نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هفتم، شماره نخست، بهار ۱۳۹۸

Vol.7, No.1, Spring 2019

۵۵-۷۲

مقاله پژوهشی

این مقاله در دومین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی به‌عنوان مقاله برگزیده انتخاب شده است که پس از تکمیل، داوری مجدد و اخذ پذیرش در این شماره از نشریه به چاپ می‌رسد.

بررسی اثر توپوگرافی در مدلسازی میدان تغییر شکل آتشفشان کامپی فلگری با استفاده از روش حل اساسی

مریم یزدان پرست [۱]، بهزاد وثوقی [۲*] ، فرشید مسیبی [۳]

۱- دانشجوی دکترای نقشه برداری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱

چکیده

با توجه به اهمیت پیش‌بینی فوران آتشفشان و تعدد قلل آتشفشانی در سرتاسرجهان، انجام تحقیقات در این زمینه ضروری به‌نظر می‌رسد. بر اساس تحقیقات ژئودتیکی، تغییر شکل سطح زمین به صورت بالاآمدگی یا فرونشست در منطقه آتشفشانی، به ترتیب نشانه‌ای از حرکت ماگما به سمت دهانه یا خروج آن از مخزن به اطراف است. در این تحقیق با استفاده از روش جدید حل اساسی در مطالعه تغییرشکل آتشفشان به تعیین میدان تغییر شکل آتشفشان کامپی فلگری با در نظر گرفتن اثر توپوگرافی پرداخته شده است. روش حل اساسی، روشی بدون المان است که برای حل عددی مسائل مقدار مرزی استفاده می شود. عدم نیاز به هزینه محاسباتی بالا در این روش آن را به ابزاری موثر در حل بسیاری از مسائل در زمینه‌های گوناگون تبدیل کرده است. به منظور بررسی میزان کارایی روش، میدان جابجایی به‌دست آمده با میدان جابجایی حاصل از مشاهدات تداخل سنجی رادار (*Interferometric synthetic aperture radar*) در آتشفشان کامپی فلگری ایتالیا مقایسه شد و خطای مربعی متوسط کمتر از ۲ میلی متر را در برداشت که نشان دهنده تطابق خوب نتایج در این منطقه با میدان جابجایی حاصل از مشاهدات است.

کلیدواژه‌ها: میدان تغییر شکل، آتشفشان، روش حل اساسی، توپوگرافی، روش بدون المان.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، روبروی ساختمان اسکان، دانشکده مهندسی نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، گروه ژئودزی

تلفن : ۸۸۷۷۰۲۱۸-۰۲۱

Email: vosoghi@kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]

۱- مقدمه

آتشفشان‌ها و فوران آنها نشان دهنده پروسه دینامیکی داخل زمین هستند که اغلب، نه همیشه در امتداد مرزهای صفحات تکتونیک زمین قرار دارند. مشاهدات ژئودتیکی در بسیاری از مناطق آتشفشانی نشان دهنده بالاآمدگی یا فرونشست سطح زمین است که به انتقال ماگما در عمق نسبت داده می‌شود [۱، ۲ و ۳]. بنابراین پایش تغییر شکل زمین در مناطق آتشفشانی به آگاهی از وضعیت آتشفشان و پیش‌بینی فوران آن کمک خواهد کرد. در این زمینه تاکنون مطالعات زیادی انجام گرفته است از جمله درسال ۱۹۱۰ برای اولین بار امری[1] با استفاده از ترازیابی دقیق تغییر شکل قائم را برای آتشفشانی در ژاپن به دست آورد [۴]. پس از آن مگی[2] درسال ۱۹۵۸ تغییر شکل سطح را با استفاده از پارامترهای مخزن ماگمای آتشفشان مانند موقعیت و عمق محاسبه کرد [۱]. در فوران ۱۹۸۱ کوه اتنا[3]، اندازه‌گیری‌هایی با استفاده از ترازیابی دقیق وگراویمتری در زمان های قبل و بعد از فوران انجام شد. همچنین از ابزار اندازه‌گیری الکترونیکی (*EDM*)[4] نیز برای بررسی تغییر شکل در کوه اتنا استفاده گردید[۵]. ریزوس[5] و همکاران در سال ۲۰۰۰ یک شبکه از ایستگاه‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی (*GPS*)[6] را برای پایش تغییر شکل آتشفشان پاپاندایان[7] در اندونزی طراحی کردند[۶]. بیودوسل[8] و همکاران [۷] در سال۲۰۰۴ مدلی برای تغییر شکل زمین در آتشفشان کامپی فلگری ایتالیا با استفاده از روش المان مرزی (*BEM*)[9] و داده‌های تداخل سنجی راداری (*InSAR*)[10] ارائه کردند. لارسن[11] و همکاران در سال ۲۰۱۰ تغییر شکل آتشفشان کیلوا[12] را با استفاده از مشاهدات *GPS* بررسی و نتایج به‌دست آمده را با مشاهدات حاصل از تیلت متر مقایسه کردند [۸]. در سال ۲۰۱۰ شیرزایی و همکاران مطالعه‌ای بر روی تغییرشکل منطقه آتشفشانی دماوند با استفاده از مشاهدات تداخل سنجی راداری انجام دادند [۹].

در این مطالعه با استفاده از روش جدید حل اساسی در زمینه مسائل ژئودینامیکی، به تعیین میدان تغییر شکل حاصل از آتشفشان پرداخته خواهد شد. روش حل اساسی یک روش مرزی بدون المان است که در حل مسائل مقدار مرزی که حل اساسی معادلات حاکم برآنها موجود است کاربرد دارد. پرکاربرد بودن این روش به‌دلیل سادگی آن است. همچنین می‌تواند برای مسائل با هندسه‌های پیچیده و سه بعدی نیز به کار رود. محاسنی که روش حل اساسی نسبت به سایر روش های کلاسیک گسسته‌سازی مرزی و دامنه دارد در ادامه آورده می‌شود؛ اول اینکه روش بدون المان است و فقط تعدادی نقطه مرزی برای آن در نظر گرفته می‌شود. دوم اینکه روش با انتگرال‌گیری‌های پیچیده مانند روش المان مرزی سروکار ندارد. سوم اینکه روش حل اساسی یک روش مرزی است بدین معنی که تمام برتری‌های روش المان مرزی را نسبت به روش‌هایی که کل دامنه المان بندی می‌شود مانند المان محدود (*FEM*)[13] وتفاضل محدود (*FDM*)[14] دارا می‌باشد. به‌عنوان یک نتیجه، این روش یک روش ایده‌آل برای حل مسائلی است که مرز از اهمیت خاصی

[1] Omori
[2] Mogi
[3] Etna
[4] ElectronicDistanceMeasurement
[5] Rizos
[6] Global Positioning System
[7] *Papandayan*
[8] Beauducel

[3] Boundary Element Method
[10] InterferometricSyntheticApertureRadar
[11] Larson
[12] kilauea
[13] Finite Element Method
[2] Finite Difference Method

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]

برخوردار است[۱۰]. از جمله مطالعاتی که با استفاده از این روش در حوزه‌های مختلف علوم انجام شده می‌توان به [۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴] اشاره کرد.

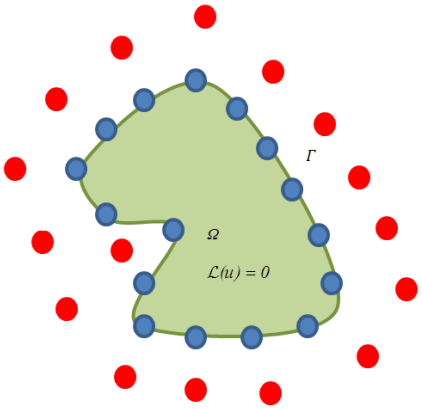
در این تحقیق با در نظر گرفتن زمین به‌عنوان محیط همگن ایزوتروپ با خاصیت الاستیسیته خطی، به تعیین میدان تغییر شکل آتشفشان کامپی‌فلگری با استفاده از روش حل اساسی همراه با اثر توپوگرافی پرداخته خواهد شد. بدین منظور بخش دوم به معرفی روش حل اساسی اختصاص داده شده، در بخش سوم مختصری از آتشفشان کامپی‌فلگری به‌عنوان منطقه مطالعاتی و مشاهدات مورد استفاده ارائه می‌شود، بخش چهارم شامل ارزیابی روش به‌صورت شبیه‌سازی بوده، در بخش بعد نتایج اجرای روش بر روی آتشفشان کامپی‌فلگری نشان داده خواهد شد و در نهایت نتیجه‌گیری تحقیق ارائه می‌شود.

۲- روش حل اساسی

روش حل اساسی یک روش عددی برای حل معادلات دیفرانسیل جزیی(PDE)[1] است. این روش بدون المان بوده و برای حل مسائل مقدار مرزی در شرایطی که حل اساسی معادله دیفرانسیل حاکم موجود باشد قابل استفاده است. برای توضیح این که چگونه این روش به‌کار گرفته می‌شود، دامنه بسته Ω را همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده، در نظر گرفته که دارای مرز Γ بوده و معادله دیفرانسیلی به‌صورت رابطه (۱) بر روی این دامنه حاکم است.

$$\mathcal{L}(u) = 0 \qquad \text{رابطه (۱)}$$

که $\mathcal{L}$ یک اپراتور دیفرانسیل خطی با ضرایب ثابت بوده و u نیز پارامتر مجهولی است که قرار است برآورد شود که در مساله فعلی می‌تواند جابجایی یا تنش یا ترکیبی از آنها باشد. برای حل این گونه معادلات نیاز به شرایط مرزی بوده که می‌تواند به یکی از صورت‌های دریکله[2]، نیومن[3] یا روبین[4] در نظر گرفته شود. در روش حل اساسی تقریبی را روی مرز ایجاد کرده که هم معادلات دیفرانسیل حاکم و هم شرایط مرزی را ارضا کند.



