

این مقاله در دومین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی به عنوان 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 آتشفسان کامپی فلگری با استفاده از روش حل اساسی

مریم یزدان پرست<sup>۱</sup>، بهزاد وثوقی<sup>۲\*</sup>، فرشید مسیبی<sup>۳</sup>

- ۱ دانشجوی دکترای نقشه برداری، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
-۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
-۳ دانشیار دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه اصفهان

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

### چکیده

با توجه به اهمیت پیش‌بینی فوران آتشفسان و تعدد قلل آتشفسانی در سرتاسر جهان، انجام تحقیقات در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. بر اساس تحقیقات ژئودتیکی، تغییر شکل سطح زمین به صورت بالاًمدگی یا فرونخشست در منطقه آتشفسانی، به ترتیب نشانه‌ای از حرکت ماقما به سمت دهانه یا خروج آن از مخزن به اطراف است. در این تحقیق با استفاده از روش جدید حل اساسی در مطالعه تغییر شکل آتشفسان به تعیین میدان تغییر شکل آتشفسان 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 می‌شود. 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 جایجایی به دست آمده با میدان جایجایی حاصل از مشاهدات تداخل سنجی راداری (Interferometric synthetic aperture radar) در آتشفسان کامپی فلگری ایتالیا مقایسه شد و خطای مربعی متوسط کمتر از ۲ میلی متر را در برداشت که نشان دهنده تطبیق خوب نتایج در این منطقه با میدان جایجایی حاصل از مشاهدات است.

**کلیدواژه‌ها:** میدان تغییر شکل، آتشفسان، 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: ۰۲۱-۸۸۷۷-۰۲۱۸

## ۱- مقدمه

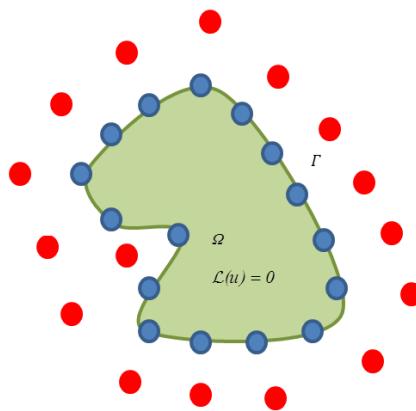
مرزی (*BEM*)<sup>۹</sup> و داده‌های تداخل سنجی راداری (*InSAR*)<sup>۱۰</sup> ارائه کردند. لارسن<sup>۱۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰ تغییر شکل آتشفشار کیلووا<sup>۱۲</sup> را با استفاده از مشاهدات *GPS* بررسی و نتایج به دست آمده را با مشاهدات حاصل از تیلت متر مقایسه کردند [۸]. در سال ۲۰۱۰ شیرازی و همکاران مطالعه‌ای بر روی تغییر شکل منطقه آتشفشاری دماوند با استفاده از مشاهدات تداخل سنجی راداری انجام دادند [۹].

در این مطالعه با استفاده از روش جدید حل اساسی در زمینه مسائل رُؤوپی دینامیکی، به تعیین میدان تغییر شکل حاصل از آتشفشار پرداخته خواهد شد. روش حل اساسی یک روش مرزی بدون المان است که در حل مسائل مقدار مرزی که حل اساسی معادلات حاکم بر آنها موجود است کاربرد دارد. پرکاربرد بودن این روش به دلیل سادگی آن است. همچنین می‌تواند برای مسائل با هندسه‌های پیچیده و سه بعدی نیز به کار رود. محاسبی که روش حل اساسی نسبت به سایر روش‌های کلاسیک گستره‌سازی 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*)<sup>۱۳</sup> و تفاضل محدود (*FDM*)<sup>۱۴</sup> دارا می‌باشد. به عنوان یک نتیجه، این روش یک روش ایده‌آل برای حل مسائلی است که مرز از اهمیت خاصی

آنشنفشارها و فوران آنها نشان دهنده پروسه دینامیکی داخل زمین هستند که اغلب، نه همیشه در امتداد مرزهای صفحات تکتونیک زمین قرار دارند. مشاهدات رُؤوپتیکی در بسیاری از مناطق آتشفشاری نشان دهنده بالآمدگی یا فرونژیت سطح زمین است که به انتقال مانگما در عمق نسبت داده می‌شود [۲، ۱].<sup>۳</sup> بنابراین پایش تغییر شکل زمین در مناطق آتشفشاری به آگاهی از وضعیت آتشفشار و پیش‌بینی فوران آن کمک خواهد کرد. در این زمینه تاکنون مطالعات زیادی انجام گرفته است از جمله در سال ۱۹۱۰ برای اولین بار امری<sup>۱</sup> با استفاده از ترازیابی دقیق تغییر شکل قائم را برای آتشفشاری در ژاپن به دست آورد [۴]. پس از آن مگی<sup>۲</sup> در سال ۱۹۵۸ تغییر شکل سطح را با استفاده از پارامترهای مخزن مانند موقعیت و عمق محاسبه کرد [۱]. در فوران ۱۹۸۱ کوه اتنا<sup>۳</sup>، اندازه‌گیری‌هایی با استفاده از ترازیابی دقیق و گروایمتری در زمان‌های قبل و بعد از فوران انجام شد. همچنین از ابزار اندازه‌گیری الکترونیکی (*EDM*)<sup>۴</sup> نیز برای بررسی تغییر شکل در کوه اتنا استفاده گردید [۵]. ریزووس<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۰ یک شبکه از ایستگاه‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی (*GPS*)<sup>۶</sup> را برای پایش تغییر شکل آتشفشار پاپاندایان<sup>۷</sup> در اندونزی طراحی کردند [۶]. بیودوسل<sup>۸</sup> و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۴ مدلی برای تغییر شکل زمین در آتشفشار کامپی فلگری ایتالیا با استفاده از روش المان

<sup>1</sup> Omori<sup>2</sup> Mogi<sup>3</sup> Etna<sup>4</sup> Electronic Distance Measurement<sup>5</sup> Rizos<sup>6</sup> Global Positioning System<sup>7</sup> Papandayan<sup>8</sup> Beauducel<sup>3</sup> Boundary Element Method<sup>10</sup> Interferometric Synthetic Aperture Radar<sup>11</sup> Larson<sup>12</sup> kilauea<sup>13</sup> Finite Element Method<sup>2</sup> Finite Difference Method

نیومن<sup>۳</sup> یا روبین<sup>۴</sup> 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.



شکل ۱: نمایش شماتیک دامنه  $\Omega$ ، مرز  $\Gamma$ ، 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 به صورت رابطه (۲) می‌توان نوشت:

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

در رابطه (۲)،  $\delta$  نشان دهندهتابع دلتای دیراک بوده و  $P$  به عنوان نقطه منبع نیرو و  $Q$  به عنوان نقطه‌ای که تحت تأثیر منبع نیرو قرار دارد که همان نقطه مرزی است در نظر گرفته می‌شود. اگر نقطه منبع  $Q$  خارج از دامنه  $\Omega$  در نظر گرفته شود، حل اساسی یا هر ترکیب خطی از آنها، رابطه (۱) را بدون هیچ گونه تکینگی<sup>۵</sup> برآورده خواهد کرد. بنابراین می‌توان بدون از دست دادن کلیت مساله تقریبی از معادله (۱) را به صورت رابطه (۳) نوشت [۱۶، ۱۵ و ۱۷].

