بازیابی میدان جابجایی سه بعدی حاصل از تداخل سنجی راداری با استفاده از روش برآورد مؤلفه واریانس کمترین مربعات پایدارشده

حمید مهرابی*

استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده عمران و حمل ونقل - دانشگاه اصفهان
h.mehrabi@eng.ui.ac.ir

(تاریخ دریافت مرداد ۱۳۹۷، تاریخ تصویب فروردین ۱۳۹۸)

چکیده

اندازه‌گیری جابجایی‌های سه‌بعدی پوسته زمین، اطلاعات بسیار مفیدی را در مورد فعل و انفعالات پوسته در اختیار قرار می‌دهد. تکنیک تداخل‌سنجی راداری دارای قابلیت‌های بسیار بالایی برای تعیین میدان جابجایی پوسته می‌باشد ولی جابجایی های واقعی پوسته زمین را در راستای دید ماهواره اندازه‌گیری می‌نماید. در بازیابی میدان سه‌بعدی جابجایی پوسته زمین با استفاده از مشاهدات تداخل سنجی راداری با دو مسئله اساسی تلفیق مشاهدات با دقت های متفاوت و ناپایدار بودن برآورد مجهولات مواجه هستیم. در این مقاله، روش برآورد مؤلفه واریانس کمترین مربعات پایدار شده برای بازیابی میدان جابجایی سه‌بعدی پیشنهاد می‌شود. برای بررسی کارائی روش پیشنهادی، داده‌های راداری حاصل از دو ماهواره Envisat و ALOS بر روی یکی از فوران های آتشفشان کیلاویا (Kilauea) واقع در جزایر هاوایی مورد استفاده قرار گرفت. برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از روش پیشنهادی، بردارهای جابجایی ۱۹ ایستگاه GNSS واقع در منطقه مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد که بازیابی میدان جابجایی سه‌بعدی با روش پیشنهادی بهبود معناداری بر روی دقت و صحت نتایج به ویژه بر روی مؤلفه شمالی-جنوبی بردار جابجایی ایجاد خواهد نمود.

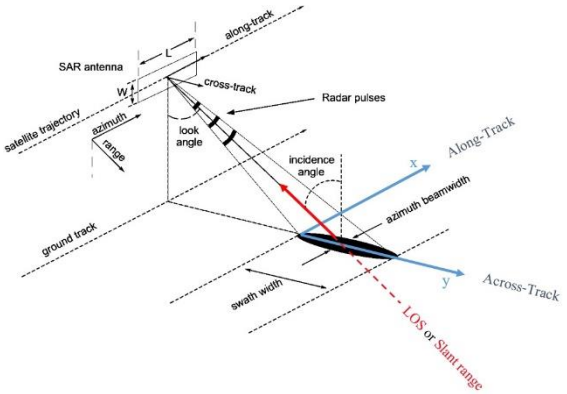
واژگان کلیدی: بازیابی میدان جابجایی سه‌بعدی، برآورد مؤلفه واریانس کمترین مربعات، پایدارسازی مسائل ناپایدار، تداخل‌سنجی راداری

---

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

امروزه تداخل‌سنجی راداری با دریچه مصنوعی (InSAR) به صورت گسترده در اندازه‌گیری جابجایی های ناشی از فرونشست، زمین‌لرزه، فعالیت‌های آتشفشانی و دیگر پدیده‌های تغییرشکل پوسته زمین مورد استفاده قرار می-گیرد. شکل (۱) هندسه تصویربرداری ماهواره های جانب-نگر SAR[۱] را نشان می‌دهد که در آن‌ها جابجایی های پوسته در راستای دید ماهواره (LOS)[۲] یا عمود بر مسیر حرکت[۳] اندازه‌گیری می‌شوند. در واقع، بردار جابجایی سه-بعدی، روی برداری از نقطه زمینی (یا سلول زمینی) به سمت ماهواره تصویر می‌شود. در سیستم SAR دو نوع مشاهده غیر مستقیم نیز وجود دارد، مشاهدات آزیموت آفست[۴] (AZO) [۱] و تداخل سنجی راداری چند دیافراگمی[۵] (MAI) [۲] که حاصلِ پردازش تصویر و در راستای حرکت ماهواره[۶] می‌باشند. این در حالی است که جابجایی های واقعی در یک فضای سه‌بعدی هستند و برای آنالیز تغییر شکل و برای درک و تفسیر بهتر مکانیزم پدیده-های ژئوفیزیکی و ژئودینامیکی (مثل آتشفشان) به بردارهای جابجایی سه‌بعدی نیاز است[۳].



شکل ۱- هندسه تصویربرداری راداری و جابجایی در راستای LOS

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی در راستای ارائه راهکاری برای بازیابی میدان جابجایی سه‌بعدی (3D) از اندازه گیری های InSAR صورت گرفته است. صرفنظر کردن از یک یا دو مؤلفه جابجایی (درصورتی‌که سازوکار جابجایی معلوم باشد)، استفاده از مشاهده LOS حداقل در سه هندسه مستقل [۴]، ترکیب مشاهدات LOS با مشاهدات در راستای آزیموت (MAI و Offset-tracking) [۵]، تلفیق بردارهای جابجایی حاصل از GPS با InSAR [۶]، استفاده از Simulated annealing و بهینه سازی random field-based [۷] و [۸]، همپوشانی برست‌ها در ماهواره Sentinel [۹] و ترکیب مدل‌های ژئوفیزیکی با داده‌های InSAR [۱۰] ازجمله تحقیقات انجام شده در این زمینه است.

در بازیابی میدان جابجایی سه‌بعدی، با تشکیل معادلات مشاهدات با حداقل سه مشاهده (معادله)، امکان حل سه مجهول جابجایی سه‌بعدی فراهم می‌شود. تصویر بردار جابجایی سه‌بعدی $d = [U_e\ U_n\ U_u]$ در راستای LOS (d_{los}) و در راستای حرکت ماهواره (d_{azo}) به ترتیب به-صورت زیر می‌باشد[4]:

$$[U_n\, sin\alpha - U_e\, cos\alpha]\, sin\lambda + U_u\, cos\lambda + \delta_{los} = d_{los} \quad (۱)$$

$$U_n cos\alpha + U_e\, sin\alpha + \delta_{azo} = d_{azo} \quad (۲)$$

در این روابط α آزیموت ماهواره، λ زاویه فرود[۷]، U_e مؤلفه شرقی-غربی، U_n مؤلفه شمالی-جنوبی و U_u مؤلفه ارتفاعی بردار جابجایی می‌باشد. متناسب با نوع مشاهدات موجود، دستگاهی خطی از معادلات فوق‌الذکر و مجهولات بردار جابجایی سه‌بعدی به ازای هر سلول و به صورت زیر تشکیل می‌شود

$$E(l) = Ax, \quad D(l) = C_l \quad (۳)$$

در این رابطه l بردار مشاهدات، A ماتریس ضرایب، x بردار مجهولات، C_l ماتریس واریانس کواریانس مشاهدات، D اپراتور واریانس و E اپراتور امید ریاضی می‌باشد. بردار مجهولات و ماتریس واریانس کواریانس آن‌ها بر اساس سرشکنی کمترین مربعات وزن دار[۸] (WLS) از روابط زیر به دست خواهد آمد:

$$\hat{x} = (A^T PA)^{-1} A^T Pl \quad (۴)$$

$$C_{\hat{x}} = \sigma_0^2 (A^T PA)^{-1} \quad (۵)$$

۱ Synthetic Aperture RADAR
۲ Line of sight
۳ Across track (ACT)
۴ Azimuth offset-tracking
۵ Multiple Aperture RADAR
۶ Along track (ALT)
۷ Incidence Angle
۸ Weighted Least Squares Adjustment

در روابط (۴) و (۵)، P ماتریس وزن مشاهدات و σ_0^2 فاکتور واریانس اولیه می‌باشند.

