

بررسی میزان جابجایی زمین و برآورد پارامترهای گسل حاصل از زلزله با استفاده از داده‌های سنتینل-۱ (مطالعه موردی: زلزله گناوه)

ابراهیم کرمی^۱، نیلوفر علیزاده^{۱*}، محمودرضا صاحبی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
Ebrahimkarami3335@gmail.com

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
Niloofer.Alizadeh@email.kntu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
sahebi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت: بهمن‌ماه ۱۴۰۰، تاریخ تصویب: دی‌ماه ۱۴۰۱)

چکیده

با توجه به وضعیت خاص کشور ایران از نظر زمین‌ساختی می‌توان ادعا کرد که همه گسل‌های موجود در کشور زلزله‌زا هستند. به طوری که همه‌ساله خسارات و تلفات مالی و جانی، به خصوص در نواحی روستایی در اثر زلزله ایجاد می‌شود. امروزه فناوری تداخل‌سنجی راداری با قابلیت‌ها و محصولات متعدد در حیطه فاز و دامنه به ابزاری قدرتمند برای پایش جابجایی‌ها قرار گرفته‌است. تصاویر ماهواره‌ای به جهت برداشت از دوگذر (بالاگذر و پایین‌گذر) می‌توانند اطلاعات متفاوتی از گسل‌ها را ارائه دهند. در این مقاله با استفاده از حل مسئله معکوس با مقادیر مرزی میدان جابجایی سطحی بدست‌آمده از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری، پارامترهای گسلش زمین‌لرزه برآورد شده‌است. بررسی پارامترهای گسلش فعال به منظور شناخت زلزله‌ها و بهبود امکان پیش‌بینی آن‌ها موضوع مورد توجه محققان علوم زمین است. بدین منظور، زوج تصاویر راداری سنتینل-۱ مربوط به قبل و بعد از زلزله به عنوان تصاویر منطقه مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته‌است. به طوری که نتایج تحقیق نشان می‌دهد، مقدار بیشینه جابجایی سطح زمین به میزان ۱۹ سانتی‌متر بالا آمدگی و ۸ سانتی‌متر فرونشست داشته‌است. برای بدست آوردن هندسه گسل و توزیع لغزش روی صفحه گسل این مولفه‌ها با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و مدل تحلیل نیم فضای الاستیک آکادا معکوس شده‌اند. استفاده از مدل‌سازی معکوس نشان داد که تکنیک تداخل‌سنجی راداری برای برآورد میزان جابجایی زمین در اثر زلزله و همچنین تعیین پارامترهای گسل مسبب زلزله روشی مفید می‌باشد. همچنین، نتایج بدست‌آمده به ترتیب برای دو هندسه بالاگذر و پایین‌گذر بترتیب میزان ۱ و ۳ سانتی‌متر خطا مشاهده شده که این موضوع حاکی از دقت مناسب‌تر هندسه پایین‌گذر در این تحقیق می‌باشد.

واژگان کلیدی: زلزله، تداخل‌سنجی راداری، مدل‌سازی، پایین‌گذر، بالاگذر، گسل

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

کشف تغییرات فرآیندی برای تشخیص تغییرات ایجاد شده در وضعیت یک جسم یا پدیده با انجام مشاهدات در زمان‌های مختلف است. بررسی و پایش اشیا یا عوارض از نظر میزان جابجایی، تغییر شکل یا میزان تخریب در یک بازه زمانی مشخص و در سطوح مختلف از یک سازه تا یک شهر، در علم سنجش از دور دارای اهمیت ویژه‌ای است. در این راستا برای بررسی میزان جابه‌جایی سطح، متناسب با نیاز و نوع منطقه مورد نظر، روش‌ها و داده‌های متنوعی به کار گرفته می‌شود. در این میان می‌توان به روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری‌های ژئودتیکی و پایش تغییر شکل نظیر ترازبایی دقیق، سیستم‌های تعیین موقعیت تداخل پایه بسیار طولانی (SLR)^۱، تداخل خط پایه بسیار طولانی (VLBI)^۲، سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS)^۳ و ... و تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR)^۴ اشاره نمود. سامانه اخذ داده رادار با روزنه مجازی (SAR)^۱ گام بزرگی در زمینه فناوری ژئودتیک فضایی برداشته شده و اندازه‌گیری تغییر شکل را با دقتی بهتر از سانتی‌متر به دست می‌دهد. از اوایل دهه ۱۹۹۰، InSAR به عنوان ابزاری کارآمد در مطالعه کلیه پدیده‌هایی که سبب تغییر سطح زمین می‌شوند، مطرح و مورد استفاده قرار گرفت. اولین کاربردهای InSAR برای مطالعات توپوگرافی سطح زمین و تغییرات آن توسط زبکر و گلدشتاین (۱۹۸۶) و گابریل و همکاران (۱۹۸۹) انجام پذیرفت [۱] و [۲]. از آن زمان به بعد تداخل‌سنجی تفاضلی (D-InSAR)^۲ و آنالیز سری‌های زمانی InSAR در اندازه‌گیری تغییرشکل‌های زمین مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. بررسی عواملی مانند فعالیت‌های آتشفشانی، حرکات بین‌لرزه‌ای، حرکات هم‌لرزه‌ای، حرکات پس‌لرزه‌ای، تغییر شکل‌های ناشی از استخراج معادن و آب‌های زیرزمینی، گسل‌های لغزشی و استخراج پارامترهای تغییرشکل، نمونه‌هایی از پژوهش‌های صورت‌پذیرفته در این عرصه می‌باشد [۱].

بران و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۱ زلزله‌ی سرپل ذهاب را مطالعه کردند و مطالعات خود را با نرم‌افزار SNAP انجام دادند و نتایج نشان‌دهنده‌ی فرورفتگی و نشست به میزان ۴۵ سانتی‌متر و بالا آمدگی به میزان ۴۹ سانتی‌متر در منطقه بود [۸]. کریستینو تولومی و

همکاران با استفاده از تصاویر بالاگذر و پایین‌گذر سنجنده‌های ALOS-2 و سنتینل-۱، زلزله‌ی سرپل ذهاب را مطالعه و با استفاده از نرم‌افزار SARscape میزان جابه‌جایی را حداکثر تا یک متر در راستای جهت دید ماهواره برآورد کردند. آن‌ها برای حذف اثر توپوگرافی از مدل رقومی زمین SRTM با دقت ۱۰ متر استفاده کردند [۹]. معتق و همکاران با تلفیق داده‌های سنجش از دور نوری و راداری و زلزله‌شناسی اقدام به مطالعه‌ی پارامترهای منشا، لرزه‌های ثانویه و شکستگی‌های ناگهانی شیب زمین در اثر زلزله‌ی سرپل ذهاب کردند. آن‌ها از تصاویر بالاگذر و پایین‌گذر سنجنده‌های سنتینل-۱، ALOS و همچنین از داده‌ی نوری Sentinel-2 استفاده کردند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که تلفیق روش‌های زلزله‌شناسی و استفاده از داده‌های سنجش‌ازدوری مختلف برای درک و فهم تغییرات سطح زمین بسیار مفید است [۱۰]. شناخت گسل‌های فعال موجود در منطقه به منظور شناخت فیزیک زلزله و امکان پیش‌بینی آن موضوع مورد توجه محققین علوم زمین است [۶] و [۷]. جابجایی صفحات گسلی که ممکن است به صورت امتداد لغز، شیب لغز و یا ترکیبی از این دو باشند، که می‌توانند به سطح زمین برسند و خود را به صورت جابجایی در سه جهت نشان دهند. مدلسازی این جابجایی که ناشی از تغییر شکل در کانون زلزله است، منتهی به شناخت پارامترهای گسل مسبب زمین‌لرزه شده که این پارامترها شامل امتداد، شیب، ریک (Rake)^۸ موقعیت جغرافیایی، طول، عرض، عمق و لغزش در صفحه گسل است که نوع گسل را آشکار می‌سازد. این جابجایی با استفاده از مشاهدات ماهواره‌های راداری و روش تداخل‌سنجی راداری قابل اندازه‌گیری است که با استفاده از این مشاهدات می‌توان با حل معکوس به پارامترهای ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی منطقه دست پیدا کرد.

