

نشربه علمي مهندسي فناوري اطلاعات مكاني

سال دهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۱ Vol.10, No.2, Summer 2022 1.0-114

مقاله يژوهشى DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.2.6.2

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

رضا رحیمی پور'، 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

چکیدہ

تلفن: ۳۱۳۷۹۳۵۲۹۷

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 روش های برآورد این پارامترها، استفاده از بردارهای جابجایی حاصل از روشهای ژئودتیکی سیستم تعیین موقعیت جهانی و تداخلسنجی راداری موسوم به InSAR می باشد. در این پژوهش، با استفاده از پردازش تصاویر راداری ماهواره سنتینل-۱ در مدارات بالاگذر و پائین گذر 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.

كليد واژهها : تداخلسنجي راداري، پارامترهاي هندسي گسل، حل مسئله معكوس؛ زلزله سرپل ذهاب.

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

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 شـمالی و ۴۵٬۸۸ درجـه شـرقی توسط سـازمان زمین شناسی آمریکا موسوم به USGS^۲ تخمین زده شده است. گسل موجود در منطقه مرزی میان ایران و عراق جزء فعالترين مناطق لرزهاى دنيا مى باشد. كمربند كوهستاني فعال قارهاي ميان صفحات عربي و اوراسیا میباشد و در حال حاضر یک سوم تا نیمی از نـرخ همگرایـی فعلـی را در خـود جـای مـیدهـد[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 زمين مىرسند؛ بنابراين تعيين هندسه دقيق گسل و رابطه بین جابجایی عمیق لرزهای و ساختار تکتونیکی در منطقه بسیار چالش برانگیز می باشد و اطلاعاتی مانند اندازه گیریهای لرزهای و ژئودتیکی کمک شایانی به شناسایی و بررسی ماهیت دقیق هندسه گسل می-کنند[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 چنـد یـارامتر هندسی و فیزیکی بیان میشوند که برای بررسی آنها می توان از مدل های مختلفی بهره برد. یکی از این مدل-ها، مدل اوكادا ميباشد. در مدل مستقيم اوكادا، در

مطالعات و پژوهشهای مختلفی در زمینه حل مسأله معکوس برای برآورد پارامترهای هندسی گسل صورت گرفته است. دلوئیس و همکاران(۲۰۰۲) با کمک داده-های لرزهای و معکوس سازی مشاهدات تعیین موقعیت جهانی(GPS)^۷ و تاداخلسانجی 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 * هملرزهای برای یک گسل تخمین زده شد[۷]. فانینگ و همکاران(۲۰۰۵) با استفاده از تصاویر ماهواره انویست و جابجائیهای حاصل از تکنیک تداخلسنجى رادارى، توزيع لغزش گسل مسبب زلزك 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

صورت معلوم بودن پارامترهای هندسی گسل می توان 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.

^{\$} Inverse problem

^v Global Navigation System

[^] Interferometric Synthetic Aperture RADAR(InSAR)

⁹ Slip distribution

[\] Epicenter

^r U.S. Geological Survey

[&]quot; Thrust

^{*} Fold-and-Thrust Belt

^a Bedrock

یسلرزه ۱ 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 زمین لرزه کرمانشاه را برآورد کردند. سیس با استفاده از مشاهدات جابجائی در راستای خط دید ماهواره موسوم به LOS^۲، پارامترهای مدل مرجع گسل برآورد شدند. با توجه به نتایج، حداکثر لغزش ۳٫۸ متر محاسبه شد [10]. 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 زمین لغزش ناشی از زلزله سرپل ذهاب را برآورد كردند. سیس با استفاده مؤلف های جابجائی و روش بایزین برای حل مسأله معکوس پارامترهای هندسی گسل را برآورد کردند. کـه عمـق قفـل شـدگی 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^۳ و پایین گذر^۴ و بکارگیری تکنیک تداخلسنجی مشاهدات LOS برآورد میشوند. سپس با تلفیق این تصاویر، میدان جابجائی سهبعدی استخراج می گردد، سپس جابجائی های سه-بعدی بازیابی شده و بهعنوان ورودی، وارد حل مسأله معکوس میشوند و پارامترهای هندسی گسل مسبب زمین لرزه به همراه توزیع لغزش آن برآورد میشوند. تکنیک تداخلسنجی راداری روشی است که با صرفه جویی در وقت و هزینه، با قدرت تفکیک^۵ مکانی و زمانی بالا، تغییر شکل های مختلف پوسته زمین را

