

## برآورد پارامترهای هندسی گسل با استفاده از میدان جابجایی سه بعدی حاصل از روش تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: زمین لرزه ۱۳۹۶ سرپل ذهاب)

رضا رحیمی پور<sup>۱</sup>، حمید مهربانی<sup>۲\*</sup>

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

زمین لرزه‌ها که عمدتاً در مرز صفحات و روی گسل‌ها رخ می‌دهند، عامل ایجاد خسارت‌های مالی و جانی هستند. مطالعه زلزله‌ها و تغییر شکل 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 تداخل سنجی 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 تداخل سنجی راداری، جابجایی‌های در راستای دید ماهواره (*LOS*) برای زمین لرزه ۱۳۹۶ کرمانشاه برآورد شد، سپس با تلفیق جابجایی‌های خط دید ماهواره، مؤلفه‌های میدان جابجایی سه بعدی استخراج شدند. با استفاده از حل مسئله معکوس روی جابجایی‌های *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 سه بعدی جابجایی برای حل مسئله 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 سه بعدی میدان جابجایی در حل مسئله معکوس، پارامترهای گسل را با دقت بهتری در مقایسه با پارامترهای حاصل شده از جابجایی‌های *LOS* برآورد می‌کند.

کلید واژه‌ها: تداخل سنجی 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: ۰۲۱۳۷۹۳۵۲۹۷

## ۱- مقدمه

صورت معلوم بودن پارامترهای هندسی گسل می‌تواند میزان جابجائی سه‌بعدی را محاسبه نمود [۵] ولی در این پژوهش، حل مسأله معکوس<sup>۶</sup> 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. دلوثیس و همکاران (۲۰۰۲) با کمک داده‌های لرزه‌ای و معکوس سازی مشاهدات تعیین موقعیت جهانی (GPS)<sup>۷</sup> و تداخل‌سنجی راداری دریاچه مصنوعی (InSAR)<sup>۸</sup> 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<sup>۹</sup> 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

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<sup>۱</sup> این زلزله ۳۴/۷۹ درجه شمالی و ۴۵/۸۸ درجه شرقی توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا موسوم به USGS<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup> فعال درون زمین، در کمربندهای کوهستانی که درگیر نیروهای کششی و رانشی<sup>۴</sup> 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<sup>۵</sup> 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

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

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 (۱۱)) [۱۲].

تصاویر جابجائی حاصل از تکنیک تداخل‌سنجی در راستای دید ماهواره یا *LOS* می‌باشند و به دلیل نزدیک به قطبی 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 مسئله 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)،  $\lambda$  زاویه فرود<sup>۷</sup>،  $\alpha$  آزیموت ماهواره و  $U_n$ ،  $U_u$  و  $U_e$  مجهولات مسئله 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

پس‌لرزه<sup>۱</sup> 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*<sup>۲</sup>، 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 پیشش ۱۴۱/۵ درجه برآورد شد [۳].

در پژوهش حاضر، با استفاده از چهار جفت داده راداری ماهواره سنتینل-۱ در مدارات بالاگذر<sup>۳</sup> و پایین‌گذر<sup>۴</sup> 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<sup>۵</sup> مکانی و زمانی بالا، تغییر شکل‌های مختلف پوسته زمین را