از نقطه نظر تئوری، با وجود سه مشاهده مستقل LOS، می‌توان بردار جابجایی هر سلول[۱] دلخواه را بازیابی نمود. از آن‌جا که ماهواره‌های SAR همگی در مدارات تقریباً قطبی در حال گردش هستند، ساختار هندسی ایجاد شده ناشی از عبور چند ماهواره، ساختاری ضعیف و بد وضع خواهد شد و در نتیجه بازیابی میدان جابجایی سه‌بعدی یک برآورد در شرایط ناپایدار می‌شود. این مشکل با افزودن مشاهدات در راستای حرکت ماهواره که حساسیت بالاتری نسبت به مؤلفه شمالی-جنوبی جابجایی دارند، تا حدود زیادی مرتفع می‌شود ولی در صورت نبود مؤلفه در راستای آزیموت باید مشکل ناپایدار بودن برآورد با روش‌های عددی پایدارسازی مرتفع گردد. بررسی عدد شرط[۲] و شرط پیکارد[۳] در بازیابی میدان جابجایی سه‌بعدی از مشاهداتِ در راستای دید ماهواره نشان می‌دهد که این برآورد یک برآورد ناپایدار است، بدین صورت که تغییرات بسیار کوچک در مشاهدات InSAR تأثیر قابل توجهی در مقادیر برآورد شده می‌گذارد. مخصوصاً زمانی که درجه آزادی معادلات صفر باشد این مسئله بیشتر خودنمایی می‌کند. در واقع بازیابی میدان جابجایی سه‌بعدی یک مسئله معکوس بد وضع[۴] است و راه حل معمول برای پایدارسازی این‌گونه مسائل، افزودن یک یا چند قید اضافی به تابع هدف مسئله می‌باشد[11] . در این مقاله روش پایدارسازی تیخونو (TR[۵]) [12] برای پایدارسازی برآورد مورد استفاده قرار گرفت. نرم کمترین مربعات باقیمانده ها به اضافه یک قید مربعی از بردار مجهولات با اعمال پارامتر پایدارسازی(α)، تابع هدف پایدارسازی را تشکیل می‌دهد[۱۳]:

$$min\left(\|Ax-l\|_{L_2}^2+\alpha^2\|x\|_{L_2}^2\right) \qquad (۶)$$

در این رابطه α پارامتر پایدارسازی و $\|\cdot\|_{L_2}$ نرم اقلیدسی هستند. پارامتر پایدارسازی یک کمیت مثبت کوچک است که به ماتریس نرمال اضافه می‌شود تا مقدار عدد شرط ماتریس نرمال کاهش یابد و برآورد پایدارتر شود، این پارامتر با استفاده از معیار L-curve و روش شبه بهینه[۶] [14, 15]، GCV[۷] [16] و VCE[۸] [17] قابل برآورد است. در این مقاله پارامتر پایدارسازی به روش L-curve برآورد می‌شود. بردار مجهولات و ماتریس واریانس کواریانس مجهولات از حل تابع هدف (۶) به‌صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\hat{x}_{reg}=(A^TPA+\alpha^2I)^{-1}A^TPl \qquad (۷)$$

$$C_{\hat{x}_{reg}}=(A^TPA+\alpha^2I)^{-1} \qquad (۸)$$

در روابط فوق P و I ماتریس‌های وزن و همانی هستند. افزودن پارامتر پایدارسازی باعث اریب[۹] شدن نتایج پایدارسازی خواهد شد، این اریبی هزینه پایدار کردن مسئله است و مقدار آن برای TR به صورت زیر به دست می‌آید [18, 19]:

$$Bias\left(\hat{x}_{reg}\right)=-\alpha^2(A^TPA+\alpha^2I)^{-1}\hat{x}_{reg} \qquad (۹)$$

بنابراین، بردار مجهولات بدون بایاس، به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\hat{x}_{Unbiased}=\hat{x}_{reg}-Bias\left(\hat{x}_{reg}\right) \qquad (۱۰)$$

دقت جابجایی حاصل از InSAR تابع چندین پارامتر است، دقت برآورد اولیه توپوگرافی، اندازه طول مبنای قائم، همدوسی[۱۰] تصاویر اصلی و پیرو و طول موج مورد استفاده در سنجنده و نوع مشاهده InSAR (در راستای دید یا در راستای حرکت) ازجمله عوامل مؤثر بر دقت هستند. این دقت را می‌توان برای مؤلفه های در راستای دید (ACT) و در راستای حرکت ماهواره (ALT) به‌صورت زیر بیان نمود[20]:

$$\sigma_{LOS}^2=\frac{1-\gamma^2}{2N\gamma^2}\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2+\sigma_{APS}^2 \qquad (۱۱)$$

$$\sigma_{AZO}^2=\frac{3}{2N}\frac{1-\gamma^2}{(\pi\gamma)^2}\rho_{az}^2+\sigma_{APS}^2 \qquad (۱۲)$$

در روابط فوق γ همدوسی سیگنال، N تعداد نمونه‌های استخراج شده برای برآورد یک اندازه‌گیری، ρ_{az} قدرت تفکیک تصویر در راستای آزیموت، λ طول‌موج، σ_{APS} خطاهای اتمسفری می‌باشند. در اکثر منابع از روابط (۱۱) و

۱ Cell (instead of Pixel)
۲ Condition number
۳ Picard condition
۴ Ill-Posed Inverse Problem
۵ Tikhonov Regularization
۶ Quasi-Optimal method
۷ Generalized Cross-Validation
۸ Variance Component Estimation
۹ Bias
۱۰ Coherence

(۱۲) برای محاسبه واریانس مشاهدات استفاده شده‌است، این در حالی است که این روابط صرفاً یک برآورد اولیه از وزن مشاهدات خواهد بود. وزن صحیح مشاهدات باید با استفاده از یکی از روش های برآورد مؤلفه واریانس، برآورد گردد. در این مقاله وزن مشاهدات با استفاده از روش LS-VCE[1] برآورد خواهند شد، سپس در رابطه (۱۰) مورد استفاده قرار خواهند گرفت. این نوع بازیابی میدان جابجایی سه‌بعدی که از تلفیق روش پایدارسازی تیخونو و برآورد مؤلفه واریانس کمترین مربعات به‌دست می‌آید تحت عنوان برآورد مؤلفه واریانس کمترین مربعات پایدار شده (RLS-VCE[2]) نامگذاری گردید.

