مجلهٔ فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۱، شماره ۱، ۱۳۹۴، صفحهٔ ۵۱- ۶۲

یادداشت تحقیقاتی

مدل‌سازی میدان جابه‌جایی ژئودتیکی ناشی از فعالیت‌های مخزن ماگمای آتشفشان و تحلیل حساسیت پارامترهای مدل

مینا علی صوفی[1*] و بهزاد وثوقی[2]

[1] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
[2] دانشیار، گروه مهندسی ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، 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 می‌باشد. مدل‌های آتشفشانی در بررسی تغییر شکل پوسته، دید باارزشی نسبت به ویژگی‌های آتشفشان‌ها و رفتارشان در طول زمان فراهم می‌کنند. یکی از مدل‌های تحلیلی میدان جابه‌جایی ژئودتیکی آتشفشان، مدل موگی است. این مدل، مخزن ماگمای آتشفشان با هندسه کروی را به منزلهٔ منبع تغییر شکل فرض می‌کند. مدل‌سازی میدان جابه‌جایی با استفاده از مدل‌های تحلیلی موجود مستلزم مشخص کردن پارامترهای رئولوژی و زمین‌شناسی مخزن آتشفشان است. به‌عبارتی، با در نظر گرفتن فرضیاتی در مورد خصوصیات پوسته زمین در منطقه موردنظر، می‌توان از میدان جابه‌جایی حاصل از مشاهدات ژئودتیک درحکم مسئله مقدار مرزی مدل‌های تحلیلی استفاده کرد و با حل معکوس این معادله‌ها به پارامترهای مخزن دست یافت. در این تحقیق پس از استخراج پارامترهای مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مدل‌سازی میدان جابه‌جایی ناشی از آتشفشان با مدل تحلیلی موگی صورت گرفت. در ادامه پس از مدل‌سازی میدان جابه‌جایی، تحلیل حساسیت میدان جابه‌جایی نسبت به پارامترهای ورودی مدل عملی شد. در این تحلیل میدان جابه‌جایی به تغییرات کمیت‌های مختصاتی مرکز منبع بیشترین حساسیت را نشان داد. اما تغییرات کمیت اختلاف حجم منبع، تأثیر قابل‌توجهی بر میدان جابه‌جایی ایجاد نکرد. یکی از نتایجی که این تحلیل به‌دست می‌دهد این است که مدل در تعیین پارامترهای موقعیت منبع قوی‌تری است ولی برای تعیین پارامتر تغییر حجم منبع ضعیف عمل می‌کند. به‌منظور استخراج پارامترهای موقعیت منبع، می‌توان با تغییر این پارامترها و عکس‌العمل خروجی مدل و مقایسه آن با مشاهدات به مقدار بهینه آنها دست یافت.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، مدل موگی، مدل‌سازی میدان جابه‌جایی، تغییر شکل‌های 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

*نگارنده رابط: E-mail: alisufi.m@gmail.com

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 obtaine 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

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. اندازه‌گیری‌به 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 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

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 به‌دست آمده از مشاهدات ژئودتیک به منزلهٔ 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 جابه‌جایی‌هایی ناشی از آتشفشان صورت گیرد. یکی از این بررسی‌ها تحلیل حساسیت مدل به‌منظور 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 بپردازیم. 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. به‌منظور 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.

۲ مدل تحلیلی موگی (مدل کروی)

علی‌رغم بسیاری از ساده‌سازی‌های ذاتی در این فرمول‌بندی، بهترین و پراستفاده‌ترین روش برای مدل کردن تغییر شکل سطحی حاصل از یک تورم یا کاهش تورم مخزن ماگما، است. به عقیده موگی منبع کروی به‌خوبی 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 به‌صورت رابطه‌های (۱)، (۲) و (۳) داده می‌شود (دیزوریسن،۲۰۰۷):