<sup>۱</sup> Post-seismic

<sup>۲</sup> Line Of Sight

<sup>۳</sup> Ascending

<sup>۴</sup> Descending

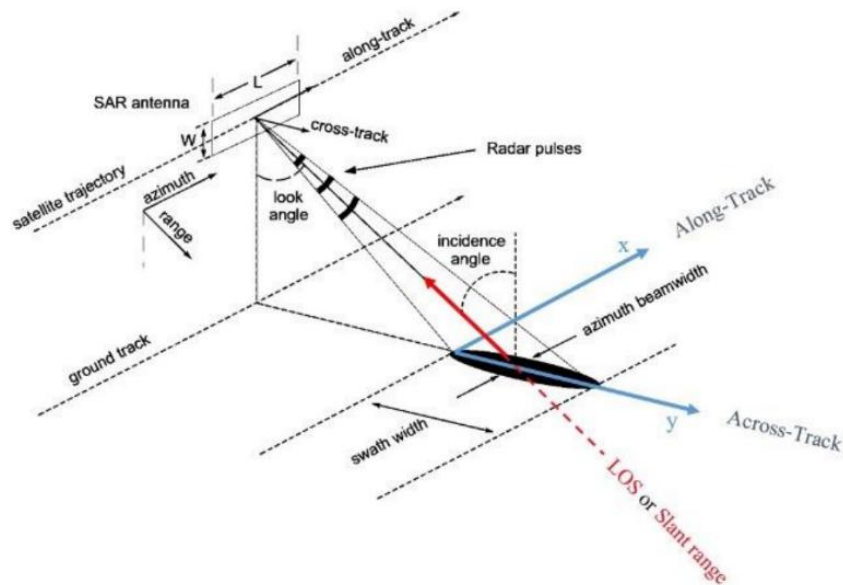
<sup>۵</sup> Resolution

<sup>۶</sup> Near-polar

<sup>۷</sup> Incidence angle

میدان جابجائی سه بعدی یک مسأله معکوس بد وضع ( *Ill-posed* ) می باشد [۱۶]. بنابراین می توان از روش های پایدارسازی برای حل این مشکل استفاده کرد.

صورت وجود حداقل سه مشاهده جابجایی *LOS* برای هر پیکسل، درجه آزادی صفر خواهد شد. به دلیل نزدیک بودن هندسه های تصویربرداری، حل مجهولات



شکل ۱: هندسه تصویربرداری سیستم روزنه مصنوعی

استفاده از مدل نیم-فضا الاستیک<sup>۱</sup> اوکادا، هندسه گسل حاصل می شود. رابطه (۳)، مسأله مستقیم را نشان می دهد که با استفاده از پارامترهای مدل ( $m$ ) و عملگر  $G$ ، جابجائی ها ( $d$ ) برآورد می شوند.

$$d = Gm \quad \text{رابطه (۳)}$$

در حل مسأله معکوس، با در اختیار داشتن مقادیر جابجائی پارامترهای مدل برآورد می شوند. در برآورد پارامترهای گسل به روش حل مسأله معکوس، معمولاً از دو روش بایزین<sup>۲</sup> و کمترین مربعات<sup>۳</sup> استفاده می شود.

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

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

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

## ۲- حل مسأله معکوس

در حل مسأله معکوس، هدف برآورد پارامترهای هندسی گسل ( $m$ ) با استفاده از داده های جابجائی ( $d$ ) می باشد. با معکوس نمودن اطلاعات استخراج شده توسط داده های راداری و تکنیک تداخل سنجی و

<sup>۱</sup> Elastic half-space

<sup>۲</sup> Bayesian

<sup>۳</sup> Least-squares

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

در رابطه (۵)، مقیدار  $G_H$  از فرمول  
 $K_H(r/a)^H$  محاسبه می‌شود، که منظور از  
 $K$ ، تابع بسل نوع دوم،  $r$  فاصله میان پچ‌ها،  $a$  طول  
 همبستگی و  $H$  پارامتر هرست<sup>۹</sup> 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 ( $\Sigma_d$ )  
 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  $\Sigma_d^{-1}$  معکوس  
 ماتریس واریانس کواریانس مشاهدات می‌باشد.  
 در رابطه (۷)، منظور از  $NM$  تعداد پارامترهای مدل می-  
 باشد ( $m = [m^1, m^2, \dots, m^{NM}]$ ) [۱۹ و ۲۲].

