

مدل سازی میدان جابه جایی ژئودتیکی ناشی از فعالیت های مخزن ماگمای آتشفشان و تحلیل حساسیت پارامترهای مدل

مینا علی صوفی^{۱*} و بهزاد وثوقی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
^۲ دانشیار، گروه مهندسی ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

(دریافت: ۹۲/۱۱/۲۸، پذیرش نهایی: ۹۳/۱۱/۲۸)

چکیده

بررسی حرکات آتشفشان و تغییر شکل سطحی حاصل از آن، امری ضروری می باشد. مدل های آتشفشانی در بررسی تغییر شکل پوسته، دید بارزشی نسبت به ویژگی های آتشفشان ها و رفتارشان در طول زمان فراهم می کنند. یکی از مدل های تحلیلی میدان جابه جایی ژئودتیکی آتشفشان، مدل موگی است. این مدل، مخزن ماگمای آتشفشان با هندسه کروی را به منزله منبع تغییر شکل فرض می کند. مدل سازی میدان جابه جایی با استفاده از مدل های تحلیلی موجود مستلزم مشخص کردن پارامترهای رئولوژی و زمین شناسی مخزن آتشفشان است. به عبارتی، با در نظر گرفتن فرضیاتی در مورد خصوصیات پوسته زمین در منطقه مورد نظر، می توان از میدان جابه جایی حاصل از مشاهدات ژئودتیکی در حکم مسئله مقدار مرزی مدل های تحلیلی استفاده کرد و با حل معکوس این معادله ها به پارامترهای مخزن دست یافت. در این تحقیق پس از استخراج پارامترهای مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مدل سازی میدان جابه جایی ناشی از آتشفشان با مدل تحلیلی موگی صورت گرفت. در ادامه پس از مدل سازی میدان جابه جایی، تحلیل حساسیت میدان جابه جایی نسبت به پارامترهای ورودی مدل عملی شد. در این تحلیل میدان جابه جایی به تغییرات کمیت های مختصاتی مرکز منبع بیشترین حساسیت را نشان داد. اما تغییرات کمیت اختلاف حجم منبع، تأثیر قابل توجهی بر میدان جابه جایی ایجاد نکرد. یکی از نتایجی که این تحلیل به دست می دهد این است که مدل در تعیین پارامترهای موقعیت منبع قوی تری است ولی برای تعیین پارامتر تغییر حجم منبع ضعیف عمل می کند. به منظور استخراج پارامترهای موقعیت منبع، می توان با تغییر این پارامترها و عکس العمل خروجی مدل و مقایسه آن با مشاهدات به مقدار بهینه آنها دست یافت.

واژه های کلیدی: تحلیل حساسیت، مدل موگی، مدل سازی میدان جابه جایی، تغییر شکل های آتشفشان، الگوریتم ژنتیک

Modeling of geodetic displacement field caused by the activities of the volcano's magma reservoir and sensitivity analysis of the parameters of the model

Alisufi, M.¹ and Voosoghi, B.²

M.Sc. Student, Faculty of Geodesy & Geomatic Engineering, K. N Toosi University of Technology, Tehran, Iran
Associate Professor, Faculty of Geodesy & Geomatic Engineering, K. N Toosi University of Technology, Tehran, Iran
(Received: 17 Feb 2014, Accepted: 17 Feb 2015)

Summary

Volcanoes and their eruption indicate dynamic process of the inside of ground, which are often located along the boundaries of tectonic plates. Study of movements and surface deformation of the volcano is essential because surface deformation reflects changes in the subsurface. In the studies of crustal deformation, volcanic models provide valuable insights of the features of volcanoes and their behavior throughout time. These models have been adjusted based on geodetic and seismic geological data. According to the geometry of deformation source, various models have been proposed for volcanoes. One of the

analytical geodetic displacement models is Mogi model, which assumes the volcano's magma reservoir with spherical geometry as a source of surface deformation. In the Mogi model, the Earth's crust has been described as a half-bound elastic body which is called an elastic half-space. Half-space is a planar surface, which is taken as surrounding an environment and extended indefinitely in all direction. Displacement field of the Mogi model is caused by hydrostatic pressure change in a finite spherical source with a radius smaller than its depth in an elastic half-space. Modeling of displacement field using the analytical models requires determination of rheological and geological parameters of the volcanic magma reservoir. Hence, by taking into account the assumptions about the properties of the crust in the desired area, one can obtain displacement field from geodetic observations as the boundary value problem of the elastic models. Then geophysical and geological parameters can be obtained by solving the inverse problem. On the other hand, solving the inverse problem has many answers. Hence, optimization algorithms are used to solve this problem. Optimization algorithms gain the most likely answers.

In this study, parameter extraction was performed by genetic optimization algorithm. In this algorithm mating probability 50% and mutation probability 5% was assumed for a population of 1,000 subjects. RMSE (Root Mean Square Error) of inversion was 0.006 mm. After determining the required parameters, the displacement field modeling was done by the Mogi model. Finally, The sensitivity analysis of the displacement field to changes of the model input parameters was evaluated. The purpose of sensitivity analysis is to discover changes in which the input parameters, most affected the model output. An important result that can be extracted from the sensitivity analysis is that a more sensitive parameter is a more one reliable in the parameter extraction process. By performing this analysis, the displacement field showed most sensitivity to the coordinate quantities of the source center and least sensitivity to the volume change of the quantity of magma reservoir. This analysis indicates that the Mogi model is more robust in determining the location parameters of the source, but is poor in determining the source volume change parameters. In order to extract the parameter, it can be possible to obtain the optimal value by changing the sensitive parameters and comparing the output with the observations. It is notable that the Mogi model is very sensitive to the shallow sources.

Keywords: Sensitivity analysis, Mogi model, Displacement field modeling, Volcanic deformation, Genetic algorithm

۱ مقدمه

شکل پوسته مدل‌های آتشفشانی که براساس اطلاعات زمین‌شناسی، ژئودتیکی و لرزه‌ای تنظیم شده‌اند، دید با ارزشی از ویژگی‌های آتشفشان‌ها و رفتار آنها در طول زمان فراهم می‌شود.

