قسمت به سراغ بررسی نتایج و نمودارهای حاصل برای گسل بم می رویم. میدان جابجایی سطحی افقی حاصل از گسل بم بدست آمده از طریق مدل ارائه شده در این تحقیق، با توجه به مشخصات ارائه شده برای گسل بم در شکل ۳، در شکل ۴ نشان داده شده است. از آنجا که این گسل یک گسل تقریباً قائم می باشد، پس صفحه گسل دارای تصویری در سطح زمین، که قابل نمایش باشد، نیست و از این به بعد گسل بم را در شکل ها به صورت یک خط که بیانگر موقعیت و نحوه گسترش طولی گسل در محدوده مطالعاتی است نمایش می دهیم. با

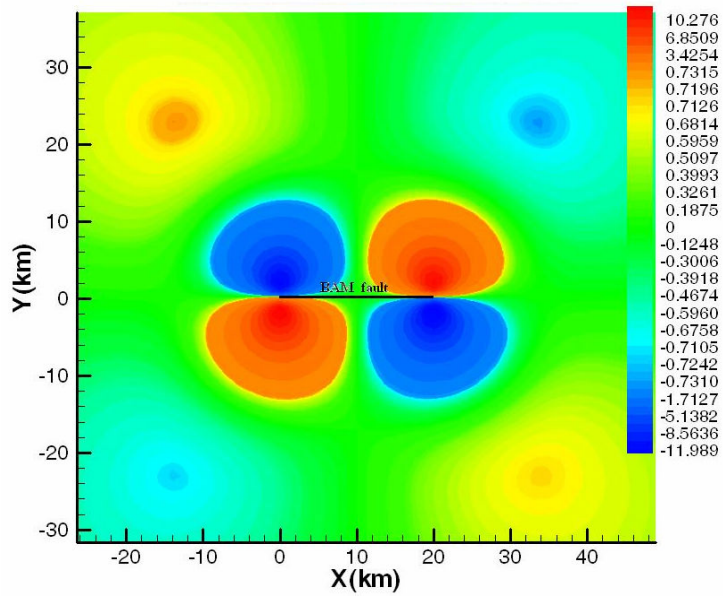
توجه به شکل ۴ ملاحظه می شود که جابجاییهای سطحی به دست آمده برای این گسل در محدوده صفر تا تقریباً ۴۰ سانتیمتر در نواحی مختلف در حال تغییر می باشد که این میزان تغییرات با میدان جابجایی حاصل از داده های راداری (شکل ۶) تطابق دارد. ملاحظه می شود که بیشترین میزان تغییرات در یک باندی که طول آن تقریباً برابر با طول گسل و عرض آن حدود ۶ کیلومتر در هر سمت گسل است، می باشد. هر چه از محدوده فوق الذکر و از گسل دورتر می شویم میزان جابجاییها کمتر و کمتر می شود به طوری که در نقطه ای به فاصله تقریبی ۴۰ کیلومتر از گسل به صفر می رسد. با توجه به شکل بیشترین میزان جابجایی برای نقاط واقع در ناحیه مرکزی گسل رخ داده است. در شکل ۵ مولفه های ارتفاعی جابجایی سطحی حاصل از مدل رسم شده اند و میزان جابجاییها برای گسل بم در محدوده ۱۱- سانتیمتر تا ۱۰/۳ سانتیمتر می باشد.



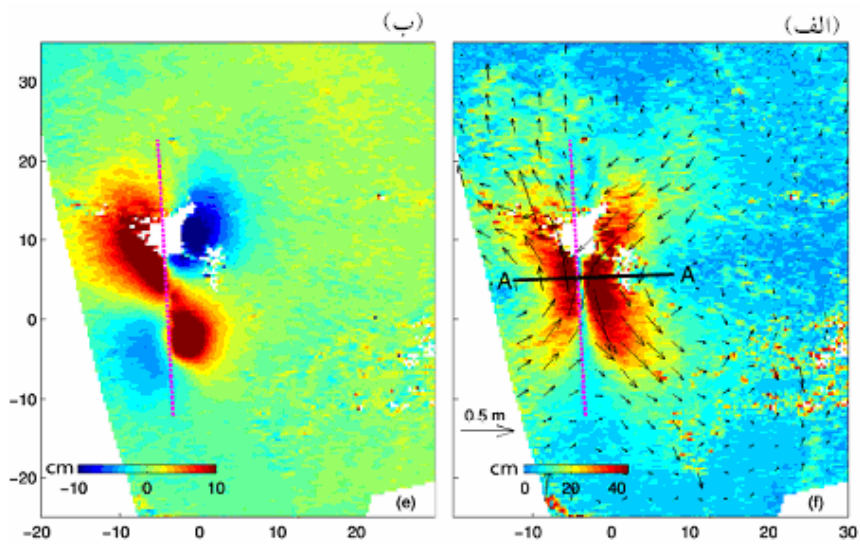
شکل ۴: مولفه های افقی جابجایی سطحی محاسبه شده از مدل برای گسل بم.

با توجه به شکل های ۴ و ۵ و مقایسه آنها با شکل ۶ ملاحظه می شود که در مدل در مناطقی که ، با توجه به تصاویر ماهواره ای ، انتظار رخ دادن بیشترین جابجاییها و تغییر شکلهای سطحی بوده ایم با این مساله مواجه می شویم. در شکل ۷ مقادیر مطلق عددی جابجایی روی سطح زمین را در امتداد پروفیل  $AA'$  نشان داده شده در شکل ۴ بصورت خاص ترسیم کرده ایم.