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

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

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 به عنوان محیط همگن ایزوتrop با خاصیت الاستیسیته خطی، به تعیین میدان تغییر شکل آتشفشن 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 آتشفشن کامپیفلگری به عنوان منطقه مطالعاتی و مشاهدات مورد استفاده ارائه می‌شود، بخش چهارم شامل ارزیابی روش به صورت شبیه‌سازی بوده، در بخش بعد نتایج اجرای روش بر روی آتشفشن 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 ( $PDE$ )<sup>۱</sup> 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 به کار گرفته می‌شود، دامنه بسته  $\Omega$  را همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده، در نظر گرفته که دارای مرز  $\Gamma$  بوده و معادله دیفرانسیلی به صورت رابطه (۱) بر روی این دامنه حاکم است.

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

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،<sup>۲</sup>

<sup>۳</sup> Neumann

<sup>۴</sup> Robin

<sup>۵</sup> Singularity

<sup>۱</sup> Partial Differential Equation

<sup>۲</sup> Dirichlet

که  $\lambda$  و  $\mu$  ثابت‌های لامه هستند. شرایط مرزی رابطه (۵) به شکل معادله (۶) در نظر گرفته می‌شود.

$$B_i \langle u_1, u_2, u_3, t_1, t_2, t_3 \rangle = f_i, i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

عملگرهای  $B_i$  نشان دهنده شرایط مرزی دریکله، نیومن یا روبین و  $t_i, i = 1, 2, 3$  تنش‌ها می‌باشند. جابجایی‌ها توسط ترکیب‌های خطی حل اساسی که در معادلات (۷) نشان داده شده اند تقریب زده می‌شوند. اگر شرایط مرزی موجود تنش‌ها باشند، حل اساسی مربوط به آنها از حل اساسی جابجایی‌ها و روابط ارائه شده در [۱۹] قابل محاسبه است.

در معادلات (۷)،  $N$  نشان دهنده تعداد نقاط منابع نیرو و  $G_{ij}, i, j = 1, 2, 3$  حل‌های اساسی هستند که برای فضای پراز طریق رابطه (۸) قابل محاسبه می‌باشند.

$$R_{i,j} \text{ مشتق جزئی } R \text{ نسبت به نقاط مرزی } p_i, q_j \text{ نسبت پواسن}^2 \text{ و } p_i, q_i, i = 1, 2, 3 \text{ به ترتیب مختصات نقاط مرزی و منابع نیرو هستند.}$$

حل‌های اساسی برای نیم فضا از معادلات (۱۰) به دست می‌آیند [۲۰]. به دلیل تقارن مساله، جابجایی‌های ایجاد شده توسط نیروهای عمل کننده در راستای محور دوم با جایگزینی  $q_1 - p_1$  با  $p_2 - q_2$  در مولفه‌های  $G_{i1}$  بدست می‌آیند.

مرزی در نقطه  $P$  روی مرز هستند. شکل (۱) پراکندگی نقاط مرزی و منبع نیرو را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در این مرحله باید ضرایب ثابت  $c_i$  تعیین شوند که این کار با استفاده از نقاط مرزی (دایره‌های آبی رنگ در شکل (۱)) و در نظر گرفتن شرایط مرزی برای حل رابطه (۳) انجام می‌شود. اگر تعداد  $M$  نقطه مرزی و  $N$  نقطه مرزی در نظر گرفته شود، در این صورت یک دستگاه معادلات  $M$  معادله و  $N$  مجهول به وجود خواهد آمد. پس از تعیین ضرایب ثابت اکنون می‌توان مقدار  $\mathbf{u}$  را در هر نقطه داخل مرز با قرار دادن حل اساسی بین نقطه مورد نظر و نقاط منبع نیرو محاسبه نمود.

## ۲-۱- به کار گیری روش حل اساسی در میدان تغییر شکل آتشفسان

بر اساس گفته لوزن<sup>۱</sup> و همکاران در ۱۹۹۷ تغییر شکل زمین در مناطق آتشفسانی از برهم نهی میدان جابجایی سطح نیم فضا و بخش توپوگرافی حاصل می‌شود [۱۸]. بنابراین جابجایی کلی می‌تواند به صورت رابطه (۴) که شامل برهم نهی جابجایی مربوط به حرکت مأگما در عمق، در سطح نیم فضا  $u_i^f$  و جابجایی حاصل از اثر توپوگرافی  $u_i^t$  بیان گردد.

$$\text{رابطه (۴)} \quad u_i = u_i^f + u_i^t$$

$u_i^f$  معمولاً از طریق روابط تحلیلی بسته به نوع مخزن مأگما محاسبه می‌شود و در نتیجه روش حل اساسی برای محاسبه جایجایی حاصل از اثر توپوگرافی استفاده می‌شود. در غیاب نیروهای حجمی، معادله حاکم بر محیط همگن ایزوتrop در حالت الاستیستیته خطی معادلات کوشی-ناوبر می‌باشند. با در نظر گرفتن نماد تنسوری برای جابجایی‌ها  $u_i^t, i = 1, 2, 3$  در دامنه سه بعدی  $\Omega$  این معادلات به شکل رابطه (۵) می‌باشند [۱۶]

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

<sup>2</sup> Poisson

<sup>1</sup> Luzzo'n

رابطه (۷)

$$u_{1N}^t(a, b, c, Q, p) = \sum_{j=1}^N a_j G_{11}(P, Q_j) + \sum_{j=1}^N b_j G_{12}(P, Q_j) + \sum_{j=1}^N c_j G_{13}(P, Q_j)$$

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

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

$$G_{ij}(P, Q) = \frac{1}{16\pi\mu(1-\vartheta)R} [(3-4\vartheta)\delta_{ij} + R_{,i}R_{,j}] \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در این رابطه

$$R^2 = (p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + (p_3 - q_3)^2 \quad \text{رابطه (۹)}$$

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

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

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

$$G_{11} = \frac{1}{16\pi\mu(1-\vartheta)} \left[ \frac{(3-4\vartheta)}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{(p_1 - q_1)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\vartheta)(p_1 + q_1)^2}{R_2^3} + \frac{2(R_2^2 - 3(p_1 - q_1)^2)p_3q_3}{R_2(R_2 - p_3 - q_3)} + \frac{4(1-\vartheta)(1-2\vartheta)[R_2^2 - (p_1 - q_1)^2 - R_2(p_3 + q_3)]}{R_2(R_2 - p_3 - q_3)^2} \right] \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