با توجه به هندسه منبع ایجادکننده تغییر شکل، مدل‌های متنوعی برای آتشفشان مطرح شده است. یکی از انواع مدل‌های تحلیلی میدان جابه‌جایی ژئودتیکی، مدل تحلیلی موگی است که مخزن ماگمای آتشفشان با هندسه کروی را درحکم منبع تغییر شکل‌های سطحی فرض می‌کند. مدل‌سازی میدان جابه‌جایی با استفاده از مدل‌های تحلیلی

بررسی حرکات آتشفشان و تغییر شکل سطحی حاصل از آن، امری ضروری است. اولین قدم برای درک بهتر فرایندهای فورانی آتشفشان، زیر نظر گرفتن و پایش تغییرات اطراف آتشفشان‌ها است. اندازه‌گیری به روش‌های پایش تغییر شکل زمینی قادر به تعیین رفتار زمین‌ساختی آینده زمین و یا رفتار گذشته آن نیستند. به همین علت شاخه‌های گوناگون علوم زمین با در نظر گرفتن فرضیاتی در مورد رفتار و خصوصیات پوسته زمین در مناطق اطراف آتشفشان، از مدل‌هایی بر پایه ریاضیات و فیزیک برای بیان تغییر شکل‌های آن استفاده می‌کنند. در تحقیقات تغییر

۲ مدل تحلیلی موگی (مدل کروی)

علی‌رغم بسیاری از ساده‌سازی‌های ذاتی در این فرمول‌بندی، بهترین و پر استفاده‌ترین روش برای مدل کردن تغییر شکل سطحی حاصل از یک تورم یا کاهش تورم مخزن ماگما، است. به عقیده موگی منبع کروی به خوبی با ایده مخزن ماگما زیر سطح زمین هماهنگ است. از منبع فشار نقطه‌ای یا منبع اتساع نقطه‌ای اغلب به نام مدل موگی نام برده می‌شود (جانسن، ۲۰۰۷).

در مدل موگی جابه‌جایی‌ها با تغییر فشار هیدروستاتیکی در یک منبع کروی محدود در یک نیم‌فضای کشسان با شعاعی کوچک‌تر از عمق آن به صورت رابطه‌های (۱)، (۲) و (۳) داده می‌شود (دیزورینسن، ۲۰۰۷):

$$\begin{pmatrix} d_e \\ d_n \\ d_v \end{pmatrix} = \frac{\alpha^3 \Delta p (1-\nu)}{\mu} \begin{pmatrix} \frac{x-x_0}{R^3} \\ \frac{y-y_0}{R^3} \\ \frac{d}{R^3} \end{pmatrix} \quad (1)$$

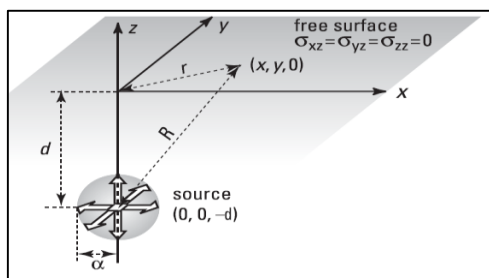
$$\Delta v = \frac{\alpha^3 \Delta P \pi}{\mu} \quad (2)$$

$$R = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (0-d)^2} \quad (3)$$

در رابطه (۱) (d_e, d_n, d_v) بردار جابه‌جایی در نقطه $(x, y, 0)$ (نقطه‌ای روی سطح آزاد)، $(x_0, y_0, -d)$ مختصات مرکز حفره، R فاصله شعاعی از مرکز حفره تا نقطه روی سطح آزاد، ΔP مجموع تغییر فشار منبع، Δv تغییر حجم منبع ناشی از تغییر فشار، α شعاع منبع، μ مدول کشسانی برشی و ν نسبت پواسون نیم‌فضا هستند.

همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود مدل موگی از یک دستگاه مختصات دکارتی موضعی دست راستی با مختصات مکانی (x, y, z) استفاده می‌کند. دستگاه مختصات موضعی روی سطح آزاد $z=0$ قرار دارد که جهت آن بالای مرکز منبع است که در عمق $-d$ قرار دارد و محور x در امتداد ریشه‌دوانی منبع است. (d_e, d_n, d_v) بردار جابه‌جایی در نقطه $(x, y, 0)$ است (نقطه‌ای روی سطح آزاد)، مرکز حفره در نقطه $(x_0, y_0, -d)$ قرار دارد و R فاصله شعاعی از مرکز حفره تا نقطه روی سطح آزاد است.

موجود مستلزم مشخص ساختن پارامترهای رئولوژی و زمین‌شناسی مخزن آتشفشان است. با در نظر گرفتن فرضیاتی در مورد خصوصیات پوسته زمین در منطقه موردنظر، می‌توان از میدان جابه‌جایی به دست آمده از مشاهدات ژئودتیکی به منزله مسئله مقدار مرزی مدل‌های کشسان مربوط استفاده کرد و با حل معکوس این معادله‌ها به پارامترهای ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی منطقه دست یافت. با توجه به اهمیت شناخت رفتارهای رئولوژیکی آتشفشان‌ها به خصوص برای کشور ما با توجه به حضور آتشفشان‌هایی مثل آتشفشان نیمه فعال دماوند لازم است که مدل‌هایی بیان‌کننده جابه‌جایی‌های ناشی از آنها عرضه شود. مدل‌سازی تحلیلی میدان جابه‌جایی می‌تواند اطلاعات مهمی در مورد رفتار آینده پوسته زمین نواحی اطراف، ناشی از آتشفشان را در اختیار قرار دهد. قبل از مدل‌سازی میدان جابه‌جایی بهتر است ابتدا بررسی جامعی نسبت به مدل‌های بیان‌کننده جابه‌جایی‌های ناشی از آتشفشان صورت گیرد. یکی از این بررسی‌ها تحلیل حساسیت مدل به منظور دستیابی به اطمینان از استخراج این پارامترها با روندهای معکوس است. برای مثال می‌توان به تحلیل حساسیت مدل تحلیلی اکادا (۱۹۸۵)، نوری و همکاران (۱۳۸۸) اشاره کرد. در این تحقیق سعی بر آن داریم که با معرفی مدل تحلیلی موگی و آشنایی با فرضیات مطرح در آن، به تحلیل حساسیت پارامترهای آن پردازیم. این مدل یکی از کاربردی‌ترین مدل‌های آتشفشانی است. منکنی و همکاران (۲۰۱۰) به مدل‌سازی میدان جابه‌جایی در نواحی اطراف آتشفشان کمپی فلگری طی سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷ پرداختند. آنها با استفاده از مدل تحلیلی موگی و روش عددی المان محدود با دو فرض فضای همگن و ناهمگن برای بهینه‌سازی در روند معکوس به مشخصات منبع تغییر شکل دست یافتند. به منظور تحلیل حساسیت مدل موگی ابتدا مدل‌سازی میدان جابه‌جایی توسط روندی معکوس بیان می‌شود و در ادامه به تحلیل حساسیت پارامترهای مدل تحت نگرشی مستقیم می‌پردازیم.



