نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۱

Vol.10, No.2, Summer 2022

۱۰۵ -۱۱۸

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2]

[DOI: 10.52547/jgit.10.2.105]

برآورد پارامترهای هندسی گسل با استفاده از میدان جابجایی سه‌بعدی حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری(مطالعه موردی: زمین‌لرزه ۱۳۹۶ سرپل ذهاب)

رضا رحیمی پور[۱]، حمید مهرابی[۲*]

۱- کارشناس ارشد ژئودزی – دانشکده عمران و حمل و نقل – دانشگاه اصفهان

۲- استادیار گروه مهندسی نقشه برداری – دانشکده عمران و حمل و نقل – دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۰۳

چکیده

زمین‌لرزه‌ها که عمدتاً در مرز صفحات و روی گسل‌ها رخ می‌دهند، عامل ایجاد خسارت‌های مالی و جانی هستند. مطالعه زلزله‌ها و تغییرشکل زمین، می‌تواند به درک بهتر مکانیزم زلزله‌ها و در نتیجه به مدیریت بحران‌های ناشی از آن کمک کند. یک گسل را می‌توان با هفت پارامتر هندسی مشخص نمود که در تعریف اوکادا این هفت پارامتر شامل: طول، عرض، عمق، امتداد، شیب، پیچ و لغزش می‌باشد. یکی از روش‌های برآورد این پارامترها، استفاده از بردارهای جابجایی حاصل از روش‌های ژئودتیکی سیستم تعیین موقعیت جهانی و تداخل‌سنجی راداری موسوم به *InSAR* می‌باشد. در این پژوهش، با استفاده از پردازش تصاویر راداری ماهواره سنتینل-۱ در مدارات بالاگذر و پائین‌گذر و استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، جابجایی‌های در راستای دید ماهواره (*LOS*) برای زمین‌لرزه ۱۳۹۶ کرمانشاه برآورد شد، سپس با تلفیق جابجائی‌های خط دید ماهواره، مؤلفه‌های میدان جابجائی سه‌بعدی استخراج شدند. با استفاده از حل مسأله معکوس روی جابجائی‌های *LOS* در روش بایزین پارامترهای گسل کور کرمانشاه برآورد گردید. با استفاده از این روش، ۴۱٫۷ کیلومتر طول، ۱۳٫۵ کیلومتر عرض و ۱۴٫۹ کیلومتر عمق قفل-شدگی گسل، ۳۵۰٫۸ درجه آزیموت، ۱۶ درجه شیب و ۲/۹۸ درجه لغزش برای این گسل برآورد شد. سپس از روش کمترین مربعات و مؤلفه-های سه‌بعدی جابجائی برای حل مسأله معکوس استفاده شد تا پارامترهای هندسی گسل برآورد شوند. در این روش مقادیر برای طول، عرض و عمق قفل‌شدگی گسل به ترتیب ۴۵٫۶، ۱۷٫۵ و ۱۹٫۶ کیلومتر و زوایای آزیموت و شیب گسل به ترتیب ۳۵۳، ۱۶٫۹ درجه برآورد شدند. گسل مسبب این زلزله، از نوع گسل معکوس کور می‌باشد. بیشترین لغزش در حدود ۳ متر در راستای عمود به صفحه گسل، تقریباً در عمق ۷ کیلومتری زمین رخ داده است. با توجه به مقایسه نتایج با کاتالوگ‌های زمین‌شناسی، می‌توان گفت که استفاده از مؤلفه‌های سه‌بعدی میدان جابجائی در حل مسئله معکوس، پارامترهای گسل را با دقت بهتری در مقایسه با پارامترهای حاصل شده از جابجائی‌های *LOS* برآورد می‌کند.

کلید واژه‌ها : تداخل‌سنجی راداری، پارامترهای هندسی گسل، حل مسئله معکوس؛ زلزله سرپل ذهاب.

* نویسنده مکاتبه کننده: اصفهان، میدان آزادی، خیابان هزار جریب، دانشگاه اصفهان، دانشکده عمران و حمل و نقل، گروه مهندسی نقشه برداری.

تلفن: ۰۳۱۳۷۹۳۵۲۹۷

Email: h.mehrabi@eng.ui.ac.ir

۱- مقدمه

در ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ ساعت ۱۸:۱۸ زلزله‌ای به بزرگی ۷٫۳ ریشتر در لبه جنوب-غربی ایران، استان کرمانشاه، بوقوع پیوست. موقعیت رو مرکز[۱] این زلزله ۳۴٫۷۹ درجه شمالی و ۴۵٫۸۸ درجه شرقی توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا موسوم به *USGS*[۲] تخمین زده شده است. گسل موجود در منطقه مرزی میان ایران و عراق جزء فعال‌ترین مناطق لرزه‌ای دنیا می‌باشد. کمربند کوهستانی فعال قاره‌ای میان صفحات عربی و اوراسیا می‌باشد و در حال حاضر یک سوم تا نیمی از نرخ همگرایی فعلی را در خود جای می‌دهد[۱]. گسلش‌های تراست[۳] فعال درون زمین، در کمربندهای کوهستانی که درگیر نیروهای کششی و رانشی[۴] بوده بسیار رایج هستند. چنین گسل‌هایی در زیر پوشش رسوبی و در عمق دفن شده‌اند و به ندرت به سطح زمین می‌رسند؛ بنابراین تعیین هندسه دقیق گسل و رابطه بین جابجایی عمیق لرزه‌ای و ساختار تکتونیکی در منطقه بسیار چالش برانگیز می‌باشد و اطلاعاتی مانند اندازه‌گیری‌های لرزه‌ای و ژئودتیکی کمک شایانی به شناسایی و بررسی ماهیت دقیق هندسه گسل می‌کنند[۲ و ۳]. مشاهدات ژئودتیکی مختلفی به منظور بررسی مشخصات گسل مسبب زمین‌لرزه‌های بزرگ در منطقه زاگرس اعمال شده و برخی از محققان بر این باورند که زمین‌لرزه‌های موجود در این منطقه بیشتر در بستر سنگی[۵] رخ می‌دهند[۴]. گسل‌ها با چند پارامتر هندسی و فیزیکی بیان می‌شوند که برای بررسی آن‌ها می‌توان از مدل‌های مختلفی بهره برد. یکی از این مدل‌ها، مدل اوکادا می‌باشد. در مدل مستقیم اوکادا، در صورت معلوم بودن پارامترهای هندسی گسل می‌توان میزان جابجائی سه‌بعدی را محاسبه نمود[۵] ولی در این پژوهش، حل مسأله معکوس[۶] مطرح است. در این مسأله، جابجائی‌های سه‌بعدی مشاهدات در نظر گرفته شده و پارامترهای هندسی گسل برآورد شدند.

مطالعات و پژوهش‌های مختلفی در زمینه حل مسأله معکوس برای برآورد پارامترهای هندسی گسل صورت گرفته است. دلوئیس و همکاران(۲۰۰۲) با کمک داده‌های لرزه‌ای و معکوس سازی مشاهدات تعیین موقعیت جهانی(*GPS*)[۷] و تداخل‌سنجی راداری دریچه مصنوعی(*InSAR*)[۸] پارامترهای گسل مسبب زلزله ۱۹۹۹ ایزمیت ترکیه را برآورد کردند[۶]. پدرسن و همکاران(۲۰۰۳)، با معکوس سازی مشاهدات تداخل-سنجی و تعیین موقعیت، پارامترهای مرجع گسل مسبب دو زلزله ۶٫۵ ریشتر جنوب ایسلند که در سال ۲۰۰۰ رخ داد را برآورد کردند. در این پژوهش اولین بار توزیع لغزش[۹] هم‌لرزه‌ای برای یک گسل تخمین زده شد[۷]. فانینگ و همکاران(۲۰۰۵) با استفاده از تصاویر ماهواره انویست و جابجائی‌های حاصل از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، توزیع لغزش گسل مسبب زلزله بم را برآورد کردند[۸].