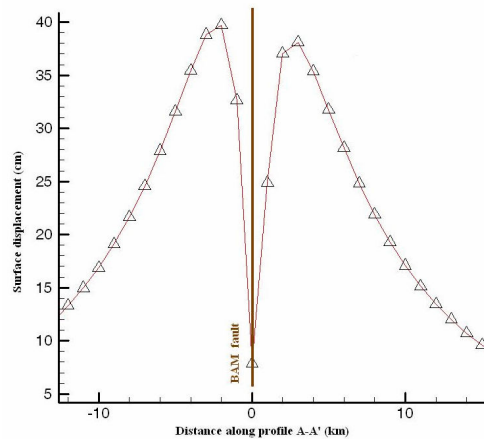




شکل ۵: مولفه های قائم جابجایی سطحی محاسبه شده از مدل برای گسل بم .



شکل ۶: میدان جابجایی حاصل از داده های راداری. الف: میدان جابجایی مسطحاتی. ب: مولفه های جابجایی قائم [۳].



شکل ۷: نمودار جابجایی مسطحاتی هم لرزه گسل بم. مثلث های سیاه بیانگر مقدار عددی جابجایی برای نقاط واقع در روی پروفیل  $AA'$ ، نشان داده شده در شکل ۴، می باشند. خط قائم نشان دهنده تصویر گسل بر روی سطح زمین است.

#### ۴- نتیجه

با توجه به نتایج حاصل از انجام محاسبات برای گسل بم با طول ۲۰ کیلومتر و عرض ۸ کیلومتر که به صورت تقریباً قائم با مقدار لغزش ۲ متر در عمق ۹/۳ کیلومتری از سطح زمین قرار دارد، مشاهده شد که ماکزیمم مقدار جابجایی افقی حدود ۳۹/۵ سانتیمتر و ماکزیمم جابجایی ارتفاعی برابر ۱۱ سانتیمتر می باشد. جهت مقایسه به سراغ داده های راداری و میدان های جابجایی حاصل از آنها رفتیم چرا که هیچ داده دیگری برای این امر در دسترس نمی باشد. می بینیم که این دو میدان جابجایی برای گسل بم تطابق داشته و نواحی که با مشاهده از نقشه میدان جابجایی نشان داده شده در شکل ۶ انتظار می رود که دارای بیشترین مقدار جابجایی باشند در نقشه های نرسیم شده از خروجی های مدل در بخش قبل نیز دقیقاً در همین مناطق شاهد وقوع بیشترین تغییر شکل سطحی می باشیم.

با توجه به پروفیل رسم شده در شکل ۷، نکته دیگری که می توان با دقت در این نمودار به آن توجه کرد نحوه تغییر مقدار جابجایی در محدوده ای نزدیک به گسل، تقریباً فاصله ۲ کیلومتری در هر سمت، می باشد که علت این امر را پاسخ غیر الاستیک زمین در این ناحیه عنوان کرده اند که، البته این مساله خود هنوز جای تحقیق و مطالعه بیشتر دارد.

#### مراجع:

- [1] Chinnery, M. , AThe stress changes that accompany strike-slip faulting, Bull , Seism. Soc. Am ., Vol. 53 , 1963 , pp.921-932.
- [2] Dias, F.,Dutykh,D.,Dynamics of tsunami, waves,Springer,2006.
- [3] Fialko,Y. , D. Sandwell, M Simons, and P Rosen, “Three-dimensional deformation caused by the Bam , Iran, earthquake and the origin of shallow slip deficit” ,Nature,Vol. 435 ,pp. 295-299,2005.
- [4] Iwasaki, T. and Sato, R. , Strain field in a semi-infinite medium due to an inclined rectangular fault , J. Phys. Earth , Vol. 27, 1979, pp 285-314.

- [5] Love, A. E. H., A treatise on the mathematical theory of elasticity, Dover Publications, New York.,1944 .
- [6] Masterlark, T., 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, 2540,2003.
- [7] McGinley, J. R., 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., 1969.
- [8] Mindlin, R. D. , Force at a point in the interior of a semi-infinite medium, Physics,Vol. 7 ,1936, pp195–202.
- [9] Okada, Y., Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am. , Vol. 82, 1992 ,pp1018–1040.
- [10] Okada, Y., Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am, Vol. 75 , 1985,pp 1135–1154.
- [11] Press, F., Displacements, strains and tilts at tele-seismic distances, J. Geophys. Res.,Vol. 70, 1965 , pp 2395–2412.
- [12] Reilinger , R. E .,S. Ergintav, R. Brgmann, S. McClusky, O.Lenk, A. Barka, O. Gurkan, L. Hearn, K. L. Feigl, R. Cakmak, B. Aktug, H. Ozener , and M. N., Tksoz Coseismic and Post seismic Fault Slip for the 17August 1999 , M=7.5 ,Izmit , Turkey Earthquake ,Sciencev , Vol 289, 2000, pp 1519-1524 .
- [13] Sato, R. and Matsu'ura , MStrains and tilts on the surface of a semi-infinite medium, J.Phys. Earth ,Vol. 22, 1974 , pp 213–221.
- [14] Thatcher , W., 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, 1990 ,pp 189-205 .
- [15] Thatcher ,W. , Strain accumulation and release mechanism of the 1906 San Francisco earthquake , Journal of Geophysical Research , Vol 80 , 1975 , pp 4862-4872 .