در ادامه مقاله، مروری بر روش LS-VCE انجام خواهد شد، سپس از این روش برای برآورد مؤلفه های واریانس مشاهدات حاصل از تصاویر بالاگذر و پایین‌گذر ماهواره‌های Envisat و ALOS در زمان فوران ۱۷ ژوئن ۲۰۰۷ یکی از آتشفشان های جزیره هاوایی، استفاده خواهد شد. مدل سه-بعدی جابجایی ناشی از این فوران و نتایج حاصل در بخش نهایی مقاله مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۲- برآورد مؤلفه واریانس کمترین مربعات

ماهواره Envisat از موجی در باند C امواج رادار به اندازه ۵/۶ سانتیمتر و ماهواره ALOS از طول موج باند L به اندازه ۲۳/۶ سانتیمتر استفاده می‌نمایند. بنابراین دقت مشاهدات آن‌ها متفاوت خواهد شد. یکی از شرایط اطمینان از صحت نتایج سرشکنی کمترین مربعات، وجود برآورد درست از وزن مشاهدات است و این موضوع تحت عنوان برآورد مؤلفه واریانس (VCE) مطرح می‌باشد. تلفیق مشاهدات با دقت های متفاوت بدون در نظر گرفتن وزن درست آنها می‌تواند دقت و صحت نتایج حاصل از بازیابی میدان سه‌بعدی را دستخوش تغییرات زیادی نماید. اطلاعات ناقص و نادرست از وزن مشاهدات مختلف InSAR و در واقع عدم وجود یک مدل تصادفی درست برای مشاهدات، مانعی برای دستیابی به بهترین برآورد نا اریب خطی (BLUE[3]) از پارامتر ها خواهد شد. روش‌های MINQUE[21][4] ، BIQUE[22][5] ، REML[6] [23] وLS-VCE [24] ازجمله روش‌هایی هستند که برای برآورد مؤلفه های واریانس مشاهدات پیشنهاد شده‌اند. در این مقاله از روش LS-VCE که روشی قدرتمند و کارا است برای اختصاص وزن به مشاهدات InSAR استفاده شده است.

در VCE مشاهدات همگن در یک دسته[7] قرار می‌گیرند، به عنوان مثال جابجایی های LOS حاصل از InSAR که در دو طول موج باند L (ماهواره ALOS) و C (ماهواره Envisat) قرار دارند، هر کدام در یک دسته قرار می‌گیرند. در صورت وجود بردارهای GNSS[8] و ضرورت انجام تلفیق، مؤلفه های افقی بردار جابجایی در یک دسته و مؤلفه ارتفاعی در دسته دیگر قرار می‌گیرند (به دلیل تفاوت دقت مؤلفه های افقی و ارتفاعی). بخش تصادفی مدل معادلات مشاهدات (۳) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$D(l) = C_l = \sum_{k=1}^{p} \sigma_k C_k \qquad (۱۳)$$

در رابطه فوق $C_k, k = 1. \dots . p$ یک ماتریس متقارن $n \times n$، n تعداد مشاهدات به ازای هر پیکسل زمینی، σ_k مجهولات مؤلفه واریانس و p تعداد دسته‌های موجود است. هدف از برآورد مؤلفه واریانس در حقیقت برآورد مقادیر درست σ_k به ازای p دسته می‌باشد. $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ بردار مجهولات مؤلفه واریانس، یک بردار $p \times 1$ است که از رابطه زیر به دست می‌آید[۲۵]:

$$\hat{\sigma} = N^{-1} l \qquad (۱۴)$$

در رابطه فوق N ماتریس نرمال $p \times p$ و l یک بردار $p \times 1$ است که از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$n_{ij} = \frac{1}{2} tr\left(C_i C_l^{-1} P_A^{\perp} C_j C_l^{-1} P_A^{\perp}\right) \qquad (۱۵)$$

$$l_i = \frac{1}{2} \hat{e}^T C_l^{-1} C_i C_l^{-1} \hat{e} - \frac{1}{2} tr(C_l^{-1} P_A^{\perp} C_i C_l^{-1} P_A^{\perp}) \qquad (۱۶)$$

در روابط فوق $i, j = 1. \dots . p$ و $\hat{\boldsymbol{e}} = P_A^{\perp} \boldsymbol{l}$ بردار باقیمانده‌های ظاهری است. $P_A^{\perp}$ ماتریس تصویرگر قائم[9] می-باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

---

۱ Least Squares Variance Component Estimation
۲ Regularized Least Square Variance Component Estimation
۳ Best Linear Unbiased Estimation
٤ Minimum Norm Quadratic Unbiased Estimation
٥ Best Invariant Quadratic Unbiased Estimation
٦ Restricted Maximum Likelihood
٧ Category
٨ Global Navigation Satellite System
٩ Orthogonal Projector

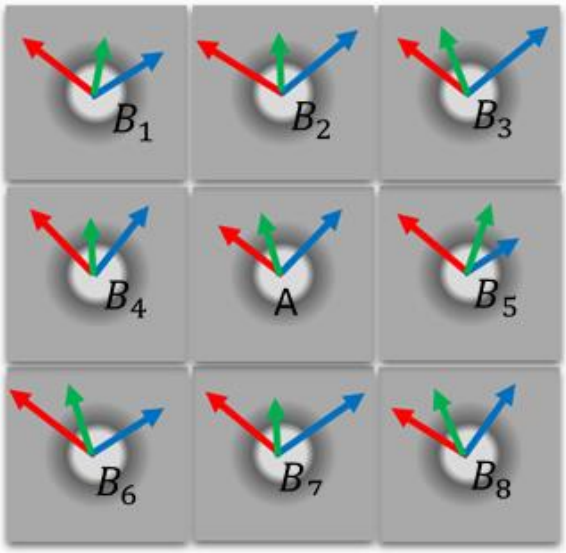
$$P_A^{\perp} = I - A(A^T C_l^{-1} A)^{-1} A^T C_l^{-1} \quad (۱۷)$$

در این صورت N^{-1} ماتریس واریانس کواریانس مؤلفه‌های واریانس است:

$$C_{\hat{\sigma}} = N^{-1} \quad (۱۸)$$

ماتریس کواریانس C_l و تصویرگر $P_A^{\perp}$ هر دو توابعی از مؤلفه‌های مجهول واریانس هستند، بنابراین فرآیند برآورد مجهولات باید به‌گونه‌ای تکرار گردد که مقادیر مجهول در تکرار بدون تغییر بمانند[۲۴]، بازیابی وزن های میدان جابجایی سه‌بعدی InSAR معمولاً با ۴ تا ۶ تکرار، برآورد می‌شوند. بعد از برآورد ماتریس کواریانس مشاهدات می‌توان با استفاده از رابطه (۱۰) بردارهای سه‌بعدی جابجایی را برآورد نمود. کمبود درجه آزادی در مدل تابعی و ساختار نادرست مدل تصادفی می‌توانند باعث برآورد مقادیر منفی برای مؤلفه های واریانس شوند [۲۶] که برای پرهیز از این مسئله می‌توان قیدهایی را در برآورد مؤلفه واریانس مدنظر قرار داد[۲۷، ۲۸].