شکل۱: نمایش شماتیک دامنه Ω ، مرز Γ، معادله حاکم و پراکندگی نقاط مرزی (دایره‌های آبی رنگ) و نقاط منبع نیرو(دایره‌های قرمز رنگ) در روش حل اساسی

حل اساسی$G(P,Q)$ رابطه (۱) را به‌صورت رابطه (۲) می‌توان نوشت:

$$\mathcal{L}(G) = \delta(P - Q) \qquad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه (۲)، $\boldsymbol{\delta}$ نشان دهنده تابع دلتای دیراک بوده و Q به‌عنوان نقطه منبع نیرو و P به عنوان نقطه‌ای که تحت تاثیر منبع نیرو قرار دارد که همان نقطه مرزی است در نظر گرفته می‌شود. اگر نقطه منبع Q خارج از دامنه Ω در نظر گرفته شود، حل اساسی یا هر ترکیب خطی از آنها، رابطه (۱) را بدون هیچ‌گونه تکینگی[5] برآورده خواهد کرد. بنابراین می‌توان بدون از دست دادن کلیت مساله تقریبی از معادله (۱) را به‌صورت رابطه (۳) نوشت [۱۵، ۱۶ و ۱۷] .

$$u(P) = \sum_{j=1}^{N} c_j G(P, Q_j) \qquad \text{رابطه (۳)}$$

که Q_j نشان دهنده مکان $\boldsymbol{N}$ نقطه منبع می‌باشد که خارج از دامنه قرار دارند، $\boldsymbol{c_j}$ ها ضرایب ثابت و $\boldsymbol{u}$ مقدار

[1] Partial Differential Equation
[2] Dirichlet
[3] Neumann
[4] Robin
[5] Singularity

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]

مـرزی در نقطـه P روی مـرز هسـتند. شـکل (۱) پراکندگی نقاط مرزی و منبع نیرو را به‌صورت شماتیک نشان مـی‌دهـد. در ایـن مرحلـه بایـد ضـرایب ثابـت c_j تعیین شوند کـه ایـن کـار بـا اسـتفاده از نقـاط مـرزی (دایره‌های آبـی رنـگ در شـکل(۱)) و در نظـر گـرفتن شرایط مـرزی بـرای حـل رابطـه (۳) انجـام مـی‌شـود. اگـر تعـداد M نقطـه مـرزی و N نقطـه منبـع در نظـر گرفتـه شـود، در ایـن صـورت یـک دسـتگاه معادلات M معادله و $\boldsymbol{N}$ مجهول به‌وجـود خواهـد آمـد. پس از تعیین ضرایب ثابت اکنون می‌تـوان مقـدار $\boldsymbol{u}$ را در هر نقطه داخل مرز با قـرار دادن حـل اساسـی بـین نقطه مورد نظر و نقاط منبع نیرو محاسبه نمود.

۲-۱- به‌کار گیری روش حـل اساسـی در میـدان تغییر شکل آتشفشان

بـر اسـاس گفتـه لـوزن[1] و همکـاران در ۱۹۹۷ تغییـر شکل زمین در مناطق آتشفشانی از بـرهم نهـی میـدان جابجـایی سـطح نـیم‌فضـا و بخـش توپـوگرافی حاصل می‌شود[۱۸]. بنابراین جابجـایی کلـی مـی‌توانـد به‌صـورت رابطـه (۴) کـه شـامل بـرهم نهـی جابجـایی مربوط به حرکت ماگما در عمق، در سطح نیم‌فضا u_i^f و جابجایی حاصل از اثر توپوگرافی u_i^t بیان گردد.

رابطه (۴) $u_i = u_i^f + u_i^t$

u_i^f معمولا از طریق روابط تحلیلی بسته به نـوع مخـزن ماگما محاسبه می‌شود و در نتیجـه روش حـل اساسـی بـرای محاسـبه جایجـایی حاصـل از اثـر توپـوگرافی استفاده می‌شـود. در غیـاب نیروهـای حجمـی، معادلـه حاکم بر محیط همگن ایزوتروپ در حالت الاستیسـیته خطی معادلات کوشی-ناویر می‌باشند. با در نظر گـرفتن نماد تنسوری برای جابجایی‌ها $u_i^t, i = 1,2,3$ در دامنه سه بعدی $\boldsymbol{\Omega}$ این معادلات به شکل رابطه (۵) می‌باشند [۱۶]

رابطه (۵) $(\lambda + \mu)u_{k,ki} + \mu u_{i,kk} = 0$

کـه λ و μ ثابـت‌هـای لامـه هسـتند. شـرایط مـرزی رابطه (۵) به شکل معادله (۶) در نظر گرفته می‌شود.

رابطه (۶) $B_i\langle u_1, u_2, u_3, t_1, t_2, t_3\rangle = f_i, i = 1,2,3$

عملگرهای B_i نشان دهنده شرایط مرزی دریکله، نیومن یا روبین و $t_i, i = 1,2,3$ تنش‌ها می‌باشند. جابجـایی‌هـا توسـط ترکیـب هـای خطـی حـل اساسـی کـه در معادلات (۷) نشان داده شده اند تقریب زده می‌شوند.

اگر شرایط مرزی موجود تنش‌هـا باشـند، حـل اساسـی مربـوط بـه آنهـا از حـل اساسـی جابجـایی‌هـا و روابـط ارائـه شـده در [۱۹] قابـل محاسـبه اسـت. در معادلات (۷)، $\boldsymbol{N}$ نشان‌دهنده تعداد نقاط منابع نیـرو و $G_{ij}, i, j = 1,2,3$ حل‌های اساسی هسـتند کـه بـرای فضای پر از طریق رابطه (۸) قابل محاسبه می‌باشند.

$R_{,i}$ مشتق جزئی R نسبت به نقاط مـرزی p_i، ϑ نسـبت پواسـن[2] و $\boldsymbol{p_i}, q_i, i = 1,2,3$ بـه ترتیـب مختصـات نقـاط مـرزی و منـابع نیـرو هسـتند. حـل‌هـای اساسـی بـرای نـیم فضـا از معـادلات (۱۰) بـه‌دسـت مـی‌آینـد [۲۰]. بـه‌دلیـل تقـارن مسـاله، جابجایی‌های ایجاد شده توسط نیروهای عمل کننده در راستای محور دوم بـا جـایگزینی $p_1 - q_1$ بـا $p_2 - q_2$ در مولفه‌های $\boldsymbol{G_{i1}}$ به‌دست می‌آیند.

[1] Luzo´n

[2] Poisson

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]

رابطه (۷)

$$u_{1N}^{t}(a,b,c,Q,p)=\sum_{j=1}^{N}a_j\,G_{11}(P,Q_j)+\sum_{j=1}^{N}b_j\,G_{12}(P,Q_j)+\sum_{j=1}^{N}c_j\,G_{13}(P,Q_j)$$
$$u_{2N}^{t}(a,b,c,Q,p)=\sum_{j=1}^{N}a_j\,G_{21}(P,Q_j)+\sum_{j=1}^{N}b_j\,G_{22}(P,Q_j)+\sum_{j=1}^{N}c_j\,G_{23}(P,Q_j)$$
$$u_{3N}^{t}(a,b,c,Q,p)=\sum_{j=1}^{N}a_j\,G_{31}(P,Q_j)+\sum_{j=1}^{N}b_j\,G_{32}(P,Q_j)+\sum_{j=1}^{N}c_j\,G_{33}(P,Q_j)$$

رابطه (۸)

$$G_{ij}(P,Q)=\frac{1}{16\pi\mu(1-\vartheta)R}\left[(3-4\vartheta)\delta_{ij}+R_{,i}R_{,j}\right]$$

که در این رابطه

رابطه (۹)

$$R^2=(p_1-q_1)^2+(p_2-q_2)^2+(p_3-q_3)^2$$

$$G_{13}=\frac{p_1-q_1}{16\pi\mu(1-\vartheta)}\left[\frac{(p_3-q_3)}{R_1^3}+\frac{(3-4\vartheta)(p_3-q_3)}{R_2^3}+\frac{4(1-\vartheta)(1-2\vartheta)}{R_2(R_2-p_3-q_3)}+\frac{6p_3q_3(p_3+q_3)}{R_2^5}\right]$$

$$G_{23}=\frac{p_2-q_2}{16\pi\mu(1-\vartheta)}\left[\frac{(p_3-q_3)}{R_1^3}+\frac{(3-4\vartheta)(p_3-q_3)}{R_2^3}+\frac{4(1-\vartheta)(1-2\vartheta)}{R_2(R_2-p_3-q_3)}+\frac{6p_3q_3(p_3+q_3)}{R_2^5}\right]$$

$$G_{33}=\frac{1}{16\pi\mu(1-\vartheta)}\left[\frac{(3-4\vartheta)}{R_1}+\frac{5-12\vartheta+8\vartheta^2}{R_2}+\frac{(p_3-q_3)^2}{R_1^3}+\frac{(3-4\vartheta)(p_3+q_3)^2-2p_3q_3}{R_2^3}+\frac{6p_3q_3(p_3+q_3)^2}{R_2^5}\right]$$

$$G_{11}=\frac{1}{16\pi\mu(1-\vartheta)}\left[\frac{(3-4\vartheta)}{R_1}+\frac{1}{R_1}+\frac{(p_1-q_1)^2}{R_1^3}+\frac{(3-4\vartheta)(p_1+q_1)^2}{R_2^3}+\frac{2(R_2^2-3(p_1-q_1)^2)p_3q_3}{R_2(R_2-p_3-q_3)}+\frac{4(1-\vartheta)(1-2\vartheta)[R_2^2-(p_1-q_1)^2-R_2(p_3+q_3)]}{R_2(R_2-p_3-q_3)^2}\right]$$

رابطه (۱۰)

$$G_{21}=\frac{(p_1-q_1)(p_2-q_2)}{16\pi\mu(1-\vartheta)}\left[\frac{1}{R_1^3}+\frac{(3-4\vartheta)}{R_2^3}-\frac{6p_3q_3}{R_2^5}-\frac{4(1-\vartheta)(1-2\vartheta)}{R_2(R_2-p_3-q_3)^2}\right]$$
$$G_{31}=\frac{(p_1-q_1)}{16\pi\mu(1-\vartheta)}\left[\frac{(p_3-q_3)}{R_1^3}+\frac{(3-4\vartheta)(p_3+q_3)}{R_2^3}-\frac{6p_3(p_3+q_3)q_3}{R_2^5}-\frac{4(1-\vartheta)(1-2\vartheta)}{R_2(R_2-p_3-q_3)}\right]$$