رابطه (۶)

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

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

<sup>۹</sup> hurst

## ۲-۱- روش بایزین در برآورد پارامترهای گسل

در این روش، هر پارامتری که برآورد می‌شود (مانند  
 لغزش<sup>۱</sup> و پیچ<sup>۲</sup>)، به‌عنوان یک متغیر تصادفی به‌همراه  
 یک تابع چگالی احتمال پیشین<sup>۳</sup> ( $PDF$ ) شناخته می-  
 شود 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<sup>۴</sup> نیز برآورد شوند [۱۹ و ۲۰].  $PDF$  پسین  
 با استفاده از تابع درست‌نمایی<sup>۵</sup> 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.

$$p(m/d) = \frac{p(d/m)p(m)}{p(d)} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه (۴)،  $p(d/m)$  تابع درست‌نمایی 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<sup>۶</sup> برای مدل می‌باشد [۱۹]. طبق این نظریه، گسل  
 به  $M$  تعداد پچ<sup>۷</sup> 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<sup>۸</sup>  
 توسط رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

<sup>۱</sup> Slip

<sup>۲</sup> Rake

<sup>۳</sup> Probability density function(PDF)

<sup>۴</sup> Hyperparameters

<sup>۵</sup> Likelihood

<sup>۶</sup> Normalizing constant

<sup>۷</sup> Patch

<sup>۸</sup> Patch

## ۲-۲- روش کمترین مربعات در برآورد پارامترهای

گسل

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

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

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

$$G^T G m - G^T d = 0 \quad \text{رابطه (۹)}$$

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

$$m_{est} = [G^T G]^{-1} G^T d \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

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

هر مدل  $(m_i)$ ، سختی<sup>۴</sup> خود را به‌عنوان لاپلاسیان 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 لاپلاسیان 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

<sup>۱</sup> Ill-posed problem

<sup>۲</sup> Regularization

<sup>۳</sup> Generalized inverse problem

<sup>۴</sup> Roughness

رابطه،  $K$  پارامتر هموارسازی<sup>۵</sup> می‌باشد.

$$d_p = 0 = \kappa \Delta^2 s \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

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:

$$d = Gm = [W_{ii} d \ 0] = [W_{ii} G \ \kappa \Delta^2 s] m \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

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

$$m_{est} = [G^T G + \varepsilon^2 I]^{-1} G^T d \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

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]:

$$m_{est} = G^{-1} d \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

در اکثر مقالات از مشاهدات  $LOS$  و روش بایزین و المان محدود<sup>۶</sup> 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

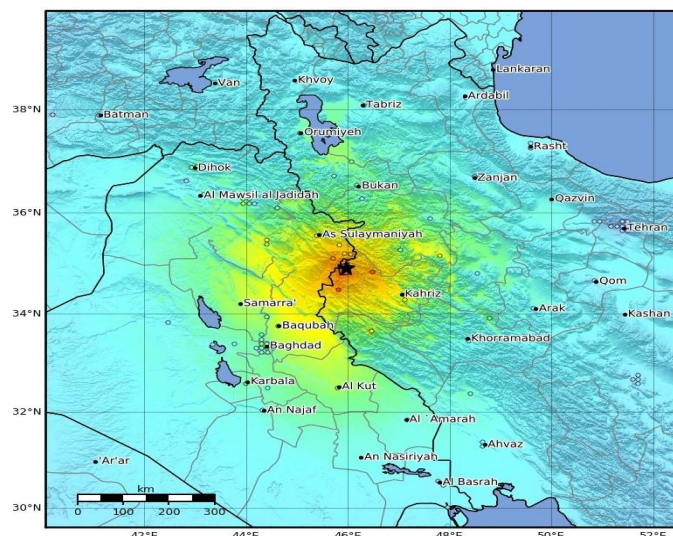
داده‌ها و منطقه مورد مطالعه به شرح زیر می‌باشد.

#### 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.

<sup>۵</sup> Smoothing kernel

<sup>۶</sup> Finite element method (FEM)



شکل ۲: محدوده مطالعاتی، موقعیت زلزله.