پژوهش‌های مختلفی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای، ژئودتیک و سنجش از دوری، زمین‌لرزه کرمانشاه و گسل مسبب آن را مورد بررسی قرار داده‌اند. توانی و همکاران(۲۰۱۸) مشخصات لرزه‌ای دقیقی ارائه کردند و گسل را به صورت یک پارگی در عمق زمین معرفی کردند[۹]. بارنهارت و همکاران(۲۰۱۸)، با استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ میدان جابجائی هم‌لرزه‌ای و

[۱] *Epicenter*
[۲] *U.S. Geological Survey*
[۳] *Thrust*
[۴] *Fold-and-Thrust Belt*
[۵] *Bedrock*
[۶] *Inverse problem*
[۷] *Global Navigation System*
[۸] *Interferometric Synthetic Aperture RADAR(InSAR)*
[۹] *Slip distribution*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2]
[DOI: 10.52547/jgit.10.2.105]

پس‌لرزه[1] را برآورد کردند. بر اساس این پژوهش، زلزله اصلی در عمق حدود ۱۵ کیلومتری رخ داده است[۱]. کوانگ و همکاران(۲۰۱۹) با استفاده از تصاویر راداری ماهواره‌های ایلوس-۲ و سنتینل-۱ جابجائی‌های ناشی از زمین‌لرزه کرمانشاه را برآورد کردند. سپس با استفاده از مشاهدات جابجائی در راستای خط دید ماهواره موسوم به *LOS*[2]، پارامترهای مدل مرجع گسل برآورد شدند. با توجه به نتایج، حداکثر لغزش ۳٫۸ متر محاسبه شد[۱۰]. واجدیان و همکاران(۲۰۱۸) نیز با استفاده از تصاویر راداری ماهواره‌های ایلوس-۲ و سنتینل-۱ و مشاهدات در راستای خط دید ماهواره، جابجائی سه بعدی و میزان زمین‌لغزش ناشی از زلزله سرپل ذهاب را برآورد کردند. سپس با استفاده مؤلفه‌های جابجائی و روش بایزین برای حل مسأله معکوس پارامترهای هندسی گسل را برآورد کردند. که عمق قفل شدگی ۱۸٫۴ کیلومتر، شیب ۱۷٫۵ درجه، امتداد ۳۵۴٫۴ درجه و پیچش ۱۴۱/۵ درجه برآورد شد[۳].

در پژوهش حاضر، با استفاده از چهار جفت داده راداری ماهواره سنتینل-۱ در مدارات بالاگذر[3] و پایین‌گذر[4] و بکارگیری تکنیک تداخل‌سنجی مشاهدات *LOS* برآورد می‌شوند. سپس با تلفیق این تصاویر، میدان جابجائی سه‌بعدی استخراج می‌گردد، سپس جابجائی‌های سه-بعدی بازیابی شده و به‌عنوان ورودی، وارد حل مسأله معکوس می‌شوند و پارامترهای هندسی گسل مسبب زمین‌لرزه به همراه توزیع لغزش آن برآورد می‌شوند.

تکنیک تداخل‌سنجی راداری روشی است که با صرفه جویی در وقت و هزینه، با قدرت تفکیک[5] مکانی و زمانی بالا، تغییر شکل‌های مختلف پوسته زمین را اندازه‌گیری می‌کند. این روش به صورت گسترده‌ای در اندازه‌گیری جابجائی‌های ناشی از بلایای طبیعی همچون زمین‌لرزه، فرونشست و دیگر بلایای مسبب جابجائی استفاده می‌شود. تکنیک *InSAR* با استفاده از اختلاف فاز موجود میان زوج تصویر راداری جابجائی-های پوسته را محاسبه می‌کند[۱۱]. سیستم *SAR*، سیستمی جانب‌نگر می‌باشد که جابجائی‌های پوسته زمین را در راستای دید ماهواره برآورد می‌کند. این بردار، تصویر بردار جابجائی سه‌بعدی بر روی سلول زمینی به سمت ماهواره می‌باشد (شکل(۱))[۱۲].

تصاویر جابجائی حاصل از تکنیک تداخل‌سنجی در راستای دید ماهواره یا *LOS* می‌باشند و به‌دلیل نزدیک به قطبی[6] بودن مدار ماهواره‌های تداخل‌سنجی، حرکت پوسته در راستای شمالی-جنوبی یا راستای آزیموت ماهواره به خوبی قابل اندازه‌گیری نخواهد بود، این درحالی است که تغییر شکل واقعی در یک فضای سه-بعدی رخ می‌دهد و برای آنالیزهای تغییر شکل و درک بهتر ساختار پدیده‌های ژئوفیزیکی و ژئودینامیکی به مؤلفه‌های سه بعدی میدان جابجائی نیاز است[۱۳].

برای بازیابی میدان جابجائی سه‌بعدی می‌توان از روش تلفیق تصاویر جابجائی حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری استفاده کرد. در این روش با استفاده از مقادیر جابجائی در راستای خط دید ماهواره و رابطه(۱) مجهولات این مسأله برآورد می‌شوند[۱۴ و ۱۵]:

رابطه(۱)

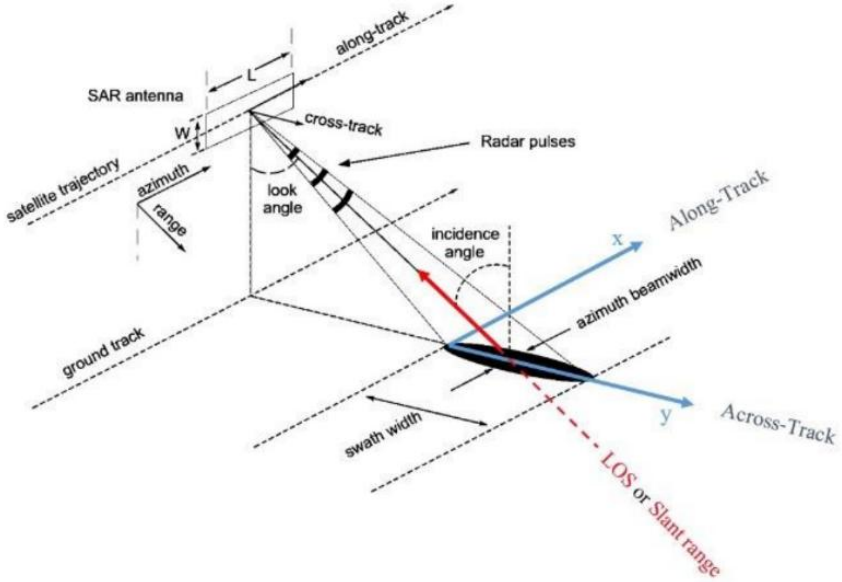
$$[U_n sin\alpha - U_e cos\alpha] sin\lambda + U_u cos\lambda + \delta_{los} = d_{los}$$

در رابطه (۱)، λ زاویه فرود[7]، α آزیموت ماهواره و U_n، U_e و U_u مجهولات مسأله بازیابی میدان جابجائی سه-بعدی که به ترتیب جابجائی در راستای شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و ارتفاعی می‌باشند[۱۵]. برای هر پیکسل، سه مولفه مجهول بردار جابجایی برآورد می‌شود، در

[1] *Post-seismic*
[2] *Line Of Sight*
[3] *Ascending*
[4] *Descending*
[5] *Resolution*
[6] *Near-polar*
[7] *Incidence angle*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2]
[DOI: 10.52547/jgit.10.2.105]

صورت وجود حداقل سه مشاهده جابجایی LOS برای هر پیکسل، درجه آزادی صفر خواهد شد. به‌دلیل نزدیک بودن هندسه‌های تصویربرداری، حل مجهولات میدان جابجائی سه‌بعدی یک مسأله معکوس بد وضع (*Ill-posed*) می‌باشد[۱۶]. بنابراین می‌توان از روش‌های پایدارسازی برای حل این مشکل استفاده کرد.