شکل ۱. دستگاه مختصات تعریف شده در مدل موگی (دیزورینسن، ۲۰۰۷).

$$\lambda = \frac{2\mu\nu}{1-2\nu} \quad (۴)$$

در این رابطه، μ تنش برشی را به کرنش مرتبط می کند که یک صلبیت یا سفت شدگی تحت برش را فراهم می کند و دارای واحد فشار است. یک مقدار نوعی برای صخره پوسته ای دست نخورده در محدوده ۱۰۰۰۰ مگا پاسکال تا ۳۰۰۰۰ مگا پاسکال است. صخره شکسته و رسوبات، مقدار کمتر μ از درجه ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ مگا پاسکال دارند. نسبت پواسون (ν) نسبت بین کرنش واحد عرضی به کرنش واحد طول در یک جسم است که از نظر طولی دارای تنش در محدوده کشسان خود است. تجارب آزمایشگاهی روی صخره های سالم مقدار ν را در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۳ نشان داده است و معمولاً ۰/۲۵ یا به طور معادل $\lambda = \mu$ فرض می شود. معادله (۱) اغلب با قرار دادن $\nu = 1/4$ ساده و به صورت روابط (۵) و (۶) داده می شود:

$$\begin{pmatrix} d_e \\ d_n \\ d_v \end{pmatrix} = \frac{3\Delta\nu}{4\pi} \begin{pmatrix} \frac{x-x_0}{R^3} \\ \frac{y-y_0}{R^3} \\ \frac{d}{R^3} \end{pmatrix} \quad (۵)$$

$$\Delta\nu = \frac{\alpha^3 \Delta P \pi}{\mu} \quad (۶)$$

میدان جابه جایی سه بُعدی موگی با استفاده از رابطه تبدیل (۷) به جابه جایی در جهت خط دید ماهواره تبدیل می شود (هنسن، ۲۰۰۲).

$$dr = d_v \cos(\theta) - \sin(\theta) [d_n \cos(H - \frac{3\pi}{2}) + d_e \sin(H - \frac{3\pi}{2})] \quad (۷)$$

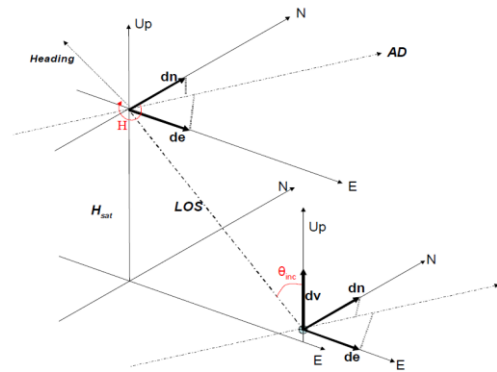
این مدل پوسته زمین را به مثابه جسم کشسان محدود عرضه می کند که درحکم یک نیم فضای کشسان شناخته می شود. نیم فضا دارای یک سطح صفحه ای است که اطراف یک محیط را گرفته است و به طور نامحدود در همه راستاها گسترش یافته است. نیم فضا از نظر مادی همگن و از نظر مکانیکی ایزوتروپیک است و از قانون هوک (Hook's law) پیروی می کند. در آزمایش های کوتاه مدت آزمایشگاهی، صخره ها برای کرنش های کمتر از حدود ۱ درصد (۱۰۰۰۰ ppm) به خصوص در دماهای کم، مثل اجسام کشسان خطی رفتار می کنند. مدل های نیم فضای کشسان اغلب از بسیاری از ویژگی های زمین واقعی صرف نظر می کنند، اما تقریب خوبی از تغییر شکل های نتیجه شده از پدیده های کوتاه مدت نامتناهی روی سطح یا داخل سطح در عمق کم می دهند (دیزورینسن، ۲۰۰۷). در روش فضای کامل از سطح زمین صرف نظر و به پدیده ژئودینامیکی در یک فضای کامل توجه می شود. در این حالت تنش در سطح آزاد غیر صفر است که با شرایط زمین واقعی سازگار نیست. از طرفی مشاهدات ما در نزدیکی سطح زمین به دست می آید و در نتیجه با مدل نیم فضا سازگاری بیشتری دارد. معادله های اصلی برای یک جسم جامد کشسان خطی ایزوتروپیک نیاز به فقط دو ثابت مستقل کشسان برای توضیح رابطه بین تنش و کرنش دارند. معمولاً مدل های منبع آتشفشانی از نسبت پواسون (ν) و مدول کشسانی برشی (μ) مدول صلبیت یا ثابت دوم لامه) استفاده می کنند. اکادا (۱۹۸۵) و سگال (۲۰۱۰) از ۲ ثابت لامه (λ, μ) به صورت رابطه (۴) استفاده کردند:

تولیدکننده جابه‌جایی برآزنده شود، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود که منجر به محتمل‌ترین جواب‌ها می‌شوند.

هر مسئله بهینه‌سازی دارای تعدادی متغیر مستقل است که آنها را متغیرهای طراحی می‌نامند. هدف از بهینه‌سازی، تعیین متغیرهای طراحی است، به گونه‌ای که تابع هدف کمینه یا بیشینه شود. روش‌های بهینه‌سازی به دو دسته کلی روش‌هایی بر مبنای محاسبه گرادیان‌ها و روش‌های غیر مبتنی بر محاسبه گرادیان‌ها تقسیم می‌شوند. در روش‌های نوع اول گرادیان‌های تابع هزینه نسبت به متغیرهای طراحی نقشی اساسی را در فرایند بهینه‌سازی ایفا می‌کنند. الگوریتم‌های نوع اول ممکن است به بهینه‌های موضعی دچار شوند اما سریع به جواب می‌رسند. در روش دوم که به روش‌های تصادفی یا تکاملی معروف است، محاسباتی را برای یافتن احتمال متغیرها به کار می‌برند که سرعت کمتری دارند اما توفیقشان در یافتن بهینه مطلق بیشتر است.