درجه آزادی مدل تابعی در رابطه (۳)، از فرمول $df_1 = n - u$ به‌دست می‌آید، در این رابطه n تعداد مشاهدات (جابجایی های حاصل از تصاویر مختلف InSAR) و u تعداد مجهولات (مؤلفه های جابجایی سه‌بعدی) می‌باشند. در مدل تصادفی، رابطه (۱۳)، درجه آزادی از رابطه $df_2 = \frac{df_1(df_1+1)}{2} - p$ به دست می‌آید که در آن p تعداد مؤلفه - های واریانس می‌باشد [۲۴] . به علت محدودیت‌های موجود در تصویر برداری InSAR، تعداد مشاهدات جابجایی خیلی بیشتر از تعداد مجهولات نیست و معمولاً درجه آزادی معادلات مشاهدات پایین است، در نتیجه ممکن است، اساساً امکان استفاده از روش VCE برای یک سلول وجود نداشته باشد یا مؤلفه های واریانس منفی شوند. برای غلبه بر این مشکل و افزایش درجه آزادی مدل تصادفی در برآورد مؤلفه های واریانس، پیشنهاد می‌شود که مشاهدات سلول-های مجاور نیز همراه با سلول مورد نظر، وارد مدل تصادفی شوند. بدین صورت که، مطابق شکل (۲) برای برآورد مؤلفه های واریانس سلول (A)، مشاهدات سلول‌های B_1 تا B_8نیز وارد مدل تصادفی شوند، این موضوع باعث افزایش قابل توجه در درجه آزادی مدل خواهد شد. در این مقاله پنجره مشاهداتی سلول‌ها 3×3 در نظر گرفته شد، که معادل ۹ سلول مشاهداتی می‌شود. اندازه این پنجره می‌تواند 5×5 ، 7×7 یا حتی بزرگتر در نظر گرفته شود. انتخاب اندازه بهینه این پنجره مشاهداتی، خود می‌تواند موضوعی برای بررسی و تحقیق بیشتر باشد.

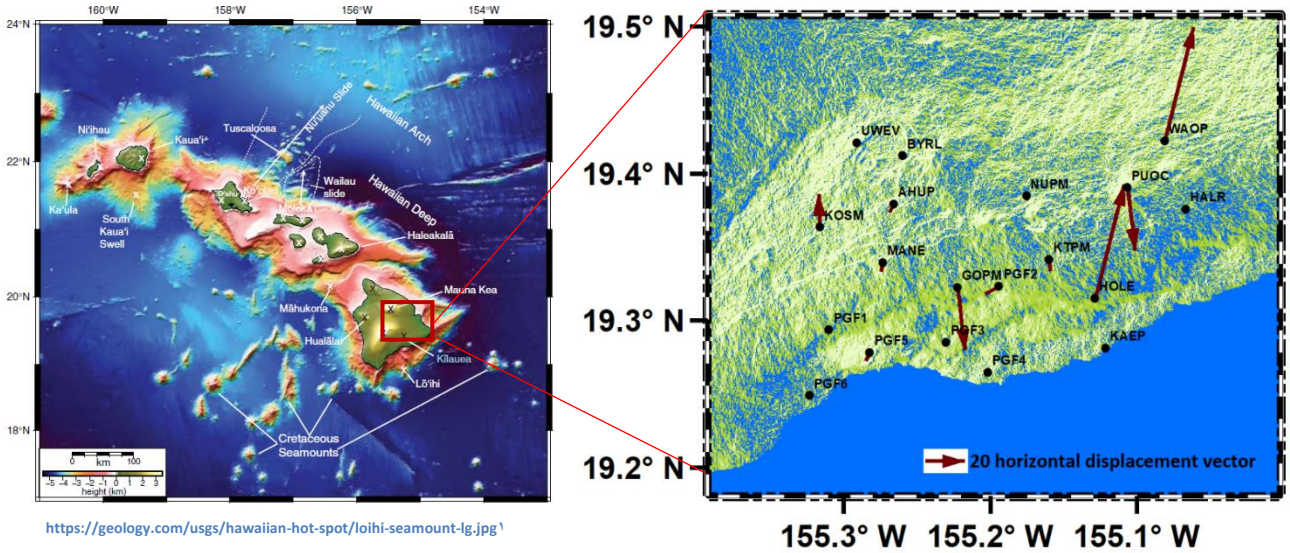


شکل ۲- پنجره مشاهداتی 3×3 که شامل ۹ سلول مجاور هم برای سلول مرکزی A می‌باشد

۳- منطقه مطالعاتی و داده‌های آن

برای بررسی قابلیت و کارایی روش RLS-VCE در بازیابی میدان جابجایی سه‌بعدی حاصل از D-InSAR، داده-های ژئودتیکی مربوط به آتشفشان کیلاویا (Kilauea) در یکی از فوران‌های آن مورد استفاده قرارگرفت. این آتشفشان در جزیره هاوایی (بزرگترین جزیره از زنجیره جزایر هاوایی) واقع شده است، این آتشفشان یکی از پنج آتشفشان فعال واقع در این جزیره می‌باشد[۲۹]. آتشفشان کیلاویا بارها و بارها در قرن‌های گذشته دچار فوران شده است[۳۰]. این آتشفشان در ۱۷ ژوئن ۲۰۰۷ دچار یک دوره فوران با یک فروکش ناگهانی در قله گردید[۳۱]. فعالیت‌های آتشفشانی کیلاویا توسط ابزارها و تکنیک‌های ژئودتیکی و ژئوتکنیکالی از قبیل ابزارهای دقیق (مثل تیلت متر)، ایستگاه‌های دائمی و موردی GNSS و InSAR رصد می‌شوند. صرفنظر از مدل سازی سیالی تغییر شکلهای سطحی آتشفشان که ممکن است دلایل تکتونیکی و آتشفشانی داشته باشد، در این مقاله هدف ارائه میدان جابجایی سه‌بعدی ناشی از فعالیت این آتشفشان برای دوره زمانی فوق‌الذکر می‌باشد. برای این منظور در این مقاله، تصاویر راداری دو ماهواره Envisat و ALOS در مدارهای بالا و پایین گذرشان طبق جدول (۱) و بردارهای جابجایی ۱۹ ایستگاه GNSS واقع در محدوده