شکل ۱: هندسه تصویربرداری سیستم روزنه مصنوعی

در پایدارسازی، با اضافه نمودن یک یا چند قید اضافی به تابع هدف و محاسبه و اعمال پارامتر پایدارسازی مجهولات برآورد می‌شوند [۱۷]. افزودن پارامتر پایدارسازی باعث ایجاد بایاس در نتایج پایدارسازی می‌شود. این خطای سیستماتیک هزینه پایدارسازی مسأله می‌باشد و مقدار آن برای پایدارسازی تیخونو به صورت رابطه (۲) محاسبه شده و از بردار مجهولات($\hat{x}_{reg}$) کاسته می‌شود.

رابطه(۲) $$Bias(\hat{x}_{reg}) = -k^2(A^T PA + k^2 I)^{-1}\hat{x}_{reg}$$

در رابطه(۲)، k پارامتر پایدارسازی، P ماتریس وزن و I ماتریس همانی می‌باشد[۱۸].

۲- حل مسأله معکوس

در حل مسأله معکوس، هدف برآورد پارامترهای هندسی گسل(m) با استفاده از داده‌های جابجائی(d) می‌باشد. با معکوس نمودن اطلاعات استخراج شده توسط داده‌های راداری و تکنیک تداخل‌سنجی و استفاده از مدل نیم-فضا الاستیک[۱] اوکادا، هندسه گسل حاصل می‌شود. رابطه (۳)، مسأله مستقیم را نشان می‌دهد که با استفاده از پارامترهای مدل(m) و عملگر G، جابجائی‌ها(d) برآورد می‌شوند.

رابطه(۳) $$d = Gm$$

در حل مسأله معکوس، با در اختیار داشتن مقادیر جابجائی پارامترهای مدل برآورد می‌شوند. در برآورد پارامترهای گسل به روش حل مسأله معکوس، معمولاً از دو روش بایزین[۲] و کمترین مربعات[۳] استفاده می‌شود.

[۱] *Elastic half-space*

[۲] *Bayesian*

[۳] *Least-squares*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2]
[DOI: 10.52547/jgit.10.2.105]

۲-۱- روش بایزین در برآورد پارامترهای گسل

در این روش، هر پارامتری که برآورد می‌شود (مانند لغزش[۱] و پیچ[۲])، به‌عنوان یک متغیر تصادفی به‌همراه یک تابع چگالی احتمال پیشین[۳](*PDF*) شناخته می‌شود که در فرآیند معکوس سازی به‌روز می‌شود. در نهایت یک *PDF* پسین برای پارامترهای مدل نتیجه می‌شود، یک گروه از تمامی مدل‌های ممکن که داده‌ها را پوشش داده و همچنین درک خوبی از عدم قطعیت در پارامترها و کواریانس میان آن‌ها ارائه می‌دهد. این رویکرد کمک می‌کند تا همراه با معکوس سازی، ابرپارامترها[۴] نیز برآورد شوند[۱۹ و ۲۰]. *PDF* پسین با استفاده از تابع درست‌نمایی[۵] حاصل از تئوری بایز ساخته می‌شود. تابع درست‌نمایی تناسب داده‌های محاسبه شده در مدل مستقیم را با مشاهدات توصیف می‌کند. تئوری بایز توسط رابطه (۴) بیان می‌شود.

$$P(m \mid d) = \frac{p(d \mid m)p(m)}{p(d)} \qquad \text{رابطه(۴)}$$

در رابطه(۴)، $p(d|m)$، تابع درست نمایی برای مدل(m) با توجه به مشاهدات(d) بر اساس باقیمانده بین داده‌ها و پیش‌بینی مدل مشاهدات می‌باشد. $p(m)$ اطلاعات اولیه پارامترهای مدل و مخرج رابطه (۴)، ثابت نرمال سازی[۶] برای مدل می‌باشد[۱۹]. طبق این نظریه، گسل به M تعداد پچ[۷] تقسیم شده و بزرگی لغزش و پیچش برای هر یک از این پچها محاسبه می‌شود و با استفاده از توزیع ون کارمن، همبستگی لغزش میان قطعه‌ها[۸] توسط رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$C(r) = \frac{G_H(\frac{r}{a})}{G_H(0)} \qquad \text{رابطه(۵)}$$

در رابطه (۵)، مقدار G_H از فرمول $(r/a)^H K_H(r/a)$ محاسبه می‌شود، که منظور از K، تابع بسل نوع دوم، r فاصله میان پچها، a طول همبستگی و H پارامتر هرست[۹] می‌باشد[۲۱]. ابتدا جابجائی‌ها با مقادیر اولیه برای پارامترهای مدل، با استفاده از مدل اوکادا در نیم-فضای الاستیک برآورد می‌شوند. بدین صورت که با ضرب مدل لغزش s در کرنل G، جابجائی سطح d حاصل می‌شود($d=Gs$). ماتریس G با توجه به مقادیر پیچ در هر تکرار بهنگام می‌شود[۱۹].

نحوه عملکرد روش بایزین به این صورت می‌باشد که ابتدا ماتریس واریانس-کواریانس مشاهدات (Σ_d) تشکیل شده و تابع کواریانس $C(h)$ برآورد می‌شود. سپس با استفاده از $C(h)$ و مقادیر محاسبه شده توسط مدل مستقیم، تابع درست‌نمایی $p(d|m)$ توسط رابطه(۶) محاسبه می‌شود. در ادامه، با استفاده از $p(d|m)$، مقدار $p(m)$ محاسبه می‌شود(رابطه (۷)) و دوباره مدل مستقیم با استفاده از مقادیر جدید برآورد می‌شود($d_{i+1}=Gm_{i+1}$). این حلقه تکرار می‌شود تا مقدار $p(d|m_{i+1})$ از $p(d|m_i)$ بیشتر شود و در نهایت $p(m|d)$، محاسبه می‌شود.

در رابطه(۶)، N تعداد مشاهدات و Σ_δ^{-1} معکوس ماتریس واریانس کواریانس مشاهدات می‌باشد.

در رابطه(۷)، منظور از NM تعداد پارامترهای مدل می‌باشد ($m = [m^1, m^2, \dots, m^{NM}]$)[۱۹ و ۲۲].