یکی از این روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، الگوریتم ژنتیک است. نگرش اصلی الگوریتم ژنتیک بر مبنای حفظ ژن‌های خوب در نسل جاری و در نتیجه تولید نسلی بهتر در طی فرایند تولید نسل است. الگوریتم ژنتیک را می‌توان به منزله ابزاری قدرتمند در موضوع علوم مرتبط با زمین به کار گرفت (یو و همکاران، ۱۹۹۸). الگوریتم ژنتیک استفاده شده در این تحقیق ساده و مجهز به سه عملگر تکثیر، ترکیب و جهش است که از نخبه‌گرایی هم بهره برده است. الگوریتم ژنتیک با ایجاد یک جمعیت اولیه ۱۰۰۰ نفری از کروموزوم‌ها به صورت تصادفی اما در محدوده مجاز برای کروموزوم‌ها، آغاز به کار می‌کند. پس از تولید جمعیت اولیه، نوبت به انتخاب دو تن از والدین و تلفیق آنها در قالب یک یا دو فرزند و در نهایت جهش فرزندان می‌رسد. والدین با احتمال ترکیب ۵۰٪ با استفاده از روش ترکیب نقطه‌ای ساده همراه یک برون‌یابی تلفیق شدند و فرزندان را تولید کردند (هوپت و هوپت، ۲۰۰۴). سپس برای جلوگیری از همگرایی موضعی فرزندان تحت جهش

که در آن، (d_e, d_n, d_v) مطابق شکل ۲ بردارهای جابه‌جایی در سه جهت (x, y, z) ، θ زاویه بروز (Incidence Angle) ماهواره نسبت به سمت‌القدم (نادیر)، H زاویه سمت (Heading Angle) یا آزیموت ماهواره نسبت به شمال هستند (هنسن، ۲۰۰۲).



شکل ۲. نمایی از سمت راست ماهواره‌ای بالاگذر: زاویه بروز و زاویه سمت ماهواره در این تصاویر مشخص شده است (هنسن، ۲۰۰۲).

۳ حل مسئله معکوس با استفاده از الگوریتم ژنتیک

مدل‌سازی داده‌های ژئودتیکی برای یک آتشفشان با پارامترهای معلوم مسئله مستقیم نامیده می‌شود. از آنجا که پارامترهای مخزن ماگمای آتشفشان (عمق، مؤلفه‌های موقعیت مرکز و تغییر حجم) با ابزار ژئودتیکی دقیق قابل اندازه‌گیری نیستند و فقط می‌توان مقادیر بعضی از آنها را از اطلاعات زمین‌شناسی منطقه به دست آورد، لزوم بهره‌گیری از روندی معکوس مطرح می‌شود. در مسئله معکوس، تقریب کمی مکان، هندسه و دینامیک منابع تغییر شکل به وسیله مقایسه یا برآزش مشاهدات زمینی با مدل‌های ریاضی ایدئال شده به دست می‌آید. باین حال اغلب مسائل معکوس در گروه مسائل فرومعین واقع می‌شوند و جواب منحصر به فردی ندارند و در صورتی می‌توان به جواب منحصر به فرد دست یافت که ماتریس مشاهدات با مرتبه کامل وجود داشته باشد. بنابراین از آنجا که مسئله معکوس به طور مستقیم قابل حل نیست، برای تأمین پارامترهای یکتای منبع تغییر شکل که به بهترین وجه به مدل تحلیلی

با احتمال ۵٪، ویژگی‌های جدیدی را به جامعه افزودند. فرزندان جدید تولید شده جایگزین یکی از افراد نسبت به خود ضعیف‌تر در جمعیت می‌شوند. هر فرد از این جمعیت، روند بقا شامل انتخاب، ترکیب و جهش را به منظور تولید جمعیت جدید در فضای جست‌وجو طی می‌کند تا به این ترتیب نسل بعدی که فرزندان فعلی و والدین برتر هستند، تولید شود. پس از تولید چند نسل، نسلی شامل افراد برتر، دارای کلیه شرایط بهینه، ایجاد می‌شود و به این ترتیب مسئله به سمت یک راه حل بهینه تکامل می‌یابد (ادموند و بورکه، ۲۰۰۵). تابع هدف مورد بررسی ما در الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، اختلاف بین جابه‌جایی‌های محاسباتی با استفاده از مدل مستقیم و جابه‌جایی‌های مشاهده شده با ماهواره‌ها در جهت خط دید ماهواره است.

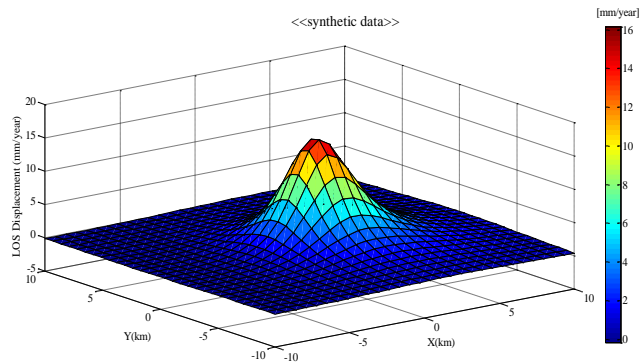
در طول اجرای الگوریتم ژنتیک، چهار متغیر، مولفه‌های مختصات سطحی و عمق و تغییر حجم، مدام در حال تغییرند و نسل‌های جدید را با اعمال قوانین موجود در الگوریتم به وجود می‌آورند؛ تا زمانی که بهترین میزان تابع هدف برابر با مقدار حداقل آن به دست آید و در نهایت یکی از شرط‌های توقف الگوریتم ژنتیک برقرار شود.