که

رابطه (۱۱)

$$R_1=\sqrt{(p_1-q_1)^2+(p_2-q_2)^2}+(p_3-q_3)^2$$
$$R_2=\sqrt{(p_1-q_1)^2+(p_2-q_2)^2}+(p_3+q_3)^2$$
$$c=(c_1,c_2,\dots.,c_N),b=(b_1,b_2,\dots.,b_N),a=(a_1,a_2,\dots.,a_N)$$

در روابط (۷) بردارهای شامل ضرایب مجهول، Q مختصات منابع نیروی Q_j که در خارج از دامنه قرار دارند و $p_i,i=1:M$ مجموعه نقاط نشان دهنده نقاط مرزی می‌باشند [۱۶]

۳- منطقه مطالعاتی و داده مورد استفاده

آتشفشان کامپی‌فلگری در جنوب ایتالیا، تاکنون فعالیت‌های آتشفشانی مختلفی از خود بروز داده و در نزدیکی شهر ناپل[1] که یکی از شهرهای پرجمعیت

[1] Naples

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]

ایتالیاست قرار دارد به‌عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شده است[۲۱]. طبق تحقیقات آتشفشان‌شناسی اولین فوران این دهانه مربوط به ۳۵۰۰۰ سال قبل می‌شود. حرکات زمین در منطقه کامپی‌فلگری از زمان رومیان تشخیص داده شد[۷]. یکی از کاملترین سری‌های زمانی تغییر شکل زمین در این منطقه در شکل (۲) نشان داده شده است.

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق مربوط به مشاهدات تداخل سنجی راداری ماهواره‌های ای آر اس[۱] و انویست[۲] در بازه زمانی ۲۰۰۷-۲۰۰۸ می‌باشد. برای پردازش داده از روش تداخل سنجی تفاضلی خط مبنای کوتاه (*SBAS-DInSAR*)[۳] استفاده شده است. با به‌کار بردن این تکنیک برای یک مجموعه از داده‌های جمع‌آوری شده بر روی مدار بالاگذر[۴] (مسیر[۵] ۱۲۹، چارچوب[۶] ۸۰۹)، محصولات نهایی که شامل نقشه‌های سرعت متوسط و نیز جابجایی مربوط به تاریخ‌های برداشت داده می‌شود به دست آمد[۲۱]. دقت این روش برای جابجایی و سرعت طبق گفته کاسو[۷] و همکاران [۲۱] به ترتیب ۵ میلی متر و ۱ میلی متر در سال می‌باشد.

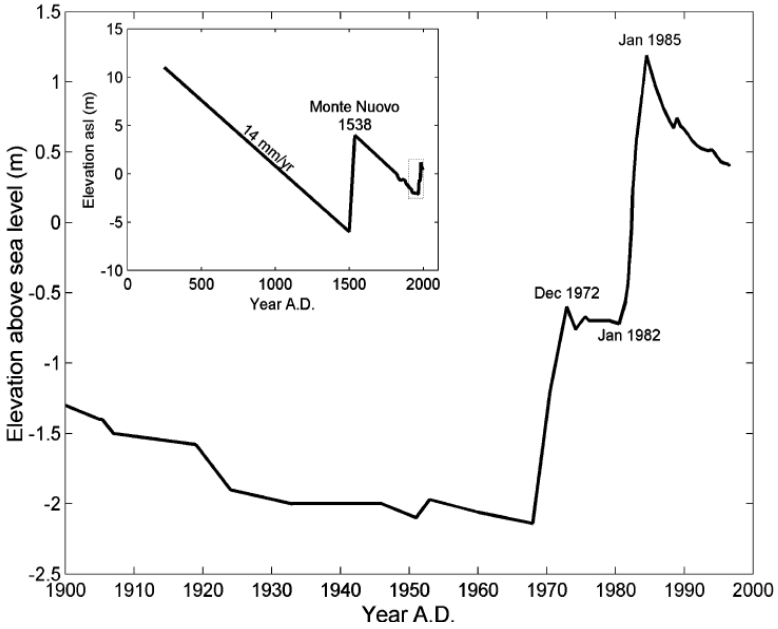
۴- ارزیابی روش با داده‌های شبیه‌سازی شده

پیش از اجرای روش حل اساسی بر روی آتشفشان کامپی‌فلگری، این تکنیک در حالت شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن اثر توپوگرافی و برای دو حالت مخزن ماگمای کروی و بیضوی ارزیابی شد. در حالت مخزن ماگمای کروی، یک مربع ۲۰×۲۰ کیلومتر به‌عنوان سطح نیم‌فضا به همراه یک حفره کروی ماگما که در زیر سطح نیم‌فضا قرار دارد به عنوان مرزهای بیرونی و داخلی مساله انتخاب شدند. مشخصات مخزن ماگما در جدول (۱) آورده شده است. با در نظر گرفتن ۲۵ نقطه مرزی روی مرز بیرونی و همین تعداد نقطه مرزی بر روی مرز داخلی و نیز ۵۰ نقطه منبع نیرو به موازات نقاط مرزی که به‌طور یکنواخت روی مرز پراکنده شده‌اند روش حل اساسی به کار گرفته شد. در شکل (۳) طرح شماتیک این نقاط نشان داده شده است. برای تعیین مقادیر مرزی جابجایی در مرز بیرونی از روابط ارائه شده در [۲۳] استفاده گردید که در آنجا معادلات مورد نیاز برای محاسبه جابجایی ناشی از یک حفره کروی در نیم‌فضای همگن ایزوتروپ ارائه شده است. در واقعیت مشاهدات همراه با خطای تصادفی می‌باشند بنابراین در این بخش نیز اثر خطای تصادفی به‌صورت توزیع نرمال با واریانس ۰/۵ سانتیمتر مربع به مقادیر مرزی اعمال گردید. این واریانس از مرتبه واریانس واقعی مشاهدات تداخل سنجی راداری است [۲۴]

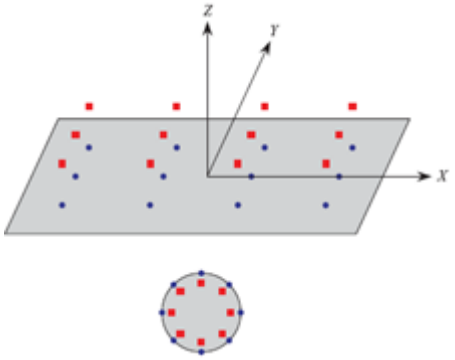
در حالت منبع ماگمای بیضوی، یک حفره بیضوی به‌جای کره به‌عنوان مرز داخلی در نظر گرفته شد که پارامترهای مربوط به آن در جدول (۱) آورده شده است. نقاط مرزی و منابع نیرو مشابه با حالت کروی می‌باشند. هندسه این حالت در شکل (۴) نشان داده شده است. برای تعیین مقادیر مرزی جابجایی در مرز بیرونی از روابط ارائه شده در [۲۵] استفاده گردید و مجددا خطای تصادفی به این مقادیر اعمال گردید. همچنین مقدار مرزی برروی حفره ماگما مشابه با پیشنهاد مطالعه [۱۰] به صورت تنش صفر فرض شد. نسبت پواسن برای این مساله برابر با ۰/۲۵ و مدول برشی همانند تحقیق [۲۱] در منطقه کامپی‌فلگری برابر با ۷ گیگا پاسکال در نظر گرفته شد. به‌منظور محاسبه حل‌های اساسی نیم فضا نیز از روابط ارائه شده در رابطه‌های (۱۰) استفاده گردید.

[1] ERS
[2] ENVISAT
[3] Small Baseline Subset Differential InSAR
[4] Ascending Orbit
[5] Track
[6] Frame
[7] Casu

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]



شکل ۲: سری زمانی ارتفاع منطقه آتشفشانی کامپی‌فلگری در ۲۰۰۰ سال گذشته [۷]



شکل ۳: هندسه مرز داخلی (حفره کروی) و بیرونی مساله به همراه سیستم مختصات مورد استفاده. نقاط مرزی و منبع به ترتیب با دایره‌های آبی و مربعات قرمز رنگ در شکل نمایش داده شده‌اند

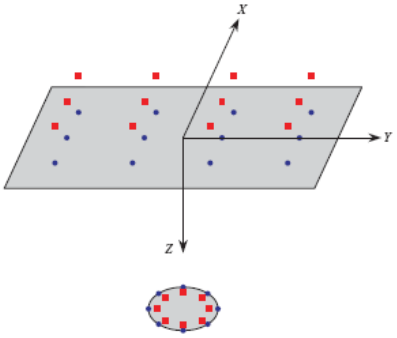
پس از محاسبه حل‌های اساسی برای جابجایی و تنش، در گام اول ضرایب $\boldsymbol{a}$ و $\boldsymbol{b}$ و $\boldsymbol{c}$ توضیح داده شده در زیربخش ۲-۱ محاسبه شد. چون هدف اصلی، مقایسه میدان جابجایی حاصل از روش حل اساسی با میدان جابجایی حاصل از مشاهدات تداخل سنجی راداری برای آتشفشان کامپی فلگری است که در بخش بعد توضیح داده خواهد شد، جابجایی‌های شبیه‌سازی شده نیز روی مرز بیرونی در راستای خط دید ماهواره ***(LOS)***[1] برای حالتی مشابه با داده‌های راداری تصویر شدند. برای این تصویرسازی از رابطه ارائه شده در [۲۶] استفاده گردید. جابجایی‌های شبیه‌سازی شده در شبکه ای یکنواخت با فواصل ۰/۵ کیلومتری نمونه‌برداری شد تا با رزولوشن مکانی جابجایی‌های حاصل از مشاهدات تداخل سنجی راداری که حدود ۰/۱ کیلومتر است قابل مقایسه باشد.

