

مدل سازی میدان های جابجایی هم لرزه گسلی در محیط های الاستیک بر پایه مدل نابرجایی کروی

افسانه مرادی فرج^۱، بهزاد وثوقی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
a.moradifaraj@email.kntu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
vosoghi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت اردیبهشت ۱۳۹۸، تاریخ تصویب تیر ۱۳۹۸)

چکیده

این تحقیق بر روی مدل سازی تغییر شکل های هم لرزه در اثر حرکت گسل در محیط الاستیک می باشد و می توانیم با آن تغییر شکل های ایجاد شده در گسل ها را به دست آوریم. در اینجا مدل سازی میدان جابجایی هم لرزه بر اساس روش تحلیلی با دو مدل نابرجایی کروی و مدل نابرجایی نیم فضا صورت گرفته است. اختلاف میدان جابجایی حاصل از دو مدل کروی و نیم فضا که ناشی از کروی و مسطح در نظر گرفتن زمین در دو مدل می باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس این مدل سازی، آنالیز حساسیت اختلاف دو مدل کروی و نیم فضا در برآورد میدان جابجایی نسبت به پارامترهای هندسی یک گسل شبیه سازی شده برای یک پروفیل طولی ۱۰۰ کیلومتری مورد بررسی قرار گرفته و میزان تأثیر پارامترهای گسل را در نتایج خروجی دسته بندی کرده ایم. با توجه به نتایج عددی حاصل از آنالیز حساسیت بیشترین تأثیر از پارامتر میزان لغزش و به دنبال آن پارامترهای عمق گسل، زاویه شیب و عرض و طول گسل دیده می شود. این نتایج به این معنی می باشد که هرچه میزان لغزش، عمق و عرض و طول گسل بیشتر شود و یا زاویه شیب میانه داشته باشیم مدل کروی نتایج بهتری نسبت به مدل نیم فضا در برآورد میدان جابجایی دارد.

واژگان کلیدی: مدل سازی میدان جابجایی، مدل نابرجایی کروی، تغییر شکل هم لرزه گسلی، آنالیز حساسیت

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

مطالعه زمین لرزه ها و به دنبال آن بررسی حرکاتی نظیر تغییر شکل حرکتی گسل موضوع بسیار مهمی می باشد که هدف اصلی انجام این تحقیق است. به همین منظور مدل سازی به روش های مختلف برای تغییر شکل های هم لرزه صورت می پذیرد، این مدل سازی اغلب به روش تئوری نابرجایی می باشد. ما در اینجا برای تغییر شکل هم لرزه گسلی و میزان جابجایی در گسل های امتدادلغز و شیب لغز از این تئوری استفاده می کنیم. با استفاده از این مدل، میدان جابجایی حاصل از حرکت گسل را با توجه به اطلاعات در دسترس گسل به دست می آوریم.

در این تحقیق مدل سازی تغییر شکل ایجاد شده تحت تأثیر زلزله و حرکت گسل بر پایه دو مدل همگن الاستیک نیم فضا و کروی انجام می گیرد. با استفاده از این دو مدل می توان میزان جابجایی ایجاد شده بعد از وقوع زلزله یا حرکت گسل را به دست آورد. این دو مدل دارای تفاوت در میزان خروجی یعنی تغییر شکل هم لرزه گسلی می باشند که دلیل عمده آن می تواند اثر انحنا مدل کروی باشد. با کروی در نظر گرفتن زمین اثر انحنا در این مدل وارد شده و تغییراتی در میزان خروجی مدل کروی و نیم فضا ایجاد می کند.

بررسی اختلاف میدان جابجایی هم لرزه گسلی ناشی از دو مدل کروی و نیم فضا هدف اصلی این تحقیق است. با استفاده از یک آنالیز حساسیت، تأثیر پارامترهای مدل را در اختلاف میدان جابجایی حاصل از دو مدل کروی و نیم فضا بررسی می کنیم. برای محاسبه تغییر شکل لرزه ای مناسب یا مدل های لرزه ای معکوس، یک نظریه نابرجایی^۱ مناسب باید پذیرفته شود. بسیاری از دانشمندان (استیکتی^۲، ۱۹۵۸)، (مارویاما^۳، ۱۹۶۴)، (پرس^۴، ۱۹۶۵)، (جوانویچ^۵ و همکاران، ۱۹۷۴)، (اکادا^۶، ۱۹۸۵) و غیره، جابجایی سطح و استرین را با توجه به نابرجایی در یک محیط نیم بی نهایت مورد مطالعه قرار دادند. آن ها فرمول های تئوری توسعه یافته تغییر شکل را برای زمین

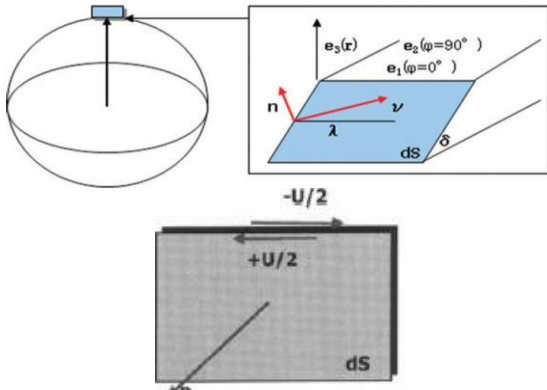
همگن ایزوتروپ، ناشی از نابرجایی متفاوت توصیف کرده اند. نخستین گام مؤثر در مدل سازی تغییر شکل های حاصل از پدیده های تکتونیکی گسل و آتشفشان، توسط (استیکتی، ۱۹۸۵) صورت گرفته است. او در این مقاله ایده استفاده از تئوری نابرجایی الاستیک را در توصیف پدیده های ژئوفیزیکی، مطرح کرده است. اکادا در سال های ۱۹۸۵ و ۱۹۹۲ مدل تحلیلی بردارهای جابجایی را برای یک گسل در حالت های امتدادلغز و شیب لغز در دو منبع نقطه ای و مستطیلی محدود محاسبه نمود.

اکوبو^۷ در سال های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲، مسئله تغییرات پتانسیل و شتاب ثقل ناشی از نابرجایی را با گسل روی یک صفحه محدود در یک نیم فضای همگن بررسی کرده است. تمام مطالعات توضیح داده شده در بالا در بردارنده یک نیم فضای همگن است. سان^۸ و اکوبو در سال ۱۹۹۳ تغییرات گرانش و پتانسیل ناشی از نابرجایی در مدل زمین متقارن کروی را مطالعه کرده اند، نتایج نشان می دهد وقتی فاصله بزرگتر از ۱۰ درجه از مرکز گسل است اختلاف ۱۰ درصدی دیده می شود. فو^۹ و سان در سال ۲۰۰۸ یک نظریه جدید برای محاسبه تغییرات گرانش در یک زمین ناهمگن سه بعدی ارائه دادند. در این تحقیق روابط ریاضی میدان جابجایی ناشی از مدل نابرجایی کروی از [۱۲] آورده شده است. در بسیاری از زمین لرزه های بزرگ از این روش استفاده شده است.