همچنین، پژوهش‌های متعددی در زمینه برآورد میزان جابه‌جایی زمین ناشی از زلزله با استفاده از تصاویر راداری صورت گرفته‌است مطالعه گسل‌های فعال در منطقه به منظور شناخت فیزیک زلزله‌ها و بهبود امکان پیش‌بینی آن‌ها موضوع مورد توجه محققین علوم زمین است. اکادا (۱۹۸۵) مدل‌های متفاوتی به منظور برآورد تغییر شکل سطح زمین با معلوم

۵ Interferometry Synthetic Aperture Radar

۶ Synthetic Aperture Radar

۷ Differential InSAR

۸ Rake

۱ Satellite Laser Range

۲ Satellite Laser Range

۳ Very Long Baseline

۴ Global Positioning System

بلندی‌های سطح زمین (DEM^۸) و جابجایی‌های رخ داده در اثر عوامل انسانی و غیر انسانی (زلزله، گودبرداری و ...) را محاسبه کند. در صورت در اختیار داشتن دو تصویر از یک منطقه، که هر دو دارای فازهای کاملاً تصادفی هستند، با کم کردن فاز دو تصویر، یک تصویر حاصل شده که الگوی مشخص و منظمی دارد و به آن تداخل‌نما یا اینترفروگرام^۹ گفته می‌شود. خطوط اینترفروگرام، مشابه منحنی‌های هم‌تراز در نقشه‌برداری بوده و در جاهایی که شیب بیشتری وجود داشته باشد این خطوط به هم نزدیک‌تر و برعکس در سطوح صاف و هموار، فاصله این خطوط از هم بیشتر می‌شود. اینترفروگرام‌ها ساختار تکرار شونده دارند که به هر کدام از این سیکل‌ها یک فرینج^۶ (Fringe) گفته می‌شود. هر فرینج اختلاف فازی در بازه $[\pi, -\pi]$ را نمایش می‌دهد در حالی که اختلاف فاز واقعی بسیار بیشتر از این می‌باشد؛ به همین منظور طی یک فرایندی به نام بازیابی کردن^۷ فاز این فرینج‌ها از حالت تکرار شونده خارج شده و یک اینترفروگرام یکنواخت به دست می‌آید [۱۵] و [۱۴].

در حالت کلی فاز یک اینترفروگرام از مولفه‌های رابطه ۱ تشکیل می‌شود.

$$\Delta\phi_{int} = W(\Delta\phi_{Topo} + \Delta\phi_{Defo} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{FE} + \Delta\phi_{Noise} + \Delta\phi_{Orb}) \quad (1)$$

در این رابطه $\Delta\phi_{int}$ ^۸ فاز تداخل‌سنجی راداری، $\Delta\phi_{FE}$ ^۹ فاز زمین، $\Delta\phi_{Topo}$ ^{۱۰} فاز حاصل از توپوگرافی، $\Delta\phi_{Defo}$ ^{۱۱} فاز تولید شده از تغییر شکلی منطقه، $\Delta\phi_{Noise}$ فاز نویز و $\Delta\phi_{atm}$ ^{۱۲} فاز مربوط به سهم اتمسفر می‌باشد، تمامی این فازها به جز فاز جابجایی ($\Delta\phi_{Defo}$ ^{۱۳}) در دو تصویر به عنوان فاز مزاحم شناخته می‌شوند و حذف می‌شوند. از آن جایی که فاز تداخل‌نما مقداری 2π دارد و سنجنده تنها بخش غیر صحیح اختلاف فاز رفت و برگشت بین سیگنال را ثبت می‌کند. پس $2k\pi$ ابهامی است که در فاز ثبت‌شده در سنجنده به ازای هر پیکسل وجود دارد. بنابراین تابع W در رابطه‌ی ۱ معرف تبدیل فاز به محدوده مورد نظر است. آرایش‌های متفاوت آنتن

بودن ویژگی‌های هندسی گسل مسبب زمین‌لرزه و چگونگی میزان نابرجایی اتفاق افتاده بر سطح گسل ارائه داده‌است [۱۱]. پاکدامن و همکاران در سال (۲۰۱۷) پارامترهای مسبب زلزله زرنند کرمان را برآورد کردند [۱۲]. نیسن و همکاران (۲۰۱۰) پارامترها شامل ریک، امتداد، شیب، موقعیت جغرافیایی، طول و عرض جغرافیایی، عمق و لغزش که هم نوع و هم ویژگی‌های ساختاری گسل را نیز مشخص می‌کنند، بدست آوردند [۱۳].

در پژوهش حاضر، با توجه به دو تکنیک ذکر شده تداخل‌سنجی راداری و مدلسازی پارامترهای گسل، با استفاده از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری در دو مدار بالاگذر و پایین‌گذر و دو دسته پارامتر برای گسل مسبب زمین‌لرزه شهر گناوه در استان بوشهر به دست آمده و برای به دست آوردن بهترین پارامترها برای گسل مسبب زمین لرزه، از داده‌های شتابنگاشت^۱ استفاده شده‌است و در انتها صفحه‌ای برای گسل مسبب زلزله و جابجایی‌های ناشی از زلزله مدلسازی شده و با مقادیر حاصل از شبکه‌های شتاب نگاشت مقایسه شده‌اند.