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

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

که

$$R_1 = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2} + (p_3 - q_3)^2$$

$$R_2 = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2} + (p_3 + q_3)^2 \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$c = (c_1, c_2, \dots, c_N), b = (b_1, b_2, \dots, b_N), a = (a_1, a_2, \dots, a_N)$$

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**  
آتشفشار کامپی فلکری در جنوب ایتالیا، تاکنون  
فعالیت‌های آتشفشاری مختلفی از خود بروز داده و در  
نزدیکی شهر ناپل<sup>۱</sup> که یکی از شهرهای پرجمعیت

<sup>1</sup> Naples

داخلی مساله انتخاب شدند. مشخصات مخزن مأگما 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 به طور 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 [۲۲] 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 به صورت توزیع نرمال با واریانس  $0.5^0$  سانتی‌متر مربع به مقادیر مرزی اعمال گردید. این واریانس از مرتبه واریانس واقعی مشاهدات تداخل سنجی را دری است [۲۴]

در حالت منبع مأگماهای 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 مجدداً خطای تصادفی به این مقادیر اعمال گردید. همچنین مقدار مرزی بروی حفره مأگما مشابه با پیشنهاد مطالعه [۱۰] به صورت تنش صفر فرض شد. نسبت پواسن برای این مساله برابر با  $0.25^0$  و مدول برشی همانند تحقیق [۲۱] در منطقه کامپی‌فلگری برابر با  $7 \text{ گیگا پاسکال}$  در نظر گرفته شد. به‌منظور محاسبه حل‌های اساسی نیم فضا نیز از روابط ارائه شده در رابطه‌های (۱۰) استفاده گردید.

ایتالیاست قرار دارد به‌عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شده است [۲۱]. طبق تحقیقات آتشفشن‌شناسی اولین فوران این دهانه مربوط به ۳۵۰۰ 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 را در ماهواره‌های ای آر اس<sup>۱</sup> و انویست<sup>۲</sup> در بازه زمانی ۲۰۰۷-۲۰۰۸ می‌باشد. برای پردازش داده از روش تداخل سنجی تضاضی خط مبنای کوتاه (SBAS-DInSAR)<sup>۳</sup> استفاده شده است. با به‌کار بردن این تکنیک برای یک مجموعه از داده‌های جمع‌آوری شده بر روی مدار بالاگذر<sup>۴</sup> (مسیر<sup>۵</sup> ۱۲۹، چارچوب<sup>۶</sup> ۸۰۹)، محصولات نهایی که شامل نقشه‌های سرعت متوسط و نیز جابجایی مربوط به تاریخ‌های برداشت داده می‌شود به دست آمد [۲۱]. دقیق این روش برای جابجایی و سرعت طبق گفته کاسو<sup>۷</sup> و همکاران [۲۱] به ترتیب ۵ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر در سال می‌باشد.

#### ۴- ارزیابی روش با داده‌های شبیه‌سازی شده

پیش از اجرای روش حل اساسی بر روی آتشفشن کامپی‌فلگری، این تکنیک در حالت شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن اثر توپوگرافی و برای دو حالت مخزن مأگماهای کروی و بیضوی ارزیابی شد. در حالت مخزن مأگماهای کروی، یک مربع  $20 \times 20$  کیلومتر به‌عنوان سطح نیم‌فضا به همراه یک حفره کروی مأگما که در زیر سطح نیم‌فضا قرار دارد به عنوان مرزهای بیرونی و

<sup>1</sup> ERS

<sup>2</sup> ENVISAT

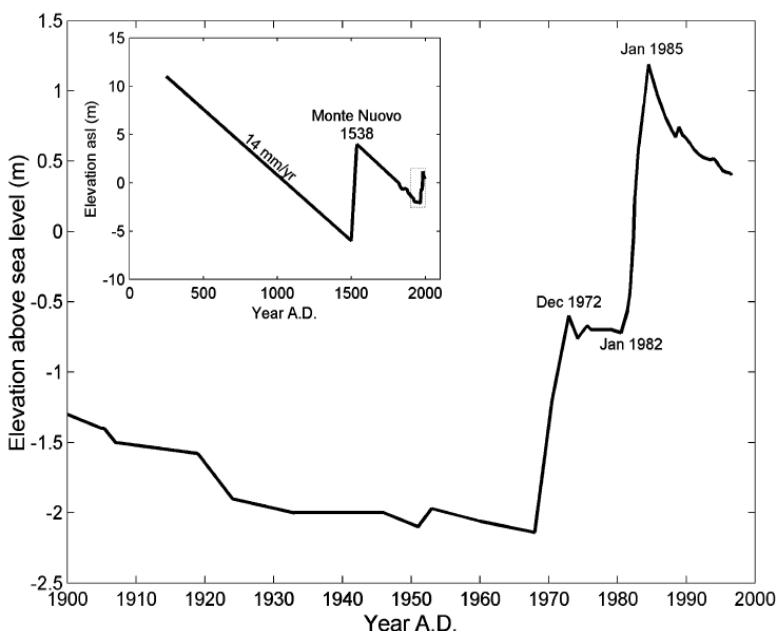
<sup>3</sup> Small Baseline Subset Differential InSAR

<sup>4</sup> Ascending Orbit

<sup>5</sup> Track

<sup>6</sup> Frame

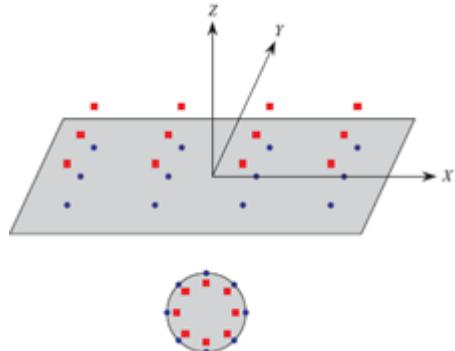
<sup>7</sup> Casu



شکل ۲: سری زمانی ارتفاع منطقه آتشفشاری کامپی فلگری در ۲۰۰۰ سال گذشته [۷]

شبیه‌سازی شده نیز روی مرز بیرونی در راستای خط دید ماهواره (*LOS*)<sup>۱</sup> برای حالتی مشابه با داده‌های راداری تصویر شدند. برای این تصویرسازی از رابطه ارائه شده در [۲۶] استفاده گردید. جابجایی‌های شبیه‌سازی شده در شبکه‌ای 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 ماقمای کروی [۱۱] 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  $\pm 3$  میلی‌متر قرار دارد.