رابطه(۶)

$$p(d \mid m) = (2\pi)^{-N/2} \left|\mathring{a}_d\right|^{-1/2} \times exp\left[-\frac{1}{2}(d - Gm)^T \mathring{a}_d^{-1}(d - Gm)\right]$$

$$p(m) = \prod_{j=1}^{NM} p(m^j) \qquad \text{رابطه(۷)}$$

---

[۱] *Slip*

[۲] *Rake*

[۳] *Probability density function(PDF)*

[۴] *Hyperparameters*

[۵] *Likelihood*

[۶] *Normalizing constant*

[۷] *Patch*

[۸] *Patch*

[۹] *hurst*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2]
[DOI: 10.52547/jgit.10.2.105]

۲-۲-روش کمترین مربعات در برآورد پارامترهای گسل

با توجه به رابطه (۳)، پارامترهای مدل را می‌توان به‌عنوان مؤلفه‌های بردار m با ابعاد M و بردار مشاهدات d با ابعاد N به صورت رابطه(۸) در نظر گرفت:

رابطه(۸)

$$d=[d_1,d_2,...,d_N]^T \ , m=[m_1,m_2,...,m_M]^T$$

روش کمترین مربعات را می‌توان به مسأله معکوس خطی تعمیم داد. با ضرب ترانهاده ماتریس G از چپ در رابطه (۳)، به رابطه(۹) خواهیم رسید:

رابطه(۹)

$$G^TGm-G^Td=0$$

عبارت G^TG ماتریس نرمال با ابعاد $M\times M$ می‌باشد، با فرض وجود معکوس برای ماتریس نرمال، پارامترهای مدل به صورت رابطه(۱۰) برآورد می‌شوند[۲۳]:

رابطه(۱۰)

$$m_{est}=[G^TG]^{-1}G^Td$$

معمولاً مسائل معکوس بدوضع[۱] هستند و باید به پایدارسازی[۲] حل مسئله توجه گردد و ممکن است ماتریس نرمال دچار کمبود مرتبه باشد که در این وضعیت بحث معکوس فراگیر[۳] مطرح خواهد شد.

هر مدل(m_i)، سختی[۴] خود را به‌عنوان لاپلاسین مؤلفه لغزش توصیف می‌کند و در راستای فرآیند، این سختی برای مؤلفه لغزش مدل‌ها(S) به کمک رابطه (۱۱) کمینه می‌شود. به‌منظور مشخص نمودن وابستگی‌های مقادیر لغزش هر پیکسل با پیکسل مجاور، عملگر لاپلاسین به ماتریس لغزش اعمال می‌گردد و در این فرآیند، با توجه به جهت و میزان لغزش‌ها، نوع گسل مشخص می‌شود که گسل‌ها شیب لغز(*dip slip*)، امتداد لغز(*strike slip*) و ترکیبی از این دو هستند و در این رابطه، κ پارامتر هموارسازی[۵] می‌باشد.

رابطه(۱۱)

$$d_p=0=\kappa\Delta^2 s$$

با تلفیق دقت مشاهدات و خطاها، ماتریس وزن W تشکیل می‌شود که مؤلفه‌های قطری این ماتریس برابر با $W_{ii}=(W_i)^{0.5}/e_i$ می‌باشند. در ادامه، با به‌کارگیری خطاها و وزن‌دهی، مدل مستقیم به صورت رابطه (۱۲) نوشته می‌شود:

رابطه(۱۲)

$$d=Gm=[W_{ii}d\ \ 0]=[W_{ii}G\ \ \kappa\Delta^2 s]m$$

با استفاده از d و G که شامل ترم‌های هموارسازی و وزن هستند، مدل برآورد به صورت رابطه (۱۳) نوشته می‌شود:

رابطه(۱۳)

$$m_{est}=[G^TG+\varepsilon^2 I]^{-1}G^Td$$

در رابطه(۱۳)، $\varepsilon^2 I$ برابر $d_p=0=\kappa\Delta^2 s$ می‌باشد. در نهایت، مدل برآورد به صورت رابطه (۱۴) نوشته می‌شود[۲۴ و ۲۵]:

رابطه(۱۴)

$$m_{est}=G^{-}d$$

در اکثر مقالات از مشاهدات *LOS* و روش بایزین و المان محدود[۶] استفاده شد و پارامترهای گسل استخراج شدند[۳، ۱۰ و ۲۶]. در این پژوهش، علاوه بر این‌که پارامترهای گسل با استفاده از چهار مشاهدات *LOS* و روش بایزین محاسبه شده‌اند، از مؤلفه‌های سه‌بعدی میدان جابجائی به‌عنوان ورودی در روش کمترین مربعات برای حل مسأله معکوس استفاده می‌شود.

۳- داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

داده‌ها و منطقه مورد مطالعه به شرح زیر می‌باشد.

۳-۱- منطقه مطالعاتی

در این پژوهش، محدوده تحت تأثیر زمین‌لرزه ۲۰۱۷ کرمانشاه منطقه مطالعاتی می‌باشد. شکل (۲) محدوده مطالعاتی و موقعیت زمین‌لرزه رخ داده در این منطقه را نشان می‌دهد.

---

[۱] *Ill-posed problem*

[۲] *Regularization*

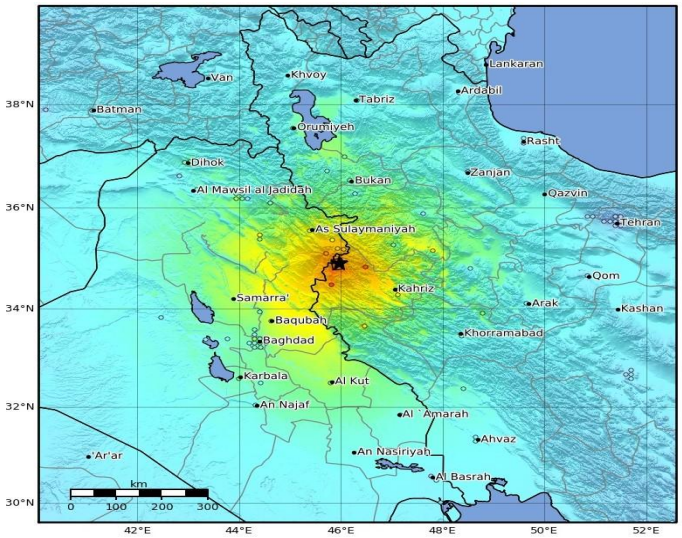
[۳] *Generalized inverse problem*

[۴] *Roughness*

[۵] *Smoothing kernel*

[۶] *Finite element method(FEM)*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2]
[DOI: 10.52547/jgit.10.2.105]



شکل۲: محدوده مطالعاتی، موقعیت زلزله.

۳-۲- داده‌های *SAR*

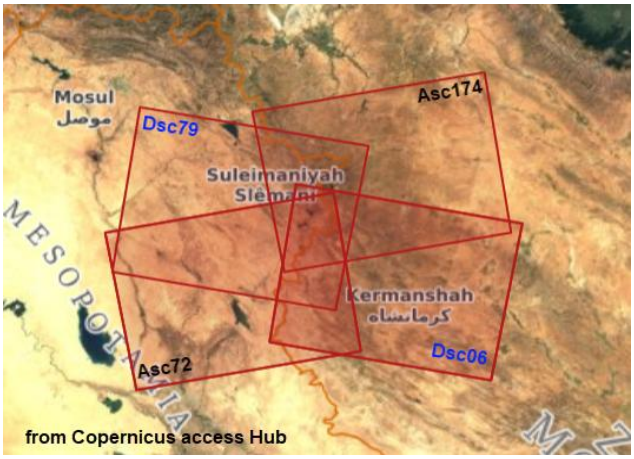
ماهواره سنتینل-۱ در مدارات بالاگذر با زاویه آزیموتی ۳۵۰ درجه و پائین‌گذر با آزیموت ۱۹۰ از محدوده تصویر برداری کرده است. جدول(۱) مسیر، شماره مدار و تاریخ اخذ داده‌های راداری مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. این تصاویر محصولات تداخل-سنجی عریض پهنا (*Interferometric Wide(IW)*)، تک برداشت مختلط (*Complex*) و از نوع دیتاهای مرحله اول می‌باشند. این ماهواره در طول موج ماکروویو و باند-*C* با استفاده از طول موج ۵٫۶ سانتی-متر تصویر برداری می‌کند.