اندازه گیری می کند. این روش به صورت گستردهای در اندازه گیری جابجائی های ناشی از بلایای طبیعی همچون زمین لرزه، فرونشست و دیگر بلایای مسبب جابجائی استفاده می شود. تکنیک InSAR با استفاده از اختلاف فاز موجود میان زوج تصویر راداری جابجائی-های پوسته را محاسبه می کند[۱۱]. سیستم SAR سیستمی جانب نگر می باشد که جابجائی های پوسته زمین را در راستای دید ماهواره بر آورد می کند. این بردار، تصویر بردار جابجائی سه بعدی 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 به دلیل نزدیک به قطبی^۶ بودن مدار ماهواره های تداخلسنجی، حرکت پوسته در راستای شمالی-جنوبی یا راستای آزیموت ماهواره به خوبی قابل اندازه گیری نخواهد بود، این درحالی است که تغییر شکل واقعی در یک فضای سه-بعدی رخ می دهد و برای آنالیزهای تغییر شکل و درک بهتر ساختار پدیده های ژئوفیزیکی و ژئودینامیکی به

مؤلفههای سه بعدی میدان جابجائی نیاز است[۱۳]. برای بازیابی میدان جابجائی سه بعدی می توان از روش تلفیق تصاویر جابجائی حاصل از روش تداخل سنجی راداری استفاده کرد. در این روش با استفاده از مقادیر جابجائی در راستای خط دید ماهواره و رابطه(۱) مجهولات این مسأله برآورد می شوند [۱۴ و ۱۵]: رابطه(۱)

Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-04

[\] Post-seismic

[†] Line Of Sight

[&]quot; Ascending

[†] Descending

^a Resolution

⁹ Near-polar

 $^{^{\}rm V}$ Incidence angle

میدان جابجائی سهبعدی یک مسأله معکوس بد وضع (III-posed) میباشد[۱۶]. بنابراین میتوان از روشهای پایدارسازی بـرای حـل ایـن مشـکل اسـتفاده کـرد.

صورت وجود حداقل سه مشاهده جابجایی LOS برای هر پیکسل، درجـه آزادی صفر خواهـد شـد. بـهدلیـل نزدیک بودن هندسههای تصویربرداری، حل مجهـولات



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 می-شود. 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.

 $Bias(\hat{x}_{reg}) = -k^2 (A^T P A + k^2 I)^{-1} \hat{x}_{reg}$ (۲) رابطه (۲) در رابطه (۲)، k پارامتر پایدارسازی، P مـاتریس وزن و I ماتریس همانی میباشد [۱۸].

۲- حل مسأله معكوس

در حـل مسـأله معکـوس، هـدف بـرآورد پارامترهـای هندسی گسل(m) با اسـتفاده از دادههـای جابجـائی(b) میباشد. با معکـوس نمـودن اطلاعـات اسـتخراج شـده توسـط دادههـای راداری و تکنیـک تـداخلسـنجی و

[`]Elastic half-space

^r Bayesian

[&]quot; Least-squares

برآورد پارامترهای هندسی گسـل با اسـتفاده از میـدان...

رضا رحیمی پور و حمید مهرابی

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

در رابط (۵)، مقد دار G_H از فرم ول G_H محاسبه می شود، که منظور از $K_H(r/a)$ محاسبه می شود، که منظور از K منابع بسل نوع دوم، r فاصله میان پچها، a طول k می بستگی و H پارامتر هرست می باشد[۲۱]. ابتدا همبستگی ها با مقادیر اولیه برای پارامترهای مدل، با استفاده از مدل اوکادا در نیم فضای الاستیک برآورد می شوند. بدین صورت که با ضرب مدل لغزش s در می می شوند. بدین مورت که با ضرب مدل می شود(d=Gs). ماتریس G با توجه به مقادیر پیچ در هر تکرار بهنگام می شود[۱۹].