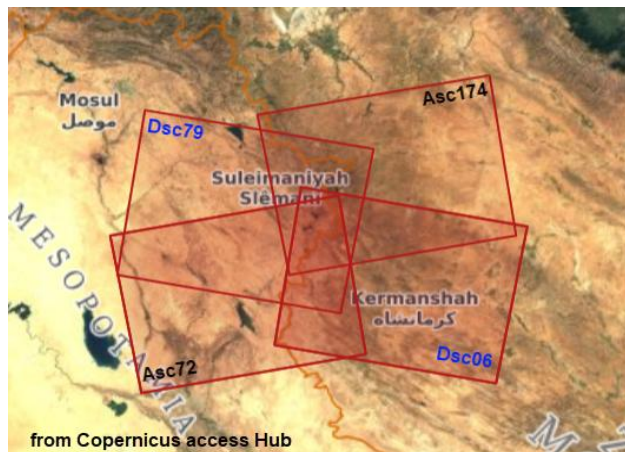
تک برداشت مختلط (*Complex*) و از نوع دیتاهای مرحله اول می‌باشند. این ماهواره در طول موج ماکروویو و باند-C با استفاده از طول موج ۵/۶ سانتی-متر تصویر برداری می‌کند. شکل (۳) موقعیت چهار جفت تصویر راداری مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

### 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)*),

جدول ۱: مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

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



شکل ۳: موقعیت تصاویر راداری سنتینل در منطقه مطالعاتی.

#### ۴- پردازش و نتایج

تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی پردازش و چهار تداخل-نما<sup>۳</sup> تولید شدند. سپس با استفاده از اطلاعات مداری دقیق<sup>۴</sup>، خطای ماهواره حذف گردید. به منظور برآورد تأخیر تروپوسفری از پشته بندی استفاده شد. به کمک مدل ارتفاعی رقومی موسوم به DEM<sup>۵</sup> با رزولوشن یک ثانیه (۳۰ متر)، فاز توپوگرافی حذف شد. برای تولید تصاویر جابجائی، عمل بازیابی فاز<sup>۶</sup> با استفاده از روش آماری جریان هزینه<sup>۷</sup> 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

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 تأخیر 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 تأثیر 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<sup>۱</sup> و میانگین‌گیری سعی در سرشکنی مشاهدات می‌شود. در برخی دیگر با استفاده از مدل‌های تجربی و اتمسفری اقدام به حذف این مؤلفه می‌شود. [۲۷، ۲۸ و ۲۹]. تصاویر راداری توسط نرم افزار اسنپ<sup>۲</sup> و طبق روال مرسوم پردازش تصاویر راداری در

<sup>۳</sup> Interferogram

<sup>۴</sup> Precise ephemeris

<sup>۵</sup> Digital Elevation Model (DEM)