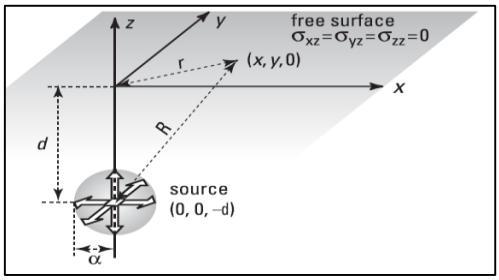
$$\begin{pmatrix} d_e \\ d_n \\ d_v \end{pmatrix} = \frac{\alpha^3 \Delta p (1-\upsilon)}{\mu} \begin{pmatrix} \frac{x-x_0}{R^3} \\ \frac{y-y_0}{R^3} \\ \frac{d}{R^3} \end{pmatrix} \quad (۱)$$

$$\Delta v = \frac{\alpha^3 \Delta P \pi}{\mu} \quad (۲)$$

$$R = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (0-d)^2} \quad (۳)$$

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 υ 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.



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

این مدل پوسته زمین را به مثابهٔ جسم کشسان نیم محدود عرضه می‌کند که درحکم یک نیم‌فضای کشسان شناخته می‌شود. نیم‌فضا دارای یک سطح صفحه‌ای است که اطراف یک محیط را گرفته است و به‌طور نامحدود در همه راستاها گسترش یافته است. نیم‌فضا از نظر مادی همگن و از نظر مکانیکی ایزوتروپیک است و از قانون هوک (Hook's law) پیروی می‌کند. در آزمایش‌های کوتاه‌مدت آزمایشگاهی، صخره‌ها برای کرنش‌های کمتر از حدود ۱درصد (۱۰۰۰۰ ppm) به‌خصوص در دماهای کم، مثل اجسام کشسان خطی رفتار می‌کنند. مدل‌های نیم‌فضای کشسان اغلب از بسیاری از ویژگی‌های زمین واقعی صرف‌نظر می‌کنند، اما تقریب خوبی از تغییر شکل‌های نتیجه شده از پدیده‌های کوتاه‌مدت نامتناهی روی سطح یا داخل سطح در عمق کم می‌دهند (دیزوریسن، ۲۰۰۷). در روش فضای کامل از سطح زمین صرف‌نظر و به پدیده ژئودینامیکی در یک فضای کامل توجه می‌شود. در این حالت تنش در سطح آزاد غیر صفر است که با شرایط زمین واقعی سازگار نیست. ازطرفی مشاهدات ما در نزدیکی سطح زمین به‌دست می‌آید و در نتیجه با مدل نیم‌فضا سازگاری بیشتری دارد. معادله‌های اصلی برای یک جسم جامد کشسان خطی ایزوتروپیک نیاز به فقط دو ثابت مستقل کشسان برای توضیح رابطه بین تنش و کرنش دارند. معمولاً مدل‌های منبع آتشفشانی از نسبت پواسون (υ) و مدول کشسانی برشی (μ مدول صلبیت یا ثابت دوم لامه) استفاده می‌کنند. اکادا (۱۹۸۵) و سگال (۲۰۱۰) از ۲ ثابت لامه (λ,μ) به‌صورت رابطه (۴) استفاده کردند:

$$\lambda = \frac{2\mu\upsilon}{1-2\upsilon} \qquad (۴)$$

در این رابطه، μ تنش برشی را به کرنش مرتبط می‌کند که یک صلبیت یا سفت‌شدگی تحت برش را فراهم می‌کند و دارای واحد فشار است. یک مقدار نوعی برای صخره پوسته‌ای دست‌نخورده در محدوده ۱۰۰۰۰مگا پاسکال تا ۳۰۰۰۰ مگا پاسکال است. صخره شکسته و رسوبات، مقدار کمتر μ از درجه ۱۰۰ها تا۱۰۰۰ها مگا پاسکال دارند. نسبت پواسون (υ) 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 صخره‌های سالم مقدار υ را در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۳ نشان داده است و معمولاً ۰/۲۵ یا به‌طور معادل $\lambda = \mu$ فرض می‌شود. معادله (۱) اغلب با قرار دادن $\upsilon = 1/4$ ساده و به‌صورت روابط (۵) و (۶) داده می‌شود:

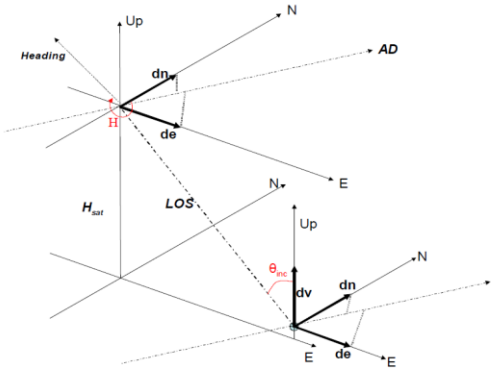
$$\begin{pmatrix} d_e \\ d_n \\ d_v \end{pmatrix} = \frac{3\Delta v}{4\pi} \begin{pmatrix} \frac{x-x_0}{R^3} \\ \frac{y-y_0}{R^3} \\ \frac{d}{R^3} \end{pmatrix} \qquad (۵)$$

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

میدان جابه‌جایی سه‌بُعدی موگی با استفاده از رابطه تبدیل (۷) به جابه‌جایی در جهت خط دید ماهواره تبدیل می‌شود (هنسن، ۲۰۰۲).

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

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 سَمت‌القدم (نادیر)، H زاویه سَمت (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. ازآنجاکه 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 به‌دست آورد، لزوم بهره‌گیری از روندی معکوس مطرح می‌شود. در مسئله معکوس، تقریب کمّی مکان، هندسه و دینامیک منابع تغییر شکل به وسیله مقایسه یا برازش مشاهدات زمینی با مدل‌های ریاضی ایدئال شده به‌دست می‌آید. بااین‌حال اغلب مسائل معکوس در گروه مسائل فرومعین واقع می‌شوند و جواب منحصربه‌فردی ندارند و در صورتی می‌توان به جواب منحصربه‌فرد دست یافت که ماتریس مشاهدات با مرتبه کامل وجود داشته باشد. بنابراین ازآنجاکه مسئله معکوس به‌طور مستقیم قابل حل نیست، برای تأمین پارامترهای یکتای منبع تغییر شکل که به بهترین وجه به مدل تحلیلی تولیدکننده جابه‌جایی برازنده 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 منزلهٔ 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 به‌صورت 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 درنهایت جهش فرزندان می‌رسد. والدین با احتمال ترکیب ٪۵۰ با استفاده از روش ترکیب نقطه‌ای ساده همراه یک برون‌یابی تلفیق شدند و فرزندانی را تولید کردند (هوپت و هوپت ، ۲۰۰۴). سپس برای جلوگیری از همگرایی موضعی فرزندان تحت جهش

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 به‌منظور 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.

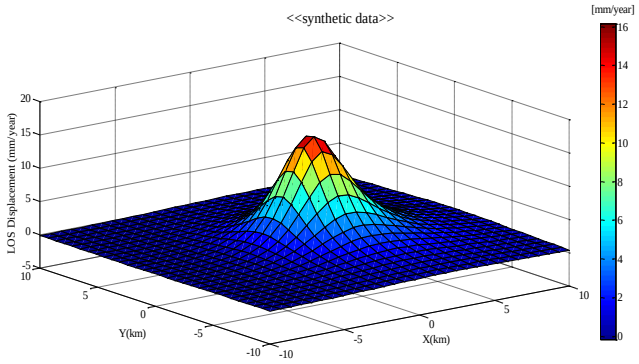
در طول اجرای الگوریتم ژنتیک، چهار متغیر، مولفه‌های مختصات سطحی و عمق و تغییر حجم، مدام در حال تغییرند و نسل‌های جدید را با اِعمال قوانین موجود در الگوریتم به‌وجود می‌آورند؛ تا زمانی که بهترین میزان تابع هدف برابر با مقدار حداقل آن به‌دست آید و درنهایت یکی از شرط های توقف الگوریتم ژنتیک برقرار شود.