آتشفشان طبق پیوست (۱) مورد استفاده قرار گرفتند. شکل (۳) نمای کلی جزیره هاوایی و موقعیت آتشفشان کیلاویا و همچنین نحوه توزیع ۱۹ ایستگاه GNSS مورد استفاده و اندازه و جهت بردارهای جابجایی افقی آن در بازه زمانی ۲۸ فوریه تا ۱۶ ژوئیه ۲۰۰۷ را نمایش می‌دهد. جابجایی های LOS حاصل از پردازش تصاویر InSAR کاملاً نسبی هستند، بدین معنا که لزوماً میدان جابجایی حاصل از پردازش برابر با مقدار واقعی جابجایی نیست، بنابراین نتایج جابجایی LOS حاصل از تداخل نماها خام می‌باشند و باید با نتایج یک روش غیر از InSAR اعتبارسنجی و احیاناً کالیبره شوند. برای این منظور به دو صورت می‌توان عمل نمود، اگر از پایدار بودن (بدون تغییر شکل بودن) بخشی از منطقه موجود در تداخل نما اطمینان وجود دارد، در این حالت جابجایی آن قسمت از منطقه در تداخل نما صفر فرض می‌شود و بقیه جابجایی ها به همان اندازه شیفت پیدا می‌کنند. روش دوم که معقول‌تر و مطمئن‌تر می‌باشد استفاده از نتایج دیگر روش‌های ژئودتیکی (مثل ایستگاه‌های GNSS یا ایستگاه‌های ترازیابی و یا هر نوع روشی که واقعیت زمین را نشان دهد) می‌باشد. در این مقاله، با توجه به وجود تعداد زیاد ایستگاه‌های GNSS در منطقه، برای یکسان‌سازی مبدأ (یا به بیان دیگر برداشتن ترند(Detrending) احتمالی از روی) بردارهای جابجایی حاصل از InSAR از بردارهای جابجایی این ایستگاه‌ها استفاده شد. در واقع بردارهای جابجایی GNSS برای برداشتن ترند ناشی از خطاهای احتمالی اتمسفر، مدار و خطاهای باقیمانده ناشی از انحنا و توپوگرافی از روی بردارهای جابجایی InSAR استفاده می‌شود. برای برداشتن ترند جابجایی از برازش یک چندجمله‌ای درجه ۲ به اختلاف بردارهای جابجایی InSAR و GNSS استفاده شد.



https://geology.com/usgs/hawaiian-hot-spot/loihi-seamount-lg.jpg[1]

شکل ۳- سمت چپ نمایی کلی از جزیره هاوایی و مکان آتشفشان کیلاویا - سمت راست نحوه توزیع ۱۹ ایستگاه GNSS و بردارهای جابجایی افقی آن برای بازه زمانی ۲۸ فوریه تا ۱۶ ژوئن ۲۰۰۷

جدول ۱- زمان اخذ زوج تصاویر رادار و مقادیر متوسط زوایای آزیموت و دید آنها در منطقه آتشفشان کیلاویا

Mission	Orbit direction	Time of acquisition		Mean Incidence Angle (deg.)	Mean Azimuth Angle (deg.)
Envisat	Ascending	28 April 2007	7 July 2007	27.74	-5.08
	Descending	28 March 2007	11 July 2007	24.60	185.20
PALSAR ALOS	Ascending	5 May 2007	20 June 2007	39.48	-6.37
	Descending	28 February	16 July 2007	39.68	187.33

۴- پردازش و نتایج

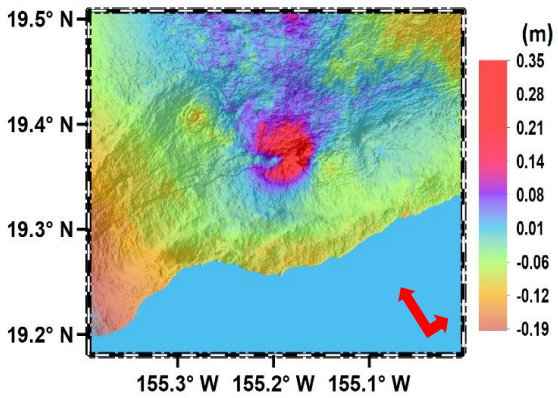
تصاویر SAR توسط نرم‌افزار Envi-SARscape و طبق روال مرسوم پردازش تصاویر D-InSAR مورد آنالیز و پردازش قرار گرفتند (رجوع شود به [۳۲، ۳۳]). پس از تولید تداخل-نماها، برای حذف خطای مدار ماهواره از اطلاعات دقیق مدار ماهواره و برای تصحیح اثر توپوگرافی از مدل ارتفاعی رقومی[1] SRTM با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده شد. برای کاهش اثر

[1] Digital Elevation Model (DEM)

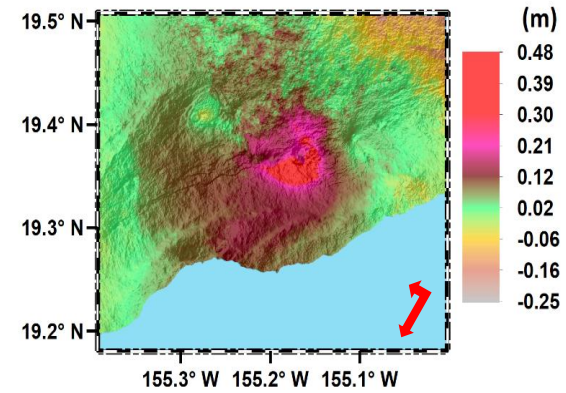
نویز از فیلتر Goldstein استفاده شد و برای دستیابی به مقادیر جابجایی از تداخل‌نما، عمل بازیابی فاز[۱] با استفاده از الگوریتم Minimum Cost Flow انجام پذیرفت و نهایتاً مقادیر جابجایی LOS در دو مدار پایین و بالا رو ماهواره‌های Envisat و ALOS برای منطقه آتشفشان کیلاویا، استخراج شدند.

با توجه به وجود تصاویر رادار دو ماهواره Envisat و ALOS در دو مدار پایین و بالا گذر تعداد چهار تداخل‌نما از زوج تصاویر موجود، به دست آمد. تصاویر بازیابی شده[۲] آنها در شکل ((a-d) ۲) نمایش داده شده است. ترند جابجایی-های حاصل از هر کدام از این چهار تداخل‌نما برای اساس تاریخ های تصویربرداری به صورت جداگانه با استفاده از بردارهای حاصل از GNSS برداشته شده‌اند. به این منظور، از برازش یک چندجمله‌ای درجه دو به اختلاف جابجایی-های حاصل از GNSS و InSAR در راستای LOS استفاده شده است. سپس رویه چندجمله‌ای درجه دو به دست آمده به صورت یک تصحیح به تداخل‌نماها اعمال شدند.

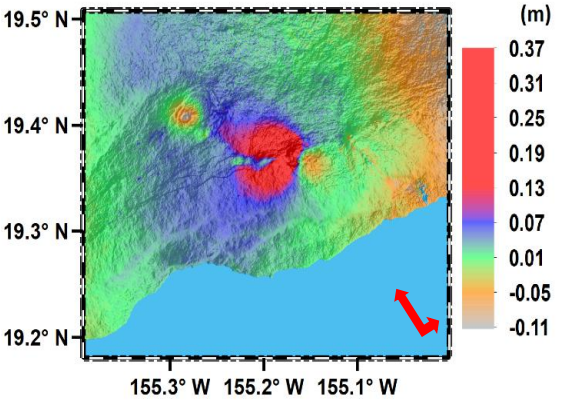
پس از تولید تصاویر جابجایی LOS از چهار تداخل نمای موجود باید مقادیر جابجایی LOS برای ایستگاه‌های GNSS از تداخل‌نماها استخراج گردد، همچنین برداری جابجایی سه‌بعدی حاصل از ایستگاه‌های GNSS با در نظر گرفتن مقادیر زاویه تابش محلی و زاویه آزیموت ماهواره و با استفاده از رابطه (۱) به امتدادLOS تبدیل گردند. حال با برازش یک رویه (صفحه‌ای یا مربعی) به اختلاف جابجایی‌های LOS ناشی از تصاویر InSAR و GNSS عملیات یکسان‌سازی دیتوم برای تصاویر جابجایی اجرا می‌گردد. به‌منظور بررسی کارائی روش پیشنهادی برای بازیابی میدان سه‌بعدی، در این مرحله عملیات بازیابی فقط روی ۱۹ سلول شامل ایستگاه‌های GNSS اجرا می‌گردد.



