

مدل سازی میدان جابجایی ژئودتیکی ناشی از فعالیت های مخزن ماگمای آتشفشان دماوند

مینا علی صوفی^{۱*}، بهزاد وثوقی^۲

دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
alisufi.m@gmail.com

دانشیار گروه مهندسی ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
(عضو قطب علمی مهندسی اطلاعات مکانی)
vosoghi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت بهمن ۱۳۹۲، تاریخ تصویب شهریور ۱۳۹۳)

چکیده

در مطالعات تغییر شکل پوسته، مدل های آتشفشانی دید با ارزشی از ویژگی های آتشفشان ها و رفتار آن ها را در طول زمان ارائه می دهند. مدل سازی میدان جابجایی با استفاده از مدل های تحلیلی، مستلزم مشخص نمودن پارامترهای ژئوفیزیکی و زمین شناسی مخزن آتشفشان می باشد. بدین منظور طی روندی معکوس با در اختیار داشتن میدان جابجایی حاصل از مشاهدات ژئودتیک به عنوان مسئله مقدار مرزی مدل های تحلیلی، مدل سازی از مخزن ماگمای آتشفشان صورت گرفت. این مدل سازی توسط روش بهینه سازی تکاملی ژنتیک برای آتشفشان دماوند انجام گرفت. مدل سازی میدان جابجایی برای آتشفشان کمپی فلگری طی سالهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۱ نیز انجام شد، که در مقایسه با مطالعات گذشته در مورد آن نتایج مطلوبی در برداشت. نتایج مدل سازی میدان جابجایی در مورد آتشفشان دماوند، باقیمانده هایی دور از انتظار (با توجه به بزرگی میدان جابجایی) در بعضی از مناطق، حاصل نمود که نشان دهنده حضور منابع تغییر شکل دیگری علاوه بر منبع آتشفشانی، در منطقه می باشد. نتایج مدل سازی میدان جابجایی نشان داد، کاهش حجم مخزن ماگمای آتشفشان قرار گرفته در عمق حدوداً ۵/۶ کیلومتری زیر زمین به میزان ۰/۰۰۱ کیلومتر مکعب در سال باعث جابجایی های کوچکی فقط در نواحی نزدیک منبع آتشفشانی می شود. مختصات مسطحاتی مدل سازی شده مرکز منبع ۴۸۳۱/۹۹۹ کیلومتر شرقی و ۳۱۳۲۸/۵۳۶ کیلومتر شمالی در سیستم تصویر لامبرت و مقدار خطای مربعی متوسط نتایج معکوس (RMSE) ۲ میلی متر حاصل گردید.

واژگان کلیدی: میدان تغییر شکل آتشفشان، مدل سازی میدان جابجایی، آتشفشان دماوند، مدل سازی میدان جابجایی، بهینه سازی تکاملی، الگوریتم ژنتیک، مدل سازی مخزن ماگما

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

با توجه به هندسه منبع تغییر شکل، مدل‌های متنوعی برای آتشفشان مطرح گردیده است. یکی از انواع مدل‌های تحلیلی میدان جابجایی ژئودینامیکی آتشفشانی، مدل تحلیلی موگی می‌باشد. هندسه منبع تغییر شکل مفروض در این مدل مخزنی کروی شکل می‌باشد. با توجه به کاربرد فراوان مدل کروی موگی در اکثر مدل‌سازی‌های آتشفشانی و همین‌طور فرضیات مناسب آن، در این تحقیق از این مدل بهره گرفته شد. با نظر به این که تاکنون هیچ‌گونه مدل‌سازی قابل استنادی برای آتشفشان دماوند انجام نشده است، پیشنهاد می‌شود برای کارهای آتی مدل‌های منبع دیگر نیز امتحان گردد و با یکدیگر مقایسه گردند.

در این تحقیق سعی بر آن داریم که پارامترهای مخزن ماگمای آتشفشان دماوند را توسط برازش مدل تحلیلی موگی به داده‌های تغییر شکل سطحی زمین بدست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری، استخراج نماییم. برای این منظور از روش‌های بهینه‌سازی بهره گرفته و طی روندی معکوس پارامترهای منبع مشخص می‌گردد. در بخش بعدی ابتدا تعریفی از مدل تحلیلی موگی و فرضیات مطرح در آن ارائه و در ادامه به بررسی روش بهینه‌سازی پرداخته می‌شود. در نهایت نتایج عددی حاصل از این تحقیق بیان می‌شود.

۲- مدل تحلیلی موگی (مدل کروی)

علی‌رغم بسیاری از ساده‌سازی‌های ذاتی در این فرمول‌بندی، بهترین و پراستفاده‌ترین روش برای مدل کردن تغییر شکل سطحی ناشی از تورم یا کاهش تورم مخزن ماگماست. به عقیده موگی منبع کروی به خوبی با ایده مخزن ماگمای زیر سطح زمین هماهنگ است. منبع فشار نقطه‌ای یا منبع اتساع نقطه‌ای اغلب به نام مدل موگی نام برده می‌شود [۳]. در مدل موگی جابجایی‌ها با تغییر فشار هیدرواستاتیکی Δp یک منبع کروی محدود در یک نیم‌فضای الاستیک با شعاع بسیار کوچک‌تر از عمق آن $d \ll \alpha$ به صورت زیر بیان می‌گردد [۴]:

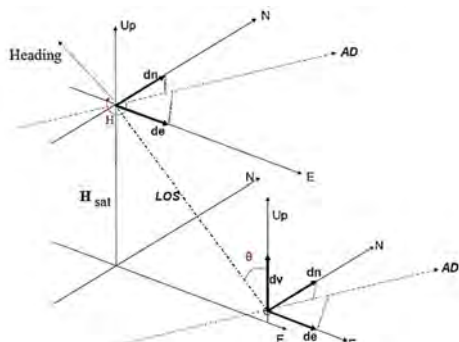
$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \frac{\alpha^3 \Delta p (1-\nu)}{\mu} \begin{pmatrix} \frac{x-x_0}{R^3} \\ \frac{y-y_0}{R^3} \\ \frac{d}{R^3} \end{pmatrix} \quad (1)$$

فوران‌های آتشفشانی و گسلش‌های لرزه‌ای هر دو مخاطرات طبیعی هستند که در حال حاضر به سختی قابل پیش‌بینی هستند. آتشفشان‌ها و فوران آن‌ها نشان‌دهنده پروسه دینامیکی داخل زمین هستند که اغلب، در امتداد مرزهای صفحات تکتونیک قرار دارند. آتشفشان دماوند با ارتفاع ۵۶۷۱ متر در استان مازندران و در میان فلات رینه قرار گرفته است. این آتشفشان در بخش میانی البرز و محل عبور از روند شمال غرب - جنوب شرق به روند شمال شرق - جنوب غرب واقع شده است و مرتفع‌ترین قله آن است.

بررسی تکتونیک و لرزه‌زمین‌ساخت آتشفشان دماوند نشان می‌دهد که دماوند در مرکز چین و رانده البرز جایگاه ویژه‌ای دارد. وجود یک آتشفشان مانند دماوند در مرکز یک سیستم فشارشی معرف تراکشن در منطقه است [۱]. از سوی دیگر نزدیکی آتشفشان دماوند با گسل‌های مهمی مثل مشاء شمال البرز نشانه‌ای از اهمیت این مجموعه دارد و گویای این امر است که این مجموعه به صورت مرتبط عمل می‌کند به گونه‌ای که شاید فعالیت دماوند این امکان را فراهم کند که تنش منطقه برای تحریک گسل‌ها و ایجاد زمین‌لرزه‌ای مخرب در منطقه آماده شوند. این مسئله به معنای آن نیست که در حال حاضر این احتمال وجود دارد بلکه گویای این واقعیت است که این مجموعه به صورت پیچیده و مرتبط عمل می‌کنند [۲].

با توجه به نقش مهم دماوند در منطقه، بررسی حرکات آن و تغییر شکل سطحی حاصل از آن، امری ضروری می‌باشد. اولین قدم برای درک بهتر پروسه‌های فورانی آتشفشان، پایش تغییرات اطراف آتشفشان‌ها است. اندازه‌گیری‌های تکنیک‌های پایش تغییر شکل زمینی (مثل سنجش از دور، طولیابی الکترونیکی و گرانی‌سنجی و...) اطلاعات با ارزشی در مورد چگونگی تغییر شکل کنونی زمین می‌دهند، ولی نمی‌توانند رفتار زمین‌ساختی آینده زمین و یا رفتار گذشته آن را تعیین کنند. به همین دلیل شاخه‌های مختلف علوم زمین از مدل‌هایی بر پایه ریاضیات و فیزیک استفاده می‌کنند. در مطالعات تغییر شکل پوسته، مدل‌های آتشفشانی که بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی ژئودینامیکی و لرزه‌ای تنظیم شده‌اند ویژگی‌های آتشفشان‌ها و رفتار آن‌ها در طول زمان فراهم می‌کنند.

که در آن (u, v, w) مطابق شکل (۲) بردارهای جابجایی در سه جهت (x, y, z) ، زاویه بروز^۲ ماهواره نسبت به نادیر، H زاویه سمت^۳ یا آزیموت ماهواره نسبت به شمال و $\vec{d} = (d_e, d_n, d_e)$ تغییر شکل‌های زمینی در سه جهت می‌باشند [۵].



شکل ۲- نمایی از سمت راست ماهواره بالاگذر [۶]

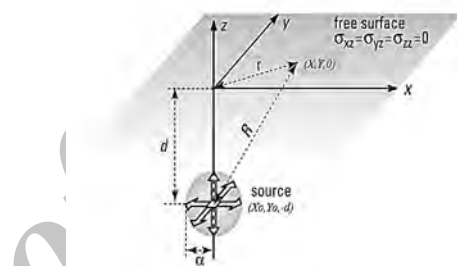
۳- حل مسئله معکوس با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی

مسئله تخمین مقادیر پارامترهای فیزیکی با استفاده از داده آزمایشی یک اصل در هر تحقیق ژئوفیزیکی است که به عنوان مدل معکوس مطرح می‌گردد. تقریب کمی مکان، هندسه و دینامیک منابع تغییر شکل به وسیله مقایسه یا برآزش مشاهدات زمینی با مدل‌های تحلیلی، به دست می‌آید. جهت تأمین پارامترهای یکتای منبع تغییر شکل که به بهترین وجه به مدل تحلیلی تولید کننده جابجایی 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 و هدف از بهینه‌سازی، تعیین متغیرهای طراحی است، به گونه‌ای که تابع هدف کمینه یا بیشینه شود. یکی از این روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک^۴ می‌باشد. الگوریتم ژنتیک می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند در موضوع علوم مرتبط با زمین به کار گرفته شود [۷]. الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های جستجوی تصادفی فرا ایتکاری است. این روش‌ها از نظر حوزه کاربرد، کاملاً عمومی هستند و می‌توانند مسائل خیلی پیچیده را حل کنند. این روش‌ها هیچ اطلاعاتی از