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 جابجایی 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 ۰/۱± 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 هستندکه 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 به‌دست 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.



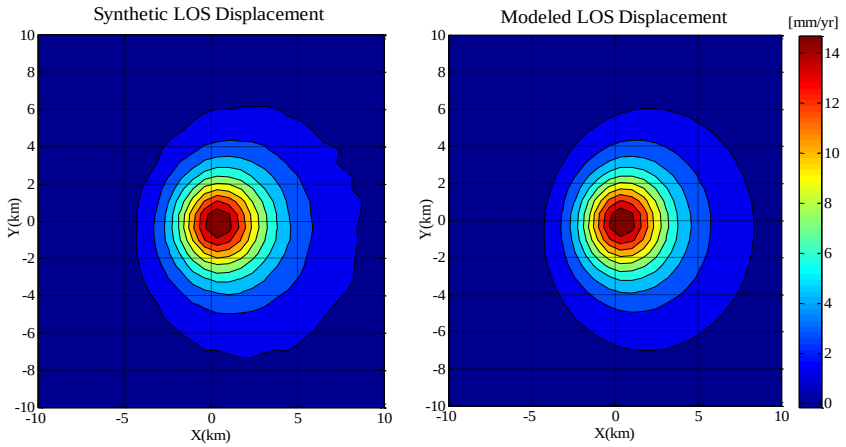
شکل ۳. میدان جابه‌جایی شبیه‌سازی شده در جهت خط دید ماهواره.

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

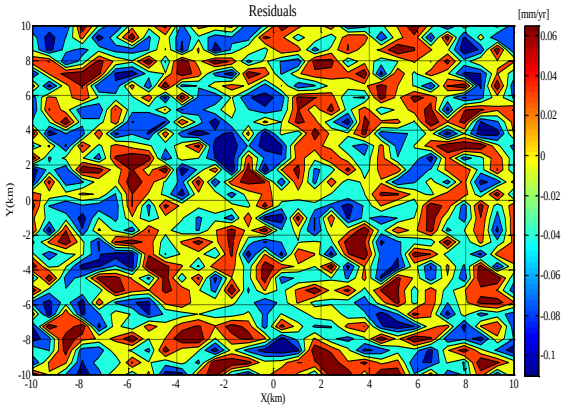
	خطای مشاهدات	موقعیت نقاط شبکه		پارامترهای ماهواره		پارامترهای مخزن			
پارامترها	σ_{los} (mm)	y (km)	x(km)	H (deg)	θ_{inc} (deg)	Y_0 (m)	X_0 (m)	d (m)	ΔV (m^3 / yr)
مقادیر پارامتر	±۰/۱	[−۱۰,۱۰]	[−۱۰,۱۰]	۱۹۴	۲۳	۰	۰	۳۰۰۰	۶۵×۱۰^۴

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

پارامترها	مولفه طولی مختصات مخزن X_0(m)	مولفه عرضی مختصات مخزن Y_0(m)	عمق مخزن d (m)	اختلاف حجم مخزن $\Delta V(m^3/yr)$	RMSE
محدوده مجاز پارامتر	[−۱۰۰۰۰,۱۰۰۰۰]	[−۱۰۰۰۰,۱۰۰۰۰]	[۱۵۰۰,۴۵۰۰]	[۳۰×۱۰^۴,۹۰×۱۰^۴]	۶×۱۰^−۵
پارامترهای برآوردشده	۲/۸۵۶	−۰/۸۲۲	۳۰۰۰/۳۳۳	۶۴۹۵۹۴/۰۵۲	



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



شکل ۵. باقی‌مانده‌های اختلاف میدان‌های جابه‌جایی شبیه‌سازی شده و مدل‌سازی شده.

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 داده-های 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 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.