۲- مروری بر تداخل‌سنجی راداری

تکنیک تداخل‌سنجی راداری تکنیکی است که با بررسی حداقل دو داده SAR که هر دو عیناً متمرکز بر یک سطح زمین هستند، سعی می‌کند تا ارتفاعات، پستی بلندی‌های سطح زمین (DEM^۲) و جابجایی‌های رخ داده در اثر عوامل انسانی و غیر انسانی (زلزله، گودبرداری و ...) را محاسبه کند. در صورت در اختیار داشتن دو تصویر از یک منطقه، که هر دو دارای فازهای کاملاً تصادفی هستند، با کم کردن فاز دو تصویر، یک تصویر حاصل شده که الگوی مشخص و منظمی دارد و به آن تداخل‌نما یا اینترفروگرام^۳ گفته می‌شود. خطوط اینترفروگرام، مشابه منحنی‌های هم‌تراز در نقشه‌برداری بوده و در جاهایی که شیب بیشتری وجود داشته باشد این خطوط به هم نزدیک‌تر و برعکس در سطوح صاف و هموار، فاصله این خطوط از هم بیشتر می‌شود. اینترفروگرام‌ها ساختار

۸ Interferogram
 ۹ Flat earth
 ۱۰ Topography
 ۱۱ Deformation
 ۱۲ Atmosphere
 ۱۳ Deformation

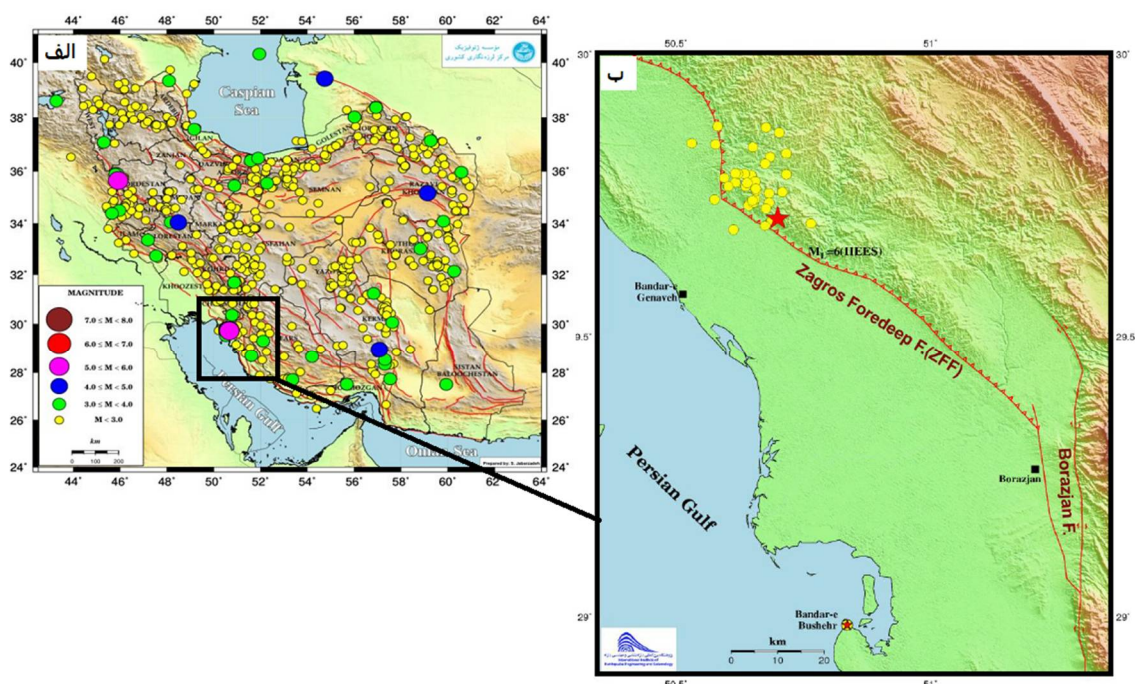
۱ Accelerogram
 ۲ Digital Elevation Model
 ۳ Interferogram
 ۴ Digital Elevation Model
 ۵ Interferogram
 ۶ Fringe
 ۷ Unwrapping

راداری که باعث ایجاد دو روش تداخل‌سنجی عمود بر راستای پرواز^۱ و در راستای پرواز^۲ می‌شود، امکان اندازه‌گیری توپوگرافی زمین و کمی‌کردن فرایندهای دگرشکلی پوسته را میسر می‌کند. در روش تداخل‌سنجی عمود بر راستای پرواز یا با تکرار مسیر^۳ از اطلاعات فاز حداقل دو تصویر SAR که در فاصله‌های زمانی متفاوت از یک ناحیه به دست آمده‌است، استفاده می‌شود. مؤلفه فاز حاصل از تداخل‌سنجی در بردارنده اثرات توپوگرافی، جابه‌جایی، اتمسفر و نویز است که از بین این اثرات، توپوگرافی و جابه‌جایی مؤثرترین عوامل هستند. فن تفاضلی تداخل‌سنجی راداری با تفاضل‌گیری از اینترفروگرام‌های پیش و بعد از زلزله، اثر مؤلفه توپوگرافی را از فاز تداخل‌سنجی حذف می‌کند و جابه‌جایی را به عنوان تنها عامل مؤثر باقی می‌گذارد [۴] و [۵].

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- منطقه مورد مطالعه

شهر گناوه در استان بوشهر به موقعیت جغرافیایی ۲۹.۵۶ درجه شمالی و ۵۰.۵۱ درجه شرقی در یکی از زلزله خیز ترین مناطق قرار دارد که متاثر از ده‌ها گسل مختلف می‌باشد. یکی از این گسل‌ها، گسل پیش ژرفای زاگرس است که با درازای چند صد کیلومتر از شمال شرق بندرعباس تا درون خاک کشور عراق امتداد دارد. راستای کلی این گسل شمال غرب-جنوب خاور با شیب به سوی شمال شرق و سازوکار این گسل معکوس می‌باشد. این گسل جداکننده کمربند پیش ژرفای زاگرس (در شمال و شمال شرق) از دشت ساحلی زاگرس (در جنوب و جنوب غرب) می‌باشد. در ساعت ۱۱ و ۱۱ دقیقه و ۵۰ ثانیه (به وقت محلی) روز یکشنبه ۲۹ فروردین ماه ۱۴۰۰ هجری شمسی مطابق با ساعت ۶ و ۴۱ دقیقه و ۵۰ ثانیه (به وقت جهانی) روز یکشنبه ۱۸ اپریل ۲۰۲۱ زمین لرزه‌ای در عمق ۱۰ کیلومتری زمین در ۲۴ کیلومتری شمال بندر گناوه در استان بوشهر به بزرگی ۵.۹ Mw به وقوع پیوست (شکل ۱).



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه الف) کلیه‌ی زمین‌لرزه‌های رخ داده در تاریخ فروردین ۱۴۰۰ ب) کانون زلزله‌ی گناوه و پس‌لرزه‌های رخ داده به همراه گسل‌های فعال منطقه

۳ Repeat pass

۱ Cross-Track

۲ Along-Track

جدول ۱: مشخصات داده‌های مورد استفاده

Track	Slave (dd. mm. yy)	Master (dd. mm. yy)	Azimuth (deg.)	Incidence (deg.)	Sensor	Number
۱۰۱	۲۰۲۱۰۴۲۲	۲۰۲۱۰۴۱۰	-۱۳.۶۳	۴۳.۸۹	Sentinel-1/ Desc (SLC)	۱
۳۵	۲۰۲۱۰۴۲۶	۲۰۲۱۰۴۱۴	-۱۶.۷۳	۴۳.۸۵	Sentinel-1/Asc (SLC)	۲

طریق سایت (<https://search.asf.alaska.edu/>) در اختیار کاربران قرار می‌گیرند که در این مطالعه نیز از آن استفاده شده و با استفاده از مدل رقومی SRTM^۵ که توسط نرم‌افزار SNAP دانلود شد، فاز توپوگرافی حذف و فقط فاز جابه‌جایی باقی مانده است. جدول ۱ مشخصات داده‌های مورد استفاده در این تحقیق را ارائه داده است.