شکل(۳) موقعیت چهار جفت تصویر راداری مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

تاریخ اخذ تصویر	شماره مدار	مسیر ماهواره
۲۰۱۷/۱۱/۰۷	۰۶	پائین‌گذر
۲۰۱۷/۱۱/۱۹		
۲۰۱۷/۱۱/۱۲	۷۹	
۲۰۱۷/۱۱/۱۸		
۲۰۱۷/۱۱/۱۱	۷۲	بالاگذر
۲۰۱۷/۱۱/۱۷		
۲۰۱۷/۱۱/۰۶	۱۷۴	
۲۰۱۷/۱۱/۱۸		

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2]
[DOI: 10.52547/jgit.10.2.105]



شکل۳: موقعیت تصاویر راداری سنتینل در منطقه مطالعاتی.

۴- پردازش و نتایج

اندازه‌گیری‌ها در تکنیک تداخل‌سنجی راداری بر مبنای تولید تداخل‌نما می‌باشد. تداخل‌نماها با استفاده از حداقل دو تصویر اصلی و پیرو تولید می‌شوند. از اثرات و نویزهای موثر در هر پیکسل از تداخل‌نما می‌توان به تاخیر اتمسفری، خطای مداری، خطای بازیابی فاز، خطای باقیماندهی توپوگرافی اشاره نمود. تأخیر اتمسفری همواره به عنوان یکی از منابع اصلی نویز در نتایج تصاویر راداری شناخته می‌شود. در مطالعات انجام شده در راستای حذف این اثر به مدلسازی یونسفر و تروپوسفر پرداخته شده است. یونسفر محیطی تجذیه‌گر دارد و به فرکانس امواج وابسته می‌باشد. به همین دلیل بیشترین تاثیر آن بر باندهای با فرکانس بالاتر همانند L و S می‌باشد. اثر تروپوسفر در تکنیک *InSAR* به روش‌های مختلفی کاهش می‌یابد. در برخی از روش‌ها با استفاده از پشته‌بندی[۱] و میانگین‌گیری سعی در سرشکنی مشاهدات می‌شود. در برخی دیگر با استفاده از مدل‌های تجربی و اتمسفری اقدام به حذف این مولفه می‌شود.[۲۷، ۲۸و۲۹]. تصاویر راداری توسط نرم افزار اسنپ[۲] و طبق روال مرسوم پردازش تصاویر راداری در تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی پردازش و چهار تداخل‌نما[۳] تولید شدند. سپس با استفاده از اطلاعات مداری دقیق[۴]، خطای ماهواره حذف گردید. به منظور برآورد تأخیر تروپوسفری از پشته بندی استفاده شد. به کمک مدل ارتفاعی رقومی موسوم به *DEM*[۵] با رزولوشن یک ثانیه(۳۰ متر)، فاز توپوگرافی حذف شد. برای تولید تصاویر جابجائی، عمل بازیابی فاز[۶] با استفاده از روش آماری جریان هزینه[۷] انجام پذیرفت که در نهایت مقادیر جابجائی *LOS* در مدارات بالاگذر و پائین‌گذر ماهواره سنتینل-۱ برای منطقه زمین‌لرزه سرپل ذهاب استخراج شدند. با توجه به وجود چهار زوج تصویر راداری ماهواره سنتینل-۱، چهار تصویر جابجائی *LOS* حاصل شد که در شکل (۴-الف) تا (۴-د) تصاویر جابجائی بازیابی شده نمایش داده می‌شوند.

در این پژوهش با استفاده از تلفیق چهار تصاویر جابجائی *LOS* و رابطه (۱)، مؤلفه‌های میدان جابجائی