۴ نتایج مدل‌سازی میدان جابه‌جایی با استفاده از داده شبیه‌سازی شده

تغییر شکل‌های ناشی از منبعی فرضی (طبق جدول ۱) بر روی شبکه‌ای به ابعاد ۲۰ کیلومتر و فواصل نقاط تقریباً ۷۰۰ متری در شکل ۳ نشان داده شده است. این میدان جابه‌جایی توسط روابط تحلیلی موگی ایجاد شده و در راستای خط دید ماهواره تصویر شده است (طبق رابطه ۷). علی‌رغم پیشرفت علوم اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات مختلف نقشه‌برداری عاری از خطا نمی‌باشند، لذا برای هر چه واقعی‌تر شدن تحلیل مدل، خطایی با توزیع نرمال دارای میانگین صفر و انحراف معیار ± 0.1 میلی‌متر به مشاهدات اعمال نمودیم. تمامی فرضیات مسئله بنا به خصوصیات

آتشفشان کمپی فلگری ایتالیا مقادیری نزدیک به شرایط واقعی را دارا می‌باشند. در جدول ۱، X_0 مولفه طولی مختصات و Y_0 مولفه عرضی مختصات مرکز مخزن آتشفشان تصویر شده بر روی سطح زمین، d عمق مخزن و ΔV اختلاف حجم مخزن ماگما که موجب تغییر شکل سطحی زمین شده، هستند. زوایای θ_{inc} و H به ترتیب زاویه بروز ماهواره نسبت به نادیر و آزیموت ماهواره هستند که با کمک آن‌ها بردار سه بعدی حاصل از مدل موگی به برداری در جهت خط دید ماهواره تصویر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود میدان جابه‌جایی ناشی از آتشفشان رابطه عکسی با فاصله از منبع دارد. این میدان جابه‌جایی درحکم مقادیر مرزی در الگوریتم‌های بهینه‌سازی ایفای نقش می‌کند. با اجرای الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی ژنتیک، با استفاده از شرایط مرزی داده جابه‌جایی، پارامترهای مخزن به دست آمد. در الگوریتم تکاملی ژنتیک بازه‌هایی شامل مقدار واقعی پارامترها برای ایجاد جامعه اولیه متغیرها، ایجاد شد. در این الگوریتم با فرض جامعه ۱۰۰۰ نفری از متغیرها و احتمال ترکیب ۵۰ درصد و احتمال جهش ۵ درصد بهینه‌سازی صورت گرفت. محدوده‌های مفروض در الگوریتم ژنتیک و نتایج حاصل از اجرای این الگوریتم، در جدول ۲ جمع‌آوری شده است. میدان‌های جابه‌جایی مشاهداتی و مدل‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک در شکل ۴ و باقی‌مانده‌های این دو، در شکل ۵ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از اجرای الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک را می‌توان پذیرفت با توجه به این که خطای مربعی متوسط که پارامتری برای ارزیابی نتایج است مقدار کوچک و مناسبی بنا به میدان جابه‌جایی مشاهداتی و میزان خطای اعمالی به آن دارد. مقادیر باقی‌مانده‌های میدان جابه‌جایی مشاهداتی و میدان جابه‌جایی مدل‌سازی شده، تطابق مناسب این دو را نشان می‌دهد (طبق شکل ۵). اختلاف ناچیزی که بین پارامترهای برآورد شده و مقادیر واقعی وجود دارد بیشتر ناشی از حساسیت الگوریتم به نویز است.



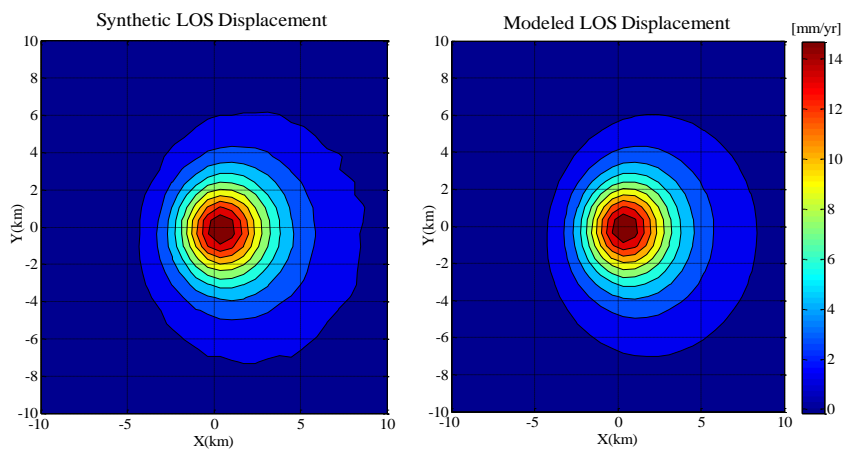
شکل ۳. میدان جابه‌جایی شبیه‌سازی شده در جهت خط دید ماهواره.

جدول ۱. مقادیر مفروض پارامترهای مدل موگی به‌منظور تهیه داده میدان جابه‌جایی شبیه‌سازی شده.

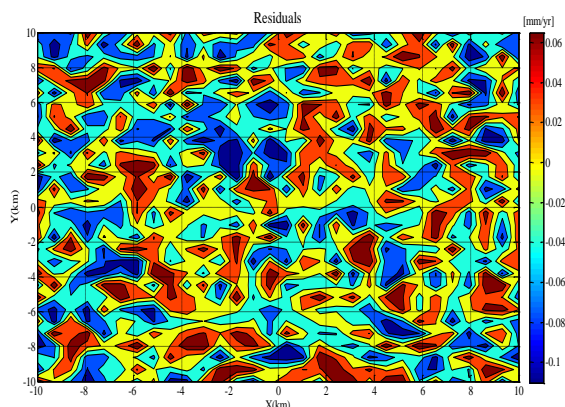
پارامترهای مخزن		پارامترهای ماهواره				موقعیت نقاط شبکه		خطای مشاهدات	پارامترها
$\Delta V (m^3/yr)$	$d(m)$	$X_0(m)$	$Y_0(m)$	$\theta_{inc} (deg)$	$H (deg)$	x(km)	y(km)	$\sigma_{los} (mm)$	
65×10^4	3000	0	0	23	194	[-10, 10]	[-10, 10]	± 0.1	مقادیر پارامتر

جدول ۲. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی روی داده شبیه‌سازی (پارامترهای مخزن آتشفشان).

RMSE	اختلاف حجم مخزن $\Delta V (m^3/yr)$	عمق مخزن $d(m)$	مولفه عرضی مختصات مخزن $Y_0(m)$	مولفه طولی مختصات مخزن $X_0(m)$	پارامترها
6×10^{-3}	$[30 \times 10^4, 90 \times 10^4]$	$[1500, 4500]$	$[-1000, 1000]$	$[-1000, 1000]$	محدوده مجاز پارامتر
	649594/052	3000/333	-0/822	2/856	پارامترهای برآورد شده



شکل ۴. مقایسه میدان‌های جابه‌جایی مشاهداتی و محاسباتی: میدان‌های جابه‌جایی مشاهداتی یا شبیه‌سازی شده (سمت چپ) و میدان جابه‌جایی محاسباتی یا مدل‌سازی شده با ژنتیک (سمت راست).