۳-۳- روش تحقیق

تداخل‌سنجی راداری با استفاده از اختلاف فاز زوج تصویر راداری با حد تفکیک مکانی بالا به دنبال تولید مدل رقومی ارتفاعی منطقه و برآورد میزان تغییر شکل و جابجایی پوسته‌ی زمین است. با توجه به ماهیت آنتن و سامانه داده‌های سنتینل-۱ که به صورت بلوک و تکه‌های مجزا داده اخذ می‌کنند، باید آن‌ها را یکپارچه کرد. بعد از این مرحله، با استفاده از مدل رقومی زمین SRTM فاز توپوگرافی از تداخل‌نما برداشته و فیلتر گلدشتاین روی تصویر فاز اعمال شده و در آخرین مرحله فاز مورد نظر بازیابی می‌شود. جابجایی‌های بدست‌آمده برحسب فاز می‌باشند و برای آنالیز راحت‌تر داده‌ها به واحد متر تبدیل می‌شوند. با استفاده از پردازش‌های نرم‌افزار SNAP و با استفاده از دو جفت تصویر بالاگذر و پایین‌گذر مقدار جابجایی برای دو جفت تصویر محاسبه می‌شود. سپس، همین عملیات برای تولید تداخل‌نما در نرم‌افزار SARscape انجام شده و هر دو تداخل‌نمای تولید شده زمین‌مرجع و جابجایی بدست‌آمده توسط هر دو قابل مشاهده خواهد بود. سپس، در بخش بعدی در این مطالعه به منظور برآورد جابجایی‌های مدلسازی‌شده، تصاویر جابه‌جایی بدست‌آمده از SARscape در نرم‌افزار ArcMap وارد شده، سپس یک shape file ساخته و با استفاده از ماژول Modelling در نرم‌افزار SARscape آن shape file ساخته‌شده به این ماژول معرفی می‌شود. در این مدل‌سازی از

این رویداد براساس لرزه نگاشت‌های ثبت‌شده در مرکز ملی شبکه‌ی لرزه‌نگاری در مختصات ۷۱/۲۹ درجه‌ی شمالی و ۷۰/۵۰ درجه‌ی غربی و با عمق کانونی حدود ۹۵ کیلومتر رخ داده است. همچنین، کانون این زمین‌لرزه در نزدیکی یکی از شاخه‌های گسل پیش ژرفای زاگرس (شکل ۱) قرار دارد. با توجه به موقعیت زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه‌های رخ داده در ساعات اول پس از وقوع، با توجه به سابقه قبلی لرزه‌خیزی منطقه، بنظر می‌رسد رخداد زمین لرزه اخیر در شمال شرق بندر گناوه مرتبط با بخشی از گسل پیش ژرفای زاگرس^۱ است.

۳-۲- داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه از داده‌های ماهواره‌ی سنتینل-۱^۲ با قدرت تفکیک ۵ متر در جهت آزیموت^۳ و ۲۰ متر در جهت رنج^۴ استفاده شده است. این ماهواره توسط سازمان فضایی اروپا توسعه و طراحی شده است. سکوی A پروژه سنتینل-۱ در تاریخ ۹ آپریل سال ۲۰۱۴ به فضا پرتاب شد و از تاریخ ۳ اکتبر سال ۲۰۱۴ تصاویر آن در اختیار کاربران قرار گرفته است. ماموریت سنتینل-۱ شامل دو ماهواره‌ی سنتینل-A1 و سنتینل-B1 است که در مدار با ارتفاع ۷۱۹ کیلومتر و با اختلاف ۹۸۰ درجه فاز در حرکت هستند و قابلیت اخذ تصویر راداری به صورت پلاریزاسیون دوگانه VH و VV را دارد. ماهواره سنتینل-۱ قادر است هر ۱۲ روز یکبار از کل کره زمین تصویربرداری کند؛ بنابراین، در صورت استفاده از هر دو سکوی سنتینل-۱ توان تفکیک زمانی و یا به عبارتی زمان بازدید مجدد به ۶ روز خواهد رسید. در این تحقیق، از میدان جابجایی به دست‌آمده از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری در راستای خط دید ماهواره به صورت دو گذر پایین‌گذر و بالا گذر استفاده شده است. داده‌ها از