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

در رابطه (۱) (u, v, w) بردار جابجایی 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، μ مدول کشسانی برشی و ν نسبت پواسن نیم فضا می‌باشند. مدل موجی از یک سیستم مختصات کارتیزین محلی دست راستی استفاده می‌کند. همان‌طور که در شکل (۱) ملاحظه می‌نمایید سیستم مختصات محلی 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 [۴].



شکل ۱- سیستم مختصات تعریف شده در مدل موجی [۴]

تجارب آزمایشگاهی روی صخره‌های 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 می‌شود. رابطه (۱) اغلب با قرار دادن $\nu = 1/4$ ساده و به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \frac{3\Delta v}{4\pi} \begin{pmatrix} \frac{x - x_0}{R^3} \\ \frac{y - y_0}{R^3} \\ \frac{d}{R^3} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\Delta v = \frac{\alpha^3 \Delta P \pi}{\mu} \quad (4)$$

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق در جهت خط دید ماهواره می‌باشد. میدان جابجایی موجی ذکر شده در بالا با استفاده از رابطه ریاضی (۵) به جابجایی‌هایی در جهت خط دید^۱ ماهواره، تصویر می‌شود.

$$dr = d_e \cos(\theta) - \sin(\theta) [d_n \cos(H - \frac{3\pi}{2}) + d_e \sin(H - \frac{3\pi}{2})] \quad (5)$$

^۲ Incidence Angle

^۳ Heading angle

^۴ Genetic algorithm

^۱ Line Of Sight

$$\text{cost} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f(\Delta V, d, X_0, Y_0) - \text{obs})^2}{n}} \quad (9)$$

مجهولات مسئله معکوس اختلاف فشار Δp ، عمق d ، مختصات مسطحاتی مرکز منبع (x_0, y_0) می‌باشند. معلومات و نقاط مرزی مسئله بردار جابجایی مشاهداتی (u, v, w) در نقاط $(x, y, 0)$ (نقطه‌ای روی سطح آزاد) هستند. تابع مدل f در رابطه (9) با توجه به رابطه (3) به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$f(\Delta V, d, X_0, Y_0) = w \cos(\theta) - \sin(\theta) \left[v \cos\left(h - \frac{3\pi}{2}\right) + u \sin\left(h - \frac{3\pi}{2}\right) \right] \quad (10)$$

این تابع با اعمال قیودی برای متغیرها (رابطه 11) مسئله را حل می‌نماید. تعیین کرانه‌های این متغیرها اغلب با اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و ژئودینامیکی موجود انجام می‌گیرد.

$$\begin{cases} \Delta V_{\min} < \Delta V < \Delta V_{\max} \\ d_{\min} < d < d_{\max} \\ X_{0_{\min}} < X_0 < X_{0_{\max}} \\ Y_{0_{\min}} < Y_0 < Y_{0_{\max}} \end{cases} \quad (11)$$

3-3- جمعیت جدید

الگوریتم ژنتیک استفاده شده در این تحقیق ساده و مجهز به سه عملگر تکثیر، ترکیب و جهش می‌باشد. پس از تولید جمعیت اولیه و ارزیابی تابع هدف برای آن، نوبت به انتخاب دو تن از والدین و ترکیب آنها در قالب یک یا دو فرزند و در نهایت جهش فرزندان می‌شود. روش انتخاب و جفت‌گیری که در این تحقیق از آن بهره برده شده روش جفت‌گیری تصادفی مرتبه‌ای وزن‌دار با احتمال ترکیب 50 درصد است [9]. پس از ترکیب و تولید فرزندان، برای جلوگیری از همگرایی محلی الگوریتم عملگر جهش با احتمال جهش (5 درصد) و با رعایت نخبه سالاری، به صورت تصادفی انجام می‌شود [10].

3-4- جایگزینی

فرزندان جدید تولید شده جایگزین یکی از افراد ضعیف‌تر نسبت به خود در جمعیت می‌شوند. هر فرد از این جمعیت، روند بقا شامل انتخاب، ترکیب و جهش را به منظور تولید جمعیت جدید در فضای جستجو طی می‌کند تا به این ترتیب نسل بعدی که فرزندان فعلی و والدین برتر

گردان‌های تابع هدف نسبت به متغیرهای طراحی در خلال فرآیند بهینه‌سازی لازم ندارند و جستجو برای رسیدن به نقطه بهینه با مقایسه مقادیر تابع هزینه در نقاط طراحی مختلف انجام می‌شود. نگرش اصلی آن بر مبنای حفظ ژن‌های خوب در نسل جاری و در نتیجه تولید نسلی بهتر در طی فرآیند تولید نسل می‌باشد. الگوریتم ژنتیک با دو کدگذاری متفاوت دودویی¹ و پیوسته² مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجایی که در این تحقیق با مقادیر پیوسته‌ای از داده‌ها و متغیرها سروکار داریم لذا الگوریتم ژنتیک پیوسته مطرح می‌گردد [8]. طرح کلی این الگوریتم به شرح زیر می‌باشد:

3-1- ایجاد جمعیت اولیه

الگوریتم ژنتیک با ایجاد یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها (معمولاً به صورت تصادفی) به نمایندگی از یک سری پارامترهای طراحی آغاز به کار می‌کند و مجموعه‌ای از جواب‌های امکان‌پذیر را به عنوان جمعیت اولیه ایجاد می‌نماید. تعریف جمعیت اولیه (p) به ازای پارامترهای مجهول منبع تغییر شکل آتشفشانی (کروموزومی با ابعاد $1 \times N$) (رابطه 6) در یک جامعه 1000 نفری به صورت رابطه (8) می‌باشد.

$$\text{Chromosome} = [p_1, p_2, \dots, p_N] \stackrel{N=4}{=} [p_1, p_2, p_3, p_4] \quad (6)$$

$$\text{init_population} = \text{rand}(M, N) = \begin{bmatrix} p_{1,1} & \dots & p_{1,M} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ p_{N,1} & \dots & p_{N,M} \end{bmatrix} \stackrel{M=1000}{=} \begin{bmatrix} p_{1,1} & \dots & p_{1,1000} \\ p_{2,1} & \dots & p_{2,1000} \\ p_{3,1} & \dots & p_{3,1000} \\ p_{4,1} & \dots & p_{4,1000} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$p = (p_{\text{high}} - p_{\text{low}}) \times \text{init_population} + p_{\text{low}} \quad (8)$$

3-2- ارزش‌گذاری

تعریف تابع هزینه به کروموزوم‌های انتخاب شده مقداری حقیقی تخصیص می‌دهد که نشان‌دهنده ارزش و کیفیت آن‌هاست. تابع هدف مورد بررسی ما در الگوریتم ژنتیک اختلاف بین جابجایی‌های محاسباتی با استفاده از مدل تحلیلی موگی (f) و جابجایی‌های مشاهده شده توسط ماهواره‌ها در جهت خط دید ماهواره (obs) ³ است.

¹ binary

² continuous

³ Line Of Sight

در جدول (۱)، X_0 مولفه شرقی-غربی و Y_0 مولفه شمالی-جنوبی 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 و آزیموت ماهواره هستند.

در این الگوریتم با فرض جامعه ۱۰۰۰ نفری از متغیرها و احتمال ترکیب ۵۰ درصد و احتمال جهش ۵ درصد بهینه‌سازی انجام گرفت. با اجرای الگوریتم ژنتیک با استفاده از شرایط مرزی داده جابجایی شبیه‌سازی شده، پارامترهای مخزن بدست آمد. نتایج حاصل از آن در جدول (۲) جمع آوری گردیده است. باقیمانده‌های میدان-های جابجایی مشاهداتی و مدل‌سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک در شکل (۵) نشان داده شده است. به طور خلاصه می‌توان به دلایل زیر نتایج را قابل قبول دانست.

- خطای مربعی متوسط که پارامتری برای ارزیابی نتایج است مقدار کوچک و مناسبی بنا به میدان جابجایی مشاهداتی و میزان خطای اعمالی به آن دارد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - c)^2} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) x_i و c به ترتیب میدان جابجایی مدل‌سازی شده و میدان جابجایی مشاهداتی می‌باشند.

- اختلاف ناچیز بین پارامترهای برآورد شده و مقادیر اولیه تعریف شده برای آن‌ها بیشتر ناشی از حساسیت الگوریتم به نویز می‌باشد.
- مقادیر باقیمانده‌های میدان جابجایی مشاهداتی و میدان جابجایی مدل‌سازی شده، تطابق مناسب این دو را نشان می‌دهد (طبق شکل ۵-۳)

هستند، تولید گردد. پس از تولید چند نسل، نسلی شامل افراد برتر، دارای کلیه شرایط بهینه، ایجاد می‌گردد و به این ترتیب مسئله به سمت یک راه حل بهینه تکامل می‌یابد.

در طول اجرای الگوریتم ژنتیک، چهار متغیر مولفه‌های مختصات سطحی، عمق و تغییر حجم، مدام در حال تغییر بوده و نسل‌های جدید را با اعمال قوانین موجود در الگوریتم به‌وجود می‌آورند، تا زمانی که بهترین میزان تابع هدف برابر با مقدار حداقل آن به‌دست آید و در نهایت یکی از شروط توقف الگوریتم ژنتیک ارضا شود.

۴- نتایج عددی

در ادامه به ارائه نتایج عددی حاصل از این مدل-سازی می‌پردازیم. ابتدا به منظور بررسی صحت الگوریتم‌ها و مدل‌های پیشنهادی آن‌ها را بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده با توجه به معلوم بودن وضعیت آن و همین‌طور آتشفشان کمپی فلگری به منظور مقایسه با مطالعات گذشته بر روی آن آنالیز می‌نماییم.