۵-۱ 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.

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

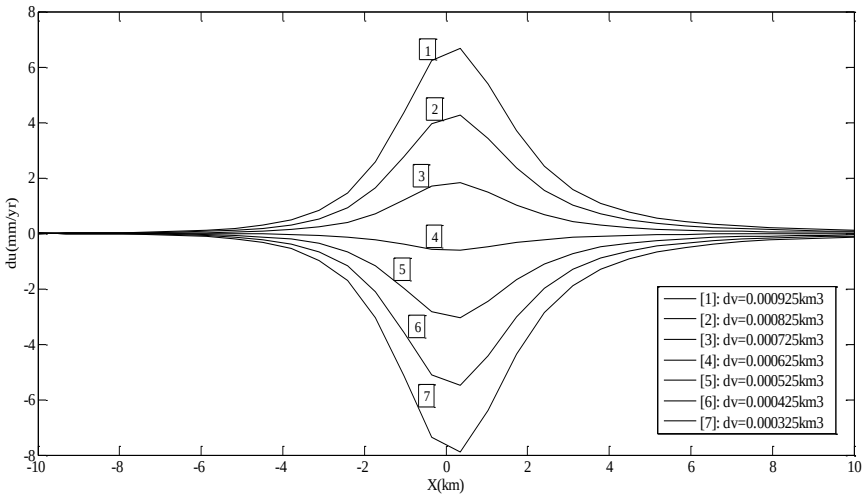
پارامترهای مخزن	X_0 (m)	Y_0 (m)	d(m)	$\Delta V(m^3)$
مقادیر پارامتر	۰	۰	۳۰۰۰	۶۵×۱۰^{۴}

جدول ۴. بیشینه تغییرات جابه‌جایی به‌ازای 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 جابه‌جایی (km^3)	۸/۰۸۲	۵/۵۹۵	۳/۱۰۹	−۰/۶۲۲	−۱/۸۶۵	−۴/۳۵۲	−۶/۸۳۹

۵-۲ تحلیل حساسیت مدل تحلیلی موگی به تغییرات پارامتر عمق

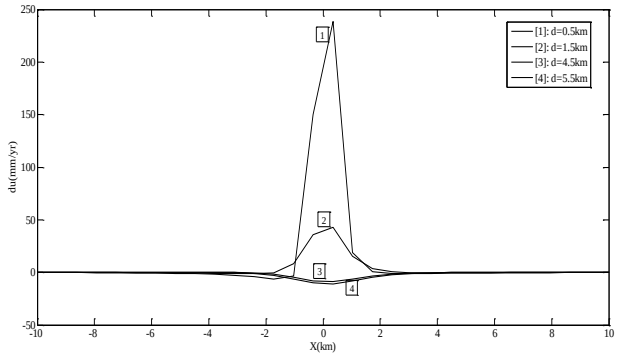
تغییرات میدان جابه‌جایی نسبت به تغییرات عمق رابطه خطی و منظمی ندارد. تغییرات به میزان بیشتر از نصف مقدار پارامتر اعمال شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌نمایید، میدان جابه‌جایی حساسیت بسیار زیادی به عمق‌های پایین (منحنی ۱ و ۲) نشان می‌دهد. هر چه از عمق‌های پایین به سمت بالاتر پیش می‌رویم فواصل منحنی‌ها کمتر و به تبع آن حساسیت کمتر می‌شود. این تغییرات، نشان‌دهنده حساسیت مدل موگی به عمق‌های پایین است. همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان کردیم، مدل موگی برای عمق‌های بالا بهتر جواب می‌دهد و در عمق‌های کم (نزدیک سطح) مثل ۵۰۰ متری و ۱۵۰۰ زیر زمین، حساسیت زیادی نشان می‌دهد. بااین‌حال تغییر این پارامتر به عمق‌های ۴۵۰۰ و ۵۵۰۰ متری تغییر زیادی در میدان جابه‌جایی ایجاد نکرده است. در منحنی ۲ و ۳ که تغییری به اندازه نصف مقدار پارامتر به مدل اِعمال شده است، میزان تغییر خیلی بیشتر از زمانی است که چنین تغییری به پارامتر اختلاف حجم وارد کردیم. این نشان‌دهنده حساسیت بیش‌تر پارامتر عمق نسبت به پارامتر اختلاف حجم است.