۴ Range

۵ Shuttle Radar Topography Mission

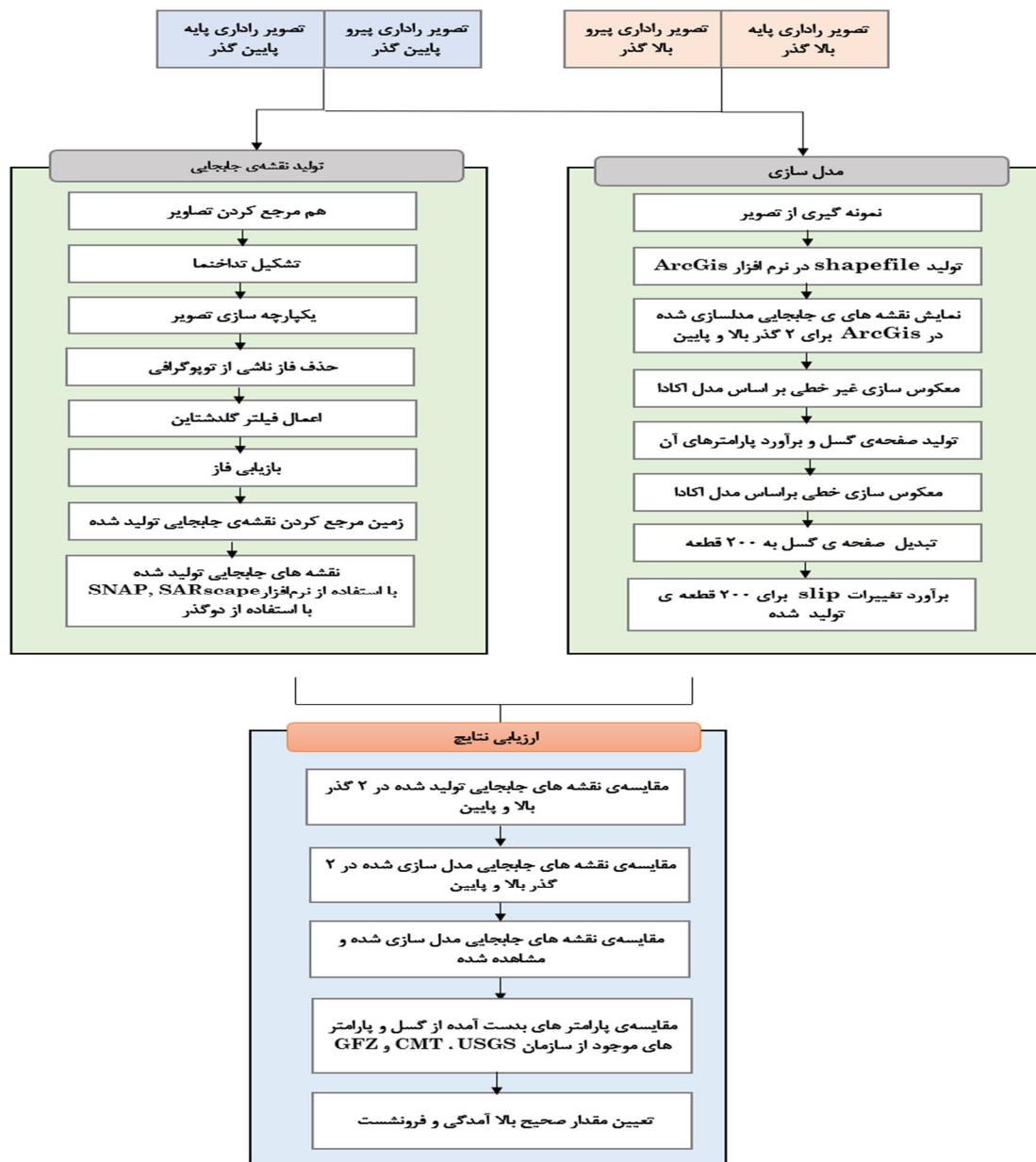
۱ Zagros Foredeep Fault

۲ Sentinel-1

۳ Azimuth

مدل استاندارد اکادا استفاده شده است [۱۵]. این مدل، جابجایی سطح ناشی از یک نابرجایی که توسط یک بردار لغزش روی سطح گسل مستطیلی مشخص می‌شود را محاسبه می‌کند. این مدلسازی از الگوریتم مارکورات استفاده می‌کند که پس از محاسبه جابجایی سطح از مشاهدات راداری ماهواره‌ای در دو مدار مختلف و مدلسازی معکوس مارکورات، پارامترهای گسل مسبب زمین‌لرزه محاسبه می‌شوند [۱۶]. برای محاسبه پارامترهای زلزله که یک فرایند تکراری دارد از مقادیر اولیه موجود در سایت‌های مختلف استفاده می‌شود. همچنین، مقادیر استخراج شده حاصل از جابجایی با استفاده از

تداخل‌سنجی و مدلسازی با یکدیگر مقایسه شده و با کم کردن این دو از یک دیگر، یک مدل باقی‌مانده ایجاد شده که بیشترین و کمترین میزان تفاوت بین مشاهدات راداری و مدلسازی تولید شده را قابل مشاهده خواهد کرد. در انتها با استفاده از یک مدلسازی خطی و صفحه مدل شده توسط مدل غیر خطی، به ۲۰۰ قطعه تقسیم شده و با ثابت نگه داشتن مقادیر پارامترهای گسل، پارامتر لغزش روی ۲۰۰ قطعه محاسبه و بیشترین میزان لغزش در این زلزله روی صفحه گسل مربوط به آن شناسایی می‌شود. به طور کلی مراحل انجام کار به صورت فلوچارت پیشنهادی در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲: فلوچارت روش پیشنهادی

۴- ارائه‌ی نتایج

۴-۱- جابجایی زمین‌لرزه با استفاده از دو گذر بالا

و پایین

به منظور بررسی میزان جابجایی منطقه گناوه در حالت صعودی تصویر ۲۲/۰۱/۱۴۰۰ تصویر پایه و ۰۱/۰۲/۱۴۰۰ به عنوان تصویر پیرو انتخاب شده و در حالت نزولی ۲۶/۰۱/۱۴۰۰ تصویر پایه و ۰۶/۰۲/۱۴۰۰ به عنوان تصویر پیرو انتخاب می‌شود.

این دو هندسه تفاوت‌هایی نیز با یکدیگر دارند که این تفاوت‌ها در مقادیر جابجایی آن‌ها که به واحد طول (متر) تبدیل می‌شود، مشاهده می‌شود.

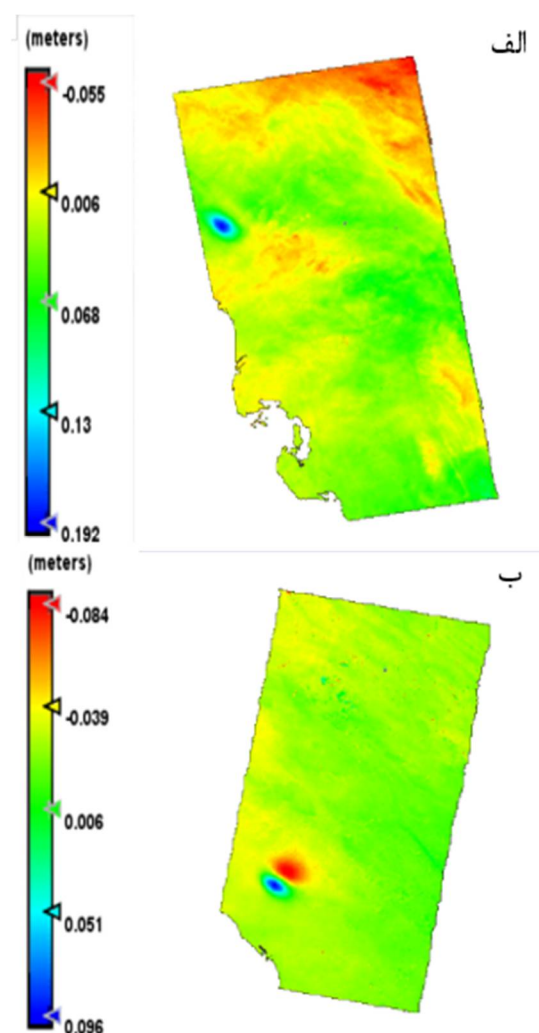
هر سیکل تغییرات رنگی در اینترفروگرام معادل جابجایی در سطح زمین به میزان نصف طول موج در راستای دید سنجنده می‌باشد. محدوده‌هایی که دچار تغییر شکل شده‌اند از لحاظ مکانی با یک الگوی مشخصی از فرینج‌ها مشخص می‌شود.

همچنین، با زمین‌مرجع کردن این تداخل‌نماها، مقادیر جابجایی آن‌ها در جهت دید سنجنده در گذر بالا و گذر پایین ایجاد شده که در شکل ۳ مقادیر این جابجایی قابل مشاهده می‌باشد. همچنین، مناطق با رنگ قرمز نشان‌دهنده فرونشست بوده که حاکی از دور شدن از دید سنجنده می‌باشد و مناطق با رنگ آبی نشان‌دهنده بالاآمدگی بوده که حاکی از نزدیک شدن به دید سنجنده است.