در مقاله (سان و اکوبو، ۲۰۰۲) به اختلاف دو مدل نیم فضا و کروی برای برآورد میدان جابجایی پرداخته و تأثیر عمق را در اختلاف دو مدل مورد بررسی قرار داده است [۱۰]. با مشخص کردن مدل بهتر برای برآورد میدان جابجایی، میدان جابجایی افقی و قائم را در مورد مطالعاتی به دست آورده است. در مقاله (سان و همکاران، ۲۰۰۶) به مقایسه دو مدل کروی و نیم فضا با داده های مشاهداتی پرداخته شده تا مدل بهتر به دست آمده آید و در ادامه میدان جابجایی زمین لرزه سوماترا^{۱۰} ۲۰۰۴ با بزرگی ۹/۱ ریشتر را با استفاده از مدل نابرجایی کروی برآورد کرده اند [۱۱]. در مقاله (ونگ^{۱۱}، سان، جیانگ^{۱۲}، ۲۰۱۰)

۷ Okubo
۸ Sun
۹ Fu
۱۰ Sumatra
۱۱ Wang
۱۲ Jiang

۱ dislocation
۲ Steketee
۳ Maruyama
۴ Press
۵ Jovanovich
۶ Okada



شکل ۱- مدل نابرجایی کروی [۱۲]

با توجه به بردار نرمال و بردار لغزش در شکل (۱)، بردار جابجایی U_v و بردار نرمال را به ترتیب در رابطه (۱) و (۲) تعریف می‌کنیم [۱۲].

$$U_v = U(v_1 e_1 + v_2 e_2 + v_3 e_3) \quad (1)$$

$$n = n_1 e_1 + n_2 e_2 + n_3 e_3 \quad (2)$$

اگر نابرجایی در یک زمین کروی رخ دهد، رابطه (۳) میدان جابجایی را در فرمی از سه مؤلفه در جهت مختصات کروی بیان می‌کند [۱۲].

$$u(a, \theta, \varphi) = \sum_{i,j} [u_r^{ij} e_r + u_\theta^{ij} e_\theta + u_\varphi^{ij} e_\varphi] \cdot v_i n_j \frac{U dS}{a^2} \quad (3)$$

که برای رابطه (۳) می‌توان پارامترها را در روابط (۴) و (۵) تعریف کرد [۱۲].

$$u_r^{ij}(a, \theta, \varphi) = \sum_{n,m} y_{1,m}^{n,ij}(a) Y_n^m(\theta, \varphi) \quad (4)$$

$$u_\theta^{ij}(a, \theta, \varphi) = \sum_{n,m} y_{3,m}^{n,ij}(a) \frac{\partial Y_n^m(\theta, \varphi)}{\partial \theta} + \sum_{n,m} y_{1,m}^{t,n,ij}(a) \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial Y_n^m(\theta, \varphi)}{\partial \varphi} \quad (5)$$

$$u_\varphi^{ij}(a, \theta, \varphi) = \sum_{n,m} y_{3,m}^{n,ij}(a) \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial Y_n^m(\theta, \varphi)}{\partial \varphi} - \sum_{n,m} y_{1,m}^{t,n,ij}(a) \frac{\partial Y_n^m(\theta, \varphi)}{\partial \theta} \quad (6)$$

روابط (۷) و (۸) پارامترهای لازم برای سه رابطه بالا را نشان می‌دهند [۱۲].

$$Y_n^m(\theta, \varphi) = P_n^m(\cos \theta) e^{im\varphi} \quad (7)$$

برای زلزله ونچوان^۱ ۲۰۰۸، سه مدل گسل در نظر گرفته شده و میدان جابجایی افقی و قائم در دو مدل کروی و نیم فضا برآورد شده است، گسل و مدل بهتر برای این زمین لرزه مشخص شده است [۱۳]. دانگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۴ زلزله توهوکوکو^۳ ۲۰۱۱ با بزرگی ۹ ریشتر را در نظر گرفته‌اند و اختلاف میدان جابجایی افقی و قائم دو مدل کروی و نیم فضا در این زمین لرزه مورد بررسی قرار گرفته است [۲].

۲- روش‌های مدل‌سازی تغییرات هم‌لرزه گسلی

برای محاسبه میزان جابجایی و تغییر شکل‌های ناشی از وقوع زلزله در نقاط مختلف زمین، می‌توان از روش‌های تحلیلی و عددی استفاده نمود. روش‌های تحلیلی بر اساس تئوری نابرجایی شکل گرفته است. روش‌های تحلیلی مورد استفاده در این تحقیق مدل‌های لرزه‌ای شامل مدل نیم فضا و مدل کروی است. در مدل نابرجایی نیم فضا زمین به‌عنوان یک نیم فضای همگن و الاستیک در نظر گرفته شده و محاسبه میدان جابجایی و تغییر شکل در راستای مختصات کارتزین می‌باشد.

در مدل نابرجایی کروی زمین به‌عنوان یک کره در یک محیط الاستیک در نظر گرفته می‌شود. از این مدل برای محاسبه میدان جابجایی در راستای شعاع کره، طول و عرض جغرافیایی استفاده می‌شود که در آن اثر انحنای زمین نیز در نظر گرفته شده است. یکی از بارزترین مشخصات این دو مدل امکان محاسبه میدان جابجایی و تغییر شکل در هر عمقی از جمله سطح زمین می‌باشد. در ادامه روابط ریاضی مدل کروی را برای برآورد میدان جابجایی مطرح می‌کنیم.

۲-۱- مدل نابرجایی کروی

مدل نابرجایی کروی در فاصله شعاعی روی یک گسل بی‌نهایت با بردارهای لغزش v ، بردار نرمال n و زاویه لغزش λ و شیب گسل δ در شکل (۱) تعریف شده است. حرکت نسبی (نابرجایی) از دو طرف گسل با $U = (U/2) - (-U/2)$ تعریف می‌شود [۱۲].