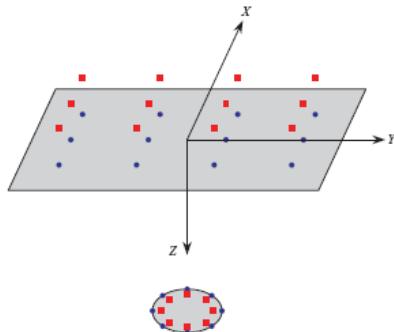


شکل ۳: هندسه مرز داخلی (حفره کروی) و بیرونی مساله به همراه سیستم مختصات مورد استفاده. نقاط مرزی و منبع به ترتیب با دایره‌های آبی و مربعات قرمز در شکل نمایش داده شده‌اند

پس از محاسبه حل‌های اساسی برای جابجایی و تنش، در گام اول ضرایب *a* و *b* و *c* توضیح داده شده در زیربخش ۱-۲ محاسبه شد. چون هدف اصلی، مقایسه میدان جابجایی حاصل از روش حل اساسی با میدان جابجایی حاصل از مشاهدات تداخل سنجی راداری برای آتشفشار کامپی فلگری است که در بخش بعد توضیح داده خواهد شد، جابجایی‌های

<sup>1</sup>Line Of Sight

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

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 مجدداً بقیه پارامترها ثابت

جدول ۱: پارامترهای مخزن ماغما،  $X$ ،  $Y$ ،  $Z$ ، مختصات مسطحاتی،  $VC$ ، تغییر حجم مخزن کروی،  $PC$ ، تغییر فشار مخزن بیضوی،  $MmA$ ،  $PA$ ، زاویه شیب مخزن بیضوی،  $MiA$  نیم قطر کوچک مخزن بیضوی،  $SA$  آزیموت مخزن بیضوی

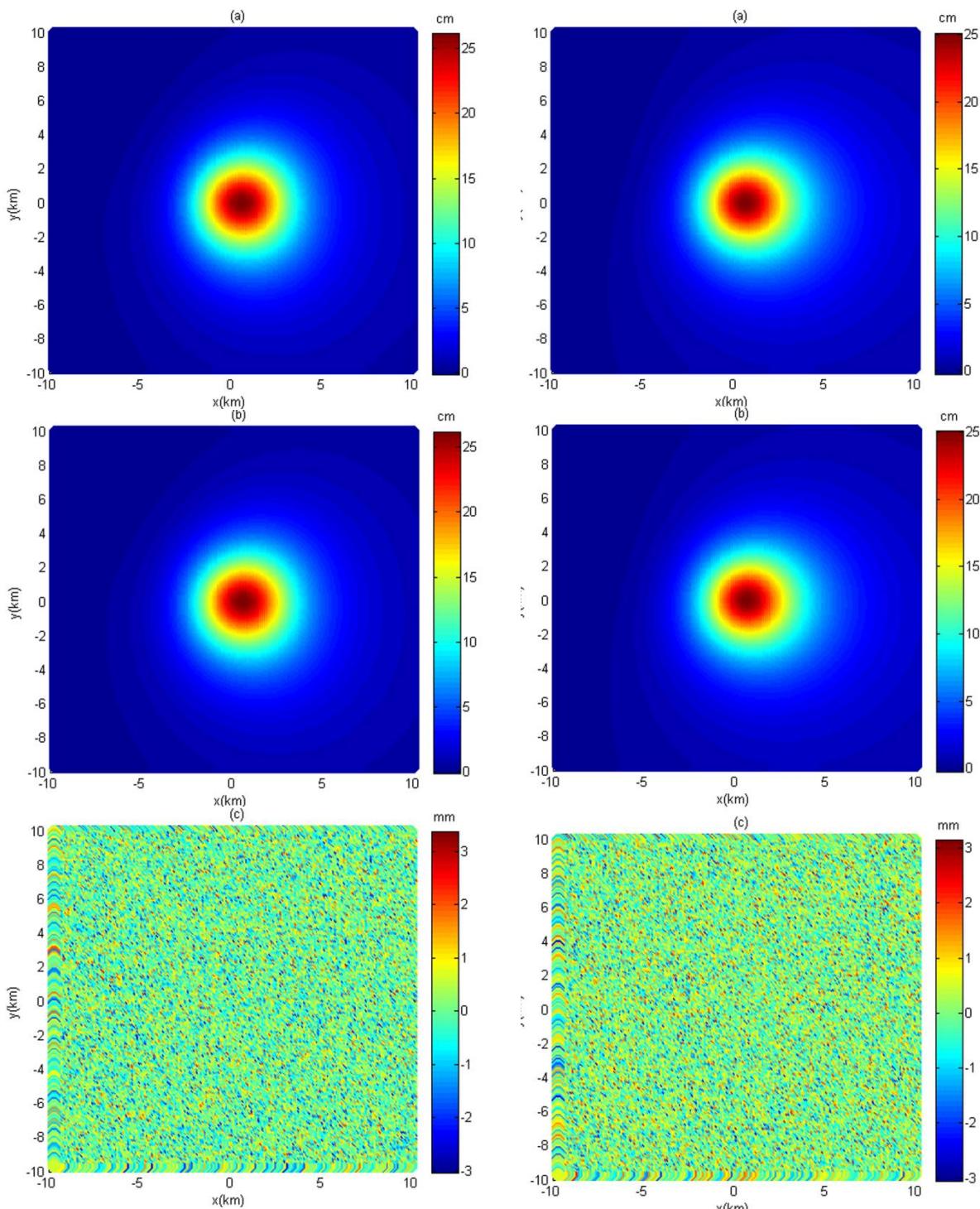
$SA$ (°)	$PA$ (°)	$MiA$ (km)	$MaA$ (km)	$PC$ (GPa)	$VC$ (km³)	$Depth$ (km)	$Y$ (km)	$X$ (km)	نوع
				-	۰/۰۱	۳	۰	۰	کروی
۹۰	۰	۱	۲	۰/۰۱	-	۳	۰	۰	بیضوی

آتشفشارهای با ارتفاعات  $H$  برابر با ۰ و ۸۸۱ و ۱۸۱۹ متر و شیب‌های متوسط دامنه  $\alpha$  برابر با ۰ و ۲۰ و ۳۰ درجه بررسی شد. مخروطی با شعاع ۵ کیلومتر به عنوان عمارت آتشفشاری در نظر گرفته شد. نسبت پواسن و مدول برشی و پارامترهای مخزن ماغما مشابه ارزیابی قبلی است.