شکل ۵. باقی مانده‌های اختلاف میدان‌های جابه‌جایی شبیه‌سازی شده و مدل‌سازی شده.

مرجع برای مقایسه در نظر می‌گیریم. مخزن شبیه‌سازی شده در بخش قبلی را به عنوان مخزن مرجع در نظر می‌گیریم. مشخصات آن در جدول ۳ بیان شده است.

۱-۵ تحلیل حساسیت مدل تحلیلی موگی به تغییرات پارامتر اختلاف حجم

تغییرات پارامتر اختلاف حجم را در هفت حالت در نظر گرفتیم و در شکل زیر نمایش دادیم. در شکل ۶ محور افقی، فاصله افقی از مرکز مخزن (مبدأ محور افقی) تصویر شده روی زمین و محور قائم تغییرات جابه‌جایی به‌ازای تغییرات پارامتر "اختلاف حجم" را نشان می‌دهد. نمودارهای ۱ و ۷ شامل حداکثر تغییرات پارامتر اختلاف حجم به میزان نصف مقدار مرجع آن هستند. فواصل تقریباً مساوی منحنی‌ها نشان‌دهنده خطی بودن رابطه تغییر پارامتر اختلاف حجم و تغییر میدان جابه‌جایی ناشی از آن است. بیشترین تغییرات در محدوده نزدیک مرکز مخزن آتشفشان است و با دور شدن از مرکز میزان حساسیت کم‌تر می‌شود.

۵ تحلیل حساسیت پارامترهای مدل تحلیلی موگی

هدف از تحلیل حساسیت، بررسی پارامترهای مؤثر در مدل است. تشخیص پارامتر مؤثر به این صورت است که تغییر مقدار آن در مدل، خروجی مدل (جابه‌جایی) را بیشتر از پارامترهای دیگر تحت تأثیر قرار دهد. این تحلیل به این صورت است که با تغییر یکی از پارامترهای مدل و ثابت ماندن بقیه پارامترها، رفتار میدان جابه‌جایی بررسی می‌شود. نتیجه مهمی که از این تحلیل می‌توان کسب نمود، این است که پارامتر حساس‌تر، پارامتر قابل اعتمادتری در روند استخراج پارامتر است. به عبارت دیگر اگر مدل نسبت به یک پارامتر حساس‌تر باشد و با تغییرات آن جابه‌جایی بیشتر دچار تغییر شود در یک منطقه که با مشاهدات داده‌های جابه‌جایی، اگر آن پارامتر برای ما مجهول باشد، می‌توان از طریق تغییر در میزان آن پارامتر و معرفی مقادیر متفاوت برای آن به مدل و مقایسه خروجی با نتایج حاصل از داده‌های مشاهداتی به مقدار بهینه آن کمیت پی برد و آن را برای آن مخزن آتشفشان در نظر گرفت. برای عملی ساختن این تحلیل، مخزنی با پارامترهای ثابت را به عنوان مخزن

جدول ۳. پارامترهای مخزن مرجع: مخزنی با پارامترهای ثابت که به عنوان مخزن مرجع برای مقایسه در تحلیل حساسیت استفاده می‌شود.

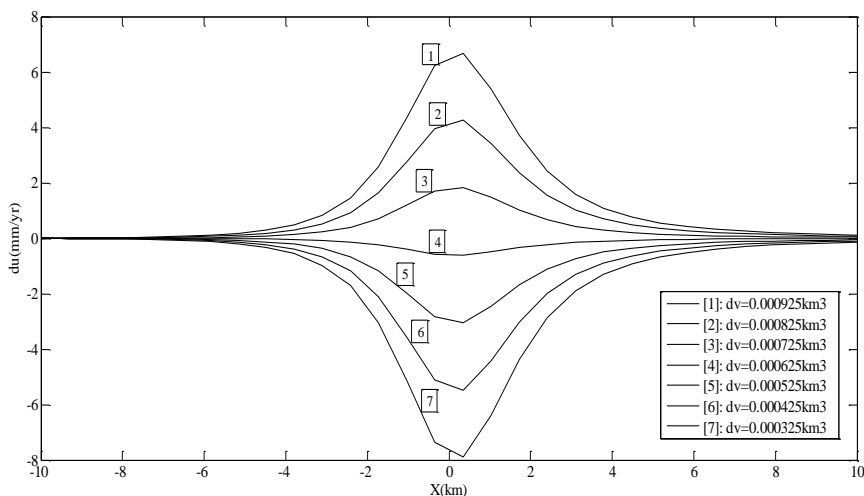
$\Delta V(m^3)$	$d(m)$	$Y_0(m)$	$X_0(m)$	پارامترهای مخزن
65×10^4	۳۰۰۰	۰	۰	مقادیر پارامتر

جدول ۴. بیشینه تغییرات جابه جایی به ازای تغییرات پارامتر تغییر حجم منبع.

نمودار	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
اختلاف حجم منبع (km ³)	۰/۰۰۰۹۲۵	۰/۰۰۰۸۲۵	۰/۰۰۰۷۲۵	۰/۰۰۰۶۲۵	۰/۰۰۰۵۲۵	۰/۰۰۰۴۲۵	۰/۰۰۰۳۲۵
بیشینه تغییر میدان جابه جایی (km ³)	۸/۰۸۲	۵/۵۹۵	۳/۱۰۹	-۰/۶۲۲	-۱/۸۶۵	-۴/۳۵۲	-۶/۸۳۹

پایین است. همان طور که در بخش های قبلی بیان کردیم، مدل موگی برای عمق های بالا بهتر جواب می دهد و در عمق های کم (نزدیک سطح) مثل ۵۰۰ متری و ۱۵۰۰ زیر زمین، حساسیت زیادی نشان می دهد. با این حال تغییر این پارامتر به عمق های ۴۵۰۰ و ۵۵۰۰ متری تغییر زیادی در میدان جابه جایی ایجاد نکرده است. در منحنی ۲ و ۳ که تغییری به اندازه نصف مقدار پارامتر به مدل اعمال شده است، میزان تغییر خیلی بیشتر از زمانی است که چنین تغییری به پارامتر اختلاف حجم وارد کردیم. این نشان دهنده حساسیت بیش تر پارامتر عمق نسبت به پارامتر اختلاف حجم است.