^۱ Wenchuan

^۲ Dang

^۳ Tohoku

۲-۱-۱- تابع منبع امتدادلغز عمودی

طبق توابع منبع $S^s = (s_{1,m}^{n,ij}, \dots, s_{6,m}^{n,ij})$ و $S^t = (s_{1,m}^{t,n,ij}, s_{2,m}^{t,n,ij})$ تابع منبع امتدادلغز عمودی به ترتیب با بردار لغزش و بردار نرمال $v = e_1$ و $n = e_2$ انتخاب شده که یک لغزش راست گرد است. این انتخاب دلالت بر این دارد که تنها المان‌های غیر صفر $v_1 = 1$ و $n_2 = -1$ هستند. روابط (۱۱) و (۱۲) تابع منبع امتدادلغز عمودی را بیان می‌کنند [۱۲].

$$S_{j,m}^{n,12} = -i \frac{(2n+1)\mu}{8\pi n(n+1)r_s^3} \delta_{j4} (\delta_{m2} - \delta_{m,-2}) \quad (11)$$

$$S_{j,m}^{t,n,12} = -\frac{(2n+1)\mu}{8\pi n(n+1)r_s^3} \delta_{j2} \delta_{|m|2} \quad (12)$$

۲-۱-۲- تابع منبع شیب‌لغز عمودی

یک تابع منبع شیب‌لغز عمودی به ترتیب با اختصاص بردار لغزش و بردار نرمال $v = e_3$ و $n = -e_2$ انتخاب شده است. روابط (۱۳) و (۱۴) تابع منبع شیب‌لغز عمودی را نشان می‌دهند [۱۲].

$$S_{j,m}^{n,32} = i \frac{2n+1}{8\pi n(n+1)r_s^2} \delta_{j3} \delta_{|m|1} \quad (13)$$

$$S_{j,m}^{t,n,32} = -\frac{(2n+1)\mu}{8\pi n(n+1)r_s^3} \delta_{j1} (\delta_{m1} - \delta_{m,-1}) \quad (14)$$

در روابط بالا δ_{ij} دلتای کرونکر است. بعد از حل این روابط جابجایی معرفی شده در رابطه (۳) به دست می‌آید. با استفاده از اجزا جابجایی تعریف شده در رابطه (۳) تابع گرین کرنش می‌تواند به آسانی بیان شود.

۲-۱-۳- تابع گرین

در این بخش تابع گرین تغییر شکل هم لرزه در یک مدل همگن با نابرجایی کروی را بیان می‌کنیم. توابع گرین برای محاسبه تغییر شکل هم لرزه با ۲ نوع از توابع منبع وابسته امتدادلغز عمودی و شیب‌لغز عمودی در یک مدل زمین متقارن کروی استفاده می‌شوند که روابط (۱۵) تا (۲۰) توابع گرین جابجایی برای این ۲ نوع تابع منبع وابسته را بیان می‌کنند.

$$Y_n^{-|m|}(\theta, \varphi) = (-1)^m P_n^{|m|}(\cos \theta) e^{-i|m|\varphi} \quad (8)$$

در این معادلات P_n^m تابع لژاندر و a شعاع زمین است، اندیس s به تغییر شکل کروی و اندیس t به تغییر شکل توریال اشاره می‌کند. نوز به ترتیب مؤلفه‌هایی از بردار لغزش و نرمال در امتداد مختصات کروی را نشان می‌دهند. $u_r^{ij}(a, \theta, \varphi)$ ، $u_\theta^{ij}(a, \theta, \varphi)$ و $u_\varphi^{ij}(a, \theta, \varphi)$ سه مؤلفه جابجایی در مختصات کروی را نشان می‌دهد. متغیرهای y ، $y_{k,m}^{n,ij}$ و $y_{k,m}^{t,n,ij}$ با حل معادلات مرتبه اول خطی از تعادل روابط تنش و کرنش و معادلات پواسن برای تغییر شکل به دست می‌آیند.

با در نظر گرفتن $Y^s = (y_{1,m}^{n,ij}, \dots, y_{6,m}^{n,ij})^T$ و $Y^t = (y_{1,m}^{t,n,ij}, y_{2,m}^{t,n,ij})^T$ می‌توان توابع منبع را در رابطه (۹) نوشت [۱۲].

$$S^{s,t} = [Y^{s,t}(r_s + 0) - Y^{s,t}(r_s - 0)] \delta(r - r_s) \quad (9)$$

بردارهای $S^s = (s_{1,m}^{n,ij}, \dots, s_{6,m}^{n,ij})$ توابع منبع کروی و $S^t = (s_{1,m}^{t,n,ij}, s_{2,m}^{t,n,ij})$ توابع منبع توریال را معرفی می‌کنند. با در نظر گرفتن شرایط ناپیوستگی و شرایط مرزی آزاد رابطه (۱۰) را برای متغیرهای y ، $y_{k,m}^{n,ij}$ و $y_{k,m}^{t,n,ij}$ داریم [۱۲].

$$\forall n, m, i, j : y_{2,m}^{n,ij}(a) = y_{4,m}^{n,ij}(a) \\ = y_{6,m}^{n,ij}(a) = y_{2,m}^{t,n,ij}(a) = 0 \quad (10)$$

نتیجه حاصل از تقارن تابع منبع $S^{s,t}$ برای متغیرهای y را به صورت $y_{k,m}^{t,n,ij} = y_{k,m}^{t,n,ji}$ و $y_{k,m}^{n,ij} = y_{k,m}^{n,ji}$ داریم. از این رو تعداد راه‌حل‌های $y_{k,m}^{n,ij}(a)$ و $y_{k,m}^{t,n,ij}(a)$ به ۶ تا کاهش می‌یابند. بنا بر تقارن در داخل هندسه گسل تعداد مؤلفه‌ها از ۶ به ۴ می‌رسند. روابط به دست آمده به این معنی است که اگر هر ۴ راه‌حل وابسته به دست آید راه‌حل‌های دیگر نیز به راحتی به دست می‌آیند. راه‌حل‌های $y_{k,m}^{n,1}$ ، $y_{k,m}^{n,33}$ و $y_{k,m}^{n,22}$ و $y_{k,m}^{n,32}$ متناظرشان برای توریال انتخاب می‌شود که به ترتیب با یک تابع منبع امتدادلغز عمودی، یک تابع منبع شیب‌لغز عمودی، یک تابع منبع بازشدگی افقی در امتداد یک گسل عمودی و یک تابع منبع بازشدگی عمودی در امتداد یک گسل افقی برانگیخته می‌شوند. در اینجا دو حالت تابع منبع امتدادلغز عمودی و تابع منبع شیب‌لغز عمودی را بیان می‌کنیم [۱۲].

حال با روابط ذکرشده فوق برای گسل‌های مختلف در صورتی که زلزله رخ داده باشد و یا حرکتی ایجاد شود، می‌توان با داشتن اطلاعات موردنیاز به محاسبه جابجایی در آن منطقه پرداخت.