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

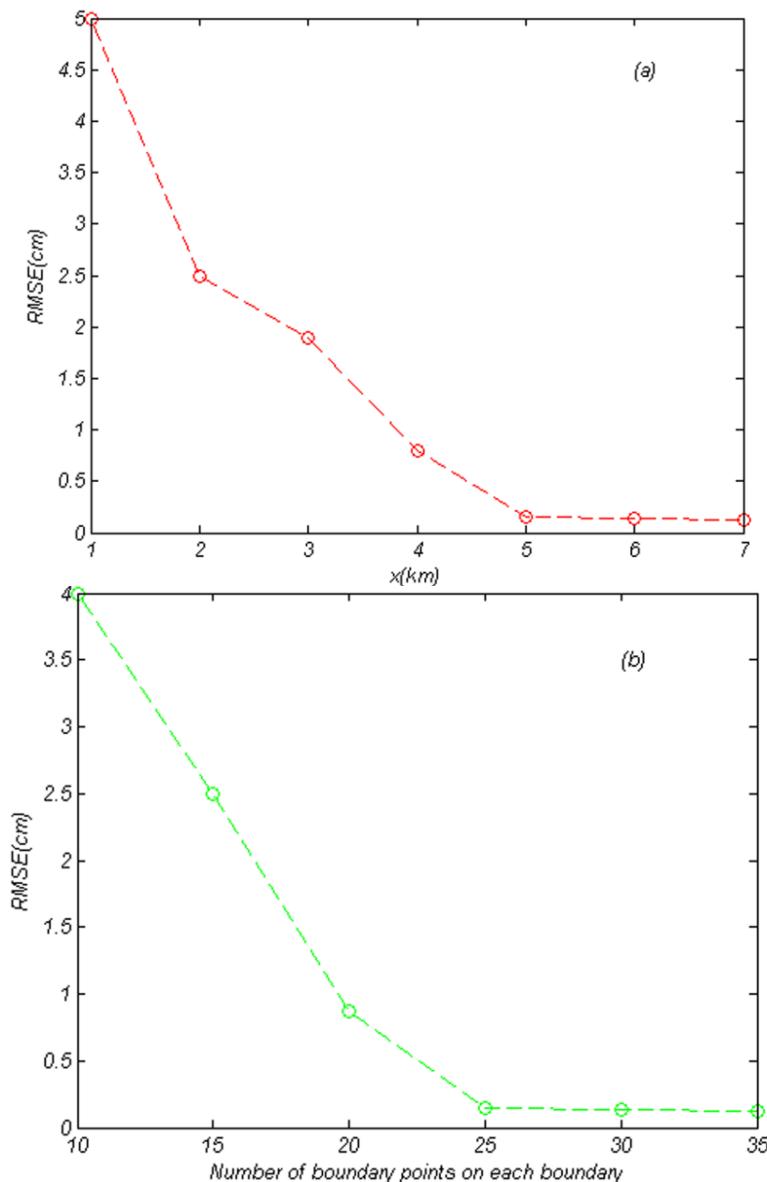
به‌منظور بررسی اثر توپوگرافی بر روی تغییر شکل یک ارزیابی عددی با استفاده از روش حل اساسی سه بعدی انجام شد. ویلیامز و واج<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۸ نشان دادند که توپوگرافی تاثیر قابل توجهی بر روی میدان جابجایی دارد [۲۷] بنابراین با در نظر گرفتن هندسه‌ای که به‌طور شماتیک در شکل (۸) نمایش داده شده است مطالعه انجام گرفت. اثر توپوگرافی برای

<sup>۱</sup> Williams & Wadge



شکل ۵: نتایج ارزیابی شبیه‌سازی برای مخزن ماقمای 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

شکل ۶: نتایج ارزیابی شبیه‌سازی برای مخزن ماقمای 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



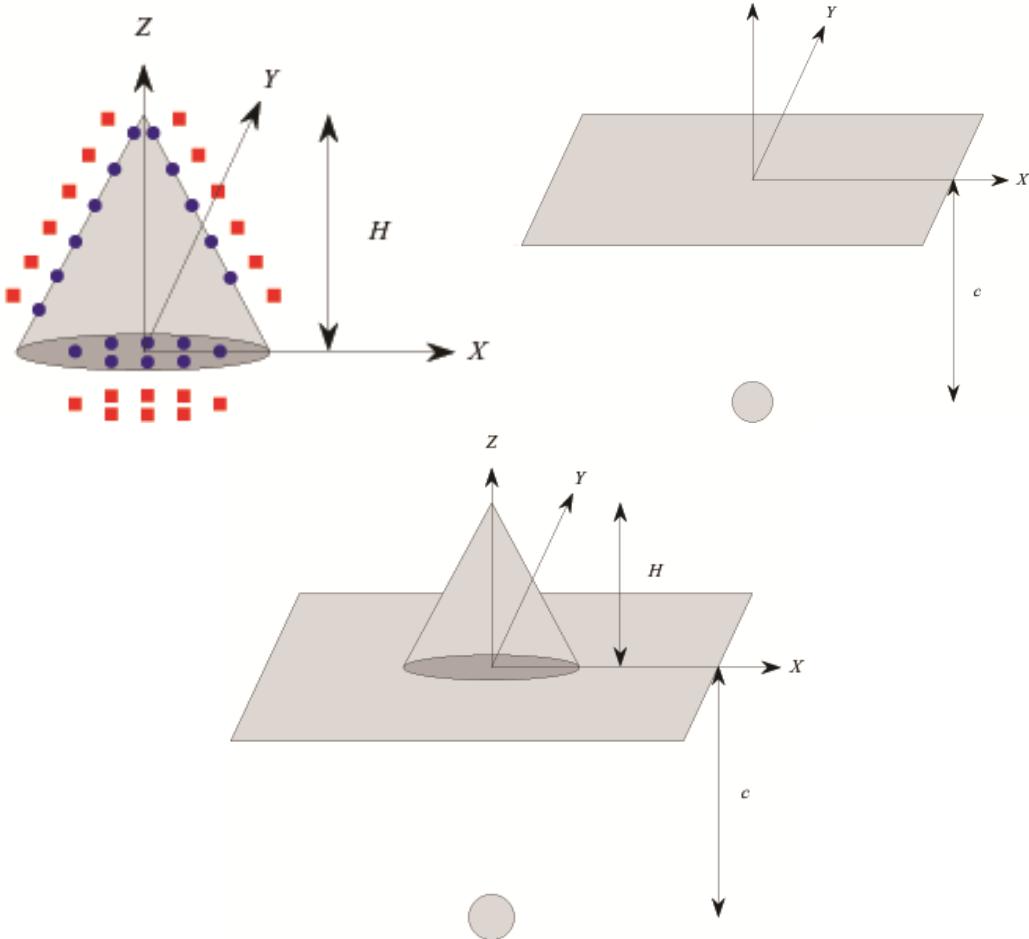
شکل ۷: تاثیر پارامترهای ورودی. الف): تغییرات خطای مربعی متوسط (RMSE) و فاصله نقاط منابع نیرو از دامنه. محور افقی نشان‌دهنده فاصله نقاط منابع نیرو از دامنه می‌باشد. ب): تغییرات خطای مربعی متوسط و تعداد نقاط مرزی

استفاده گردید. شکل (۹) نشان‌دهنده تغییرات جابجایی ایجاد شده به وسیله مخزن ماگمای کروی واقع شده در محیط همگن الاستیک می‌باشد. نتایج تغییرات شبی سطح  $\alpha$  و تغییرات ارتفاع با جابجایی‌ها در سطح نیمفضا (ارتفاع توپوگرافی برابر با صفر متر و شبی متوسط صفر درجه) مقایسه شده است. همان‌طور که از این شکل می‌توان