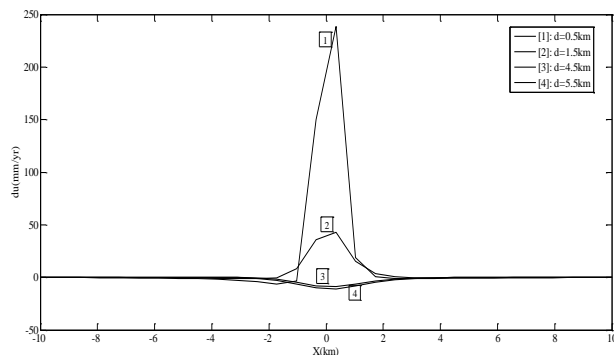
۲-۵ تحلیل حساسیت مدل تحلیلی موگی به تغییرات پارامتر عمق
تغییرات میدان جابه جایی نسبت به تغییرات عمق رابطه خطی و منظمی ندارد. تغییرات به میزان بیشتر از نصف مقدار پارامتر اعمال شده است. همان طور که در شکل ملاحظه می نمایید، میدان جابه جایی حساسیت بسیار زیادی به عمق های پایین (منحنی ۱ و ۲) نشان می دهد. هر چه از عمق های پایین به سمت بالاتر پیش می رویم فواصل منحنی ها کمتر و به تبع آن حساسیت کمتر می شود. این تغییرات، نشان دهنده حساسیت مدل موگی به عمق های



شکل ۶. تحلیل حساسیت میدان جابه جایی به تغییر در پارامتر تغییر حجم: محور عمودی نشان دهنده تغییرات در پارامتر اختلاف حجم منبع و خطوط منحنی نشان دهنده تغییرات میدان جابه جایی به ازای این تغییرات است.

جدول ۵. بیشینه تغییرات جابه جایی به ازای تغییرات پارامتر عمق منبع.

نمودار	۱	۲	۳	۴	۵
عمق منبع (m)	۵۰۰	۱۵۰۰	۴۵۰۰	۵۵۰۰	۱۳۰۰۰
بیشینه تغییر میدان جابه جایی (m)	۲۶۷/۸۴۸	۴۴/۸۹۷	۸/۹۶۰	۱۱/۳۴۷	۱۵/۳۱



شکل ۷. تحلیل حساسیت میدان جابه‌جایی شبیه‌سازی شده به تغییر در پارامتر عمق: محور عمودی نشان‌دهنده تغییرات در پارامتر عمق منبع و خطوط منحنی نشان‌دهنده تغییرات میدان جابه‌جایی به‌ازای این تغییرات است.

۳-۵ تحلیل حساسیت مدل تحلیلی موجی به تغییرات

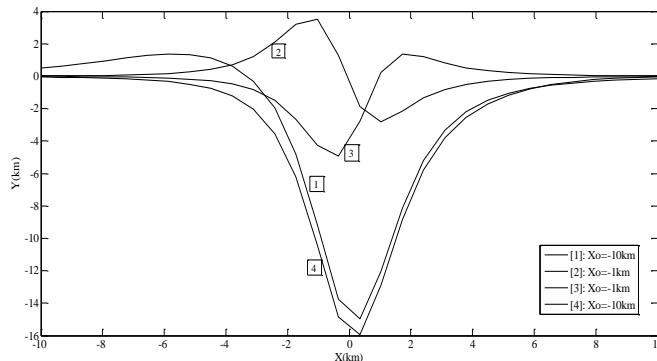
مولفه طولی مختصات مرکز مخزن

تغییرات میدان جابه‌جایی نسبت به تغییرات مولفه طولی مختصات مرکز مخزن نیز تغییرات منظمی را نشان نمی‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، در صورتی که مخزن یک کیلومتر به طرفین حرکت کند، حداکثر تغییر جابه‌جایی در حد ۴ میلی‌متر در اطراف مرکز بوجود می‌آورد (منحنی ۱ و ۲). جابه‌جایی‌های بیشینه در هر دو منحنی نزدیک مرکز دیده می‌شوند و حالتی تقریباً قرینه

نسبت به هم دارند. برای سنجش بعدی مولفه طولی مختصات را در لبه‌های شبکه در نظر گرفتیم، که جزء بدترین حالت‌ها محسوب می‌شود. در نتیجه اعمال این تغییرات در پارامتر، جابه‌جایی‌ها به میزان حداکثر ۱۶ میلی‌متر در سال تغییر می‌کند (منحنی‌های ۳ و ۴). این منحنی‌ها برخلاف منحنی‌های ۱ و ۲ رفتار بسیار مشابهی دارند. از رفتار میدان جابه‌جایی در این تحلیل می‌توان نتیجه گرفت که میدان جابه‌جایی در این مورد، حساسیتی بیشتر نسبت به اختلاف حجم آشکار می‌سازد.

جدول ۶. بیشینه تغییرات جابه‌جایی به‌ازای تغییرات پارامتر مولفه طولی مختصات مرکز منبع.

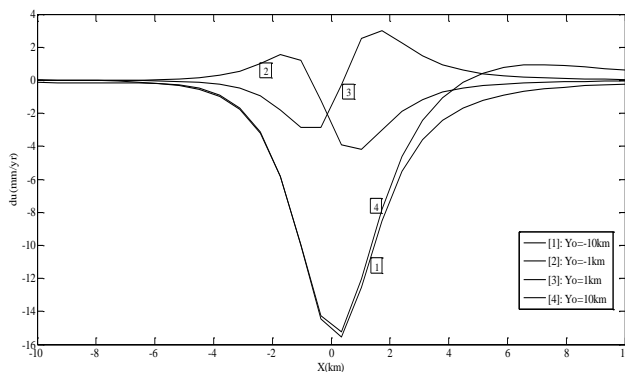
نمودار	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مولفه طولی مختصات منبع (m)	-۱۰۰۰۰	-۵۰۰۰	-۱۵۰۰	۱۵۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰
بیشینه تغییر میدان جابه‌جایی (m)	-۱۶/۰۷۶	۱۵/۰۵۹	-۷/۲۴۲	-۷/۳۸۴	-۱۵/۲۳	-۱۶/۲۹۵



شکل ۸. تحلیل حساسیت میدان جابه‌جایی شبیه‌سازی شده به تغییر در پارامتر مولفه طولی مختصات: محور عمودی نشان‌دهنده تغییرات در پارامتر مولفه طولی مختصات منبع و خطوط منحنی نشان‌دهنده تغییرات میدان جابه‌جایی به‌ازای این تغییرات است

جدول ۷. پیشینه تغییرات جابه‌جایی به‌ازای تغییرات پارامتر مولفه عرضی مختصات مرکز منبع.