۴-۱- ارائه نتایج الگوریتم‌های بهینه‌سازی بر روی داده شبیه‌سازی شده

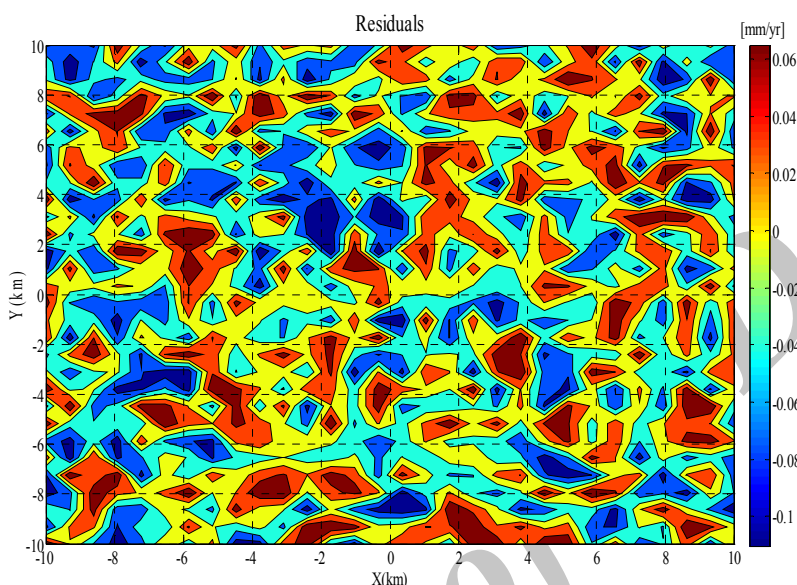
میدان جابجایی ناشی از منبعی فرضی (طبق جدول (۱)) بر روی شبکه‌ای به ابعاد ۲۰ کیلومتر و فواصل نقاط تقریباً ۷۰۰ متری که در شکل (۱) نشان داده شده، تولید گردید. علی‌رغم پیشرفت علوم، اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات مختلف نقشه‌برداری عاری از خطا نمی‌باشند، لذا برای هر چه واقعی‌تر شدن تحلیل مدل، خطایی با توزیع نرمال دارای میانگین صفر و انحراف معیار ۰/۱ میلی‌متر به مشاهدات شبیه‌سازی شده اعمال می‌شود. تمامی فرضیات مسئله بنا به خصوصیات آتشفشان دماوند مقادیری نزدیک به شرایط واقعی را دارا می‌باشند.

جدول ۱- پارامترهای لازم برای تهیه داده شبیه‌سازی

| پارامترهای مخزن | | | | پارامترهای ماهواره | | موقعیت نقاط شبکه شبیه‌سازی | | خطای مشاهدات | پارامترهای شبیه‌سازی |
|----------------------------------|---------|-----------|-----------|----------------------|-----------|----------------------------|-------------|---------------------|----------------------|
| ΔV (m ³ / yr) | d (m) | X_0 (m) | Y_0 (m) | θ_{inc} (deg) | H (deg) | x (km) | y (km) | σ_{los} (mm) | مقادیر پارامتر |
| 65×10^4 | ۳۰۰۰ | ۰ | ۰ | ۲۳ | ۱۹۴ | $[-10, 10]$ | $[-10, 10]$ | ± 0.1 | |

جدول ۲- نتایج حاصل از اجرای الگوریتم های بهینه سازی بر روی داده شبیه سازی

| پارامترها | X_0 (m) | Y_0 (m) | d (m) | ΔV (m ³ / yr) | RMSE |
|-----------------------|-------------------|-------------------|----------------|------------------------------------|--------------------|
| محدوده مجاز پارامتر | $[-10000, 10000]$ | $[-10000, 10000]$ | $[1500, 4500]$ | $[30 \times 10^6, 90 \times 10^6]$ | 6×10^{-5} |
| پارامترهای برآورد شده | ۲/۸۵۶ | -۰/۸۲۲ | ۳۰۰۰/۳۳۳ | ۶۴۹۵۹۴/۰۵۲ | |



شکل ۳- باقیمانده های میدان های جابجایی مدل سازی شده و مشاهداتی

به نتایجی مشابه با نتایج بدست آمده از مطالعات قبلی بر روی این آتشفشان دست یافتیم (مطابق جدول ۳). خطای مربعی متوسط (RMSE) مقداری مناسب بنا به میدان جابجایی مشاهداتی بدست آمد. در شکل های (۴) و (۵) و (۶) به ترتیب میدان جابجایی مشاهداتی، میدان جابجایی مدل سازی شده و باقیمانده های این دو نشان داده شده است. محورهای افقی و قائم در این شکل ها به ترتیب مولفه شرقی غربی و شمالی جنوبی نقاط در سیستم تصویر مرکاتور معکوس جهانی می باشند. میزان جابجایی در هر نقطه با رنگ های متفاوتی نشان داده شده است. مختصات ها در واحد کیلومتر و سرعت جابجایی در واحد میلی متر در سال بیان شده اند. موفقیت الگوریتم در مدل سازی میدان جابجایی با استفاده از داده شبیه سازی شده و همین طور برای آتشفشان کمپی فلگری در ایتالیا، نشان دهنده صحت مدل سازی می باشد.