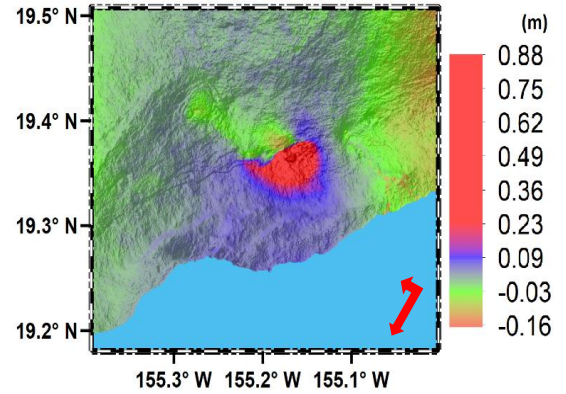
شکل (a) ۲- میدان جابجایی LOS ماهواره Envisat در مدار بالاگذر



شکل (b) ۲- میدان جابجایی LOS ماهواره Envisat در مدار پایین‌گذر



شکل (c) ۲- میدان جابجایی LOS ماهواره ALOS در مدار بالاگذر



شکل (d) ۲- میدان جابجایی LOS ماهواره ALOS در مدار پایین‌گذر

برای ارزیابی و مقایسه دقت نتایج از پارامتر RMSE[۳] (بر روی اختلاف بردارهای جابجایی حاصل از روش GNSS با بردارهای بازیابی شده سه‌بعدی به روش RLS-VCE) استفاده خواهد شد. در این راستا، RMSE کلی[۴] (با در نظر گرفتن همزمان هر سه مؤلفه مختصاتی) و RMSE مؤلفه - ای[۵] (فقط با در نظر گرفتن یک مؤلفه مختصاتی) محاسبه و

۱ Phase unwrapping
۲ Unwrapped

۳ Root mean squares error
٤ Overall RMSE
٥ Componential RMSE

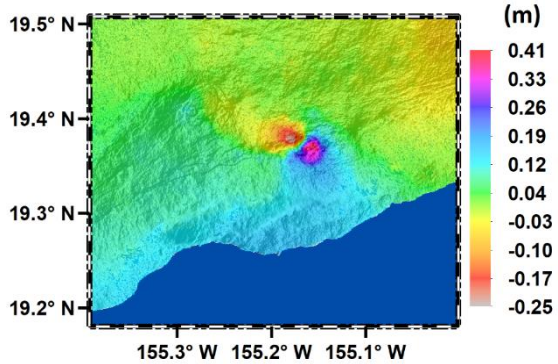
مقایسه خواهند شد. در ارزیابی اول، اندازه پنجره مشاهداتی مطابق با شکل (۲)، 3×3 (معادل ۹ سلول) در نظر گرفته شد. مقادیر RMSE برای اختلاف بین بردارهای جابجایی سه‌بعدی حاصل از GNSS و بردارهای بازیابی شده برای سه وضعیت محاسبه گردید. وضعیت اول با برابر قرار دادن ماتریس وزن مشاهدات با ماتریس یکه (از وزن مشاهدات صرفنظر شد) و استفاده از روش معمول سرشکنی بدون پایدارسازی، وضعیت دوم وزن مشاهدات از رابطه (۱۱) استخراج و استفاده از روش معمول سرشکنی بدون پایدارسازی، رابطه (۴)، و در وضعیت سوم وزن مشاهدات با استفاده از روش LS-VCE محاسبه گردید و سرشکنی با پایدارسازی انجام شد. نتایج حاصل برای RMSE کلی برای وضعیت‌های اول، دوم و سوم به ترتیب برابر با ۰/۰۷۸، ۰/۰۷۶ و ۰/۰۲۶ متر شد. مقایسه نتایج دو وضعیت اول و دوم، نشان می‌دهد که استفاده از رابطه (۱۱) ارائه شده برای دقت مشاهدات InSAR توسط Bamler and Eineder [20] بهبود ویژه‌ای در RMSE ایجاد نکرده است. این در حالی است که با استفاده از روش RLS-VCE و برآورد وزن و پایدارسازی مسئله، خطای مربع متوسط به اندازه ۶۶٪ بهبود یافته است. RMSE وضعیت اول تا سوم، برای هر مؤلفه مختصاتی جداگانه محاسبه شد و مقادیر مؤلفه‌های شرقی-غربی، شمالی-جنوبی و ارتفاعی وضعیت اول به ترتیب برابر با ۰/۰۴۸، ۰/۱۱۹ و ۰/۰۴۱ متر و برای وضعیت سوم برابر با ۰/۰۰۲، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۴۰ متر گردید. مقایسه نتایج حاصل نشان می‌دهد که با استفاده از روش RLS-VCE و برآورد مؤلفه واریانس، شاهد یک بهبود قابل ملاحظه، در بازیابی تمام مؤلفه‌ها هستیم. به صورتی که برای مؤلفه های شرقی-غربی، شمالی-جنوبی و ارتفاعی، به ترتیب بهبودی معادل با ۹۶٪، ۸۱٪ و ۳٪ روی داده است. میزان بهبود صورت گرفته بر روی مؤلفه های شرقی-غربی و شمالی-جنوبی بسیار قابل ملاحظه است، به ویژه اینکه، مقدار RMSE برای مؤلفه شمالی-جنوبی از مقدار ۱۱/۹ سانتیمتر به ۲/۲ سانتیمتر کاهش پیدا کرده است. نتایج حاصل در جدول شماره (۲) خلاصه شده‌اند.

برای بررسی تاثیر اندازه پنجره مشاهداتی و تعداد سلول‌های مشاهداتی بر روی دقت حاصل از روش RLS-VCE و بررسی تاثیر وزن برآورد شده بر روی دقت بازیابی میدان سه بعدی، مسئله در دو اندازه دیگر، برای پنجره مشاهداتی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل بر روی دو پنجره مشاهداتی 5×5 (معادل ۲۵ سلول) و پنجره مشاهداتی 7×7 (معادل ۴۹ سلول) نشان می‌دهد که افزایش اندازه پنجره مشاهداتی باعث بهبود ناچیز (در حد یک درصد) بر روی مقادیر کلی و مؤلفه‌ای RMSE و همچنین دقت برآورد شده مشاهدات دارد. بنابراین با علم به اینکه افزایش اندازه پنجره مشاهداتی تاثیر قابل توجهی در بهبود دقت ندارد ولی زمان محاسبات مربوط به برآورد وزن مشاهدات را طولانی‌تر می‌نماید، منطقی به نظر می‌رسد که اندازه کوچکتر (پنجره‌ای با اندازه 3×3 سلول) به عنوان پنجره مشاهداتی بهینه انتخاب و مورد استفاده قرار گیرد.