[۱] *Stacking*

[۲] *SNAP*

[۳] *Interferogram*

[۴] *Precise ephemeris*

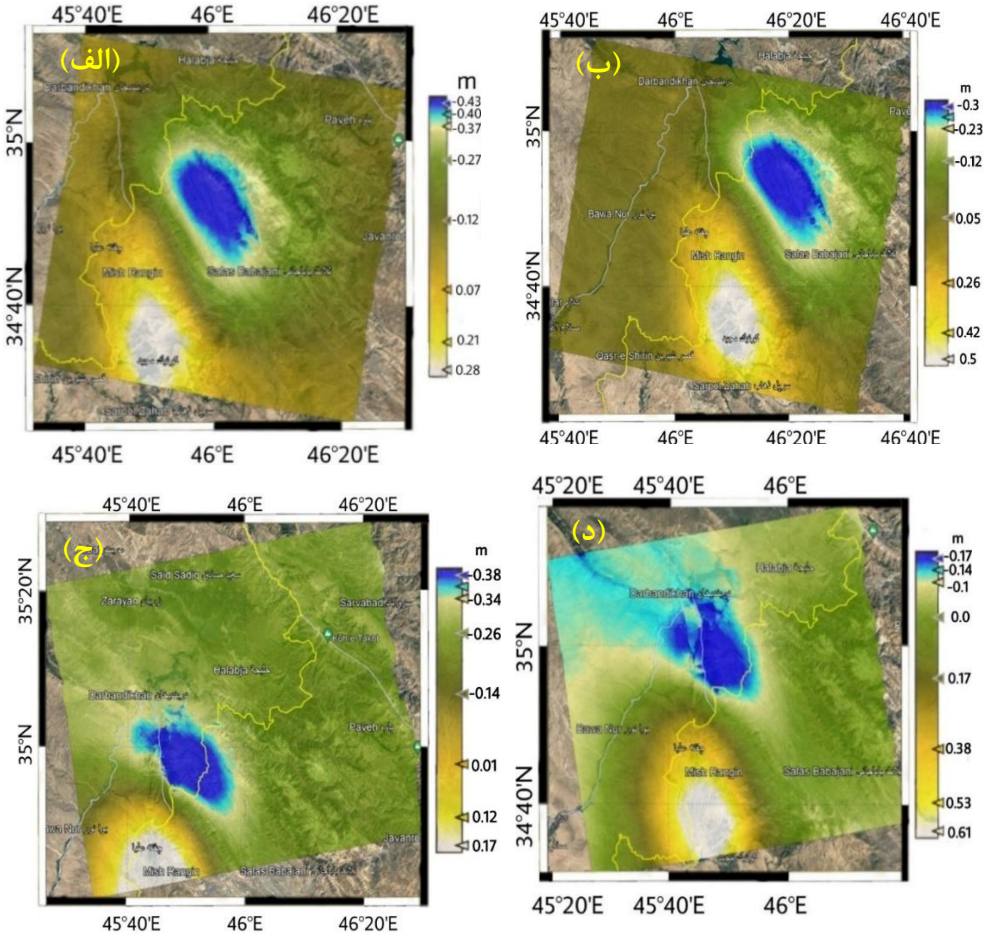
[۵] *Digital Elevation Model(DEM)*

[۶] *Phase Unwrapping*

[۷] *Statistical cost-flow*

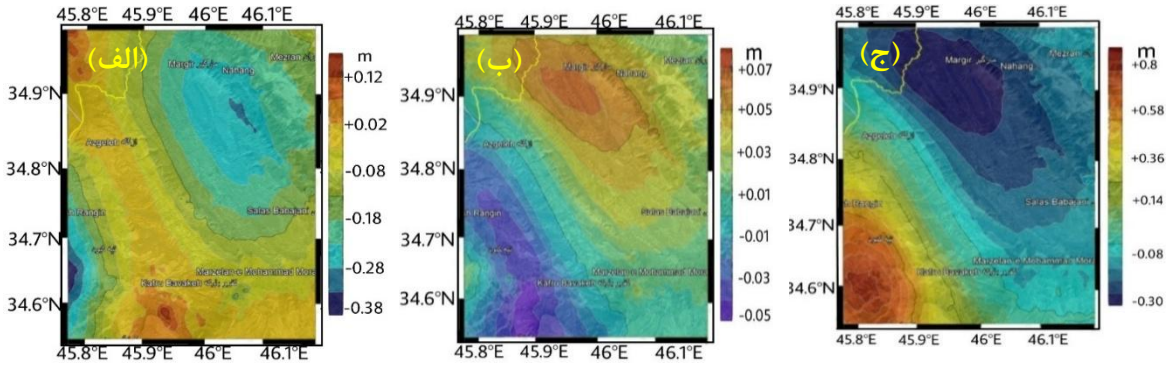
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2]
[DOI: 10.52547/jgit.10.2.105]

سه‌بعدی بازیابی شدند و با استفاده از روش *GCV* برای تعیین پارامتر پایدارسازی و از روش تیخونو (*Tikhonov regularization*) به منظور پایدارسازی مسأله استفاده شد. شکل (۵-الف)، (۵-ب) و (۵-ج)، تصاویر جابجائی در سه راستای شرقی-غربی، شمالی-جنوبی و ارتفاعی می‌باشد. این سه تصویر جابجائی واقعی پوسته زمین ناشی از زمین‌لرزه کرمانشاه را نمایش می‌دهند. با توجه به اشکال (۵-الف) تا (۵-ج)، در منطقه‌ای به نام مارگیر، با مختصات $34/9^{\circ}$ شمالی و $46/1^{\circ}$ شرقی، حدود ۳۸ سانتی‌متر جابجائی در راستای غربی و ۷ سانتی‌متر جابجائی در راستای شمالی رخ داده است. در مختصات $34/6^{\circ}$ درجه شمالی و $45/8^{\circ}$ درجه شرقی، نزدیک منطقه تپه کبود، ۵ سانتی‌متر جابجائی در راستای جنوبی و ۸۰ سانتی‌متر بالا آمدگی رخ داده است. برای بررسی صحت جابجائی‌های برآورد شده، این مقادیر با جابجائی‌های برآورد شده توسط واجدیان و همکاران بررسی شد[۳]. برای حذف ترند از نتایج میدان جابجائی *InSAR* نیاز به مقایسه نتایج با سایر روش‌های ژئودتیکی نظیر مشاهدات *GPS* می‌باشد که متأسفانه در منطقه مورد مطالعه، ایستگاه *GPS* وجود نداشت (نزدیک‌ترین ایستگاه *GPS* در مرکز استان کرمانشاه می‌باشد و فاصله زیادی تا جابجایی‌های رخ داده دارد).



شکل۴: (الف) میدان جابجائی در راستای خط دید ماهواره در مدار پائین‌گذر مسیر ۶، (ب) میدان جابجائی در راستای خط دید ماهواره در مدار پایین‌گذر مسیر ۷۹، (ج) میدان جابجائی در راستای خط دید ماهواره در مدار بالاگذر مسیر ۷۲ و (د) میدان جابجائی در راستای خط دید ماهواره در مدار بالاگذر مسیر ۱۷۴

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2]
[DOI: 10.52547/jgit.10.2.105]



شکل ۵- (الف) مؤلفه میدان جابجائی در راستای شرقی-غربی، (ب) مؤلفه میدان جابجائی در راستای شمالی-جنوبی و (ج) مؤلفه میدان جابجائی در راستای شرقی-غربی

به‌همین دلیل، انحراف معیار این جابجائی‌ها محاسبه و در جدول(۲) نمایش داده شد که مشخص شد که عدم قطعیت محاسبات میدان جابجائی سه‌بعدی در این پژوهش برای دو مؤلفه ارتفاعی و شرقی-غربی در حد میلی‌متر و برای مؤلفه شمالی-جنوبی در حد سانتی‌متر می‌باشد. با توجه به دقت برآورد برای مؤلفه جابجائی در راستای شمالی-جنوبی، نتیجه گرفته می‌شود که مقادیر حاصل شده برای این مؤلفه صحت کافی را ندارد.

در نهایت با استفاده از دو روش بایزین و کمترین مربعات برای حل مسأله معکوس، پارامترهای هندسی گسل مسبب زمین‌لرزه ۲۰۱۷ کرمانشاه و توزیع لغزش این گسل برآورد شدند. در حل مسأله معکوس به روش بایزین، جابجائی‌های *LOS* ورودی مسأله هستند و در روش کمترین مربعات، مؤلفه‌های سه‌بعدی جابجائی به‌عنوان ورودی مسأله می‌باشند. جدول(۳) پارامترهای گسل برآورد شده توسط دو روش مذکور را نشان می‌دهد. پارامترهای گسل با استفاده از چهار مشاهده جابجائی *LOS* و تقسیم سطح گسل به ۱۴۰ قطعه و با روش بایزین برآورد شد (جدول ۳)، سپس میزان لغزش برای هر یک از پچ‌ها برآورد گردید (شکل (۷)). جدول(۴) پارامترهای گسل مسبب زمین‌لرزه سرپل ذهاب را نشان می‌دهد که توسط *USGS* و *GCMT* با استفاده از داده‌های لرزه‌شناسی و ژئوفیزیکی محاسبه شده‌اند. در جدول(۴) پارامترهای برآورد شده توسط پژوهش‌های مختلف نیز آورده شد.

جدول ۲: میانگین انحراف معیار برای هر مؤلفه جابجایی

مؤلفه	شمالی-جنوبی (متر)	شرقی-غربی (متر)	ارتفاعی (متر)
Mean(σ)	۰٫۰۸۱۹	۰٫۰۰۲۹	۰٫۰۱۱۵

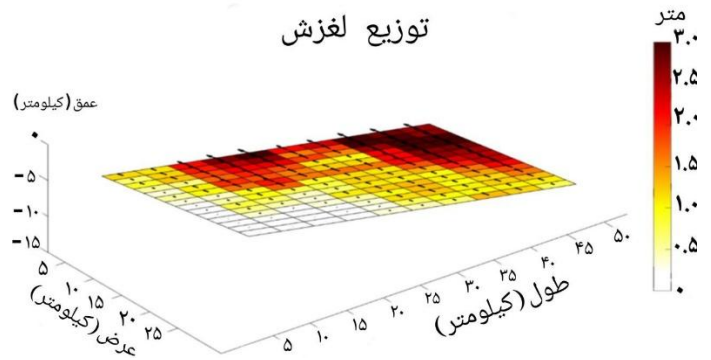
جدول ۳: پارامترهای هندسی گسل مسبب زلزله ۲۰۱۷ کرمانشاه برآورد شده

روش	طول(*km*)	عرض(*km*)	عمق(*km*)	آزیموت°	شیب°	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	پیچ°	لغزش°
Bayesian (Asc&Dsc)	۴۱٫۷	۱۳٫۵	۱۴٫۹	۳۵۰٫۸	۱۶	۳۴٫۷۴	۴۵٫۸۵	۱۳۵٫۲	۲٫۹۸
Least-Squares	۴۵٫۶	۱۷٫۵	۱۹٫۶	۳۵۳٫۵	۱۶٫۹	۳۴٫۷۷	۴۵٫۸۰	۱۳۷٫۷	۳٫۰۱