<sup>۶</sup> Phase Unwrapping

<sup>۷</sup> Statistical cost-flow

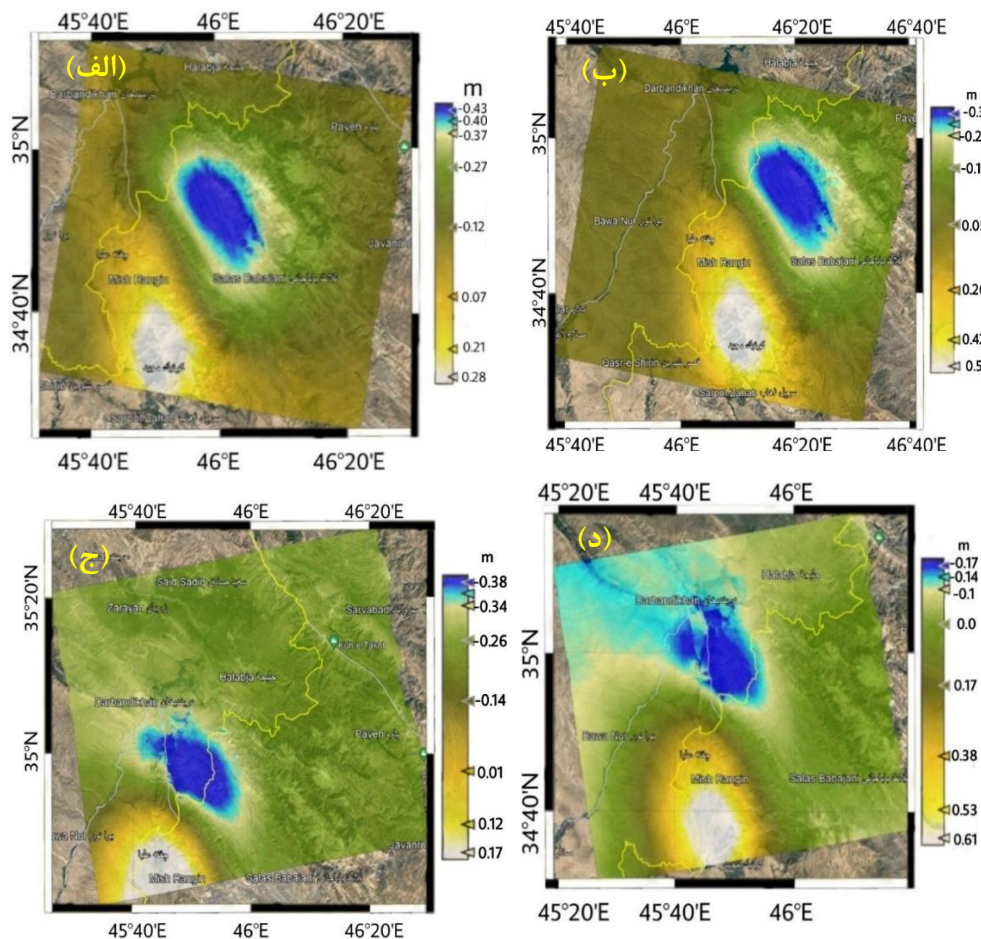
<sup>۱</sup> Stacking

<sup>۲</sup> SNAP

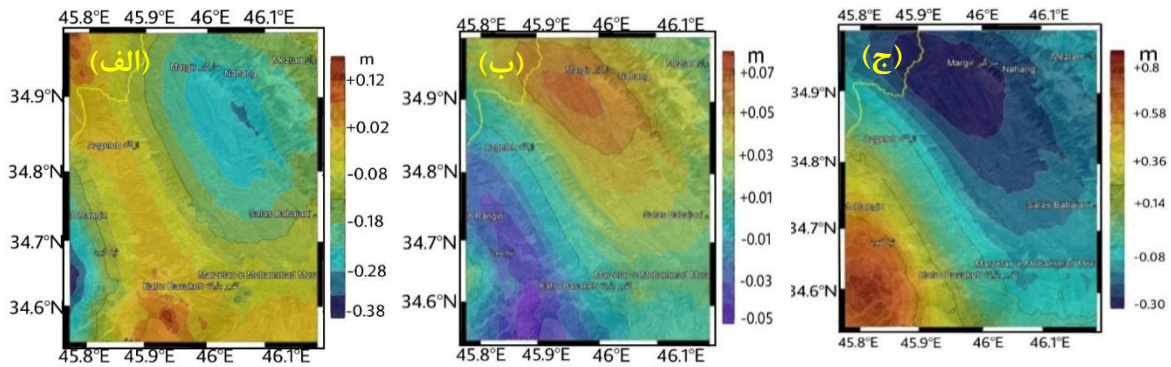


درجه شرقی، نزدیک منطقه تپه کبود، ۵ سانتی‌متر جابجایی در راستای جنوبی و ۸۰ سانتی‌متر بالا آمدگی رخ داده است. برای بررسی صحت جابجایی‌های برآورد شده، این مقادیر با جابجایی‌های برآورد شده توسط واجدیان و همکاران بررسی شد [۳]. برای حذف ترند از نتایج میدان جابجایی *InSAR* نیاز به مقایسه نتایج با سایر روش‌های 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).

سه‌بعدی بازیابی شدند و با استفاده از روش *GCV* برای تعیین پارامتر پایداری و از روش تیخونو (*Tikhonov regularization*) به منظور پایداری سازی مسأله استفاده شد. شکل (۵-الف)، (۵-ب) و (۵-ج)، تصاویر جابجایی در سه راستای شرقی-غربی، شمالی-جنوبی و ارتفاعی می‌باشد. این سه تصویر جابجایی 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  $34^{\circ}9'$  شمالی و  $46^{\circ}1'$  شرقی، حدود ۳۸ سانتی‌متر جابجایی در راستای غربی و ۷ سانتی‌متر جابجایی در راستای شمالی رخ داده است. در مختصات  $34^{\circ}6'$  درجه شمالی و  $45^{\circ}8'$