برای تفسیر جابجایی‌های حاصل از روش حل اساسی، از جابجایی‌های حاصل از مدل‌های مخزن ماگمای کروی [۱] و بیضوی [۲۵] استفاده شد. پس از تصویرسازی این جابجایی‌ها در راستای خط دید ماهواره، باقیمانده بین جابجایی‌های حاصل از روش حل اساسی و جابجایی‌های مدل تحلیلی محاسبه شد که در شکل‌های (۵ و ۶) نمایش داده شده است. مقادیر باقیمانده‌ها حاکی از رضایتبخش بودن نتایج است و در بازه ۳± میلی‌متر قرار دارد.

[1] Line Of Sight

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]

لازم به ذکر است که پیش از انتخاب پارامترهای ورودی روش حل اساسی، تاثیر این پارامترها بررسی شد. پارامترها شامل فاصله نقاط منابع نیرو از دامنه و تعداد نقاط مرزی می‌باشد که اثر تغییرات آنها مورد مطالعه قرار گرفت. برای کنترل اثر تغییرات پارامتر اول (فاصله نقاط منابع نیرو از دامنه)، مساله در حالت‌های مختلف این پارامتر در حالی که مابقی پارامترها ثابت بودند حل شد. نتایج در شکل (۷) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است میزان خطا با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. از آنجا که از فاصله ۵ کیلومتر به بعد تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقدار خطا ایجاد نشد، این فاصله برای نقاط انتخاب گردید. دومین پارامتر تعداد نقاط مرزی بود که اثر تغییرات آن بررسی شد و مجددا بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته شد. نتایج این آزمایش نیز در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۴: هندسه مرز داخلی (حفره بیضوی) و بیرونی مساله به همراه سیستم مختصات مورد استفاده. نقاط مرزی و منبع به ترتیب با دایره‌های آبی و مربعات قرمز رنگ در شکل نمایش داده شده‌اند

جدول ۱: پارامترهای مخزن ماگما.X, Y مختصات مسطحاتی،VC تغییر حجم مخزن کروی، PC تغییر فشار مخزن بیضوی،MaA نیم قطر بزرگ مخرن بیضوی، MiA نیم قطر کوچک مخزن بیضوی، PA زاویه شیب مخزن بیضوی و SA آزیموت مخزن بیضوی

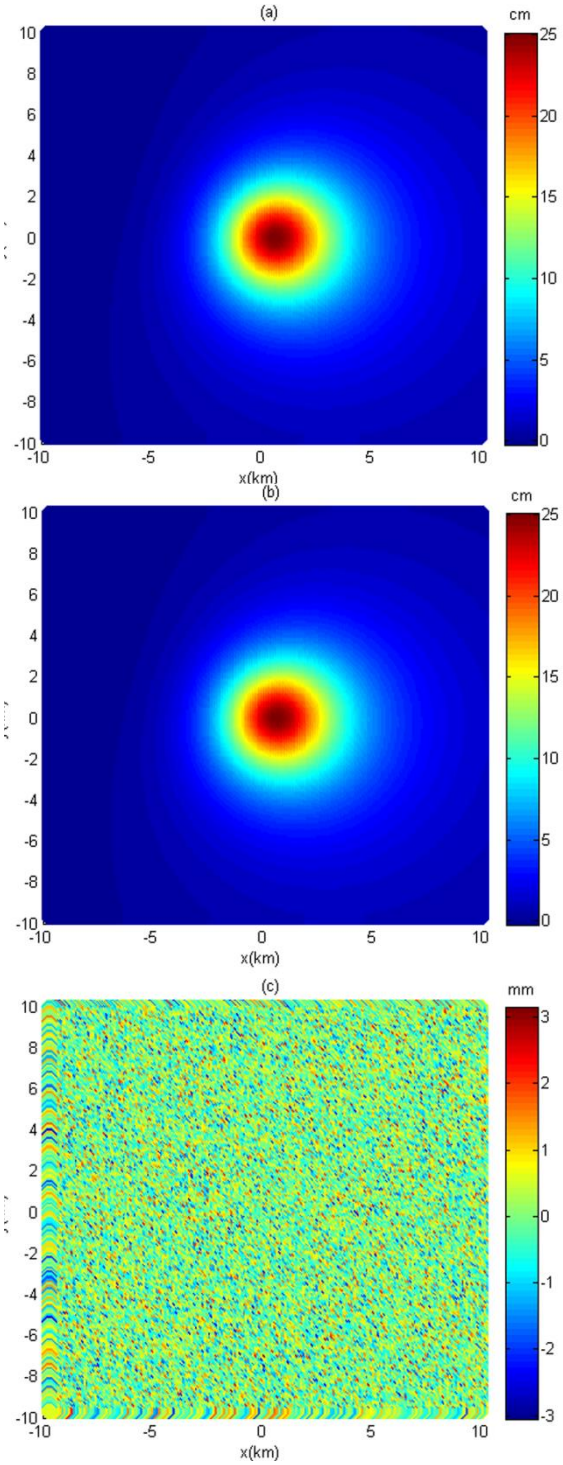
نوع	X (km)	Y (km)	Depth (km)	VC (km^3)	PC (GPa)	MaA (km)	MiA (km)	PA (°)	SA (°)
کروی	۰	۰	۳	۰٫۰۱	–				
بیضوی	۰	۰	۳	–	۰٫۰۱	۲	۱	۰	۹۰

بدیهی است که افزایش نقاط مرزی با کاهش خطا همراه خواهد بود. مجددا به‌دلیل اینکه از تعداد ۲۵ عدد به بعد تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقدار خطا ایجاد نشد، این تعداد برای نقاط انتخاب گردید.

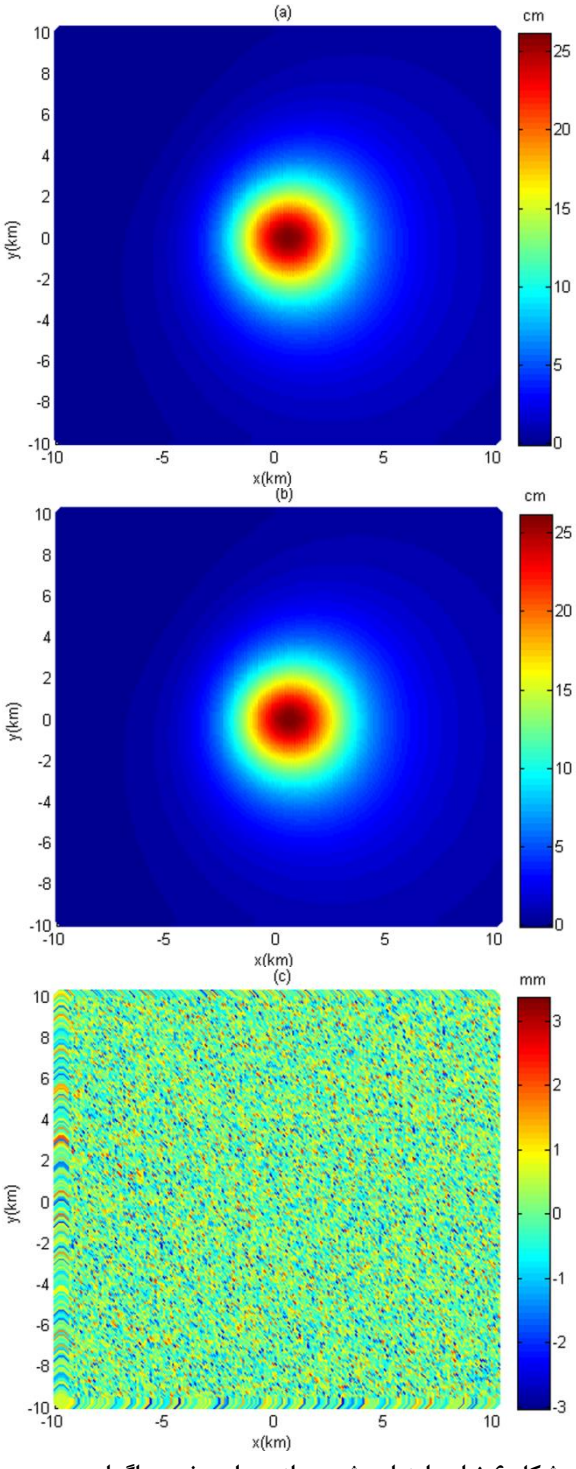
به‌منظور بررسی اثر توپوگرافی بر روی تغییر شکل یک ارزیابی عددی با استفاده از روش حل اساسی سه بعدی انجام شد. ویلیامز و واج[1] در سال ۱۹۹۸ نشان دادند که توپوگرافی تاثیر قابل‌توجهی بر روی میدان جابجایی دارد[۲۷] بنابراین با در نظر گرفتن هندسه‌ای که به‌طور شماتیک در شکل (۸) نمایش داده شده است مطالعه انجام گرفت. اثر توپوگرافی برای آتشفشان‌های با ارتفاعات H برابر با ۰ و۸۸۱ و ۱۸۱۹ و۲۸۸۶ متر و شیب‌های متوسط دامنه α برابر با ۰ و۱۰و۲۰ و۳۰ درجه بررسی شد. مخروطی با شعاع ۵ کیلومتر به‌عنوان عمارت آتشفشانی در نظر گرفته شد. نسبت پواسن و مدول برشی و پارامترهای مخزن ماگما مشابه ارزیابی قبلی است.