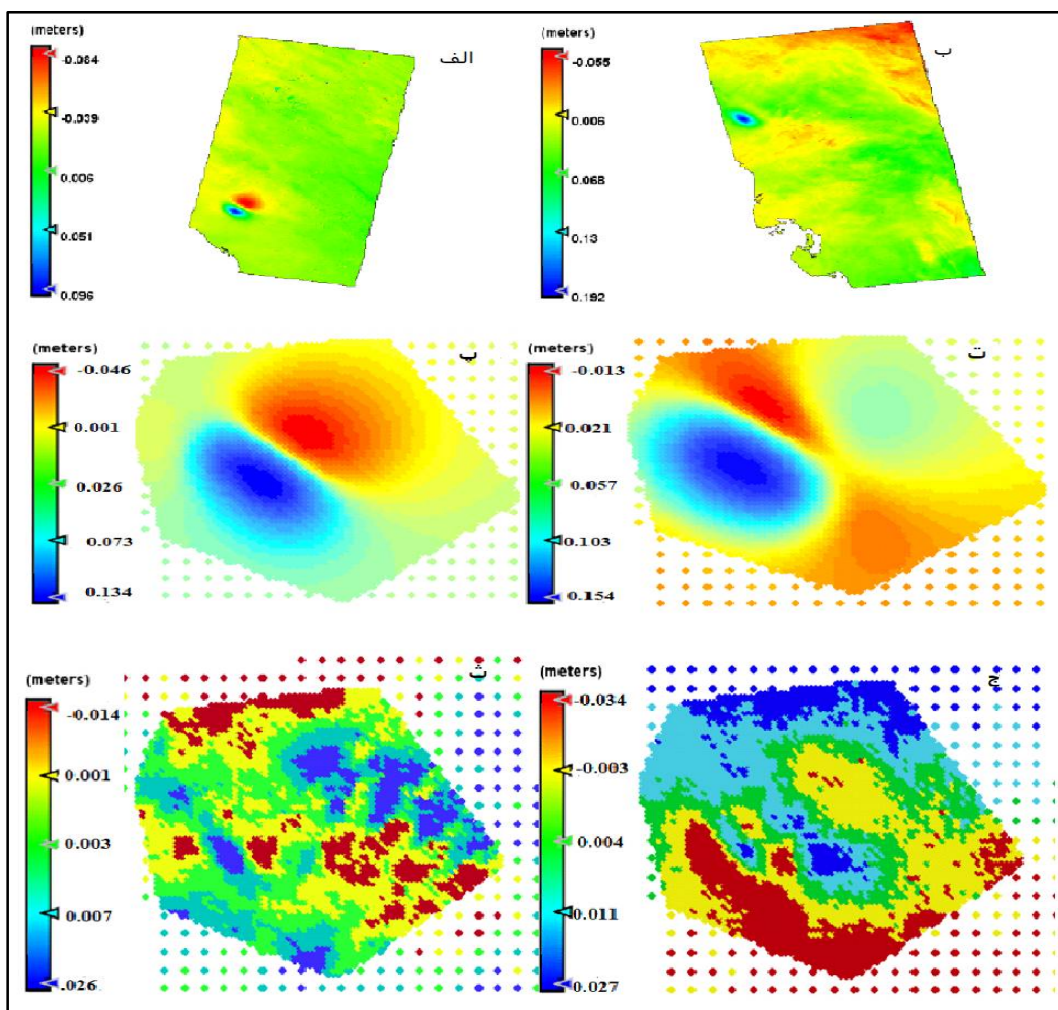
نتایج حاصل از پردازش‌ها نشان می‌دهد که برای داده‌های بالاگذر فرونشستی به میزان ۵۶ سانتی‌متر و بالا آمدگی به اندازه‌ی ۱۹۲ سانتی‌متر و برای داده‌های پایین گذر میزان فرونشست به اندازه ۵۵ سانتی‌متر و بالا آمدگی به اندازه‌ی ۹ سانتی‌متر در راستای دید ماهواره اتفاق افتاده است، دلیل این اختلاف نتایج حاصل از اختلاف دید ماهواره می‌باشد.

۴-۲- مدلسازی زمین‌لرزه بر اساس مشاهدات راداری

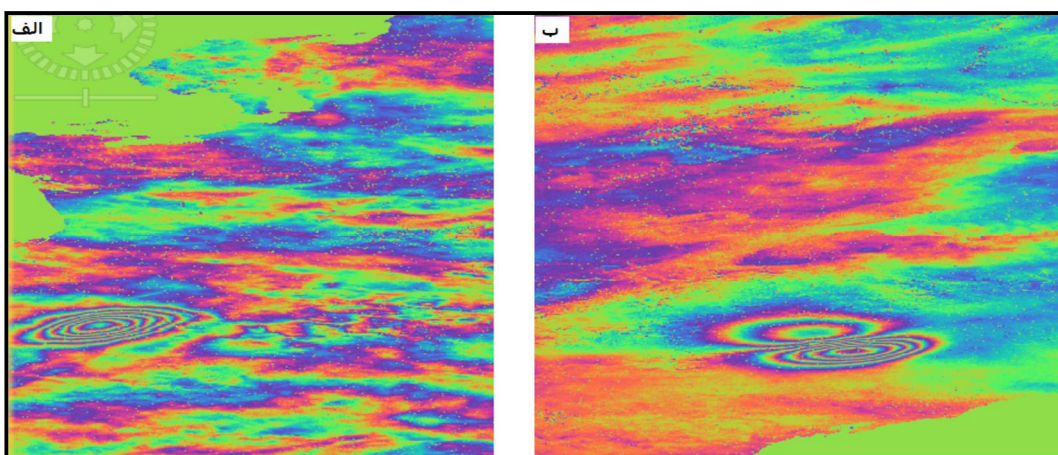
جابجایی گسل‌ها با استفاده از مشاهدات ماهواره‌های راداری و تکنیک تداخل‌سنجی راداری قابل اندازه‌گیری هستند. با استفاده از این مشاهدات می‌توان با حل معکوس^۱ به پارامترهای ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی منطقه دست پیدا کرد. بنابراین، ابتدا با استفاده از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری در دو مدار بالاگذر و پایین‌گذر، جابجایی رخ داده در گسل طبق مراحل ذکر شده مدلسازی شده و تفاوت آن در مقدار جابجایی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. همچنین، با تفاضل‌گیری از داده‌های جابجایی و مدلسازی‌شده، برای هریک از دو هندسه‌ی بالا گذر و پایین‌گذر تصاویر باقی‌مانده ایجاد می‌شود [۱۶] و [۱۷].



شکل ۳: جابجایی در جهت دید سنجنده. الف: میزان جابجایی در حالت صعودی. ب: میزان جابجایی در حالت نزولی

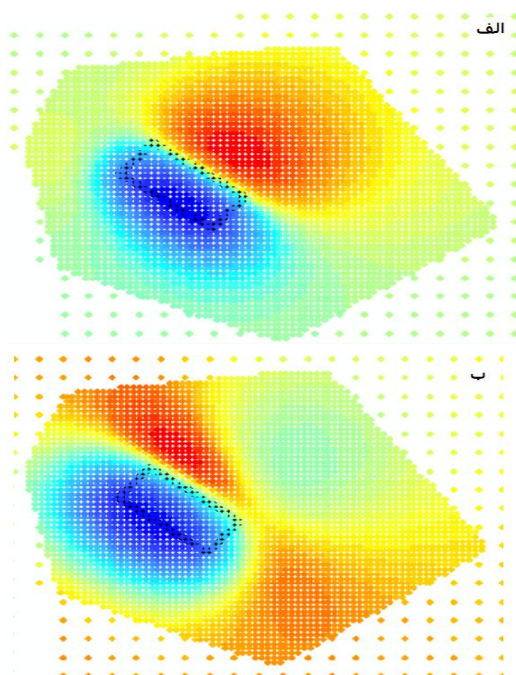


شکل ۴: تداخل‌نماهای نشان‌دهنده جابجایی (الف) جابجایی مشاهده‌شده برای هندسه پایین‌گذر. (ب) جابجایی مشاهده‌شده برای هندسه بالا‌گذر. (پ) جابجایی مدلسازی‌شده برای هندسه پایین‌گذر. (ت) جابجایی مدلسازی‌شده برای هندسه بالا‌گذر. (ث) باقی‌مانده حاصل از جابجایی مشاهده‌شده و مدلسازی‌شده برای هندسه پایین‌گذر. (ج) باقی‌مانده حاصل از جابجایی مشاهده‌شده و مدلسازی‌شده برای هندسه بالا‌گذر.