۳- آنالیز حساسیت

در این تحقیق، هدف از آنالیز حساسیت بررسی پارامترهای مدل برای برآورد اختلاف میدان جابجایی هم لرزه گسلی است. برای انجام این آنالیز نیاز به یک گسل مشخص می‌باشد. یک گسل شبیه‌سازی شده با مشخصات جدول (۱) را در نظر گرفته و به بررسی تغییرات اختلاف میدان جابجایی حاصل از دو مدل نیم فضا و کروی تحت تغییر در پارامترهای موردنیاز دو مدل می‌پردازیم. برای این کار از رسم یک پروفیل طولی بر اساس فاصله از مرکز گسل استفاده کردیم، در شکل (۲) اختلاف میدان جابجایی در دو مدل نیم فضا و کروی رسم شده است.

$$\hat{u}_r^{12}(a, \theta) = -2 \sum_{n=2}^{\infty} y_{1,2}^{n,12}(a) P_n^2(\cos \theta) \quad (15)$$

$$\hat{u}_\theta^{12}(a, \theta) = -2 \sum_{n=2}^{\infty} \left[y_{3,2}^{n,12}(a) \frac{\partial P_n^2(\cos \theta)}{\partial \theta} + 2 y_{1,2}^{t,n,12}(a) \frac{P_n^2(\cos \theta)}{\sin \theta} \right] \quad (16)$$

$$\hat{u}_\phi^{12}(a, \theta) = -2 \sum_{n=2}^{\infty} \left[2 y_{3,2}^{n,12}(a) \frac{P_n^2(\cos \theta)}{\sin \theta} + y_{1,2}^{t,n,12}(a) \frac{\partial P_n^2(\cos \theta)}{\partial \theta} \right] \quad (17)$$

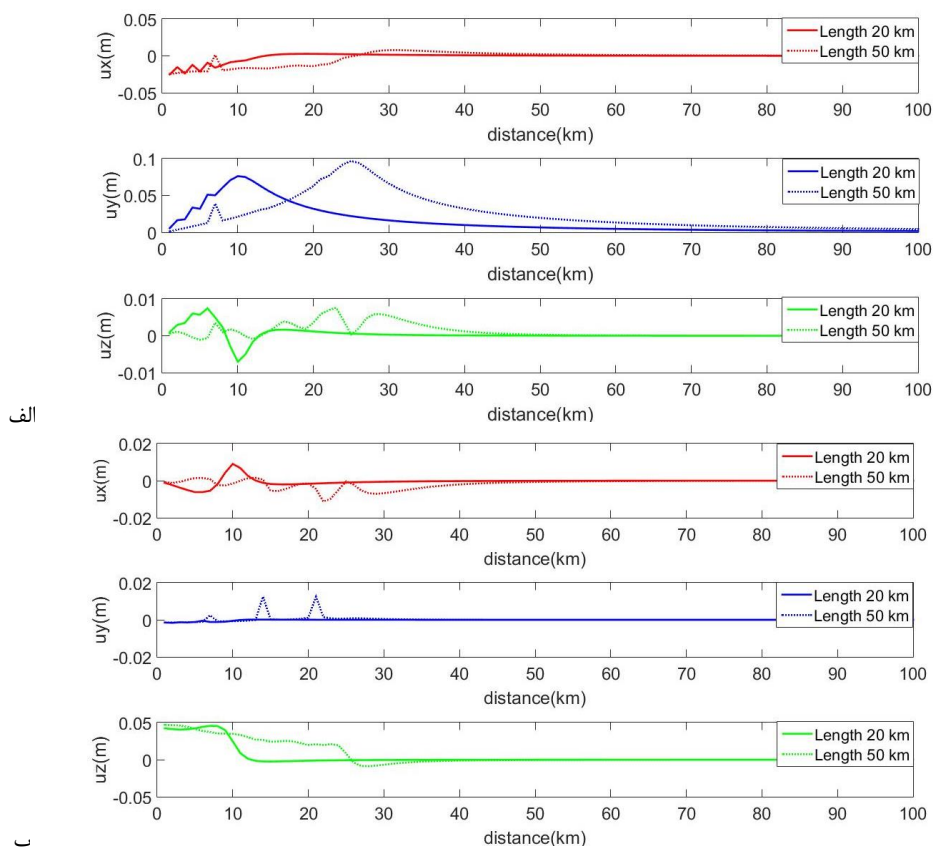
$$\hat{u}_r^{32}(a, \theta) = -2 \sum_{n=1}^{\infty} y_{1,1}^{n,32}(a) P_n^1(\cos \theta) \quad (18)$$

$$\hat{u}_\theta^{32}(a, \theta) = -2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[y_{3,1}^{n,32}(a) \frac{\partial P_n^1(\cos \theta)}{\partial \theta} - y_{1,1}^{t,n,32}(a) \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \right] \quad (19)$$