[1] Williams & Wadge

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]



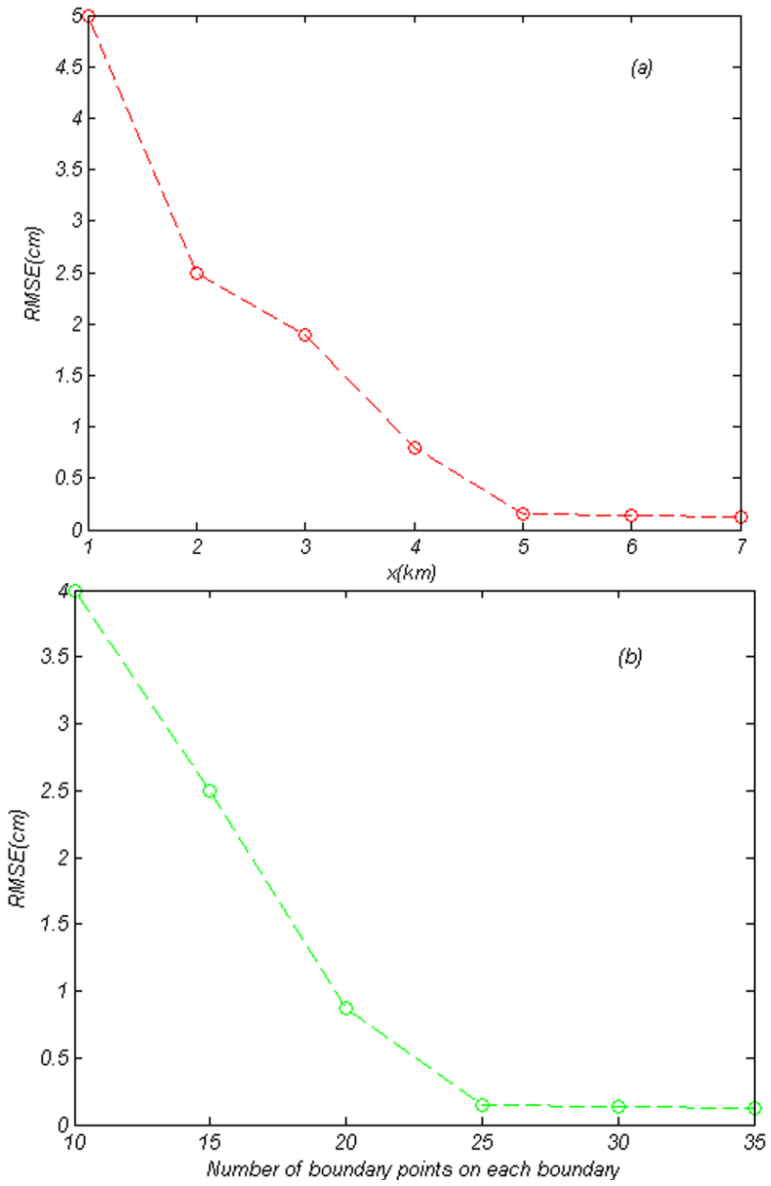
شکل ۵: نتایج ارزیابی شبیه‌سازی برای مخزن ماگمای کروی (الف): میدان جابجایی مدلسازی شده به روش تحلیلی (ب): میدان جابجایی حاصل از روش حل اساسی (ج): باقیمانده‌ها. تمام جابجایی‌ها در راستای خط دید ماهواره تصویر شده‌اند



شکل ۶: نتایج ارزیابی شبیه‌سازی برای مخزن ماگمای بیضوی (الف): میدان جابجایی مدلسازی شده به روش تحلیلی (ب): میدان جابجایی حاصل از روش حل اساسی (ج): باقیمانده‌ها. تمام جابجایی‌ها در راستای خط دید ماهواره تصویر شده‌اند

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]

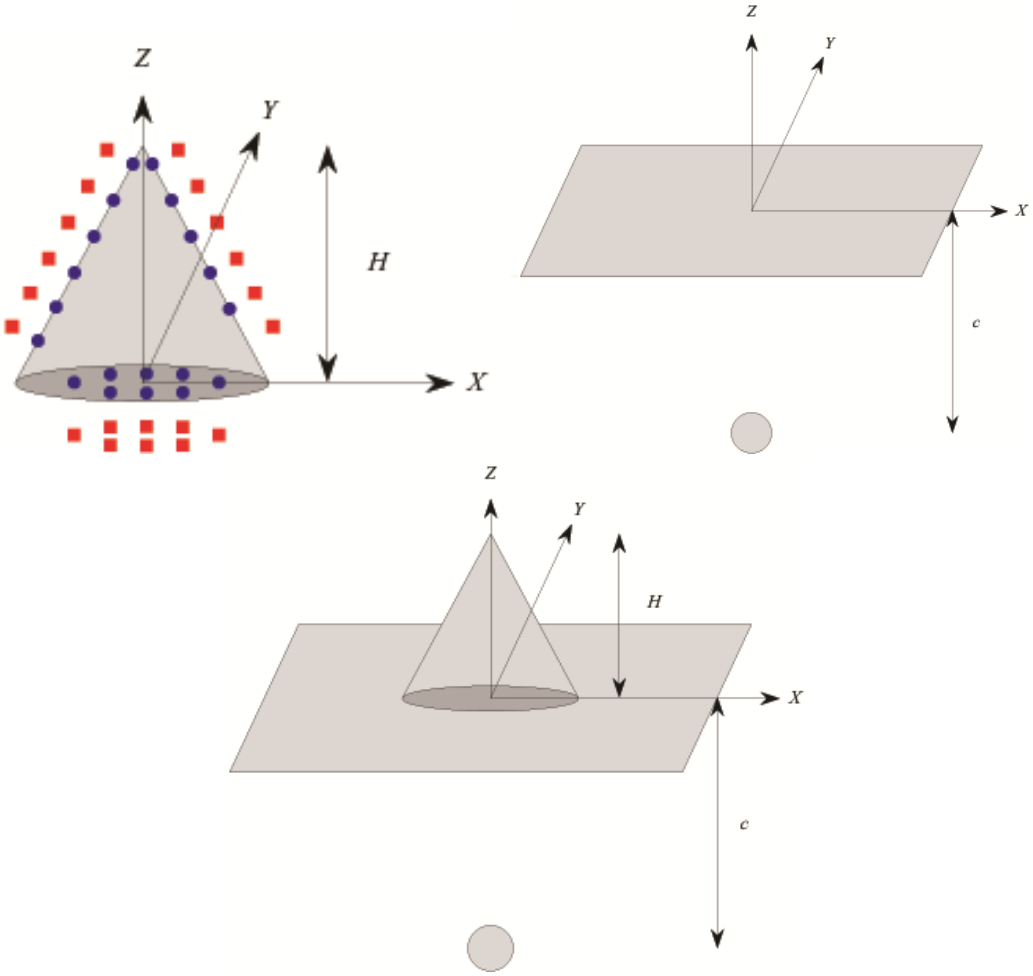


شکل ۷: تاثیر پارامترهای ورودی. الف): تغییرات خطای مربعی متوسط (RMSE) و فاصله نقاط منابع نیرو از دامنه. محور افقی نشان‌دهنده فاصله نقاط منابع نیرو از دامنه می‌باشد. ب): تغییرات خطای مربعی متوسط و تعداد نقاط مرزی

یکصد نقطه مرزی به طور یکنواخت بر روی مخروط توزیع شد. مقادیر مرزی جابجایی با استفاده از روش [۲۷] محاسبه شد که در این روش عمق‌های متفاوت مخزن ماگما برای هر نقطه مرزی در نظر گرفته می‌شود. مجددا خطای تصادفی نیز مشابه با ارزیابی‌های قبلی به مقادیر مرزی اعمال شد. برای حل اساسی جابجایی در فضای توپوگرافی از رابطه (۸) استفاده گردید. شکل (۹) نشان‌دهنده تغییرات جابجایی ایجاد شده به وسیله مخزن ماگمای کروی واقع شده در محیط همگن الاستیک می‌باشد. نتایج تغییرات شیب سطح α و تغییرات ارتفاع با جابجایی‌ها درسطح نیم‌فضا (ارتفاع توپوگرافی برابر با صفر متر و شیب متوسط صفر درجه) مقایسه شده است. همان‌طور که از این شکل می‌توان

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]

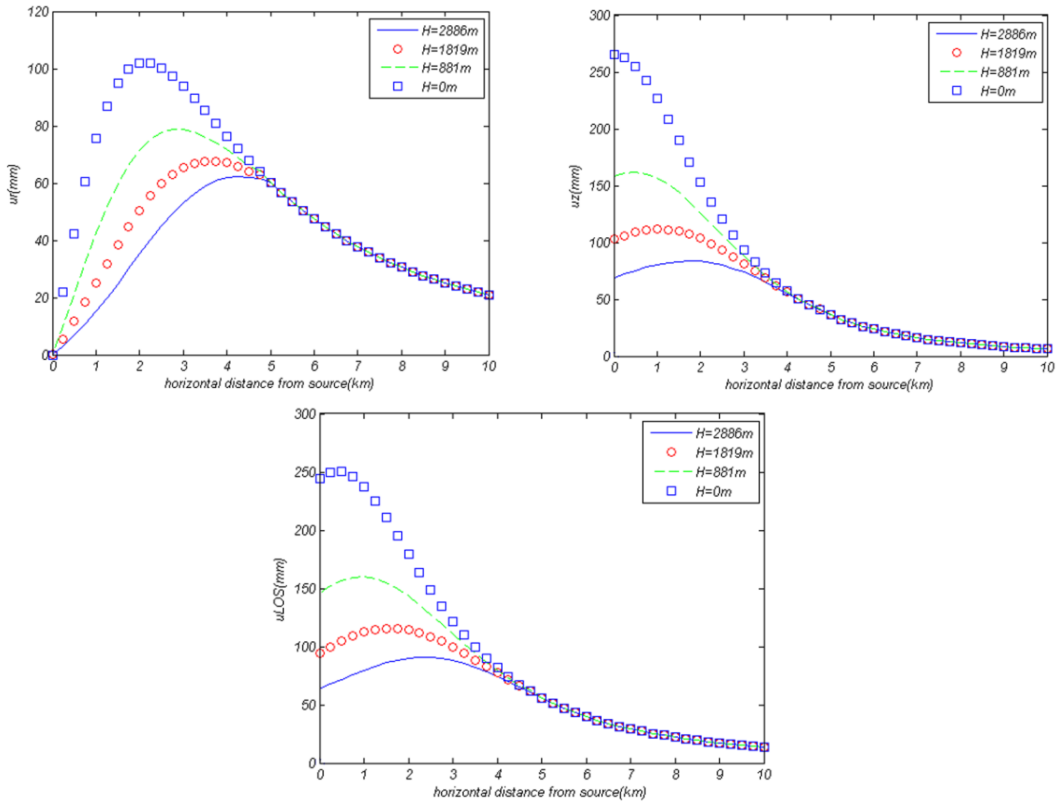
دریافت توپوگرافی تاثیر قابل توجهی بر جابجایی‌های سطحی آتشفشان دارد. با افزایش ارتفاع به‌خصوص در نزدیکی قله، جابجایی‌های ارتفاعی کاهش می‌یابند. برای شیب متوسط سی درجه ، قله محل وقوع مینیمم محلی است در حالی که در فاصله شعاعی ۲ کیلومتری مخزن ماگما ماکزیمم جابجایی ارتفاعی اتفاق می‌افتد. برای جابجایی‌های شعاعی این کاهش مقدار در نزدیکی قله کمتر است. جابجایی‌ها در راستای خط دید ماهواره رفتاری مشابه با جابجایی‌های ارتفاعی دارند.