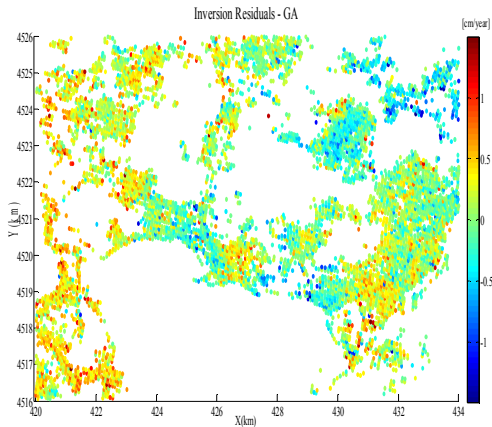
۲-۴- نتایج الگوریتم های بهینه سازی در آتشفشان کمپی فلگری ایتالیا

این الگوریتم بر روی داده های تغییر شکل آتشفشان کمپی فلگری ایتالیا طی سال های ۲۰۰۰-۲۰۰۱ نیز مورد بررسی قرار گرفت. این داده ها شامل تصاویر بدست آمده از سنجنده راداری ERS در مدار پایین گذر است که منکنی^۲ همکاران در سال ۲۰۱۰ اینترفروگرام ها را با استفاده از روش زیرمجموعه با طول مبنای کوچک (SBAS-DInSAR)^۳ به داده سرعت جابجایی در جهت خط دید ماهواره با دقت یک میلی متر در سال تبدیل کردند [۱۱]. شبکه مشاهداتی مربوط به آتشفشان کمپی فلگری شامل ۶۲۷۹ نقطه مشاهداتی بوده که در محدوده ۴۰/۷۹۱۷۸۱ تا ۴۰/۸۸۲۰۹۲ درجه طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی ۱۴/۰۵۰۹۹۲ تا ۱۴/۲۱۶۹۷۴ درجه توزیع شده بودند. با در نظر گرفتن محدوده های بزرگی برای متغیرها در بهینه سازی

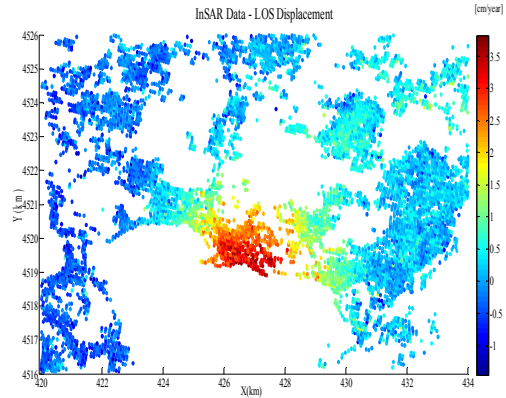
^۱ Descending orbit

^۲ Manconi

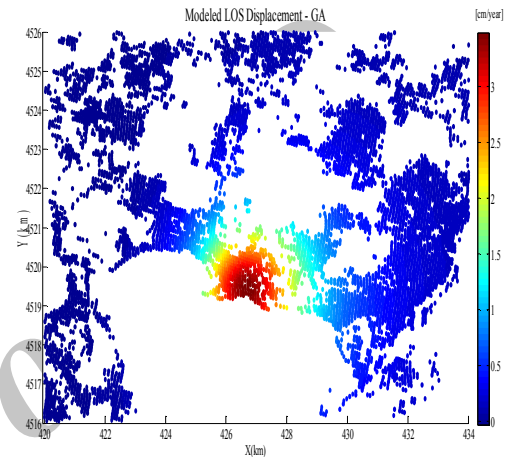
^۳ Small Base Line Subset



شکل ۶- باقیمانده‌های حاصل از مدل‌سازی میدان جابجایی در آتشفشان کمپی فلگری



شکل ۴- میدان جابجایی مشاهداتی در جهت خط دید ماهواره.



شکل ۵- میدان جابجایی مدل‌سازی شده در جهت خط دید ماهواره توسط الگوریتم ژنتیک

جدول ۳- نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی بر روی داده آتشفشان کمپی فلگری ایتالیا

| پارامترها | X_0 (km) | Y_0 (km) | d (km) | ΔV (km ³ / yr) | RMSE |
|---------------------|----------------|------------------|----------|-----------------------------------|----------------------|
| محدوده مجاز پارامتر | [۴۲۶, ۴۲۸] | [۴۵۱۸, ۴۵۲۰] | [۲, ۵] | [۰/۰۰۰۵, ۰/۰۵] | $3/9 \times 10^{-3}$ |
| نتایج این تحقیق | ۴۲۶/۳۹۴ | ۴۵۱۹/۴۸۵ | ۲/۰۸۷ | ۰/۰۰۰۶۶۷۳ | |
| نتایج منکنی (۲۰۱۰) | [۴۲۶/۳, ۴۲۷/۲] | [۴۵۱۸/۹, ۴۵۱۹/۱] | [۲, ۳] | [۰/۰۰۰۵۳, ۰/۰۰۰۷] | $3/1 \times 10^{-3}$ |

سنجی رادار دهانه ترکیبی^۱ مربوط به میدان تغییر شکل نواحی اطراف آتشفشان می‌باشد. این تصاویر راداری توسط ماهواره انویست^۲ طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ ثبت گردیده است. شیرزایی و همکاران در سال ۲۰۱۱ سری‌های زمانی جابجایی در جهت خط دید ماهواره با دقت ۰/۵ میلی‌متر در سال را ارائه دادند. آن‌ها نتایج این سری‌های