$$\hat{u}_\phi^{32}(a, \theta) = 0 \quad (20)$$

جدول ۱- مشخصات گسل مرجع

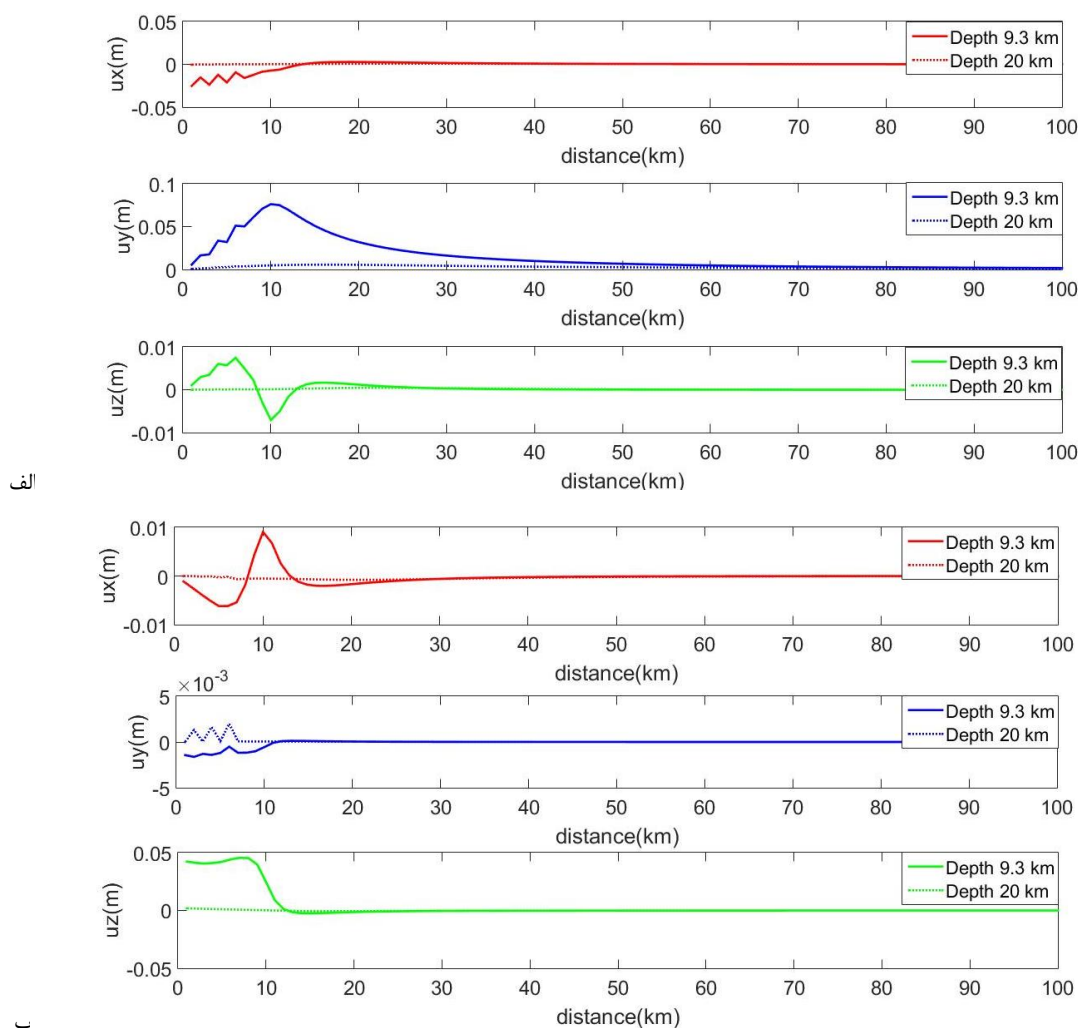
طول جغرافیایی (deg)	عرض جغرافیایی (deg)	طول (km)	عرض (km)	عمق (km)	شیب (deg)	میزان لغزش (m)	
						امتداد	شیب
۵۸/۳۶	۲۹/۰۴	۲۰	۸	۹/۳	۸۸/۸	۲	۲



شکل ۲- اختلاف میدان جابجایی برای گسل مرجع و گسلی تحت افزایش طول الف: در حالت امتدادلغز و ب: در حالت شیب‌لغز

جابجایی در دو مدل نیم فضا و کروی افزایش یافته است. پارامتر دومی که تحت تغییر قرار می گیرد، مقدار عمق گسل می باشد. در شکل (۳) اختلاف میدان جابجایی حاصل از مدل نیم فضا و کروی از گسل مرجع و گسلی با عمق ۲۰ کیلومتر و باقی پارامترها یکسان با گسل مرجع را در یک پروفیل طولی ۱۰۰ کیلومتری رسم کرده ایم.

همان طور که از شکل (۲) مشاهده می شود در هر دو حالت امتداد لغز و شیب لغز یک پروفیل طولی ۱۰۰ کیلومتری از اختلاف میدان جابجایی دو مدل کروی و نیم فضا در گسل مرجع و گسلی با طول ۵۰ کیلومتر و باقی پارامترها یکسان با گسل مرجع، رسم شده است. با توجه به نمودارهای ترسیم شده در شکل (۲)، با افزایش طول گسل از ۲۰ کیلومتر به طول ۵۰ کیلومتر اختلاف میدان

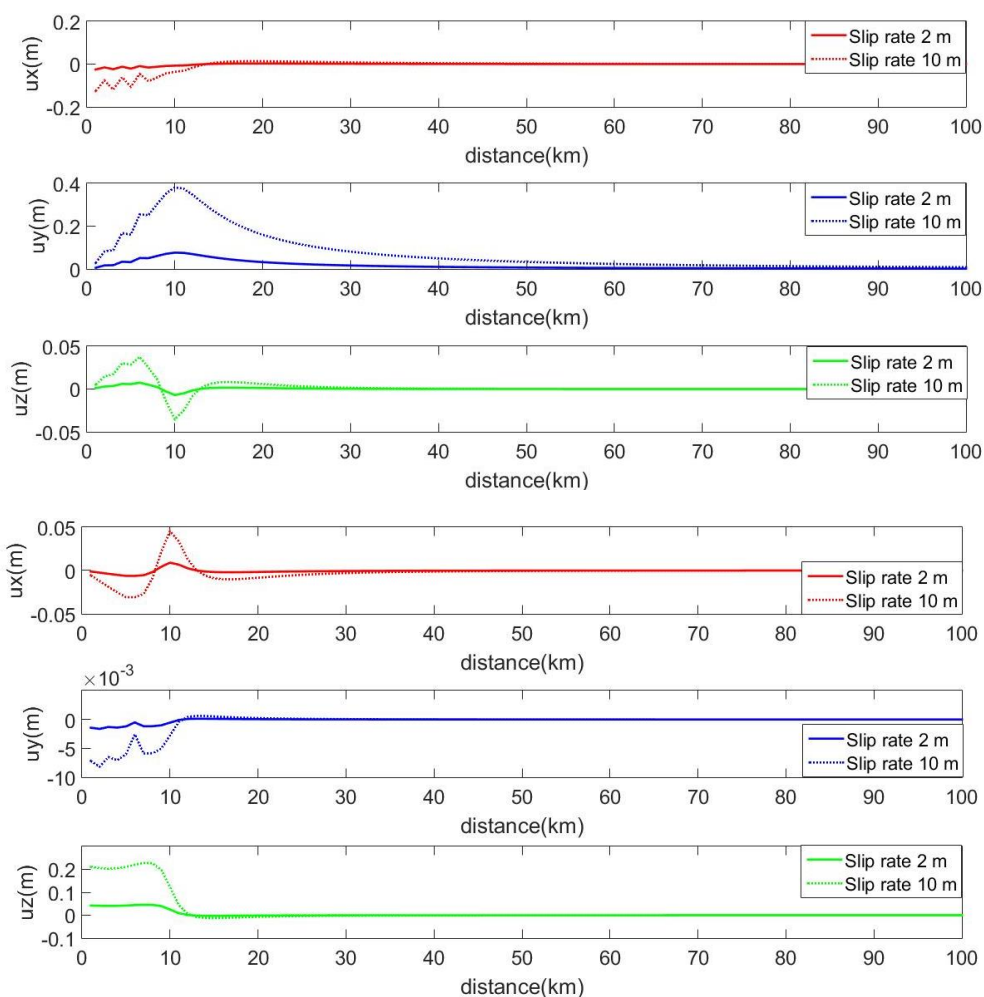


شکل ۳- اختلاف میدان جابجایی برای گسل مرجع و گسلی تحت افزایش عمق الف: در حالت امتداد لغز و ب: در حالت شیب لغز

مدل نیم فضا و کروی تحت تأثیر قرار گرفته اند. پارامتر بعدی که مورد بررسی قرار می دهیم میزان لغزش می باشد. در شکل (۴) اختلاف میدان جابجایی حاصل از مدل نیم فضا و کروی در گسل مرجع و گسلی با میزان لغزش ۱۰ متر و باقی پارامترها یکسان با گسل مرجع را در یک پروفیل طولی ۱۰۰ کیلومتری رسم کرده ایم.