شکل ۸: هندسه شماتیک مساله . آتشفشانی با ارتفاع H و عمق مخزن ماگمای c . مبدا سیستم مختصات مورد استفاده منطبق بر تصویر مرکز مخزن ماگما بر سطح نیم‌فضاست و جهت محور Z به سمت خارج دامنه در نظر گرفته شده است (بالاچپ): نقاط آبی رنگ نشان‌دهنده نقاط مرزی بر روی فضای پر توپوگرافی و مربعات نشان دهنده نقاط منابع نیرو می‌باشند (بالاراست): نیم فضا همراه با مخزن ماگمای کروی (پایین) برهم نهی دو محیط.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]



شکل ۹: اثر توپوگرافی بر جابجایی (بالاچپ): مولفه جابجایی ارتفاعی (بالاراست) مولفه جابجایی شعاعی (پایین) جابجایی ایجاد شده در راستای خط دید ماهواره. $\mathbf{H}$ ارتفاعات آتشفشانها می‌باشد. مخزن ماگما در عمق ۳ کیلومتری سطح نیم فضا در نظر گرفته شده است.

کایول و کرنت[1] در ۱۹۹۸ اشاره کردند که تفسیر جابجایی‌های سطح زمین بدون در نظر گرفتن اثر توپوگرافی می‌تواند به نتایج اشتباه منجر شود[۲۸] منحنی‌های مربوط به جابجایی‌های قائم کمی در نزدیکی قله مسطح‌تر هستند. محل ماکزیمم جابجایی برای جابجایی‌های شعاعی با ارتفاع قله متغیر است. جابجایی‌های قائم ایجاد شده به وسیله مخزن ماگما در فواصل مسطحاتی بزرگ $(r > c)$ هنگامی که اثر توپوگرافی در نظر گرفته نشود سریعتر محو می‌شود.

این نتایج با نتایج حاصل از مطالعه [۲۸] مطابقت دارد با این تفاوت که در مطالعه حاضر به جای روش المان مرزی از روش حل اساسی که به محاسن آن در قسمت‌های قبل اشاره شده بود، استفاده شده است.

[1] Cayol & Cornet

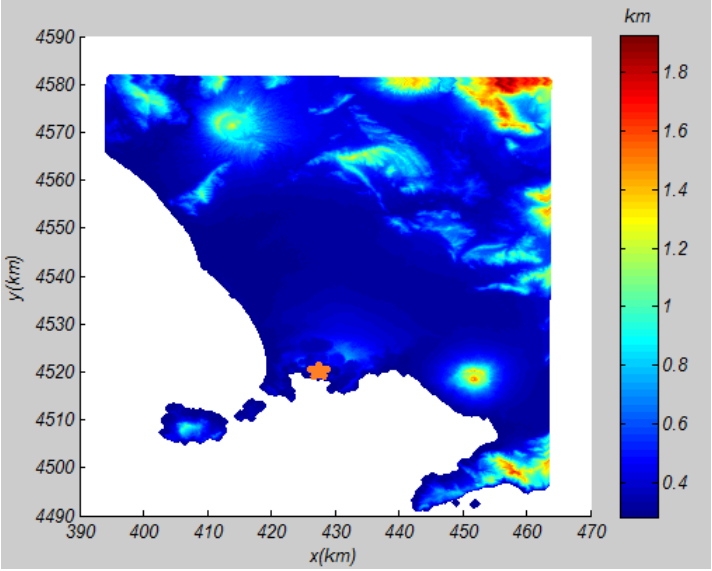
۵- کاربرد روش حل اساسی بر روی آتشفشان کامپی‌فلگری

علاوه بر محاسن ذکر شده در قسمت‌های پیشین، روش حل اساسی سه بعدی برخلاف روش‌هایی مانند المان محدود نیاز به مش‌بندی مساله که زمان‌بر است ندارد. بنابراین در این مطالعه از روش حل اساسی سه بعدی برای تعیین میدان جابجایی آتشفشان کامپی‌فلگری استفاده شد.

مدل ارتفاعی دیجیتال (*DEM*) ایجاد شده به وسیله SRTM به‌عنوان توپوگرافی منطقه در نظر گرفته شد (شکل(۱۰)). روش استفاده شده مشابه با حالت ارزیابی می‌باشد. یک سیستم مختصات کارتزین با مبدا واقع شده در سطح متوسط دریا، زیر قله آتشفشان کامپی فلگری به کار گرفته شد. محورهای x و y

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]

به‌ترتیب در راستاهای شرق به غرب و شمال به جنوب قرار دارند در حالی که جهت مثبت محور **z** به سمت بالای محیط است. برای انتخاب پارامترهای مخزن ماگما از الگوریتم ژنتیک استفاده شد.



شکل ۱۰: مدل ارتفاعی دیجیتال منطقه آتشفشان کامپی‌فلگری. ستاره نارنجی رنگ نشان دهنده محل قله می‌باشد.

حدود بالا و پایین فضای جستجو برای موقعیت مرکز مخزن برابر با پوشش مشاهدات تداخل سنجی راداری و برای عمق مخزن برابر با ۲ تا ۵ کیلومتر در بازه پیشنهادی [۷ و ۲۱] در نظر گرفته شد. معادله (۱۲) براساس مطالعه [۹] حد پایین فضای جستجو را برای تغییر حجم مخزن ماگمای کروی Δv با استفاده از مشاهدات جابجایی در راستای خط دید ماهواره u_{LOS} مشخص می‌کند.

رابطه (۱۲) $$\Delta v = 0.72 \iint_{R^2} u_{LOS} dxdy$$

که در این مطالعه برابر با ۲×۱۰^{-۳} کیلومتر مکعب است. بازه تغییر حجم مخزن بین ۱×۱۰^{-۵} و ۲×۱۰^{-۳} کیلومتر مکعب در نظر گرفته شد که در بازه پیشنهادی[۹ و ۲۱] برای این منطقه بود. جدول (۲) پارامترهای مورد استفاده در این مدلسازی را نشان می‌دهد. چهارصد نقطه مرزی به صورت یک شبکه نقاط منظم انتخاب شد. نسبت پواسن مانند سایر آتشفشانها ۰/۲۵ و مدول برشی مانند مطالعه [۲۱] در این منطقه ۷ گیگا پاسکال در نظر گرفته شد. طبق نتایج [۲۸] عمق مخزن ماگما باید نسبت به قله سنجیده شود بنابراین در این مطالعه عمق مخزن برابر با ۳/۲ کیلومتر نسبت به قله در نظر گرفته شد.

جدول ۲: پارامترهای مورد استفاده برای مخزن ماگمای کروی در آتشفشان کامپی‌فلگری

نوع پارامتر	X (km)	Y (km)	Depth (km)	VC (km^3)	RMSE(mm)
مقادیر انتخاب شده	۴۲۷/۲۰۹	۴۵۱۹/۹۰۹	۳/۲	-۰/۰۰۰۹۷	۱/۴۷

به‌منظور کنترل نتایج، پس از به‌کار گیری روش حل اساسی، میدان جابجایی با رزولوشن مکانی ۰/۱ کیلومتر مشابه با مشاهدات راداری نمونه برداری و در راستای خط دید ماهواره تصویر گردید. میدان جابجایی مشاهداتی و میدان جابجایی حاصل از روش حل اساسی در اشکال ۱۱(الف) و (ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در این اشکال دیده می‌شود نتایج حاصل از روش حل اساسی با

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]

نتـایج حاصـل از مشـاهدات راداری مطابقـت دارد و نشان‌دهنده نرخ فرونشستی برابر با ۲ سانتیمتر در سال می‌باشد. مقدار خطای مربعی متوسط کوچک و برابر بـا ۱٫۴۷ میلی‌متر است. در این حالت فرونشست با فاصله گرفتن از قله کاهش می‌یابد. معمـولا میـدان جابجـایی آتشفشان با استفاده از مدل تحلیلی مگی[۱] و بدون در نظر گرفتن اثر توپوگرافی محاسبه مـی‌شـود. همچنـین یک روش معمول برای در نظر گـرفتن اثـر توپـوگرافی، انتخاب یک سطح مبنـای ارتفـاعی ثابـت بـالای سـطح متوسط دریاست. برای مقایسه مقادیر به‌دسـت آمـده از ایـن روش‌هـا بـا روش ارائـه شـده در مطالعـه حاضـر، سه حالت مختلف بدون در نظر گرفتن اثـر توپـوگرافی، ارتفاع مبنای ۲۲۰ متر (محلی بین سطح متوسط دریا و قله) و ارتفاع مبنای ۴۵۸ متر (برابـر بـا ارتفـاع قلـه) در نظر گرفته شد. جابجایی‌های مربـوط بـه هـر حالـت در اشـکال (۱۱-ج و ۱۱-ه) نشـان داده شـده اسـت. همه جابجایی‌ها در راستای خـط دیـد مـاهواره تصـویر شده‌اند. شکل (۱۱-ج) حالتی را نشان مـی‌دهـد کـه در آن اثر توپوگرافی در نظر گرفته نشده است. همـان‌طـور که مشاهده می شود جابجایی‌ها در ایـن حالـت حـدود چهل درصد بزرگتر ازنتایج حاصل از روش حل اساسـی هستند. رخ دادن این پدیـده بـه ایـن دلیـل اسـت کـه جابجایی تابعی از عمق مخزن ماگماست و در این حالت عمق مخزن برابر با ۲٫۷ کیلومتر از سطح متوسـط دریـا در نظر گرفتـه شـده اسـت. در ایـن وضـعیت جابجـایی بیش از مقدار حقیقی به‌دسـت آمـده و خطـای مربعـی متوسط برابر بـا ۶٫۱۷ میلـی‌متـر اسـت. شـکل (۱۱-د) نتایج را در حـالتی نشـان مـی‌دهـد کـه سـطح مبنـای ارتفاعی ۲۲۰ متر بالاتر از سطح متوسـط دریـا در نظـر گرفته شود. در این حالت یـک ارتفـاع ثابـت بـه‌عنـوان توپوگرافی متوسط به سطح اضافه شـده اسـت. تقریـب بیش از اندازه جابجایی‌های حقیقی در این حالت کمتـر از حالتی اسـت کـه توپـوگرافی در نظـر گرفتـه نشـود. این تقریب حدود بیست درصد بیش از نتایج حاصـل از روش حل اساسی است. خطای مربعی متوسـط در ایـن حالت برابر با ۳٫۴۲ میلی متر می‌باشد. در شکل (۱۱-ه) جابجایی‌ها در شرایطی که سطح مبنای ارتفاعی برابر بـا ارتفاع قله در نظر گرفته شود نشان داده شده‌اند. نتـایج در ایـن حالـت کمتـر از مقـدار واقعـی و کمتـر از نتـایج حاصـل از روش حـل اساسـی مـی‌باشـد. خطـای مربعـی متوسـط در ایـن حالـت برابـر بـا ۲٫۹۷ میلی‌متر است. بر اسـاس حالـت‌هـای بررسـی شـده در شکل (۱۱) می‌توان نتیجه گرفت که توپـوگرافی واقعـی منطقه در تعیین میدان جابجایی آتشفشان مـی‌بایسـت در نظـر گرفتـه شـود. همچنـین بـه‌کـارگیری روش حل اساسی نسبتا ساده بوده و هزینه محاسـباتی کمـی دارد بنابراین می‌توان از این روش به‌سادگی در محاسبه میدان تغییر شکل آتشفشان استفاده کرد.