۳-۴- نتایج الگوریتم‌های بهینه‌سازی در آتشفشان دماوند

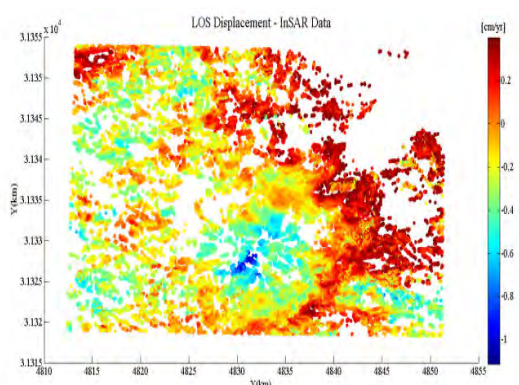
شبکه مشاهداتی مربوط به آتشفشان دماوند شامل ۶۴۰۸۹ نقطه مشاهداتی توزیع شده در محدوده ۵۱/۹۲۲۵۸۹ تا ۵۲/۳۵۱۹۰۵ درجه طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی ۳۵/۸۶۰۵۶۵ تا ۳۶/۱۷۵۲۱۹ درجه بود. داده‌های استفاده شده در این تحقیق داده‌های تداخل

^۱ Interferometry Synthetic Aperture Radar

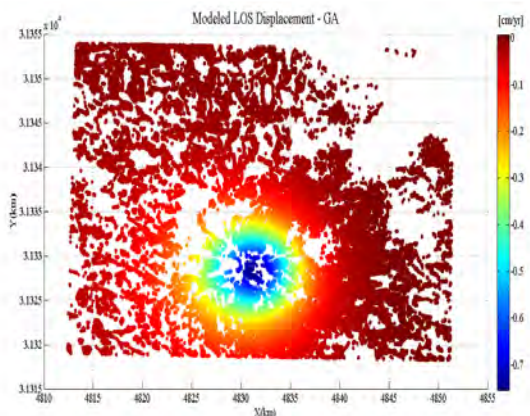
^۲ Envisat

جدول ۴- نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک بر روی آتشفشان دماوند

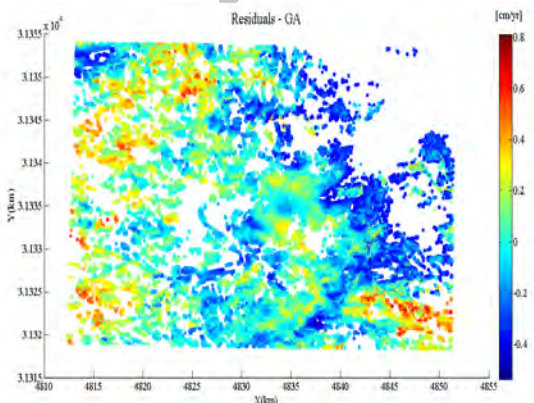
| پارامترها | محدوده مجاز پارامتر | پارامترهای برآوردی |
|--|---------------------|-----------------------|
| X_0 (km) | [۴۸۳۱, ۴۸۳۲] | ۴۸۳۱/۹۹۹ |
| Y_0 (km) | [۳۱۳۲۸, ۳۱۳۳۱] | ۳۱۳۲۸/۵۳۶ |
| d (km) | [۲/۵, ۶/۵] | ۵/۶۰۷ |
| ΔV (km^3 / yr) | [-۰/۰۰۰۴, -۰/۰۰۱۲] | -۰/۰۰۱۰۵۰۵۱۷ |
| RMSE | | $۲/۰۹ \times 10^{-3}$ |



شکل ۷- میدان جابجایی مشاهداتی در آتشفشان دماوند



شکل ۸- میدان جابجایی مدل‌سازی شده در آتشفشان دماوند



شکل ۹- باقیمانده‌های حاصل از مدل‌سازی میدان جابجایی در آتشفشان دماوند

زمانی را با نتایج داده‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی پیوسته^۱ مقایسه کرده و توافق خوبی نتیجه گرفتند. این تست ارزیابی اجازه کاوش مطمئن سری‌های زمانی میدان تغییر شکل حاصل را می‌دهد [۱۲].

میدان جابجایی مشاهداتی نشان داده شده در شکل (۷) به عنوان مقادیر مرزی مسئله تعریف شد. در این قسمت نیز فرضیات عملگرهای ژنتیک مانند بخش شبیه‌سازی تعریف شده است. محدوده مجاز موقعیت مسطحاتی مرکز مخزن آتشفشان تصویر شده روی زمین، به صورت تقریبی طبق قله آتشفشان^۲ (مکانی با بیشترین مقدار جابجایی) در میدان جابجایی مشاهداتی، که شیرزایی و همکاران در سال ۲۰۱۱ بدست آوردند، مشخص شد. اسکویی و همکاران در سال ۱۳۹۱ آنامولی‌هایی در محدوده تقریبی ۳ تا ۶ کیلومتری زیر دهانه آتشفشان از طریق مغناطیس‌سنجی یافتند [۱۳]. طبق این مطالعات محدوده مجاز برای عمق ۲/۵ تا ۶/۵ کیلومتری زیر زمین لحاظ گردید. برای محدوده مجاز مربوط به تغییر حجم، بازه بسیار بزرگی طبق بررسی‌های مناطق آتشفشانی دیگر و همین‌طور با توجه به مقدار جابجایی‌های مشاهداتی مشخص گردید.