با توجه به پروفیل رسم شده در شکل (۳) مشاهده می شود در هر دو حالت امتداد لغز و شیب لغز اختلاف میدان جابجایی دو مدل کروی و نیم فضا در گسل مرجع و گسلی با عمق ۲۰ کیلومتر و باقی پارامترها یکسان با گسل مرجع، ترسیم شده است. با توجه به نمودارهای رسم شده در شکل (۳) می توان به این نتیجه دست یافت که با افزایش عمق گسل از ۹/۳ به ۲۰ کیلومتر، اختلاف میدان جابجایی در دو

الف



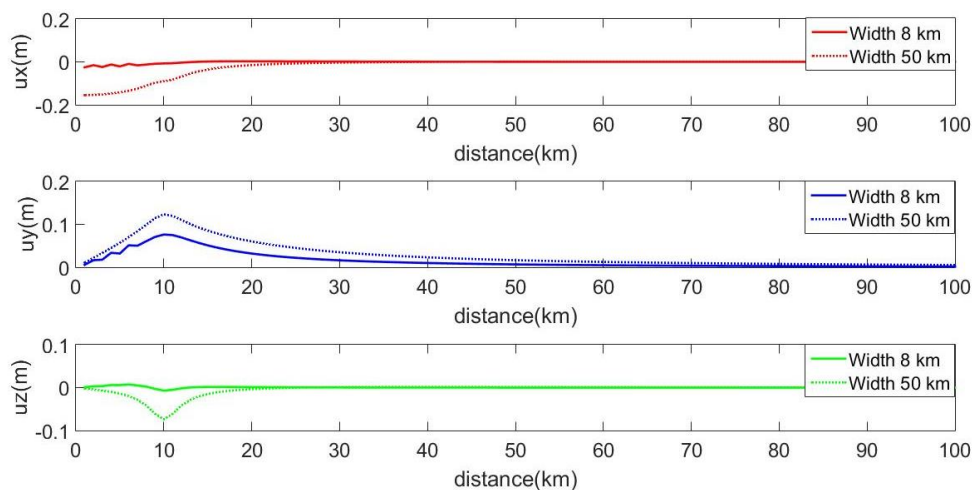
ب

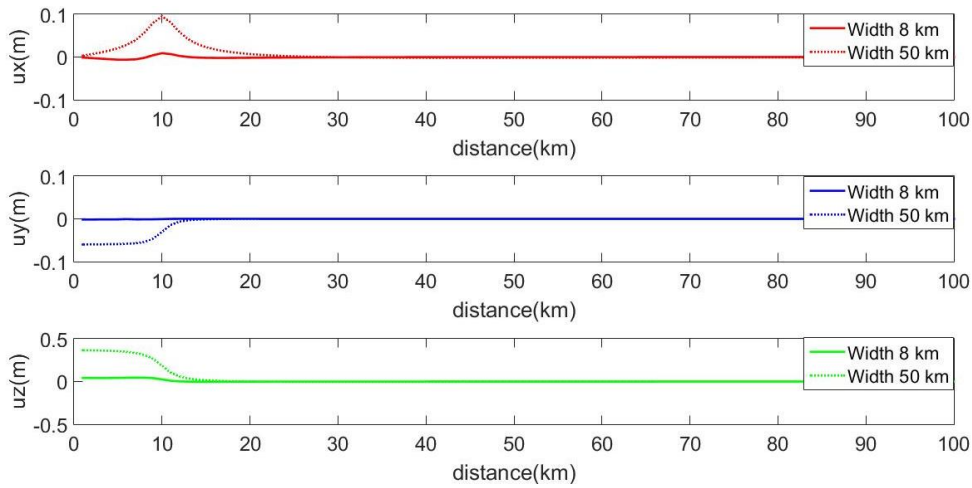
شکل ۴- اختلاف میدان جابجایی برای گسل مرجع و گسلی تحت افزایش میزان لغزش الف: در حالت امتدادلغز و ب: در حالت شیب‌لغز

به این منظور عمق گسل نیز تغییر می‌دهیم. شکل (۵) اختلاف میدان جابجایی حاصل از دو مدل کروی و نیم فضا را برای گسل مرجع و گسلی با عرض ۵۰ کیلومتر و باقی پارامترها یکسان با گسل مرجع را در یک پروفیل طولی ۱۰۰ کیلومتری رسم کرده‌ایم.

با توجه به نمودارهای ترسیمی در شکل (۴) مشاهده می‌شود با افزایش میزان لغزش گسل از ۲ متر به ۱۰ متر، اختلاف میدان جابجایی در دو مدل نیم فضا و کروی در هر دو حالت امتدادلغز و شیب‌لغز افزایش یافته است. پارامتر چهارمی که بررسی می‌کنیم عرض گسل می‌باشد با تغییر در عرض گسل مقدار $w \times \sin \delta$ تغییر می‌کند،