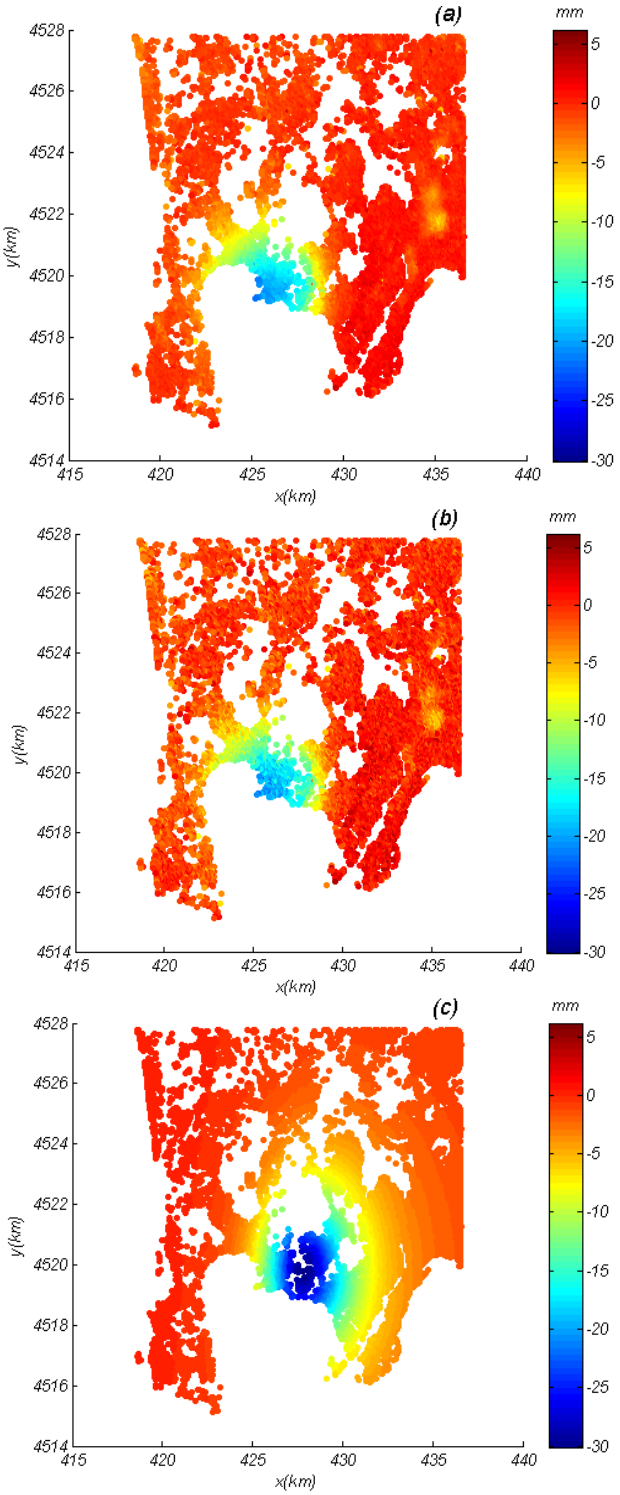
۶-نتیجه گیری

در این مطالعه با در نظر گرفتن اثـر توپـوگرافی واقعـی منطقـه، از روش حـل اساسـی بـرای محاسـبه میـدان جابجایی آتشفشان کامپی‌فلگری استفاده شد. بـا توجـه بـه‌مطالـب گفتـه شـده مـی‌تـوان دریافـت کـه اجـرای روش نسبتا ساده بوده، نیاز بـه آمـاده‌سـازی داده زیـاد ندارد و برخلاف روش المـان مـرزی، از آنجـا کـه نقـاط منابع نیرو خارج از دامنه در نظـر گرفتـه مـی‌شـوند بـا انتگرال‌هـای پیچیـده رو بـه رو نخواهـد شـد. پـیش از بـه‌کـارگیری روش حـل اساسـی بـر روی آتشفشـان کـامپی فلگـری، ایـن روش بـر روی آتشفشـان‌هـای شبیه‌سازی شده بـا مخـازن ماگمـای کـروی و بیضـوی اجرا شد و نتایج آن با یافته هـای حاصـل از مـدل‌هـای تحلیلی مقایسه گردید.

نتایج، باقیمانده ای در بازه ۳± میلی‌متر را نشـان دادنـد که حاکی از همـاهنگی دسـت آورد حاصـل از دو روش بـود. سـپس اثـر توپـوگرافی بـر روی میـدان جابجـایی بررسی شد که نشان داد در نظر نگرفتن اثر توپـوگرافی به‌خصوص در آتشفشـان‌هـای مرتفـع مـی‌توانـد باعـث ایجاد خطای زیاد در محاسبه میدان جابجایی شود.

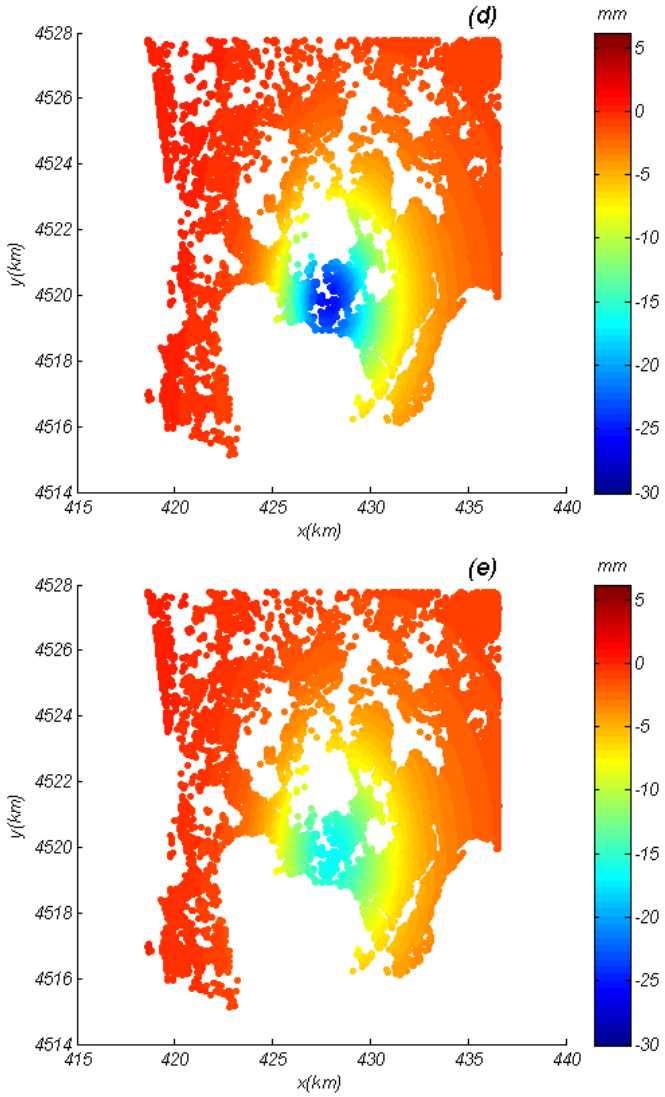
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]



شکل ۱۱: (الف) میدان جابجایی حاصل از مشاهدات راداری در راستای خط دید ماهواره[۲۱] (ب) میدان جابجایی حاصل از روش حل اساسی با در نظر گرفتن مخزن ماگمای واقع شده در عمق ۳٫۲ کیلومتری قله یا ۲٫۷ کیلومتری از سطح متوسط دریا (ج) میدان جابجایی مخزن ماگمای کروی هنگامی که سطح آزاد منطبق با سطح متوسط دریا در نظر گرفته شده و اثرتوپو گرافی نادیده گرفته شود

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]



شکل ۱۱ (ادامه): (د) میدان جابجایی تحلیلی حاصل از مخزن ماگمای کروی هنگامی که ارتفاع مبنا برابر با ۲۲۰ متر از سطح متوسط دریا (محلی بین سطح متوسط دریا و قله) در نظر گرفته شود. (ه) میدان جابجایی تحلیلی حاصل از مخزن ماگمای کروی هنگامی که ارتفاع مبنا برابر با ۴۵۸ متر از سطح متوسط دریا (برابر با ارتفاع قله) در نظر گرفته شود.