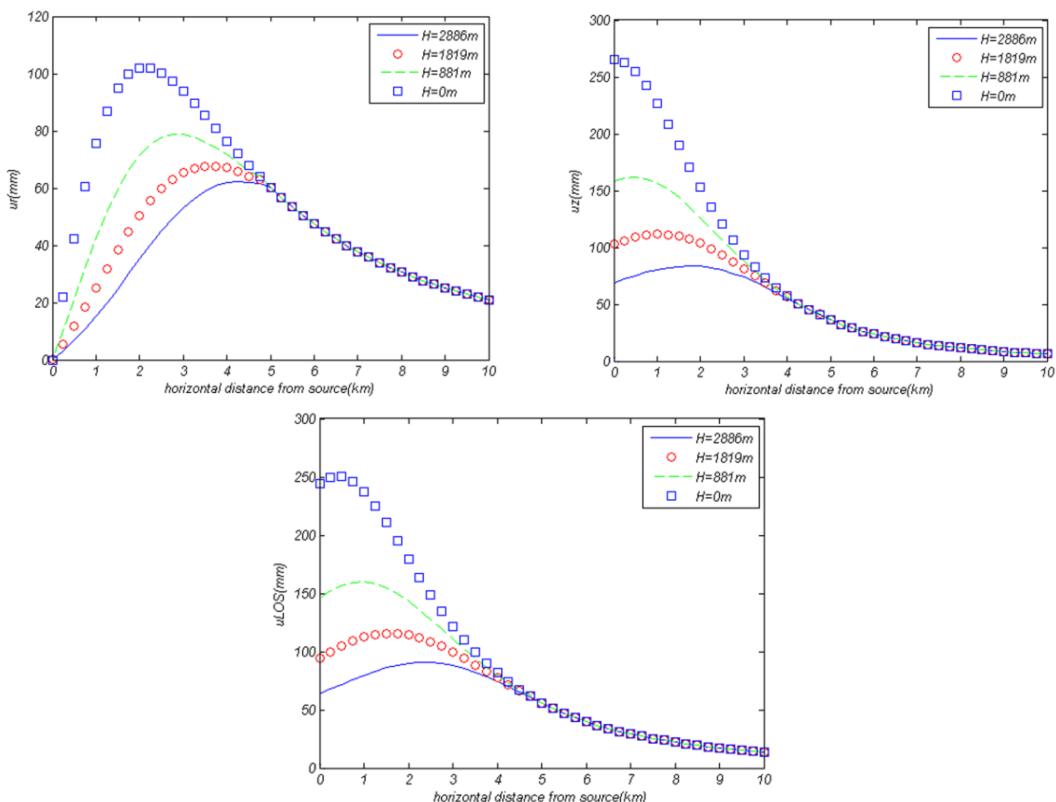
یکصد نقطه مرزی به طور یکنواخت بر روی مخروط توزیع شد. مقادیر مرزی جابجایی با استفاده از روش [۲۷] محاسبه شد که در این روش عمق‌های متفاوت مخزن ماگما برای هر نقطه مرزی در نظر گرفته می‌شود. مجدداً خطای تصادفی نیز مشابه با ارزیابی‌های قبلی به مقادیر مرزی اعمال شد. برای حل اساسی جابجایی در فضای توپوگرافی از رابطه (۸)

در فاصله شعاعی ۲ کیلومتری مخزن ماقمایما کزیم 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.

دریافت توپوگرافی تاثیر قابل توجهی بر جابجاییهای سطحی آتششنان دارد. با افزایش ارتفاع به خصوص در نزدیکی قله، جابجاییهای ارتفاعی کاهش مییابند. برای شبیه متوسط سی درجه ، قله محل وقوع مینیمم محلی است در حالی که



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



شکل ۹: اثر توبوگرافی بر جابجایی (بالاچپ): مولفه جابجایی ارتفاعی (بالاچپ) مولفه جابجایی شعاعی (پایین) جابجایی ایجاد شده در راستای خط دید ماهواره.  $H$  ارتفاعات آتشفسانها می‌باشد. مخزن ماقما در عمق ۳ کیلومتری سطح نیم فضا در نظر گرفته شده است.

## ۵- کاربرد روش حل اساسی بر روی آتشفسان کامپیفلگری

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

مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM) ایجاد شده به وسیله SRTM به عنوان توبوگرافی منطقه در نظر گرفته شد (شکل ۱۰). روش استفاده شده مشابه با حالت ارزیابی می‌باشد. یک سیستم مختصات کارتزین با مبدأ واقع شده در سطح متوسط دریا، زیر قله آتشفسان کامپیفلگری به کار گرفته شد. محورهای  $x$  و  $y$

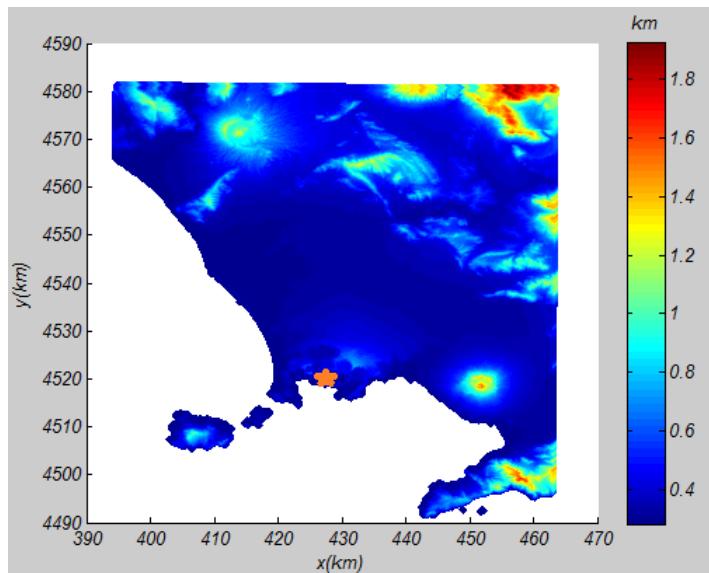
کایول و کرنت<sup>۱</sup> در ۱۹۹۸ اشاره کردند که تفسیر جابجایی‌های سطح زمین بدون در نظر گرفتن اثر توبوگرافی می‌تواند به نتایج اشتباه منجر شود [۲۸] منحنی‌های مربوط به جابجایی‌های قائم کمی در نزدیکی قله مسطح تر هستند. محل ماکریم جابجایی برای جابجایی‌های شعاعی با ارتفاع قله متغیر است. جابجایی‌های قائم ایجاد شده به وسیله مخزن ماقما در فواصل مسطحاتی بزرگ ( $r > c$ ) هنگامی که اثر توبوگرافی 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 محسن آن در قسمت‌های قبل اشاره شده بود، استفاده شده است.

<sup>۱</sup> Cayol & Cornet

بالای محیط است. برای انتخاب پارامترهای مخزن ماغما از الگوریتم ژنتیک استفاده شد.

به ترتیب در راستاهای شرق به غرب و شمال به جنوب قرار دارند در حالی که جهت مثبت محور  $z$  به سمت



شکل ۱۰: مدل ارتفاعی دیجیتال منطقه آتشفسان کامپیفلگری. ستاره نارنجی رنگ نشان دهنده محل قله می باشد.