شکل ۶. تحلیل حساسیت میدان جابه‌جایی به تغییر در پارامتر تغییر حجم: محور عمودی نشان‌دهنده تغییرات در پارامتر اختلاف حجم منبع و خطوط منحنی نشان‌دهنده تغییرات میدان جابه‌جایی به‌ازای این تغییرات است.

جدول ۵. بیشینه تغییرات جابه‌جایی به‌ازای تغییرات پارامتر عمق منبع.

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



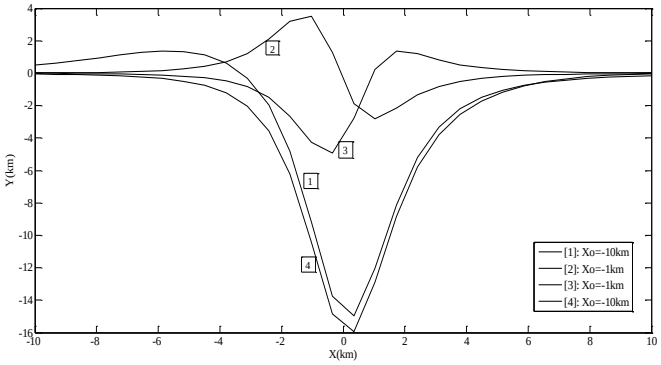
شکل ۷. تحلیل حساسیت میدان جابه‌جایی شبیه‌سازی شده به تغییر در پارامتر عمق: محور عمودی نشان‌دهنده تغییرات در پارامتر عمق منبع و خطوط منحنی نشان‌دهنده تغییرات میدان جابه‌جایی به‌ازای این تغییرات است.

۵-۳ تحلیل حساسیت مدل تحلیلی موگی 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، درصورتی‌که 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 اِعمال 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.

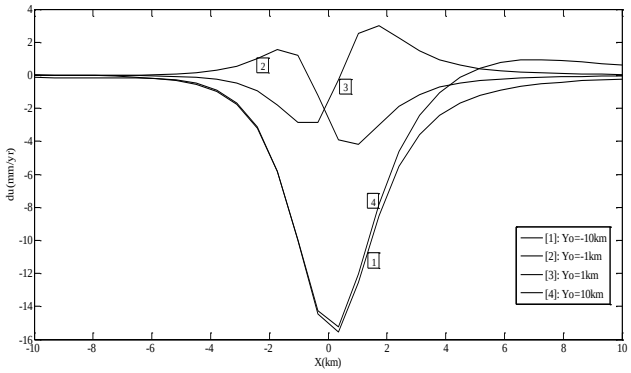
نمودار	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مولفه طولی مختصات منبع (m)	−۱۰۰۰۰	−۵۰۰۰	−۱۵۰۰	۱۵۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰
بیشینه تغییر میدان جابه‌جایی (m)	−۱۶/۰۷۶	۱۵/۰۵۹	−۷/۲۴۲	−۷/۳۸۴	−۱۵/۲۳	−۱۶/۲۹۵



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. بیشینه 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
بیشینه 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.

۵-۴ 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 درحکم 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 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 درصورتی‌که 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

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. بااین‌حال تغییرات کمیت تغییر حجم مخزن ماگما، تأثیر چندانی در میدان جابه‌جایی نداشت. یکی از نتایجی که از این تحلیل به‌دست 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 کم‌عمق اشاره کرد. در واقع همان‌طور که در تعریف مدل موگی ذکر شد، این مدل برای منابع کم‌عمق 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.

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 Researech, **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.