نحوه عملکرد روش بایزین به این صورت میباشد که ابتـدا مـاتریس واریـانس-کواریـانس مشـاهدات (Σ_d) تشکیل شده و تـابع کواریـانس (C(h) بـرآورد میشود. سپس با استفاده از (C(h) و مقادیر محاسبه شده توسـط مـدل مسـتقیم، تـابع درسـتنمـایی (p(d/m) توسـط رابطـه(\mathcal{P}) محاسـبه میشود. در ادامـه، بـا اسـتفاده از رابطـه(\mathcal{P}) محاسـبه مـیشـود (رابطه (\mathcal{V})) و دوباره مدل مستقیم با استفاده از مقادیر جدیـد بـرآورد روارد میشود تا مقدار p(m/d) از (m/d) بیشتر شـود و در نهایـت (p(m/d)محاسبه میشود.

در رابطــه(۶)، N تعــداد مشــاهدات و \sum_{δ}^{-1} معکــوس ماتریس واریانس کواریانس مشاهدات میباشد. در رابطه(۲)، منظور از NM تعداد پارامترهای مدل می-باشد ([M^{NM} , ..., m^{NM}] و ۲۲]. رابطه(۶)

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

$$p(m) = \prod_{j=1}^{NM} p(m^j)$$

۲-۱- روش بایزین در بر آورد 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 (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 رویکرد کمک میکند تا همراه با معکوس سازی، ابرپارامترها^۴ نیز برآورد شوند[۱۹ و ۲۰]. PDF پسین ساخته میشود. تابع درستنمایی تناسب دادههای محاسبه شده در مدل مستقیم را با مشاهدات توصیف میکند. تئوری بایز توسط رابطه (۴) بیان میشود.

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

در رابطه(۴)، p(d/m)، تابع درست نمایی برای مـدل(m) با توجه به مشاهدات(b) بر اساس باقیمانده بین دادهها و پیشبینی مدل مشاهدات میباشـد. p(m) اطلاعـات اولیه پارامترهای مدل و مخرج رابطه (۴)، ثابـت نرمـال سازی² برای مدل میباشد[۱۹]. طبق این نظریه، گسـل به M تعداد پچ^۷ تقسیم شده و بزرگی لغـزش و پـیچش برای هر یک از این پچها محاسبه میشود و بـا اسـتفاده از توزیع ون کارمن، همبستگی لغزش میـان قطعـههـا^{*} توسط رابطه (۵) محاسبه میشود.

- ۱ Slip
- ^r Rake
- * Probability density function(PDF)
- [†] Hyperparameters
- ^a Likelihood
- ⁹ Normalizing constant
- ^v Patch
- ^ Patch

(ابطه(۷)

^۹ hurst

نشریه علمی – مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دهم • شماره دوم • تابستان ۱۴۰۱

۲-۲-روش کمترین مربعات در بر آورد پارامترهای گسل

با توجه به رابطه (۳)، پارامترهای مدل را می توان به-عنوان 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 می توان به مسأله معکوس خطی تعمیم داد. با ضرب ترانهاده ماتریس G از چپ در رابطه (۳)، به رابطه(۹) خواهیم رسید: $G^T Gm - G^T d = 0$ رابطه(٩) عبارت $G^T G$ ماتریس نرمال با ابعاد M imes M میباشد، با فرض وجود معکوس برای ماتریس نرمال، پارامترهای مدل به صورت رابطه(۱۰) برآورد می شوند[۲۳]: $m_{est} = [G^T G]^{-1} G^T d$ رابطه(۱۰) معمولاً مسائل معكوس بدوضع المستند و بايد به پایدارسازی^۲ حل مسئله توجه گردد و ممکن است ماتریس نرمال دچار کمبود مرتبه باشد که در این وضعيت بحث معكوس فراگير ^٣ مطرح خواهد شد. هر مدل (m_i) ، سختی^{*} خود را به عنوان لاپلاسین مؤلف ه</sup>لغزش توصيف مي كند و در راستاي فرآيند، اين سختي برای مؤلفه لغزش مدل ها(۶) به کمک رابطه (۱۱) كمينه مىشود. بەمنظور مشخص نمودن وابستگىهاى مقادیر لغزش هـر پیکسـل با پیکسـل مجـاور، عملگـر لایلاسین به ماتریس لغزش اعمال می گردد و در این فرآیند، با توجه به جهت و میزان لغزش ها، نوع گسل مشخص می شود که گسلها شیب لغز(dip slip)، امتداد لغز(strike slip) و ترکیبی از این دو هستند و در این