شکل ۵: تداخل‌نماهای تولید شده برای داده‌های سنتینل-۱ (الف) تداخل‌نمای مربوط به هندسه‌ی بالا‌گذر (ب) تداخل‌نمای مربوط به هندسه‌ی پایین‌گذر

و در نهایت مطابق شکل ۶ محل قرارگیری گسل روی دو تصویر بالاگذر و پایین گذر مدلسازی شده، دیده می شود. همانطور که از شکل ها مشخص است، محل قرارگیری گسل در حالت پایین گذر با وضوح بیشتری قابل مشاهده است. همچنین، مقادیر اولیه برای پارامترهای گسل که توسط یک مدلسازی غیر خطی بدست آمده اند، که در قالب جدول ۲ مشاهده می شود [۱۸].



شکل ۶: صفحه گسل بر روی جابجایی های ایجاد شده برای دو هندسه (الف) بالاگذر و (ب) پایین گذر.

در مرحله ی بعد، مقادیر جابجایی بدست آمده در نرم افزار SNAP با نرم افزار SARscape مقایسه شده است که این مقادیر جابجایی در شکل ۴ قابل مشاهده نیز می باشد. مقادیر بدست آمده برای این دو جابجایی به ترتیب برای دو هندسه پایین گذر و بالاگذر مقدار بالآمدگی ۹ و ۱۹ سانتی متر و فرونشست ۸- و ۵- سانتی متر در جهت دید سنجنده می باشد. همچنین، این مقادیر برای حالت مدلسازی شده طبق آن چه در شکل ۵ دیده می شود، به ترتیب برای دو هندسه پایین گذر و بالا گذر مقدار بالآمدگی ۱۳ و ۱۵ سانتی متر و فرونشست ۴- و ۱- سانتی متر در جهت دید سنجنده که تطابق خوبی با جابجایی بدست آمده از نرم افزار SARscape دارد. همچنین، می توان دو تصویر حاصل از جابجایی مشاهده شده و مدلسازی را از هم کم کرد و تصویر باقی مانده را بدست آورد که تصویر باقی مانده حاکی از تطابق خوب مقدار جابجایی مشاهده شده و مدلسازی شده دارد. بنابراین، مقادیر خطای نسبی حاصل از مدلسازی به ترتیب برای دو هندسه پایین گذر و بالا گذر برابر با مقادیر ۲ سانتی متر برای فرورفتگی و ۱- و ۳- سانتی متر برای بالآمدگی می باشد.

۴-۳- برآورد پارامترهای گسل مسبب زلزله

برای بدست آوردن پارامترهای گسل، ابتدا از ماژول Non-linear inversion استفاده کرده و براساس مدل اکادا 1985 یک مقدار اولیه برای گسل وارد نموده و این مرحله تا زمانی که گسل به محل اصلی خود برسد، تکرار می شود

جدول ۲: پارامترهای گسل بدست آمده برای زلزله ۲۹ فروردین ۱۴۰۰ گناوه

Width_M	Length_M	Depth_M	Strike_D	Rake_D	Dip_M	Slip_M	Coordinate_M	Coordinate_M
۴۶۳۶.۰۹۶	۹۴۱۷.۴۳۲	۳۹۳۶.۶۹۳	۳۰۸.۲۱۷	۸۷.۸۳	۲۲.۵۴۵	۰.۰۷۸۵۹	۴۶۵۹۱۰.۸۰۳	۳۲۹۳۳۷۰.۲۶۹

علاوه بر مراحل انجام شده، یک معکوس خطی نیز انجام داده و صفحه گسل را به ۲۰۰ قطعه تبدیل کرده که در این قطعات سایر پارامترهای مربوط به گسل ثابت و پارامتر لغزش^۱ متغیر بوده و در عمق های مختلف مربوط به هر قطعه این پارامتر سنجیده می شود که در شکل ۷ قطعات مختلف مربوط به این گسل مشاهده می شود.

مطابق با توضیحات ذکر شده یک معکوس غیر خطی اعمال می شود و یک صفحه برای گسل مطابق با شکل ۴ در نظر گرفته شده که این صفحه مستطیلی شکل بر روی دو هندسه بالاگذر و پایین گذر مشاهده می شود. محل قرارگیری آن بر روی گذر پایین گذر بهتر بوده زیرا بیشترین لغزش ایجاد شده مطابق با شکل ۶ بر روی مرکز گسل می باشد.

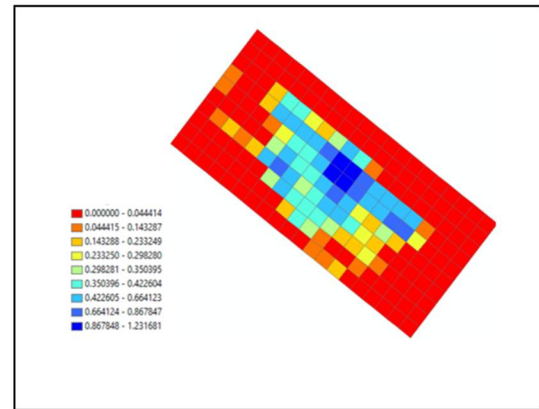
^۱ Slip

نسبی مدلسازی شده و مشاهده شده را نشان می‌دهد که مقادیر مختلف جابجایی در جدول ۳ مشاهده می‌شود.

جدول ۳: مقادیر جابجایی و مقایسه آن‌ها با مقادیر باقی‌مانده

Subsidence _Des	Subsidence _Asc	Uplift _Des	Uplift _Asc	Parameters
-۸	-۵	۹	۱۹	Observed data
-۴	-۱	۱۳	۱۵	Modeled data
-۱	-۳	۲	۲	Residual data

با توجه به اینکه در منطقه مورد بررسی داده ترازیبی یا GPS در دسترس نمی‌باشد، لذا امکان ارزیابی مطلق با استفاده از داده‌های واقعیت زمینی وجود ندارد. از این رو به منظور ارزیابی نتایج پردازش در این منطقه از روش اعتبارسنجی نسبی استفاده گردید. جهت اعتبارسنجی نسبی از دو گذر متفاوت سنجنده‌ی مورد نظر استفاده شد، که مقادیر نتایج بدست‌آمده در دو مدار بالاگذر و پایین گذر در هر دو نرم افزار صحت یکدیگر را تایید می‌کنند. همچنین، برای بدست‌آوردن پارامترهای گسل مقدار اولیه وارد شده از سایت سازمان‌های مختلف استخراج شده که این مقادیر در جدول ۴ قابل مشاهده هستند.