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 ماغمای کروی  $\Delta V$  با استفاده از مشاهدات جابجایی در راستای خط دید ماهواره  $u_{LOS}$  مشخص می کند.

$$\Delta V = 0.72 \iint_{R^2} u_{LOS} dx dy \quad (12)$$

که در این مطالعه برابر با  $-2 \times 10^{-3}$  کیلومتر مکعب است. بازه تغییر حجم مخزن بین

جدول ۲: پارامترهای مورد استفاده برای مخزن ماغمای کروی در آتشفسان کامپیفلگری

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

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

به منظور کنترل نتایج، پس از به کار 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

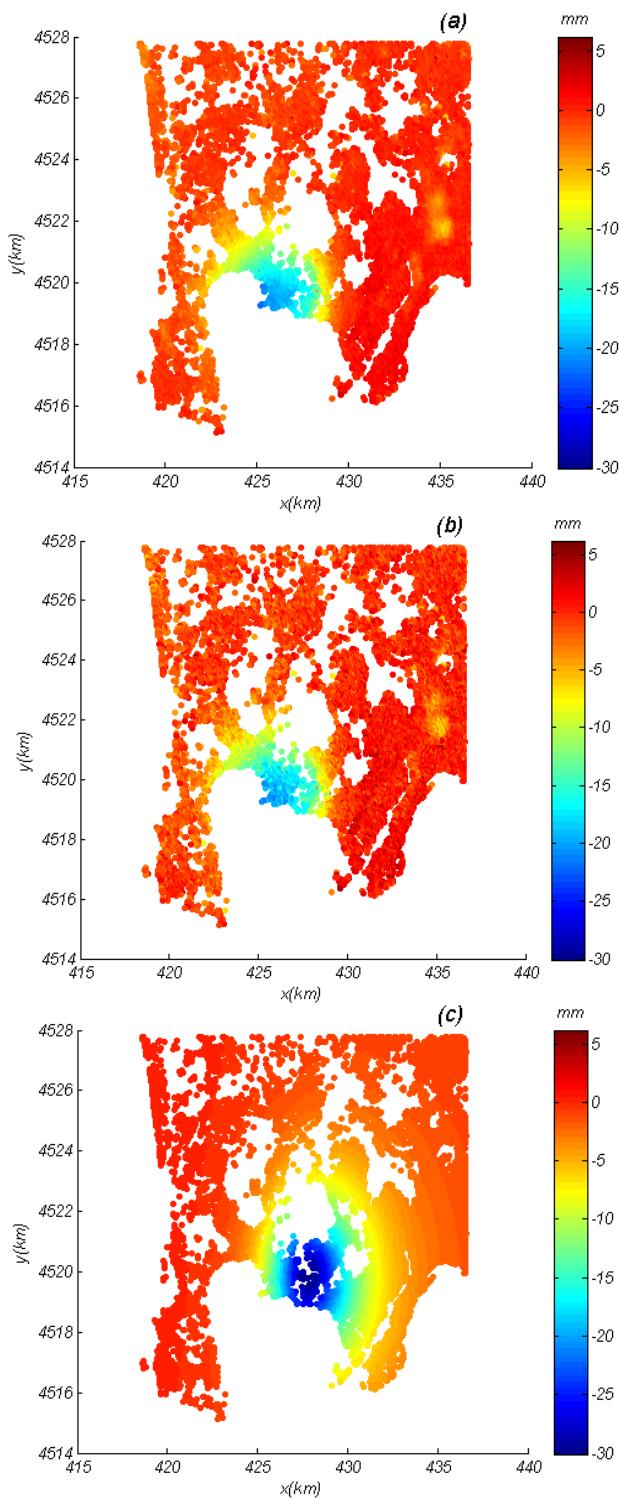
حالت برابر با  $3/42$  میلی متر می باشد. در شکل (۱۱-۵) جابجایی ها در شرایطی که سطح مبنای ارتفاعی برابر با ارتفاع قله در نظر گرفته شود نشان داده شده اند. نتایج در این حالت کمتر از مقدار واقعی و کمتر از نتایج حاصل از روش حل اساسی می باشد. خطای مربعی متوسط در این حالت برابر با  $2/97$  میلی متر است. بر اساس حالت های بررسی شده در شکل (۱۱) می توان نتیجه گرفت که توپوگرافی واقعی منطقه در تعیین میدان جابجایی آتشفسان می بایست در نظر گرفته شود. همچنین به کارگیری روش حل اساسی نسبتا ساده بوده و هزینه محاسباتی کمی دارد بنابراین می توان از این روش به سادگی در محاسبه میدان تغییر شکل آتشفسان استفاده کرد.

#### ۶-نتیجه گیری

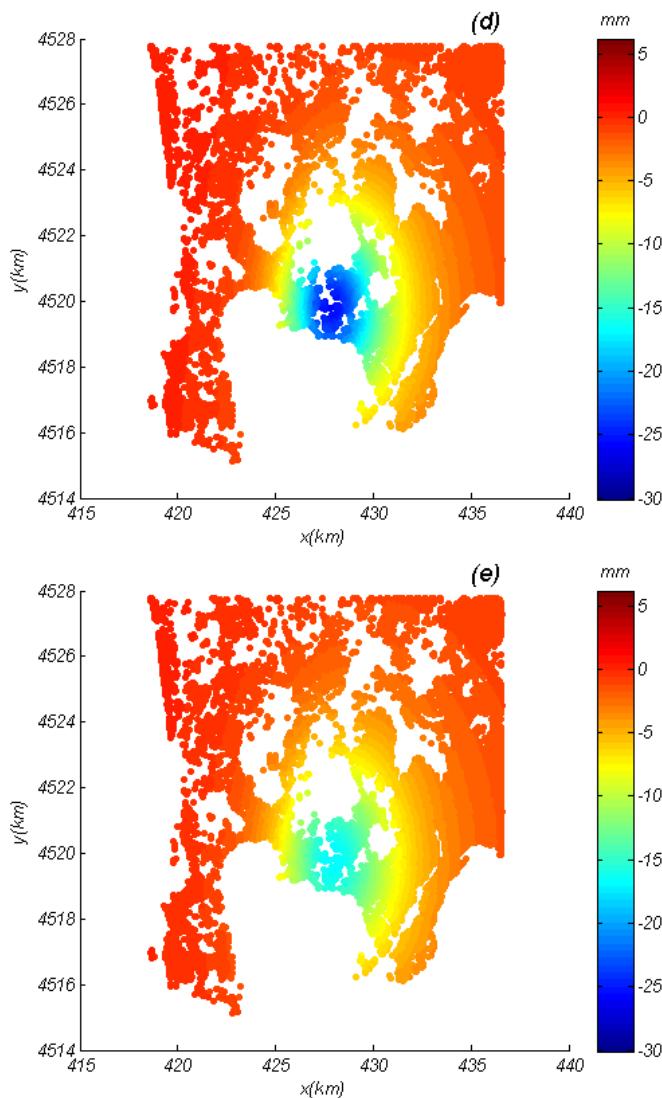
در این مطالعه با در نظر گرفتن اثر توپوگرافی واقعی منطقه، از روش حل اساسی برای محاسبه میدان جابجایی آتشفسان کامپی فلگری استفاده شد. با توجه به مطالب گفته شده می توان دریافت که اجرای روش نسبتا ساده بوده، نیاز به آماده سازی داده زیاد ندارد و برخلاف روش المان مرزی، از آنجا که نقاط منابع نیرو خارج از دامنه در نظر گرفته می شوند با انتگرال های پیچیده رو به رو نخواهد شد. پیش از به کارگیری روش حل اساسی بر روی آتشفسان کامپی فلگری، این روش بر روی آتشفسان های شبیه سازی شده با مخازن ماسه ای کروی و بیضوی اجرا شد و نتایج آن با یافته های حاصل از مدل های تحلیلی مقایسه گردید.