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2]
[DOI: 10.52547/jgit.10.2.105]

جدول ۴: پارامترهای هندسی گسل مسبب زلزله ۲۰۱۷ کرمانشاه، برآورد شده توسط سازمان‌ها و پژوهش‌های مختلف

منبع	طول(*km*)	عرض(*km*)	عمق(*km*)	آزیموت°	شیب°	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	پیچ°	لغزش°
USGS	۴۵٫۵	۱۶٫۹	۱۹	۳۵۱٫۱۲	۱۰	۳۴٫۷۹	۴۵٫۸۸	۱۳۷٫۴۴	~۳
Global CMT	۴۰٫۸	۱۴٫۶	۱۸	۳۵۱	۱۶٫۳۸	۳۴٫۷۹	۴۵٫۸۴	۱۳۴٫۸	~۳
Vajedian et al., (2018)	۳۸٫۵	۱۸٫۷	۱۸٫۷	۳۵۴٫۴	۱۷٫۵	۳۴٫۸۶	۴۵٫۶۴	۱۴۱٫۵	۴/۵
Kuang et al., (2019)	۴۰٫۵	۲۰٫۲	۱۱٫۴	۳۵۳٫۷	۱۶٫۶	۳۴٫۷۳	۴۵٫۸۶	۱۳۸٫۴	۳/۱۴



شکل۷: توزیع لغزش گسل

با توجه به رابطه میانگین مربع خطاها (*RMSE*) و محاسبه مقدار آن برای پارامترهای گسل توسط دو روش ذکر شده و مقایسه با *RMSE* پارامترهای ارائه شده توسط پژوهش‌های دیگر، نتیجه گرفته می‌شود که استفاده از مؤلفه‌های سه‌بعدی میدان جابجائی برای حل مسأله معکوس روش بهتری نسبت به استفاده از جابجائی‌های *LOS* برای حل این مسأله می‌باشد و نتایج دقیق‌تری حاصل می‌شود. مقادیر *RMSE* در جدول(۵) نمایش داده می‌شوند.

جدول ۵: میانگین انحراف معیار برای هر مؤلفه جابجایی

مؤلفه	*RMSE_LOS*	*RMSE_3D*	*RMSE*_واجدبان
طول(کیلومتر)	۳٫۸	۰٫۱	۷
عرض(کیلومتر)	۳٫۴	۰٫۶	۲٫۳
عمق(کیلومتر)	۴٫۱	۰٫۶	۱
آزیموت(درجه)	۰٫۳۲	۲٫۳۸	۰٫۱۲
شیب(درجه)	۶	۶٫۹	۶٫۳۸
پیچش(درجه)	۲٫۲۴	۰٫۲۶	۲٫۶۴
لغزش(درجه)	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2]
[DOI: 10.52547/jgit.10.2.105]

۵- بحث و نتیجه‌گیری

امروزه تکنیک تداخل‌سنجی راداری به روشی قدرتمند برای بررسی فعل و انفعالات پوسته زمین تبدیل شده است. با استفاده از این روش می‌توان جابجائی‌های رخ داده بر روی پوسته زمین ناشی از بلایای طبیعی را محاسبه نمود. این تکنیک جابجائی‌ها را در یک بعد و راستای دید ماهواره اندازه‌گیری می‌کند که یک ضعف برای این روش به حساب می‌آید و برای مطالعات دقیق‌تر جابجائی‌های پوسته کافی نیستند. برای تفسیر و درک بهتر مکانیزم پدیده‌های مختلف ژئوفیزیکی و ژئودینامیکی می‌توان مؤلفه‌های سه‌بعدی میدان جابجائی را محاسبه کرد. گسل‌ها از اصلی‌ترین عوامل رخ دادن زلزله هستند و مطالعه گسل‌ها کمک شایانی به تفسیر زلزله‌های و مدیریت بهتر بحران می‌کند. با استفاده از هفت پارامتر هندسی، یک گسل مشخص می‌شود که می‌توان با استفاده از جابجائی‌های حاصل از روش تداخل‌سنجی و حل مسأله معکوس، پارامترهای هندسی گسل را برآورد کرد. در این پژوهش، از چهار جفت تصاویر راداری ماهواره سنتینل-۱ و تکنیک تداخل‌سنجی استفاده شد و جابجائی‌های *LOS* تولید شدند. سپس با تلفیق این تصاویر، میدان جابجائی سه‌بعدی برای این زلزله استخراج شد. در ادامه، از جابجائی‌های *LOS* به‌عنوان ورودی روش بایزین برای حل مسأله معکوس استفاده شد و پارامترهای هندسی گسل برآورد شدند. در این روش مقادیر برای طول، عرض و عمق قفل‌شدگی گسل به ترتیب ۴۱٫۷، ۱۳٫۵ و ۱۴٫۹ کیلومتر و زوایای آزیموت، شیب و لغزش به ترتیب ۳۵۰٫۸، ۱۶ و ۲٫۹۸ درجه برآورد شدند. سپس از مؤلفه‌های سه بعدی جابجائی به‌عنوان ورودی روش کمترین مربعات برای حل مسأله معکوس استفاده شد و پارامترهای هندسی گسل مسبب این زمین‌لرزه برآورد شدند. بر اساس این روش، مقادیر برای طول، عرض و عمق گسل قفل شدگی به ترتیب ۴۵٫۶، ۱۷٫۵ و ۱۹٫۶ کیلومتر و زوایای آزیموت، شیب و لغزش به ترتیب ۳۵۳٫۵، ۱۶٫۹ و ۳٫۰۱ درجه برآورد شدند. با توجه به پارامترهای برآورد شده، گسل مسبب زلزله سرپل ذهاب یک گسل کور معکوس می‌باشد. با توجه به بررسی آماری نتایج و مقایسه پارامترهای برآورد شده با کاتالوگ‌های زمین‌شناسی موجود می‌توان نتیجه گرفت که حل مسأله معکوس برای برآورد پارامترهای هندسی گسل با استفاده از مؤلفه‌های سه‌بعدی جابجائی، نتایج دقیق‌تری حاصل می‌شود. مطالعه توزیع لغزش گسل با استفاده از پارامترهای هندسی برآورد شده نقش مهمی در بررسی انتقال لرزه‌خیزی از یک گسل به گسل های دیگر دارد. بنابراین مطالعات ژئوفیزیکی و اندرکنش مکانیکی میان شاخه‌های مختلف گسل جهت تحلیل خطرات لرزه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است و می‌توان آن‌را در پژوهش‌های بعدی مورد بررسی قرار داد.

مراجع

[1] W. D. Barnhart, C. M. Brengman, S. Li, and K. E. Peterson, "Ramp-flat basement structures of the Zagros Mountains inferred from co-seismic slip and afterslip of the 2017 Mw7. 3 Darbandikhan, Iran/Iraq earthquake," Earth and Planetary Science Letters, vol. 496, pp. 96-107, 2018.

[2] J. Jackson and T. Fitch, "Basement faulting and the focal depths of the larger earthquakes in the Zagros mountains (Iran)," Geophysical Journal International, vol. 64, no. 3, pp. 561-586, 1981, doi: 10.1111/j.1365-246X.1981.tb02685.x.

[3] S. Vajedian et al., "Coseismic deformation field of the Mw 7.3 12 November 2017 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake: A decoupling horizon in the northern Zagros Mountains inferred from InSAR observations," Remote Sensing, vol. 10, no. 10, p. 1589, 2018.