شکل ۴: (الف) میدان جابجایی در راستای خط دید ماهواره در مدار پائین‌گذر مسیر ۶، (ب) میدان جابجایی در راستای خط دید ماهواره در مدار پایین‌گذر مسیر ۷۹، (ج) میدان جابجایی در راستای خط دید ماهواره در مدار بالاگذر مسیر ۷۲ و (د) میدان جابجایی در راستای خط دید ماهواره در مدار بالاگذر مسیر ۱۷۴



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

روش کمترین مربعات، مؤلفه‌های سه‌بعدی جابجایی به- عنوان ورودی مسأله می‌باشند. جدول (۳) پارامترهای گسل برآورد شده توسط دو روش مذکور را نشان می- دهد. پارامترهای گسل با استفاده از چهار مشاهده جابجایی *LOS* و تقسیم سطح گسل به ۱۴۰ قطعه و با روش بایزین برآورد شد (جدول ۳)، سپس میزان لغزش برای هر یک از پج‌ها 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.

به‌همین دلیل، انحراف معیار این جابجایی‌ها محاسبه و در جدول (۲) نمایش داده شد که مشخص شد که عدم قطعیت محاسبات میدان جابجایی 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 جابجایی 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، جابجایی‌های *LOS* ورودی مسأله هستند و در

جدول ۲: میانگین انحراف معیار برای هر مؤلفه جابجایی

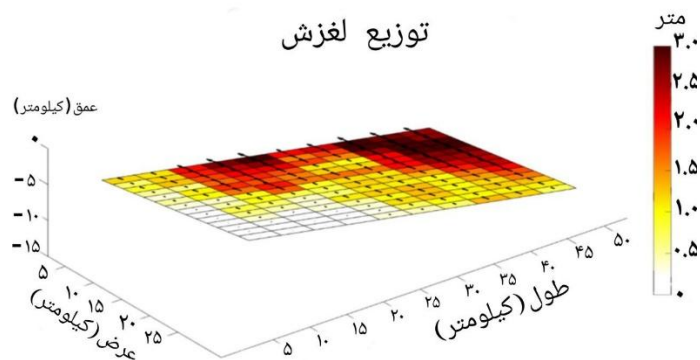
مؤلفه	شمالی-جنوبی (متر)	شرقی-غربی (متر)	ارتفاعی (متر)
<i>Mean(σ)</i>	۰٫۰۸۱۹	۰٫۰۰۲۹	۰٫۱۱۱۵

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 °
<i>Bayesian (Asc&amp;Dsc)</i>	۴۱٫۷	۱۳٫۵	۱۴٫۹	۳۵۰٫۸	۱۶	۳۴٫۷۴	۴۵٫۸۵	۱۳۵٫۲	۲٫۹۸
<i>Least-Squares</i>	۴۵٫۶	۱۷٫۵	۱۹٫۶	۳۵۳٫۵	۱۶٫۹	۳۴٫۷۷	۴۵٫۸۰	۱۳۷٫۷	۳٫۰۱

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



شکل ۷: توزیع لغزش گسل

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.

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

جدول ۵: میانگین انحراف معیار برای هر مؤلفه جابجایی

مؤلفه	$RMSE_{LOS}$	$RMSE_{3D}$	واجدبان $RMSE$
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

## 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 دقیق-تر 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 سه-بعدی برای این زلزله استخراج شد. در ادامه، از جابجائی‌های *LOS* به‌عنوان ورودی روش بایزین برای حل مسأله معکوس استفاده شد و پارامترهای هندسی

## مراجع

گسل برآورد شدند. در این روش مقادیر برای طول، عرض و عمق قفل‌شدگی گسل به ترتیب ۴۱۷، 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 قفل‌شدگی به ترتیب ۴۵/۶، ۱۷/۵ و ۱۹/۶ کیلومتر و زوایای آزیموت، شیب و لغزش به ترتیب ۳۵۲/۵، 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 گسل‌های 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.

[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,

- 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,"

- 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.



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

Reza Rahimpour <sup>1</sup>, Hamid Mehrabi <sup>2\*</sup>

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.