الف



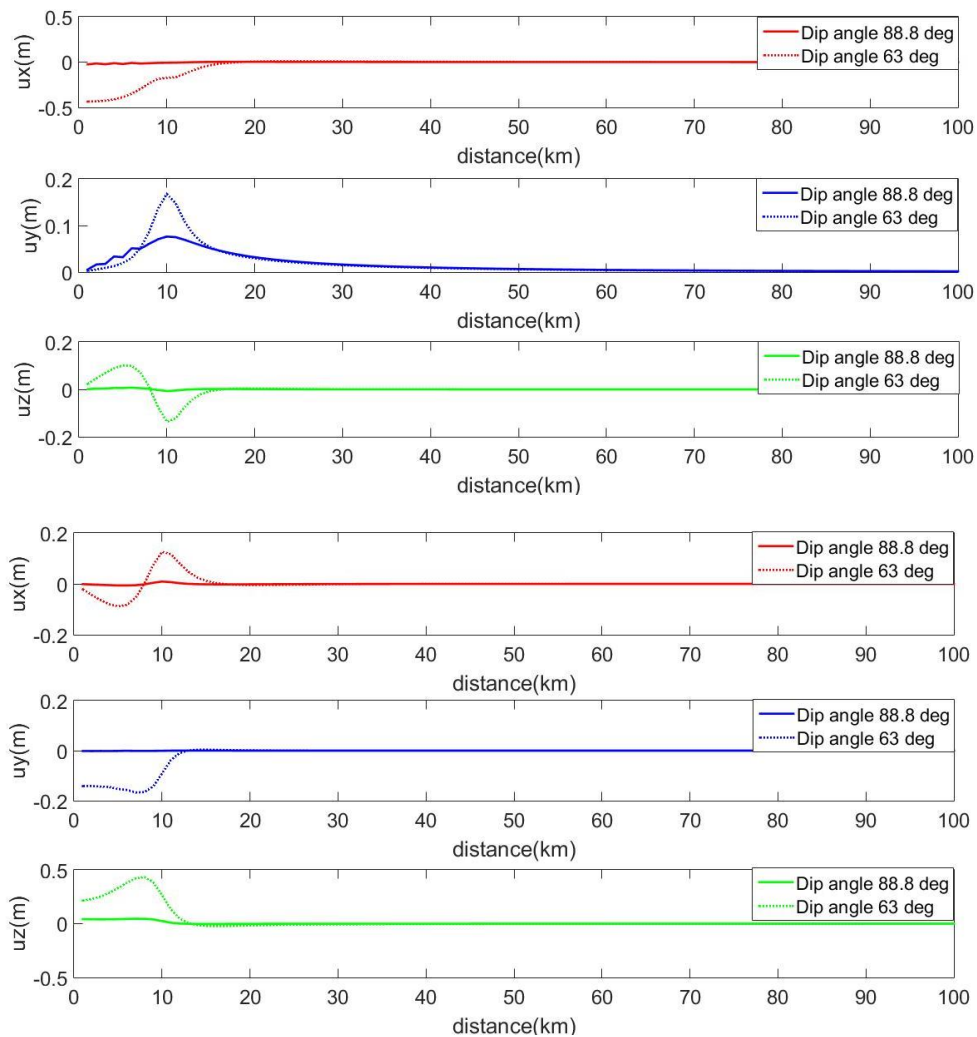


ب

شکل ۵- اختلاف میدان جابجایی برای گسل مرجع و گسلی ب افزایش عرض الف: در حالت امتداد لغز و ب: در حالت شیب لغز

میدان جابجایی حاصل از دو مدل کروی و نیم فضا را برای گسل مرجع و گسلی با زاویه شیب ۶۳ درجه و باقی پارامترها یکسان با گسل مرجع را در یک پروفیل طولی ۱۰۰ کیلومتری رسم کرده ایم.

با توجه به شکل (۵) (الف و ب) افزایش اختلاف میدان جابجایی در دو مدل کروی و نیم فضا را با افزایش عرض گسل از ۸ به ۵۰ کیلومتر می توان مشاهده نمود. پارامتر آخر زاویه شیب سطح گسل با سطح افق می باشد. اختلاف



الف

ب

شکل ۶- اختلاف میدان جابجایی برای گسل مرجع و گسل با افزایش زاویه شیب الف: در حالت امتداد لغز و ب: در حالت شیب لغز

آن‌ها را از نظر حساسیت شناسایی و رتبه‌بندی کرد. جدول (۲)، تغییرات بازه اختلاف میدان جابجایی دو مدل کروی و نیم فضا را با تغییر تک‌به‌تک پارامترهای موردنیاز مدل برای حالت امتدادلغز نشان می‌دهد. جدول (۳) نیز همین تغییرات را برای حالت شیب‌لغز نشان می‌دهد.

با توجه به نمودارهای شکل (۶)، با کاهش زاویه شیب به ۶۳ درجه، افزایش اختلاف میدان جابجایی در دو مدل کروی و نیم فضا در دو حالت امتدادلغز و شیب‌لغز دیده می‌شود. در زوایای شیب میانه نسبت به زوایای بالا و پایین اختلاف میدان جابجایی بیشتری دیده می‌شود. با توجه به تغییر پارامترهای مدل به صورت تک‌تک، می‌توان

جدول ۲- بازه اختلاف میدان جابجایی در حالت امتدادلغز

طول (km)	عرض (km)	عمق (km)	شیب (deg)	میزان لغزش (m)	اختلاف میدان جابجایی (m)	
					افقی	قائم
۲۰	۸	۹/۳	۸۸/۸	۲	-۰/۲۹۷~۰/۰۲۸	-۰/۰۶۵~۰/۰۷۱
۲۱	۸	۹/۳	۸۸/۸	۲	-۰/۲۹۷~۰/۰۰۷	-۰/۰۶۸~۰/۰۷۲
۲۰	۹	۱۰/۳	۸۸/۸	۲	-۰/۳۳۳~۰/۰۱۱	-۰/۰۷۶~۰/۰۸۱
۲۰	۸	۹/۳	۸۸/۸	۳	-۰/۴۴۶~۰/۰۴۲	-۰/۰۹۸~۰/۱۰۶۵
۲۰	۸	۱۰/۳	۸۸/۸	۲	-۰/۱۹۷~۰/۰۲۱	-۰/۰۴۹~۰/۰۵۴
۲۰	۸	۸/۳	۶۱	۲	-۰/۴۳۸~۰/۰۰۰۶	-۰/۱۲۷~۰/۱۳۴

است و به دنبال آن پارامترهای عمق گسل، زاویه شیب گسل و عرض گسل و در آخر طول گسل بر اختلاف میدان جابجایی تأثیرگذارند. با ویژگی‌های در نظر گرفته شده برای گسل شبیه‌ساز مشاهده می‌شود افزایش عمق باعث کاهش اختلاف میدان جابجایی شده است.