از آنجا که آتشفشان کامپی‌فلگری در منطقه‌ای پرجمعیت قرار گرفته و دارای فعالیت‌های مداوم است و در صورت فوران خسارات جبران‌ناپذیری بر مردم منطقه تحمیل خواهد کرد برای اجرای روش حل اساسی انتخاب گردید. روش حل اساسی برای این آتشفشان با در نظر گرفتن مخزن ماگمای کروی در عمق ۳٫۲ کیلومتری زیر قله به‌کار گرفته شد. نتایج حاصل با میدان جابجایی به‌دست آمده از مشاهدات تداخل سنجی راداری مقایسه گردید. یافته‌ها با خطای مربعی متوسط کمتر از ۲ میلی‌متر نشان می‌دهد که می‌توان از روش حل اساسی به‌عنوان یک روش کارآمد در مطالعه تغییر شکل آتشفشان استفاده کرد. همچنین تغییر شکل در سه حالت در نظر نگرفتن اثر توپوگرافی، در نظر گرفتن توپوگرافی به‌صورت ارتفاع مبنا در سطحی بین سطح متوسط دریا و قله و در نظر گرفتن توپوگرافی در ارتفاعی برابر با قله محاسبه شد. این محاسبات منجر به نتایجی بیشتر یا کمتر از جابجایی حقیقی آتشفشان شد و خطای

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]

مربعی متوسطی بیش از روش حل اساسی و توپوگرافی واقعی منطقه را نشان داد. از این تحقیق می‌توان دریافت که نتایج حاصل از روش حل اساسی همراه با در نظر گرفتن توپوگرافی واقعی منطقه با نتایج حاصل از مدل‌های تحلیلی معمول که یا اثر توپوگرافی در نظر گرفته نمی‌شود و یا به‌عنوان یک سطح متوسط فرض می‌شود متفاوت بوده و به میدان جابجایی واقعی منطقه نزدیک‌تر است. اجرای روش حل اساسی در مطالعه تغییر شکل آتشفشان کامپی‌فلگری از تحقیقات اولیه در زمینه مسائل ژئودینامیک بوده و می‌توان در سایر مطالعات این شاخه از این روش بهره جست. همچنین استفاده از روش حل اساسی برای مسائلی که دارای معادلاتی غیر از کوشی-ناویر هستند می‌تواند از موارد قابل‌توجه در مطالعات آتی باشد.

مراجع

[1] K. Mogi, "Relation between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformations of the Ground Surfaces around them", Bull. earthq. Res. Inst, Vol. 36, pp. 99-134,1958

[2] P.M. Davis, "Surface deformation due to inflation of an arbitrarily oriented triaxial ellipsoidal cavity in an elastic half-space, with reference to Kilauea Volcano, Hawaii", J. geophys. Res, Vol. 91, pp.7429–7438, 1986

[3] J. Dvorak, and D. Dzurisin, "Volcano geodesy: the search for magma reservoirs and the formation of eruptive vents", Rev. Geophys, Vol. 35, pp. 343–384, 1997

[4] F. Omori, "The Sakur-jima eruptions and earthquakes", Bulletin of the Imperial Earthquake Investigation Committee, Vol. 8, pp.1-34, 1914

[5] D. Carbone, G. Currenti, and S. Del Negro, "Multi objective genetic algorithm inversion of ground deformation and gravity changes spanning the 1981 eruption of Etna volcano", J.Geophys. Res, Vol. 113, 2008

[6] C. Rizos, S. Han, C. Roberts, X. Han, H. Z. Abidin, O. K. Suganda, and A. D. Wirakusumah,"Continuously operating GPS-based volcano deformation monitoring in Indonesia: the technical and logistical challenges", Geodesy Beyond 2000. International Association of Geodesy Symposia, Vol. 121. Springer, Berlin, Heidelberg, 2000

[7] F. Beauducel, G. De natale, F. Obrizzo, and F. Pingue, "3-D Modelling of CampiFlegrei Ground Deformations: Role of Caldera Boundary Discontinuities", Pure appl. Geophys, Vol. 161, pp.1329-1344, 2004

[8] K.M. Larson, M. Poland, and A. MikliuS , "Volcano monitoring using GPS: developing data analysis strategies based on the June 2007 Kīlauea volcano intrusion and eruption", Journal of Geophysical Research,Vol. 115, pp. B07406, 2010

[9] M. Shirzaei, T.R. Walter, H.R. Nankali, and E. P, Holohan, "Gravity-driven deformation of Damavand volcano, Iran, detected through InSAR time series", Geology, Vol. 39, pp.251-254, 2010

[10] A. Karageorghis, D. Lesnic, and L. Marin, "A survey of applications of the MFS to inverse problems", Inverse Problems in Science and Engineering, Vol. 19, pp. 309-336, 2011

[11] L. Marin, and D. Lesnic, "The method of fundamental solutions for the Cauchy problem in two-dimensional linear elasticity" International Journal of Solids and Structures, Vol. 41, pp.3425–3438, 2004

[12] B. T. Johansson, and D. Lesnic, "A method of fundamental solutions for transient heat conduction", Eng.Anal. Boundary Elements, Vol. 32, pp. 697–703, 2008

[13] M. Nili Ahmadabadi, M. Arab, and F.M. Maalek Ghaini, "The method of fundamental solutions for transient heat conduction in functionally graded materials: some special cases", Journal of Linear and Topological Algebra,Vol. 02, No. 02, pp. 117- 127, 2013

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]

[14] G. Ala, G. Fasshauer, E. Francomano, S. Ganci, and S. McCourt, "The Method of Fundamental Solutions in Solving Coupled Boundary Value Problems for M/EEG", SIAM Journal on Scientific Computing,Vol. 37, Issue. 4, 2015

[15] T. H. Reeve, "The method of fundamental solutions for some direct and inverse problems" Birmingham,UK, 2013.

[16] A. Poullikkas, A. Karageorghis, and G. Georgiou,"the method of fundamental solutions for three-dimensional elastostatics problems", Computers and Structures Journal, Vol. 80, pp. 365-370, doi: 10.1016/S0045-7949(01)00174-2, 2002

[17] R. Mathon, R.L. Johnston," The approximate solution of elliptic boundary-value problems by fundamental solutions, Siam J. Number. Anal. Vol. 14, No. 4, 1977

[18] Luzo´n, F. T., F. Sa´nchez-Sesma, J. Rodrı´guez-Zu´n˜iga, A. Posadas, J. Garcı´a, J. Martı´n, M. Romacho, and M. Navarro, " Diffraction of P, S and Rayleigh waves by three-dimensional topographies", Geophys. J. Int., Vol.129, pp.571– 578,1997

[19] A. Poullikkas, A. Karageorghis, and G. Georgiou,"the method of fundamental solutions in three-dimensional elastostatics", Parallel Processing and Applied Mathematics, pp.747-755, doi.org/10.1007/3-540-48086-2_83

[20] R.D. Mindlin, "Force at a point in the interior of a semi-infinite solid", J Applied physics. Vol.7. Issue 5,1936

[21] A. Manconi, T. R. Walter, M. Manzo, G.Zeni, P. Tizzani, E. Sansosti, and R. Lanari, " On the effects of 3 - D mechanical heterogeneities at CampiFlegrei caldera, southern Italy", J. Geophys. Res, Vol. 115, B08405, doi: 10.1029/2009JB007099, 2010

[22] F. Casu, M. Manzo, and R. Lanari, "A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data", Remote Sens. Environ, Vol.102 (3–4), pp. 195–210, doi: 10.1016/j.rse.2006.01.023, 2006

[23] Y. Okada, "Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space", Bull. seismological society of America, Vol. 82, pp. 1018-1040, 1992.

[24] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.40 (11), pp.2375–2383,2002

[25] X.M.Yang, P.M. Davis, and J.H. Dieterich,"Deformation from inflation of a dipping finite prolate spheroid in an elastic half-space as a model for volcanic stressing", J geophys Res, Vol.93, pp. 4249–4257,1988, doi: 10.1029/JB093iB05p04249

[26] R.F. Hanssen, "Radar interferometry: Data interpretation and error analysis", Vol. 2. Netherlands: Springer Science & Business Media, 2001 Available from: http://www.springer.com/gp/book/9780792369455.

[27] C.Williams, and G. Wadge, "The effects of topography on magma chamber deformation models: Application to Mt. Etna and radar interferometry, Geophys. Res. Lett, Vol.25, pp.1549– 1552,1998

[28] V. Cayol, and F.H. Cornet, "Effects of topography on the interpretation of the deformation field of prominent volcanoes: Application to Etna. Geophys. Res. Lett, Vol. 25(11) pp.1979–1982,1998

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.7 No.1, Spring 2019

Research Paper

Investigating the topography effect in modeling of deformation field of CampiFlegrei volcano using the method of fundamental solution

Maryam Yazdanparast [1], Behzad Voosoghi * [2], Farshid Mossaiby [3]

1- PhD student of Department of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Eng., K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
2- Associate professor in Department of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Eng., K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
3- Associate professor in Department of Civil Eng., University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

Considering the importance of predicting volcano eruption and the large number of volcanic peaks across the world, having enough researches in this field is vital. Based on geodetic researches, surface deformation of the earth in the form of uplift or subsidence in the volcanic region, is an indicator of the magma's movement respectively towards the crater or the exit from the tank around. In this study, using the new method of the fundamental solution, the determination of the deformation field of the Campi Flegrei volcano, taking into account the topographic effect has been considered. Method of fundamental solution is a numerical Meshless method which is used to solve boundary value problems. No need for high computational cost in this method causes it becomes an effective tool in solving many problems in a variety of fields. To verify the efficiency of the method, the resulted displacement field was compared with the Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) observations at the Italian Campi Flegrei volcano. The root mean square error was less than 2 mm which indicates a good satisfactory with the displacement field resulting from the observations.

Key words: *Deformation field,Volcano, Method of fundamental solution,Topography, Meshless method*

Correspondence Address*: Department of Geodesy,Faculty of Geodesy and Geomatics Eng., K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran*
Tel*: 00982188770218*
Email: *vosoghi@kntu.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.55]