نمودار	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مولفه عرضی مختصات منبع (m)	-۱۰۰۰۰	-۵۰۰۰	-۱۵۰۰	۱۵۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰
پیشینه تغییر میدان جابه‌جایی (m)	-۱۵/۸۶۸۲	-۱۴/۲۰۳۶	-۶/۶۱۵	۶/۷۱	-۱۴/۳۹۱۹	-۱۶/۰۳۳۴



شکل ۹. تحلیل حساسیت میدان جابه‌جایی شبیه‌سازی شده به تغییر در پارامتر مولفه عرضی مختصات: محور عمودی نشان‌دهنده تغییرات در پارامتر مولفه عرضی مختصات منبع و خطوط منحنی نشان‌دهنده تغییرات میدان جابه‌جایی به‌ازای این تغییرات است.

در همه مناطق به‌طور یکنواختی اختلافاتی نه‌چندان زیاد دیده می‌شود، می‌توان با تغییر پارامتر اختلاف حجم به مقدار بهینه آن دست یافت. با این حال در صورتی که باقی‌مانده‌ها فقط در محدوده خاصی مقادیر بزرگی داشته باشند، این امر نشان‌دهنده بهینه نبودن پارامترهای مختصاتی مرکز منبع آتشفشانی است. نکته مهم در این تحلیل این است که تا جای ممکن نباید از مدل موگی برای مدل کردن جابه‌جایی‌های ناشی از منبعی کم‌عمق (نزدیک سطح) استفاده کرد.

۶ نتیجه‌گیری

مدل‌سازی میدان جابه‌جایی برای یک آتشفشان شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک صورت گرفت. باقی‌مانده‌های حاصل از این روند معکوس نتایج مناسبی نشان می‌دهد. همین‌طور معیار آماری خطای مربعی متوسط نیز با توجه به بزرگی میدان جابه‌جایی و انحراف معیار آن، مقدار مناسبی به‌دست داد. در ادامه برای تعیین پارامترهای قابل‌اعتماد در روند استخراج پارامتر به تحلیل

۴-۵ تحلیل حساسیت مدل تحلیلی موگی به تغییرات

مولفه عرضی مختصات مرکز مخزن

تحلیل حساسیت در مورد پارامتر مولفه عرضی مختصات مرکز مخزن در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به شکل روندی مشابه پارامتر مولفه طولی مختصات دیده می‌شود و تحلیل حساسیت در این مورد مشابه بخش قبلی صورت می‌گیرد.

با توجه به تحلیل‌های حساسیت میدان جابه‌جایی، می‌توان پارامترهای مختصاتی را در حکم پارامترهای حساس مدل معرفی کرد. پارامتر تغییر حجم به نسبت پارامترهای دیگر، در همه مناطق، جابه‌جایی‌هایی به‌صورت نرمال ایجاد می‌کند، که بیشترین میزان آن در نزدیکی منبع است. تغییر جابه‌جایی‌ها برای سه پارامتر دیگر در نواحی دورتر از مرکز بسیار کوچک است و در مناطق نزدیک به‌طور فاحشی اختلاف دارد. می‌توان نتیجه گرفت پارامترهای مولفه‌های مختصاتی، پارامترهای قابل‌اعتمادتری در روندهای معکوس هستند. در برازش مدل محاسباتی به مدل مشاهداتی در روند معکوس چنانکه

- Dzurisin, D., 2007, Analytical volcano deformation source models, *Volcano Deformation*, Springer.
- Edmund, K. and Burke, G. K., 2005, Search methodologies, *Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques*, Springer.
- Hanssen, R. F., 2002, Radar interferometry, data interpretation and error analysis, Kluwer Academic Publishers, Delft University of Technology.
- Haupt, R. L. and Haupt, S. E., 2004, Practical genetic algorithms, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey.
- Janssen, V., 2007, Volcano monitoring deformation using GPS, *Journal of Geophysical Research*, **115**, 1-10.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **75**, 1135-1154.
- Manconi, A., Walter, T. R., Manzo, M., Zeni, G., Tizzani, P., Sansosti, E. and Lanari, R., 2010, On the effects of 3-D mechanical heterogeneities at Campi Flegrei caldera, southern Italy, *Journal of Geophysical Research*, **115**, B08405.
- Segall, P., 2010, Earthquake and volcano deformation, pp.458, Princeton University Press.
- Yu, T. T., Fernandez, J. and Rundle, J. B., 1998, Inverting the parameters of an earthquake ruptured fault with genetic algorithm: *Computer & Geosciences*, **24**(2), 173-182, IESAS556.

حساسیت میدان جابه‌جایی حاصل از مدل موگی نسبت به تغییر پارامترهای آن پرداخته شد. در این تحلیل، میدان جابه‌جایی به تغییرات کمیت‌های مختصاتی مرکز منبع تغییر شکل بیشترین حساسیت را نشان داد. باین‌حال تغییرات کمیت تغییر حجم مخزن ماگما، تأثیر چندانی در میدان جابه‌جایی نداشت. یکی از نتایجی که از این تحلیل به دست آمد این است که مدل تغییر شکل در تعیین پارامترهای موقعیت منبع قوی‌تر ولی برای تعیین پارامتر تغییر حجم منبع، ضعیف عمل می‌کند. همین‌طور از نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان به حساسیت بسیار زیاد میدان جابه‌جایی حاصل از مدل تحلیلی، به منابع کم عمق اشاره کرد. در واقع همان‌طور که در تعریف مدل موگی ذکر شد، این مدل برای منابع کم عمق پیشنهاد نمی‌شود. توجه به این نکات در روندهای معکوس کمک زیادی به استخراج بهتر و مطمئن‌تر پارامترها می‌کند.

مراجع

- نوری، س.، وثوقی، ب. و ابوالقاسم، ا.، ۱۳۸۸، مدل‌سازی میدان جابه‌جایی هم‌لرزه یک گسل و تعیین حساسیت پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل به میدان جابه‌جایی آن، م. فیزیک زمین و فضا، **۳۵**(۱)، ۵۹-۷۳.