محورهای افقی و قائم در این شکل‌ها به ترتیب مولفه شرقی غربی و شمالی جنوبی نقاط در سیستم تصویر مخروطی متشابه لامبرت می‌باشند. میزان جابجایی در هر نقطه توسط رنگ نشان داده شده است. مختصات‌ها در واحد کیلومتر و سرعت جابجایی در واحد میلی‌متر در سال بیان شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۹) ملاحظه می‌نمایید باقیمانده‌ها به نسبت میزان سرعت جابجایی که دارای حداکثر مقدار ۱۲ میلی‌متر در سال و متوسط مقدار ۲ میلی‌متر در سال می‌باشند، مقادیری بزرگ با فراوانی بالا می‌باشند (مناطق مشخص شده با رنگ آبی).

با ملاحظه شکل (۷) دو فاز تغییر شکل، بالآمدگی و فرونشست، در منطقه مشاهده می‌شود. در حالی که تمامی مدل‌های آتشفشانی قادر به مدل‌سازی یک فاز تغییر شکل هستند. الگوی تغییر شکل در منطقه حاکی از نوعی فرونشست می‌باشد و مناطقی با فاز تغییر شکل بالآمدگی، به عنوان اغتشاشاتی متناقض با الگوی تغییر شکل در مدل محسوب می‌شوند.

۱ cGPS
۲ Summit

۵- نتیجه گیری

خواهد بود: مخزن آتشفشان دماوند در عمق ۵/۶ کیلومتری زیر زمین قرار گرفته است که کاهش ۰/۰۰۱ کیلومتر مکعب در حجم مخزن جابجایی‌های کوچکی فقط در محدوده نزدیک منبع ایجاد می‌کند. در نتیجه جابجایی‌ها در مناطق دورتر ممکن است ناشی از منابع دیگری جز یک منبع آتشفشانی باشد.

سپاسگزاری

از تمامی کسانی که در انجام این تحقیق ما را یاری نموده‌اند، به ویژه جناب پروفیسور شیرزایی از دانشگاه Arizona state و مهندس نیکخو از دانشگاه Potsdam به خاطر همکاری صمیمانه‌شان جهت در اختیار قرار دادن داده‌ها تشکر و قدردانی می‌نمایم.

با توجه به عملکرد مناسب الگوریتم‌های بهینه‌سازی در موارد مدل‌سازی میدان جابجایی شبیه‌سازی شده و همین‌طور میدان جابجایی مربوط به آتشفشان کمپی فلگری، صحت الگوریتم تأیید گردید. از طرفی هیچ‌یک از مدل‌های تحلیلی آتشفشانی، قادر به مدل‌سازی هر دو حالت تغییر شکل تورم و کاهش تورم به صورت هم‌زمان نمی‌باشند. لذا باقیمانده‌های دور از انتظار دیده شده در مدل‌سازی منبع آتشفشانی دماوند حاکی از وجود منبع تغییر شکل دیگری جز یک منبع آتشفشانی، تولید کننده این جابجایی‌ها است. با توجه به نتایج بهینه‌سازی مقادیر باقیمانده‌ها در محدوده نزدیک مرکز منبع بسیار کوچک می‌باشد. در واقع تحلیل نتایج مدل‌سازی به این صورت

مراجع

- [1] Berberian. M, Qorashi.M, Arzhangravesh.B, Mohajer-Ashjai.A, 1985. Recent tectonics, seismotectonics, and earthquake-fault hazard study of the Greater Tehran region. Geol. Surv. Iran, 56,316p.
- [۲] زارع.م، مهرنیاس، ۱۳۸۹، بررسی مقدماتی وضعیت امروزی آتشفشان دماوند با توجه به لرزه‌خیزی و سایر پارامترهای ژئوفیزیکی، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، وابسته به وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران، ۱۶-۸۹-پ-۵۷۰۶.
- [3] Janssen.V, 2007. Volcano Monitoring Deformation using GPS. Journal Of Geophysical Research 115, 1-10.
- [4] Dzurisin.D, 2007. Analytical volcano deformation source models, Volcano Deformation. Springer.
- [5] Hanssen.R.F, 2002. Radar Interferometry, Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publishers, Delft University of Technology.
- [6] Erten.E, R.A., Hellwich.O, 2007. Generation of Three-Dimensional Deformation Map at Low Resolution Using a Combination of Spectral Diversity via Least Square Approach.
- [7] Yu.T, F.J., and Rundle. B.J, 1998. Inverting The Parameters Of An Earthquake-Ruptured Fault with A Genetic Algorithm. Computers & Geosciences 24, 173.
- [8] Edmund.K, Burke.G.K., 2005. Search Methodologies, Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques. Springer.
- [9] Haupt. R. L , H.S.E., 2004. Practical Genetic Algorithms. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey.
- [10] Reeves, C.R., 1998. A Genetic algorithm for Flowshop sequencing. Evolutionary Computation journal 6, 230-234.
- [11] Manconi.A, W.T.R., Manzo.M, Zeni.G, Tizzani.P, Sansosti.E, Lanari.R, 2010. On the effects of 3-D mechanical heterogeneities at Campi Flegreicaldera, southern Italy. Journal Of Geophysical Research 115.
- [12] Shirzaei.M, W.T.R., Nankali.H.R, Holohan.E.P .2011. Gravity-driven deformation of Damavand volcano, Iran, detected through InSAR time series. Geological Society of America 39, 251-254.
- [13] Oskooi.B, 2012. Recent Magnetotelluric Surveys in Iran, 15th conference of Geophysic, Iran, pp. 1-5.