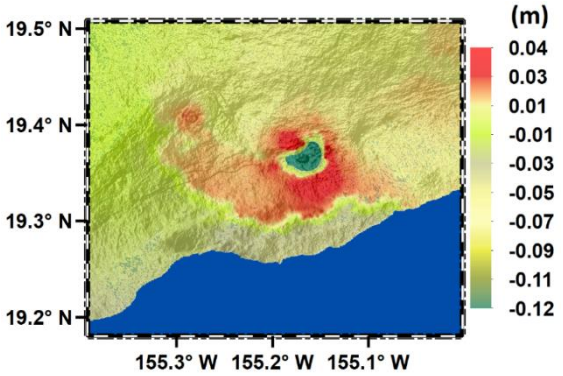
جدول ۲- مقایسه مقادیر RMSE برای سه وضعیت سرشکنی معمولی بدون اعمال وزن، سرشکنی معمولی وزن دار و سرشکنی به روش RLS-VCE در بازیابی میدان جابجایی آتشفشان Kilauea

وضعیت	دقت کلی (متر)	دقت مولفه‌ای (متر)		
		شرقی-غربی	شمالی-جنوبی	ارتفاعی
LS	۰/۰۷۸	۰/۰۴۸	۰/۱۱۹	۰/۰۴۱
WLS	۰/۰۷۶	۰/۰۴۷	۰/۱۱۷	۰/۰۳۷
RLS-VCE	۰/۰۲۶	۰/۰۰۲	۰/۰۲۲	۰/۰۴۰

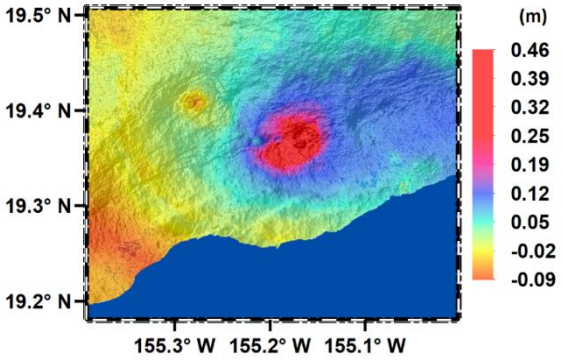
پس از تست نتایج روش RLS-VCE بر روی ۱۹ ایستگاه GNSS و نشان دادن میزان بهبود دقت بازیابی میدان جابجایی سه‌بعدی، با استفاده از این روش میدان‌های جابجایی شرقی-غربی، شمالی-جنوبی و ارتفاعی برای منطقه مطالعاتی محاسبه گردید، که در شکل‌های ۳(a) تا ۳(c) نمایش داده شده است.



شکل (a) ۳- میدان جابجایی شرقی-غربی ناشی از فوران ۱۷ ژوئن کیلاویا



شکل (b) ۳- میدان جابجایی شمالی-جنوبی ناشی از فوران ۱۷ ژوئن کیلاویا



شکل (c) ۳- میدان جابجایی ارتفاعی ناشی از فوران ۱۷ ژوئن کیلاویا

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در تکنیک InSAR جابجایی‌های پوسته زمین مستقیماً در راستای دید ماهواره اندازه‌گیری می‌شوند و به‌طور غیر مستقیم، با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصاویر امکان اندازه‌گیری جابجایی ها در راستای آزیموت ماهواره نیز وجود دارد. این یکی از نقاط ضعف تکنیک InSAR می‌باشد که ممکن است متخصصین را در تفسیر پدیده‌های ژئوفیزیکی و ژئودینامیکی دچار اشتباه نماید. برای درک و تفسیر بهتر مکانیزم پدیده‌های مختلف بهتر است که میدان جابجایی سه‌بعدی این پدیده‌ها، استخراج گردد. بازیابی میدان جابجایی با دو مشکلِ تلفیق مشاهدات با دقت‌های مختلف و بد وضع بودن مسئله برآورد مؤلفه های جابجایی سه‌بعدی مواجه است. برای غلبه بر این دو مشکل در بازیابی میدان جابجایی سه‌بعدی حاصل از InSAR از تلفیق دو روش پایدارسازی تیخونو (TR) و برآورد مؤلفه واریانس کمترین مربعات (LS-VCVE) بهره‌برداری شد. برای بررسی کارائی روش پیشنهادی، داده‌های ژئودتیکی آتشفشان کیلاویا در مجموعه جزایر هاوایی در فوران ۱۷ ژوئن ۲۰۰۷، به عنوان منطقه مطالعاتی، انتخاب گردید. داده‌های ۱۹ ایستگاه GNSS و تصاویر رادار ماهواره‌های Envisat و ALOS در مدارات پایین‌گذر و بالا گذرشان مورد استفاده قرار گرفتند. دقت جابجایی‌های حاصل از ماهواره‌های مورد استفاده، متفاوت می‌باشند و تلفیق این مشاهدات ناهمگون نیاز به برآورد مؤلفه واریانس دارد. از طرفی ماهواره‌های تصویربرداری SAR همگی در مدارات نزدیک قطب هستند و این باعث می‌شود تا ساختار هندسی مسئله بازیابی میدان جابجایی سه‌بعدی ضعیف گردد. استفاده از روش RLS-VCE باعث شد که مقدار RMSE کلی از عدد ۷/۸ سانتیمتر به ۲/۶ سانتیمتر کاهش یابد و این به معنای بهبود ۶۶٪ در دقت نتایج می‌باشد. این میزان بهبود در برآورد همه مؤلفه های مختصاتی بردار سه‌بعدی جابجایی مشهود است، ولی بهبود نزدیک به ۸۰٪ برای مؤلفه شمالی-جنوبی بردار جابجایی بسیار قابل توجه است. این بهبود به‌گونه‌ای است که RMSE مؤلفه شمالی-جنوبی جابجایی را از عدد ۱۱/۷ سانتیمتر در روش مرسوم (بدون LS-VCE و بدون TR) به عدد ۲/۲ سانتیمتر در روش پیشنهادی کاهش داده است.