- " Generalized inverse problem
- * Roughness

رابطه، K پارامتر هموارسازی^{$^{0}}$ میباشد.</sup> $d_n = 0 = \kappa \Delta^2 s$ رابطه(۱۱) با تلفیق دقت مشاهدات و خطاها، ماتریس وزن *W* تشکیل میشود که مؤلفههای قطری این ماتریس برابر با $W_{ii} = \left(W_{i}
ight)^{0.5} / e_{i}$ با به کار گیری $W_{ii} = \left(W_{i}
ight)^{0.5} / e_{i}$ خطاها و وزندهی، مدل مستقیم به صورت رابطه (۱۲) نوشته می شود: $d = Gm = [W_{ii}d \ 0] = [W_{ii}G \ \kappa \varDelta^2 s]m \quad (17)$ با استفاده از d و G که شامل ترمهای هموارسازی و وزن هستند، مدل برآورد به صورت رابطـه (۱۳) نوشـته می شود: $m_{art} = [G^T G + \varepsilon^2 I]^{-1} G^T d$ (ابطه(۱۳) در رابطه(۱۳)، $\varepsilon^2 I$ برابر $\sigma_n = 0 = \kappa \Delta^2 s$ می باشد. در نهایت، مدل برآورد به صورت رابطه (۱۴) نوشته می-شود[۲۴ و ۲۵]: $m_{ast} = G^{-}d$ رابطه(۱۴) در اکثر مقالات از مشاهدات LOS و روش بایزین و المان محدود^ع استفاده شد و پارامترهای گسل استخراج شدند [۳, ۱۰ و ۲۶]. در این پژوهش، علاوه بر این که یارامترهای گسل با استفاده از چهار مشاهدات LOS و روش بایزین محاسبه شدهاند، از مؤلف های سهبع دی میدان جابجائی بهعنوان ورودی در روش کمترین مربعات برای حل مسأله معكوس استفاده می شود. 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.

[`]Ill-posed problem

^r Regularization

^{^a} Smoothing kernel

^{*°*} *Finite element method*(*FEM*)

بر آورد پار امترهای هندسی گسـل با اسـتفاده از میـدان...

رضا رحیمی پور و حمید مهر ابی



شكل۲: محدوده مطالعاتي، موقعيت زلزله.

SAR دادههای -۲-۳

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))

تیک برداشت مختلط (Complex) و از نوع دیتاهای مرحله اول میاشند. 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.

بعدون ۱۰ مستعفات معدوير ماموروه المعقادة						
مسير ماهواره	شماره مدار	تاريخ اخذ تصوير				
	. 6	7•17/11/•7				
پائين <i>گ</i> ذر	• 7	۲・۱۷/۱۱/۱۹				
		T • 1 \/ / 1 / / 1				
	Ŷ٦	۲・۱۷/۱۱/۱۸				
بالاگذر	VE	۲・۱۷/۱۱/۱۱				
	۷١	۲・۱۷/۱۱/۱۷				
	11/16	۲・۱۷/۱۱/۰۶				
	1 ¥ 1	۲・۱۷/۱۱/۱۸				



شکل۳: موقعیت تصاویر راداری سنتینل در منطقه مطالعاتی.

تکنیک تداخلسنجی تفاضلی پردازش و چهار تداخل-نما^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 *DEA^a* با رزولوشن یک ثانیه(۳۰ متر)، فاز توپوگرافی حذف شد. برای تولید تصاویر جابجائی، عمل بازیابی فاز⁹ 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 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.