با مشاهده جدول (۲)، بازه اختلاف میدان جابجایی در دو مدل کروی و نیم فضا را برای حالت گسل امتدادلغز می‌بینیم. با توجه به جدول (۲) دیده می‌شود با افزایش میزان لغزش اختلاف میدان جابجایی افزایش یافته و این پارامتر تأثیر بیشتری نسبت به پارامترهای دیگر داشته

جدول ۳- بازه اختلاف میدان جابجایی در حالت شیب‌لغز

طول (km)	عرض (km)	عمق (km)	شیب (deg)	میزان لغزش (m)	اختلاف میدان جابجایی (m)	
					افقی	قائم
۲۰	۸	۹/۳	۸۸/۸	۲	-۰/۲۶۷~۰/۰۸۸	-۰/۳۸۱~۰/۳۷۱
۲۱	۸	۹/۳	۸۸/۸	۲	-۰/۲۹۱~۰/۰۲۸	-۰/۳۹۴~۰/۳۸۱
۲۰	۹	۱۰/۳	۸۸/۸	۲	-۰/۳۰۲~۰/۰۷۸	-۰/۴۲۷~۰/۴۱۲
۲۰	۸	۹/۳	۸۸/۸	۳	-۰/۴۰۱~۰/۱۳۵	-۰/۵۷۳~۰/۵۵۷
۲۰	۸	۱۰/۳	۸۸/۸	۲	-۰/۱۸۷~۰/۰۶۵	-۰/۲۸۱~۰/۲۸۵
۲۰	۸	۸/۳	۶۱	۲	-۰/۳۰۴~۰/۱۳۲	-۰/۳۶۴~۰/۳۹۹

۶- نتیجه‌گیری

با استفاده از نتایج اختلاف میدان جابجایی حاصل از دو مدل کروی و نیم فضا، آنالیز حساسیتی در پارامترهای مدل انجام می‌دهیم. این پارامترها را با توجه به میزان تأثیرشان در اختلاف میدان جابجایی دو مدل بررسی می‌کنیم. نتایج حاصل از این آنالیز نشان‌دهنده حساسیت بالای پارامتر میزان لغزش و کمترین حساسیت مربوط به

با توجه به جدول (۳)، بازه اختلاف میدان جابجایی در حالت شیب‌لغز با تغییر تک‌به‌تک پارامترهای مدل دچار تغییر شده و این تغییر در پارامتر میزان لغزش بیشتر از پارامترهای دیگر بوده و به دنبال آن عمق گسل، زاویه شیب و عرض گسل و طول گسل به ترتیب تأثیر بر روی اختلاف میدان جابجایی دارند.

با توجه به جدول (۴) میزان لغزش بیشترین تأثیر را در اختلاف میدان جابجایی بین دو مدل کروی و نیم فضا دارد. این نتایج به این معنی می باشد که هرچه میزان لغزش بیشتر شود مدل کروی اولویت بیشتری نسبت به مدل نیم فضا در برآورد میدان جابجایی دارد. به همین ترتیب پارامترهای بعدی با توجه به اولویتشان، تأثیر را در اختلاف میدان جابجایی بین دو مدل کروی و نیم فضا می گذارند. در اینجا می توان این نکته را مطرح کنیم، هر جا اختلاف از دقت میدان جابجایی که از طریق داده های مشاهداتی به دست آمده، بیشتر شود باید مدل کروی جایگزین مدل نیم فضا شود.

پارامتر طول در اختلاف میدان جابجایی دو مدل است. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، جدول (۴) به ترتیب کاهش حساسیت اختلاف دو مدل نسبت به هر پارامتر تهیه شده است.

جدول ۴- حساسیت اختلاف دو مدل نسبت به پارامترهای گسل

ردیف	نام پارامتر
۱	میزان لغزش
۲	عمق گسل
۳	شیب گسل
۴	عرض گسل
۵	طول گسل

مراجع

- [1] Cooper, M. A. R., 1987. CONTROL SURVEYS IN ENGINEERING. Mackays of Chatham. Great Britain.
- [2] Dong, J., Sun, W., Zhou, X., Wang, R., 2014. Effects of Earth's layered structure, gravity and curvature on coseismic deformation. *Geophysical Journal International*. 199, 1442-1451.
- [3] Dong, J., Sun, W., Zhou, X., Wang, R., 2016. An analytical approach to estimate curvature effect of coseismic deformations. *Geophysical Journal International*. 206, 1327-1339.
- [4] Dong, J., Sun, W., 2017. Internal co-seismic deformation and curvature effect based on An analytical approach. *Earthq Sci*. 30, 47-56.
- [5] Okada, Y., 1985. SURFACE DEFORMATION DUE TO SHEAR AND TENSILE FAULTS IN A HALF-SPACE. *Bulletin of the Seismological society of America*. Vol. 75, No. 4, pp. 1135-1154.
- [6] Okada, Y., 1992. INTERNAL DEFORMATION DUE TO SHEAR AND TENSILE FAULTS IN A HALF-SPACE. *Bulletin of the Seismological society of America*. Vol. 82, No. 2, pp. 1018-1040.
- [7] Fu, G., Sun, W., 2006. Global co-seismic displacements caused by the 2004 Sumatra-Andaman earthquake (Mw=9.1). *Earth Planets Space*. 58, 149-152.
- [8] Fu, G., 2010. Far-field deformation caused by the 2004 Sumatra earthquake. *Geodesy and Geodynamics*. No. 1, 70-78.
- [9] Fu, G., Sun, W., Fukuda, Y., Gao, Sh., Hasegawa, T., 2010. Effects of Earth's curvature and radial heterogeneity in dislocation studies: case studies of the 2008 Wenchuan earthquake and the 2004 sumatra earthquake. *Earthq sci*. 23, 301-308.
- [10] Sun, W., Okubo, Sh., 2002. Effects of earth's spherical curvature and radial heterogeneity in dislocation studies-for a point dislocation. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*. VOL. 29, No. 12, 46-49.
- [11] Sun, W., Okubo, S., Fu, G., 2006. Green's Function of Co-seismic Strain Changes and Investigation of Effects of Earth's Curvature and Radial Heterogeneity, *Geophys. J. Int*. 167, 1273-1291.
- [12] Sun, W., Okubo, Sh., Fu, G., Araya, A., 2009. General formulations of global co-seismic deformations caused by an arbitrary dislocation in a spherically symmetric earth model-applicable to deformed earth surface and space-fixed point. *Geophysical Journal International*. 177, 817-833.
- [13] Wang, W., Sun, W., Jiang, Z., 2010. Comparison of fault models of the 2008 Wenchuan earthquake (Ms8.0) and spatial distributions of co-seismic deformations. *Tectonophysics*. 491, 85-95.
- [14] Zhang, X., Okubo, Sh., Tanaka, Y., Li, H., 2016. Coseismic gravity and displacement changes of Japan Tohoku earthquake (Mw 9). *Geodesy and Geodynamics*. Vol. 7, No. 2, 95-100.
- [15] Zwieter, G.J.van., Hanssen, R.F., Gutiérrez, M.A., 2013. Overview of a range of solution methods for elastic dislocation problems in geophysics. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*. Vol. 118, 1721-1732.