ضمیمه ۱- ایستگاه‌های GNSS و بردارهای جابجایی آن‌ها ناشی از فوران آتشفشان کیلاویا در بازه زمانی ۲۸ فوریه تا ۱۶ ژوئن ۲۰۰۷

Number	Station	Latitude	Longitude	(m) East	North (m)	Up (m)
1	AHUP	19.3791	-155.2661	-0.0215	-0.0458	0.0172
2	BYRL	19.4120	-155.2600	0.0024	-0.0001	-0.0047
3	GOPM	19.3223	-155.2224	0.03880	-0.3391	0.1225
4	HALR	19.3756	-155.0666	-0.0058	-0.0170	-0.0005
5	HOLE	19.3149	-155.1285	0.1492	0.6149	-0.2894
6	KAEP	19.2809	-155.1214	-0.0091	-0.0112	-0.01600
7	KOSM	19.3633	-155.3165	-0.0063	0.1804	-0.0026
8	KTPM	19.3413	-155.1601	0.0087	-0.0638	-0.0105
9	MANE	19.3391	-155.2733	-0.0088	-0.0485	-0.0003
10	NUPM	19.3847	-155.1753	-0.0012	-0.0253	-0.0059
11	PGF1	19.2933	-155.3101	-0.00112	-0.0096	-0.0075
12	PGF2	19.3232	-155.1941	-0.0727	-0.0435	0.1189
13	PGF3	19.2850	-155.2302	-0.0131	-0.0089	-0.0041
14	PGF3	19.2646	-155.2018	-0.0067	0.0007	-0.0291
15	PGF5	19.2779	-155.2823	-0.0215	-0.0458	0.0172
16	PGF6	19.2486	-155.3233	0.0024	-0.0001	-0.0047
17	PUOC	19.3903	-155.1064	0.0388	-0.3391	0.1225
18	UWEV	19.4209	-155.2911	-0.0058	-0.0170	-0.0005
19	WAOP	19.4221	-155.0811	0.1492	0.6149	-0.2894

مراجع

[1] Michel, R., J.P. Avouac and J. Taboury, Measuring near field coseismic displacements from SAR images: Application to the Landers earthquake. Geophysical Research Letters, 1999. 26(19): p. 3017-3020.

[2] Bechor, N.B. and H.A. Zebker, Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair. Geophysical research letters, 2006. 33: p. 16.

[3] Bechor, N., Extending interferometric synthetic aperture radar measurements from one to two dimensions. 2007: Stanford University.

[4] Fialko, Y., M. Simons and D. Agnew, The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations. Geophys. Res. Lett., 2001. 28: p. 3063-3066.

[5] Funning, G.J., B. Parsons, T.J. Wright, J.A. Jackson and E.J. Fielding, Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) earthquake from Envisat advanced synthetic aperture radar imagery. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2005. 110(B9).

[6] Gudmundsson, S., F. Sigmundsson and J.M. Carstensen, Three-dimensional surface motion maps estimated from combined interferometric synthetic aperture radar and GPS data. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2002. 107(B10).

[7] Samsonov, S. and K. Tiampo, Analytical optimization of a DInSAR and GPS dataset for derivation of three-dimensional surface motion. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006. 3(1): p. 107-111.

[8] Samsonov, S., K. Tiampo, J. Rundle and Z. Li, Application of DInSAR-GPS optimization for derivation of fine-scale surface motion maps of Southern California. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007. 45(2): p. 512-521.

[9] Grandin, R., E. Klein, M. Métois and C. Vigny, Three-dimensional displacement field of the 2015 Mw8. 3 Illapel earthquake (Chile) from across-and along-track Sentinel-1 TOPS interferometry. Geophysical Research Letters, 2016. 43(6): p. 2552-2561.

[10] Samieie-Esfahany, S., R. Hanssen, K. van Thienen-Visser and A. Muntendam-Bos. On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates. in Proceedings of The Fringe 2009 Workshop, Frascati, Italy. 2009.

[11] Aster, R.C., B. Borchers and C.H. Thurber, Parameter estimation and inverse problems. 2013, Elsevier: Academic Press.

[12] Tikhonov, A. Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method. in Soviet Math. Dokl. 1963.

[13] Hansen, P.C., Truncated singular value decomposition solutions to discrete ill-posed problems with ill-determined numerical rank. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1990. 11(3): p. 503-518.

[14] Hansen, P.C., Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve. SIAM review, 1992. 34(4): p. 561-580.

[15] Hansen, P.C., Regularization tools version 4.0 for Matlab 7.3. Numerical algorithms, 2007. 46(2): p. 189-194.

[16] Wahba, G., A Survey of Some Smoothing Problems and the Method of the Generalized Cross-validation for Solving Them. 1976: University of Wisconsin, Department of Statistics.

[17] Arsenin, V.Y. and A. Krianev, Generalized maximum likelihood method and its application for solving ill-posed problems. Ill-posed problems in natural sciences. TVP Science Publishers, Moscow, 1992: p. 3-12.

[18] Xu, P., Y. Shen, Y. Fukuda and Y. Liu, Variance component estimation in linear inverse ill-posed models. Journal of Geodesy, 2006. 80(2): p. 69-81.

[19] Eshagh, M., Sequential Tikhonov regularization: an alternative way for inverting satellite gradiometric data. ZfV, 2011. 136(2): p. 113-121.

[20] Bamler, R. and M. Eineder, Accuracy of differential shift estimation by correlation and split-bandwidth interferometry for wideband and delta-k SAR systems. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005. 2(2): p. 151-155.

[21] Rao, C.R., Estimation of variance and covariance components—MINQUE theory. Journal of multivariate analysis, 1971. 1(3): p. 257-275.

[22] Koch, K.-R., Schätzung von varianzkomponenten. Allgemeine Vermessungs Nachrichten, 1978. 85: p. 264-269.

[23] Koch, K., Maximum likelihood estimate of variance components. Bulletin Gæodésique, 1986. 60(4): p. 329-338.

[24] Teunissen, P. and A. Amiri-Simkooei, Least-squares variance component estimation. Journal of Geodesy, 2008. 82(2): p. 65-82.

[25] Amiri-Simkooei, A., Application of least squares variance component estimation to errors-in-variables models. Journal of Geodesy, 2013. 87(10-12): p. 935-944.

[26] Sjöberg, L., Non-negative variance component estimation in the Gauss-Helmert adjustment model. Manuscripta geodaetica, 1984. 9: p. 247-280.

[27] Moghtased-Azar, K., R. Tehranchi and A.R. Amiri-Simkooei, An alternative method for non-negative estimation of variance components. Journal of Geodesy, 2014. 88(5): p. 427-439.

[28] Amiri-Simkooei, A., Non-negative least-squares variance component estimation with application to GPS time series. Journal of Geodesy, 2016. 90(5): p. 451-466.

[29] Heliker, C. and T.N. Mattox, The First Two Decades of the Pu ‘u ‘O'ö-Küpaianaha. US Geological Survey Professional Paper, 2003. 1676(1676): p. 1.

[30] Gates, A.E. and D. Ritchie, Encyclopedia of earthquakes and volcanoes. 2006: Infobase Publishing.

[31] Poland, M., A. Miklius, T. Orr, J. Sutton, C. Thornber and D. Wilson, New episodes of volcanism at Kilauea Volcano, Hawaii. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2008. 89(5): p. 37-.۳۸

[32] Ferretti, A., A. Monti Guarnieri, C. Prati, F. Rocca and D. Massonnet, INSAR Principles A. 2007: ESA publications.

[33] Ng, A.H.-M., Advanced satellite radar interferometry for ground surface displacement detection. PhD, The University of New South Wales, Sydney, 2010.