جابجائی LOS و رابطه (۱)، مؤلفههای میدان جابجائی

- ^a Digital Elevation Model(DEM)
- ⁹ Phase Unwrapping
- ^v Statistical cost-flow

۴- پردازش و نتایج

اندازه گیریها در تکنیک تداخل سنجی راداری بر مبنای تولید تداخلنما می باشد. تداخل نماها با استفاده از حداقل دو تصویر اصلی و پیرو تولید می شوند. 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 می شود. در مطالعات انجام شده در راستای حذف این اثر به مدلسازی یونسفر و ترويوسفر پرداخته شده است. يونسفر محيطي تجذيه گر 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 روش-های مختلفی کاهش میابد. در برخی از روشها با استفاده از پشتهبندی و میانگین گیری سعی در سرشکنی مشاهدات می شود. در برخی دیگر با استفاده از مدلهای تجربی و اتمسفری اقدام به حذف این مولفه می شود. [۲۷، ۲۸و۲۹]. تصاویر راداری توسط نـرم افـزار اسنپ^۲ و طبق روال مرسوم پردازش تصاویر راداری در

^r Interferogram

^{*} Precise ephemeris

[\] Stacking

^r SNAP

سهبعدی بازیابی شدند و با استفاده از روش GCV برای تعیین پارامتر پایدارسازی و از روش تیخونو ((مسأله استفاده شد. شکل (۵-الف)، (۵-ب) و (۵-ج)، 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 ^۹۲۹/۹ شمالی و (۶-۱/۹ شرقی، حدود ۳۸ سانتیمتر جابجائی در راستای غربی و ۷ سانتیمتر جابجائی در راستای شمالی رخ

برآورد پار امترهای هندسی گسـل بـا اسـتفاده از میـدان... رضا رحیمی پور و حمید مهرابی

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



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

روش کمترین مربعات، مؤلفههای سهبعدی جابجائی 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

جابجائی LOS و تقسیم سطح گسل به ۱۴۰ قطعه و با

روش بایزین بر آورد شد (جدول ۳)، سپس میزان لغزش

برای هـر یـک از یـچهـا بـرآورد گردیـد (شـکل (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

بههمین دلیل، انحراف معیار این جابجائیها محاسبه و در جدول(۲) نمایش داده شد که مشخص شد که عـدم قطعیت محاسبات میـدان جابجـائی سـهبعـدی در ایـن پژوهش برای دو مؤلفه ارتفاعی و شرقی-غربـی در حـد 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

جدول ۲: میانگین انحراف معیار برای هر مؤلفه جابجایی

مؤلفه	شمالی-جنوبی (متر)	شرقی-غربی (متر)	ار تفاعی (متر)
$Mean(\sigma)$	•,• , 1 9	•,• • ٢ ٩	•,•110

روش	طول(<i>km</i>)	عرض(<i>km</i>)	عمق(<i>km</i>)	آزيموت°	شيب ^٥	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	پيچ°	لغزش°
Bayesian (Asc&Dsc)	۴۱٫۷	١٣/۵	14,9	۳۵۰٫۸	18	34 July 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	۴۵٬۸۵	۱۳۵٬۲	۲٬۹۸
Least- Squares	40/8	$VV_{/}\Delta$	۱۹ ٬۶	۳۵۳٬۵	۱ <i>۶</i> ٬۹	٣۴,٧٧	۴۵٬۸۰	177,4	٣,٠١

مانشاه بر آورد شده	له ۲۰۱۷ کر	ىل مسبب زلز	ں ھندسی گس	مترهاء	۳: يارا،	مدول
11 11					. .	~ ~

بر آورد پار امترهای هندسی گسـل با اسـتفاده از میـدان...

مهرابی	حميد	9	پور	یمی	رح	رصا	

منبع	طول(<i>km</i>)	عرض(<i>km</i>)	عمق(km)	آزيموت°	شيب°	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	پيچ°	لغزش°
USGS	۴۵٫۵	۱۶٫۹	١٩	۳۵۱٬۱۲	١٠	۳۴٫۷۹	۴۵٬۸۸	184,66	~٣
Global CMT	۴۰,۸	14,8	١٨	301	۱۶٫۳۸	۳۴,۷۹	۴۵٬۸۴	١٣۴٫٨	~٣
Vajedian et al., (2018)	۳۸٬۵	١٨,٧	١٨,٧	۳۵۴,۴	۱۷٫۵	٣۴٫٨۶	۴۵٫۶۴	۱۴۱٬۵	۴/۵
Kuang et al., (2019)	۴۰٫۵	۲۰٫۲	11,4	۳۵۳٫۷	18,8	34,42	۴۵ _/ ۸۶	۱۳۸٫۴	31/14

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





حل مسأله معكوس روش بهترى نسبت به استفاده از جابجائیهای LOS برای حل این مسأله میباشد و نتایج دقیق تری حاصل می شود. مقادیر RMSE در جـدول(۵) نمایش داده می شوند.