[4] F. Yaminifard, M. H. Sedghi, A. Gholamzadeh, M. Tatar, and K. Hessami, "Active faulting of the southeastern-most Zagros (Iran): Microearthquake seismicity and crustal structure," Journal of Geodynamics, vol. 55, pp. 56-65,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2]
[DOI: 10.52547/jgit.10.2.105]

2012/04/01/ 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.01.003.

[5] Y. Okada, "Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space," Bulletin of the seismological society of America, vol. 82, no. 2, pp. 1018-1040, 1992.

[6] B. Delouis, D. Giardini, P. Lundgren, and J. Salichon, "Joint inversion of InSAR, GPS, teleseismic, and strong-motion data for the spatial and temporal distribution of earthquake slip: Application to the 1999 Izmit mainshock," Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 92, no. 1, pp. 278-299, 2002.

[7] R. Pedersen, S. Jónsson, T. Árnadóttir, F. Sigmundsson, and K. L. Feigl, "Fault slip distribution of two June 2000 Mw6. 5 earthquakes in South Iceland estimated from joint inversion of InSAR and GPS measurements," Earth and Planetary Science Letters, vol. 213, no. 3-4, pp. 487-502, 2003.

[8] G. J. Funning, 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, vol. 110, no. B9, 2005.

[9] S. Tavani et al., "The seismogenic fault system of the 2017 M w 7.3 Iran–Iraq earthquake: constraints from surface and subsurface data, cross-section balancing, and restoration," Solid Earth, vol. 9, no. 3, pp. 821-831, 2018.

[10] J. Kuang et al., "Coseismic deformation and source model of the 12 November 2017 MW 7.3 Kermanshah Earthquake (Iran–Iraq border) investigated through DInSAR measurements," International journal of remote sensing, vol. 40, no. 2, pp. 532-554, 2019.

[11] Y. Maghsoudi, Remote Sensing. K. N. TOOSI, 2019.

[12] H. Mehrabi, B. Voosoghi, M. Motagh, and R. F. Hanssen, "Three-dimensional displacement fields from InSAR through Tikhonov regularization and least-squares variance component estimation," Journal of Surveying Engineering, vol. 145, no. 4, p. 04019011, 2019.

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

[14] Mehrabi, "Three-dimensional displacement fields from InSAR through Tikhonov regularization and least-squares variance component estimation," Journal of Geomatics Science And Technology, vol. 9, no. 1 #a00641, pp. -, 2019. [Online]. Available: https://www.sid.ir/fa/JOURNAL/ViewPaper.aspx?id=485705.

[15] Y. Fialko, M. Simons, and D. Agnew, "The complete (3 - D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw7. 1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations," Geophysical research letters, vol. 28, no. 16, pp. 3063-3066, 2001.

[16] H. Mehrabi, "Three-dimensional strain descriptors at the Earth's surface through 3D retrieved co-event displacement fields of differential interferometric synthetic aperture radar," Journal of Geodesy, vol. 95, no. 4, pp. 1-16, 2021.

[17] G. H. Golub, P. C. Hansen, and D. P. O'Leary, "Tikhonov regularization and total least squares," SIAM journal on matrix analysis and applications, vol. 21, no. 1, pp. 185-194, 1999.

[18] P. Xu, Y. Shen, Y. Fukuda, and Y. Liu, "Variance component estimation in linear inverse ill-posed models," Journal of Geodesy, vol. 80, no. 2, pp. 69-81, 2006.

[19] M. Bagnardi and A. Hooper, "Inversion of Surface Deformation Data for Rapid Estimates of Source Parameters and Uncertainties: A Bayesian Approach,"

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2]
[DOI: 10.52547/jgit.10.2.105]

Geochemistry, Geophysics, Geosystems, vol. 19, no. 7, pp. 2194-2211, 2018, doi: https://doi.org/10.1029/2018GC007585.

[20] S. Minson, M. Simons, and J. Beck, "Bayesian inversion for finite fault earthquake source models I—Theory and algorithm," Geophysical Journal International, vol. 194, no. 3, pp. 1701-1726, 2013.

[21] P. M. Mai and G. C. Beroza, "A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip," Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol. 107, no. B11, pp. ESE 10-1-ESE 10-21, 2002.

[22] M. Bagnardi and A. J. Hooper, "GBIS (Geodetic Bayesian Inversion Software): Rapid inversion of InSAR and GNSS data to estimate surface deformation source parameters and uncertainties," in AGU Fall Meeting Abstracts, 2017, vol. 2017, pp. G23A-0881.

[23] W. Menke, Geophysical data analysis: Discrete inverse theory. Academic press, 2018.

[24] R. C. Aster, B. Borchers, and C. H. Thurber, Parameter estimation and inverse problems. Elsevier, 2018.

[25] J. C. Santamarina and D. Fratta, Discrete signals and inverse problems: an introduction for engineers and scientists. John Wiley & Sons, 2005.

[26] M. Amighpey, B. Voosoghi, and M. Motagh, "Deformation and fault parameters of the 2005 Qeshm earthquake in Iran revisited: A Bayesian simulated annealing approach applied to the inversion of space geodetic data," International journal of applied earth observation and geoinformation, vol. 26, pp. 184-192, 2014.

[27] R. F. Hanssen, Radar interferometry: data interpretation and error analysis. Springer Science & Business Media, 2001.

[28] F. Meyer, B. Kampes, R. Bamler, and J. Fischer, Methods for Atmospheric Correction in INSAR Data. 2006.

[29] L. K. Bui, "Small baseline subset InSAR data processing: design of interferogram networks and noise analysis in InSAR-derived deformation time series," Curtin University, 2021.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2]
[DOI: 10.52547/jgit.10.2.105]

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

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.10, No.2, Summer 2022

Research Paper

Estimation of source parameters of fault through InSAR observation (Case study: 2017 Sarpol-e zahab earthquake)

Reza Rahimipour [1], Hamid Mehrabi [2*]

1- Ms.c student of Geodesy in Department of Transportation, University of Isfahan
2- Assistant professor in Department of Transportation, University of Isfahan

Abstract

Earthquakes occur at the border of the plates and faults, causing financial and human losses. The study of the earthquakes and the surface deformation is useful in understanding the mechanism of earthquakes and accordingly managing the risks and crises of earthquakes. A fault can be specified by 7 geometric source parameters. In Okada's definition, these parameters are length, width, depth, strike, dip, rake, and slip. One of the methods to estimate these parameters is the displacement vectors derived from geodetic techniques such as GPS and InSAR. In this study, the LOS displacement of the 2017 Sarpol-e Zahab earthquake is estimated through the InSAR technique and Sentinel-1A/B images. The 3-dimensional displacement field is retrieved by combining LOS displacements. The source parameters of blind reverse fault are estimated by applying Bayesian inversion on LOS displacement. Then the geometric source parameters are estimated by applying the least square and the 3D displacement components. According to the results, the maximum of 3 meters slip perpendicular to the fault plane is detected approximately at the 7 kilometers depth. A comparison of the estimated parameters through LOS and 3D displacement fields and geological catalogs indicated that the estimated parameters through 3D displacement are more accurate than LOS parameters.

Key words : *SAR Interferometry, Bayesian inversion, Sarpol-e zahab earthquake, Fault source parameters.*

Correspondence Address*: Faculty of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.*
Tel*: : +98 31 37935297.*
Email : *h.mehrabi@eng.ui.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2]
[DOI: 10.52547/jgit.10.2.105]