نتایج، با قیمانده ای در بازه  $\pm 3$  میلی متر را نشان دادند که حاکی از هماهنگی دست آورده حاصل از دو روش بود. سپس اثر توپوگرافی بر روی میدان جابجایی بررسی شد که نشان داد در نظر نگرفتن اثر توپوگرافی به خصوص در آتشفسان های مرتفع می تواند باعث ایجاد خطای زیاد در محاسبه میدان جابجایی شود.

نتایج حاصل از مشاهدات راداری مطابقت دارد و نشان دهنده نرخ فرونشستی برابر با  $2$  سانتیمتر در سال می باشد. مقدار خطای مربعی متوسط کوچک و برابر با  $1/47$  میلی متر است. در این حالت فرونشست با فاصله گرفتن از قله کاهش می یابد. معمولاً میدان جابجایی آتشفسان با استفاده از مدل تحلیلی مگی [۱] و بدون در نظر گرفتن اثر توپوگرافی محاسبه می شود. همچنین یک روش معمول برای در نظر گرفتن اثر توپوگرافی، انتخاب یک سطح مبنای ارتفاعی ثابت بالای سطح متوسط دریاست. برای مقایسه مقادیر به دست آمده از این روش ها با روش ارائه شده در مطالعه حاضر، سه حالت مختلف بدون در نظر گرفتن اثر توپوگرافی، ارتفاع مبنای  $220$  متر ( محلی بین سطح متوسط دریا و قله) و ارتفاع مبنای  $458$  متر ( برابر با ارتفاع قله) در نظر گرفته شد. جابجایی های مربوط به هر حالت در اشکال (۱۱-ج و ۱۱-۵) نشان داده شده است. همه جابجایی ها در راستای خط دید ماهواره تصویر شده اند. شکل (۱۱-ج) حالتی را نشان می دهد که در آن اثر توپوگرافی در نظر گرفته نشده است. همان طور که مشاهده می شود جابجایی ها در این حالت حدود چهل درصد بزرگتر از نتایج حاصل از روش حل اساسی هستند. رخ دادن این پدیده به این دلیل است که جابجایی تابعی از عمق مخزن ماسه است و در این حالت عمق مخزن برابر با  $2/7$  کیلومتر از سطح متوسط دریا در نظر گرفته شده است. در این وضعیت جابجایی بیش از مقدار حقیقی به دست آمده و خطای مربعی متوسط برابر با  $6/17$  میلی متر است. شکل (۱۱-د) نتایج را در حالتی نشان می دهد که سطح مبنای ارتفاعی  $220$  متر بالاتر از سطح متوسط دریا در نظر گرفته شود. در این حالت یک ارتفاع ثابت به عنوان توپوگرافی متوسط به سطح اضافه شده است. تقریب بیش از اندازه جابجایی های حقیقی در این حالت کمتر از حالتی است که توپوگرافی در نظر گرفته نشود. این تقریب حدود بیشتر درصد بیش از نتایج حاصل از روش حل اساسی است. خطای مربعی متوسط در این



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 ماقمای واقع شده در عمق ۳/۲ کیلومتری قله یا ۲/۷ کیلومتری از سطح متوسط دریا (ج) میدان جابجایی مخزن ماقمای کروی هنگامی که سطح آزاد منطبق با سطح متوسط دریا در نظر گرفته شده و اثر توپوگرافی نادیده گرفته شود



شکل ۱۱ (ادامه): (د) میدان جابجایی تحلیلی حاصل از مخزن ماقمای کروی هنگامی که ارتفاع مینا 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 ماقمای کروی هنگامی که ارتفاع مینا برابر با ۴۵۸ متر از سطح متوسط دریا (برابر با ارتفاع قله) در نظر گرفته شود.

یافته‌ها با خطای مربعی متوسط کمتر از ۲ میلی‌متر نشان می‌دهد که می‌توان از روش حل اساسی به عنوان یک روش کارآمد در مطالعه تغییر شکل آتششنان استفاده کرد. همچنین تغییر شکل در سه حالت در نظر نگرفتن اثر توپوگرافی، در نظر گرفتن توپوگرافی به صورت ارتفاع مینا 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 آتششنان شد و خطای

از آنجا که آتششنان کامپیفلگری در منطقه‌ای پرجمعیت قرار گرفته و دارای فعالیت‌های مداوم است و در صورت فوران خسارات جبران ناپذیری بر مردم منطقه تحمیل خواهد کرد برای اجرای روش حل اساسی انتخاب گردید. روش حل اساسی برای این آتششنان با در نظر گرفتن مخزن ماقمای کروی در عمق ۳/۲ کیلومتری زیر قله به کار گرفته شد. نتایج حاصل با میدان جابجایی بدست آمده از مشاهدات تداخل سنجی راداری مقایسه گردید.

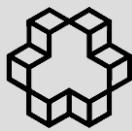
حل اساسی در مطالعه تغییر شکل آتشفشار کامپیفلگری از تحقیقات اولیه در زمینه مسائل ژئودینامیک بوده و می‌توان در سایر مطالعات این شاخه از این روش بهره جست. همچنین استفاده از روش حل اساسی برای مسائلی که دارای معادلاتی غیر از کوشی-ناویر هستند می‌تواند از موارد قابل توجه در مطالعات آتی باشد.

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 به عنوان یک سطح متوسط فرض می‌شود متفاوت بوده و به میدان جابجایی واقعی منطقه نزدیک‌تر است. اجرای روش

## 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
- [8] K.M. Larson, M. Poland, and A. MikluS , "Volcano monitoring using GPS: developing data analysis strategies based on the June 2007 Kilauea 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

- [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] Luzzo'n, F. T., F. Sa'nchez-Sesma, J. Rodríguez-Zu'niga, A. Posadas, J. García, J. Martí'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



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

*Maryam Yazdanparast<sup>1</sup>, Behzad Vosoghi \*<sup>2</sup>, Farshid Mossaiby<sup>3</sup>*

*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