با توجه به رابطه ميانگين 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 می شود که استفاده از مؤلفههای سهبعدی میدان جابجائی برای

مؤلفه	RMSE_LOS	RMSE_3D	واجدبان_RMSE
طول(کیلومتر)	٣,٨	• , 1	۷
عرض(کیلومتر)	٣٫۴	<i>ع</i> ار •	۲٫۳
عمق(کیلومتر)	۴٫۱	<i>ع</i> ار •	١
آزیموت(درجه)	۲۳٫	۲٫۳۸	٠,١٢
شيب(درجه)	۶	۶٫۹	۶٬۳۸
پیچش(درجه)	۲ _/ ۲۴	۰ ٫۲۶	۲,۶۴
لغزش(درجه)	• ,• ٢	• ,•)	•

لفه جابجايي	هر مؤ	ِ برای	، معيار	انحراف	میانگین	ل ۵: د	جدوا
-------------	-------	--------	---------	--------	---------	--------	------

۵- بحث و نتیجهگیری

امروزه تکنیک تداخلسنجی راداری به روشی قدرتمند برای بررسی فعل و انفعالات یوسته زمین تبدیل شده است. با استفاده از این روش می توان جابجائی های رخ داده بر روی پوسته زمین ناشی از بلایای طبیعی را محاسبه نمود. این تکنیک جابجائیها را در یک بعد و راستای دید ماهواره اندازه گیری می کند که یک ضعف برای این روش به حساب میآید و برای مطالعات دقیق-تر جابجائیهای پوسته کافی نیستند. برای تفسیر و درک بهتر مکانیزم پدیده های مختلف ژئوفیزیکی و ژئودینامیکی می توان مؤلف میای سهبعدی میدان جابجائی را محاسبه کرد. گسلها از اصلی ترین عوامل رخ دادن زلزله هستند و مطالعه گسلها کمک شایانی به تفسیر زلزلههای و مدیریت بهتر بحران میکند. با استفادہ از هفت یارامتر هندسے، یے گسل مشخص می شود که می توان با استفاده از جابجائی های حاصل از روش تداخلسنجی و حل مسأله معکوس، پارامترهای هندسی گسل را برآورد کرد. در این پـژوهش، از چهـار جفت تصاویر راداری ماهواره سنتینل-۱ و تکنیک تداخلسنجی استفاده شد و جابجائی های LOS تولید شدند. سپس با تلفیق این تصاویر، میدان جابجائی سه-بعدی برای این زلزله استخراج شد. در ادامه، از جابجائی های LOS به عنوان ورودی روش بایزین برای حل مسأله معکوس استفاده شد و پارامترهای هندسی

مراجع

- [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,

گسل برآورد شدند. در این روش مقادیر باری طول، عرض و عمق قفل شدگی گسل به ترتیب ۴۱٫۷، ۱۳٫۵ و ۱۴٬۹ کیلومتر و زوایای آزیموت، شیب و لغزش به ترتیب ۲/۹۸، ۱۶ و ۲/۹۸ درجه برآورد شدند. سیس از مؤلفههای سه بعدی جابجائی بهعنوان ورودی روش كمترين مربعات براي حل مسأله معكوس 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 ۳٬۰۱ و ۱۶٬۹ 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 كاتالوكهاى زمين شناسى موجود مىتوان نتيجه گرفت که حل مسأله معکوس برای برآورد پارامترهای هندسی گسل با استفاده از مؤلفههای سهبعدی جابجائی، نتایج دقیق تری حاصل می شود. مطالعه توزیع لغزش گسل با استفاده از پارامترهای هندسی برآورد شده نقش مهمی در بررسی انتقال لرزهخیزی از یک گسل به گسل هـای دیگر دارد. بنابراین مطالعات ژئوفیزیکی و اندرکنش مکانیکی میان شاخههای مختلف گسل جهت تحلیل خطرات لرزهای از اهمیت بالایی برخوردار است و مے،-توان 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.

بر آورد پار امترهای هندسی گسـل با اسـتفاده از میـدان...

رضا رحیمی پور و حمید مهر ابی

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 InSARderived deformation time series," Curtin University, 2021.



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 Rahimipour¹, 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 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