شکل ۷: مدل خطی برآورد شده نشان‌دهنده تغییرات Slip

طبق شکل ۷، تمامی پارامترهای گسل ثابت و فقط لغزش متغیر است که طبق مدل مورد نظر بیشترین مقدار لغزش در مرکز گسل بوده، این منطقه نیز در شکل‌های ۴ و ۳ نیز قابل مشاهده است که محل جداسازی دو صفحه گسل است.

۵- بحث و بررسی

مقادیر بدست‌آمده برای این دو جابه‌جایی به ترتیب برای دو هندسه نزولی و صعودی برای داده‌های مشاهده شده و مدلسازی شده بررسی شد که هرکدام به ترتیب به اندازه ۲ و ۳ سانتی‌متر با یکدیگر اختلاف داشتند که این موضوع خطای

جدول ۴: پارامترهای بدست‌آمده برای دو صفحه گسل

Fault plane 2			Fault plane 1			Solution
Rake (deg)	Dip (deg)	Strike (deg)	Rake (deg)	Dip (deg)	Strike (deg)	
۸۸	۶۴	۱۲۶	۹۴	۲۶	۳۱۰	^۱ Global CMT
۷۸	۷۹	۱۲۲	۱۳۷	۱۶	۳۵۱	^۲ USGS
۹۷	۷۴	۱۳۷	۶۴	۱۷	۲۹۱	^۳ GFZ

در انتها با انجام معکوس خطی و تبدیل صفحه گسل به ۲۰۰ قطعه با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها و تغییر پارامتر لغزش مقادیر مختلف این پارامتر در عمق‌های مختلف و قطعات مختلف بررسی می‌شوند که همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در قطعه ۶۹ بیشترین مقدار لغزش رخ داده‌است.

جهت ارزیابی نتایج حاصل از مدلسازی، مقادیر حاصل از مدلسازی معکوس مارکوارت در جهت برآورد پارامترهای گسل را که در جدول ۱ قابل مشاهده هستند، با مقادیر استخراج شده از سازمان‌های مختلف که در جدول ۳ نمایش داده شده‌اند، مقایسه کرده که نتایج حاصل از مقایسه تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارند.

^۳ <https://geofon.gfz-potsdam.de/>

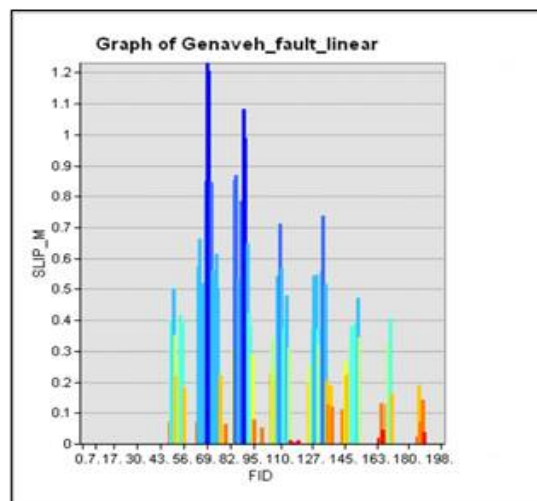
^۱ <https://www.globalcmt.org/>

^۲ <https://earthquake.usgs.gov/>

بدست آوردن جابجایی‌ها و از طرفی تعیین پارامترهای مسبب زلزله از موارد بسیار مهم در حوزه مهندسی بوده و با توجه به زلزله‌خیز بودن ایران روش‌های مختلفی در جهت برآورد مقادیر جابجایی و تعیین این پارامترها به کار گرفته می‌شود. از جمله روش‌های موثر برای تعیین این جابجایی‌ها تداخل‌سنجی راداری می‌باشد که در این مطالعه از این روش استفاده شده‌است و برای دو هندسه مستقل بالاگذر و پایین‌گذر مقادیر ۱۹ سانتی‌متر برآمدگی و ۸ سانتی‌متر فرونشست در جهت دید سنجنده برآورد شده‌است. همچنین، برای بدست آوردن مقادیر اولیه پارامترهای مسبب زلزله از داده‌های سازمان‌های مختلف ارائه دهنده در روش مدلسازی معکوس اکادا استفاده شده و مقادیر قابل قبولی برای هر کدام از این پارامترها بدست آمده‌است. در نهایت، مقادیر جابجایی بدست آمده از تکنیک تداخل‌سنجی با روش مدلسازی معکوس با یکدیگر مقایسه شده و تصاویر باقی‌مانده برای هر دو گذر بدست آمد. نتایج بدست آمده در هندسه پایین‌گذر با جابجایی مدلسازی شده تطابق بهتری در هندسه بالاگذر با جابجایی مدلسازی شده نسبت به جابجایی مشاهده شده را نشان می‌دهد. همچنین، با ثابت در نظر گرفتن مقادیر پارامترهای مختلف گسل و متغیر گرفتن پارامتر لغزش، این پارامتر در ۲۰۰ قطعه بررسی شده که طبق نتایج بدست آمده بیشترین مقدار لغزش در مرکز گسل و در قطعه ۶۹ می‌باشد.

سپاسگزاری

در پایان نویسندگان قصد دارند از تمام افراد و سازمان‌هایی که زمینه ایجاد این پژوهش را فراهم آورده‌اند تشکر کنند: آژانس فضایی اروپا جهت رایگان در اختیار قرار دادن داده‌های سنیتل-۱ و نرم‌افزارهای رایگان. سازمان‌های USGS، GFZ و CMT جهت در اختیار قرار دادن پارامترهای گسل.



شکل ۸: تغییرات لغزش در قطعات مختلف

۶- نتیجه‌گیری

شناسایی پارامترهای مسبب هر زمین‌لرزه بخشی از فرآیند درک صحیح از فعالیت‌های تکتونیکی در مناطق لرزه خیز می‌باشیم. ایران با قرارگیری بر روی کمربند زلزله همواره در معرض این پدیده طبیعی بوده و هست. از این رو استفاده از روش‌های نوین و دقیق جهت شناسایی پارامترهای گسل مسبب هر زلزله همواره مورد تاکید متخصصان بوده‌است. روش‌های اندازه‌گیری ماهواره‌ای با هزینه پایین و دقت قابل قبول به همراه اندازه‌گیری‌های زمینی، دقت محاسبات در تخمین میزان جابجایی ناشی از زلزله و مشخصه‌های هر گسل مسبب آن را به مقدار قابل توجهی افزایش داده‌است. روش تداخل‌سنجی راداری و استفاده از روش‌های مدلسازی از سریع‌ترین متدهای مطالعات تکتونوفیزیکی باشد که دقت قابل قبولی را به کاربر ارائه می‌دهد. نتایج به دست آمده از این روش‌ها با داده‌های شتاب نگاشت ثبت شده در ایستگاه زمینی، بیش از پیش به بالا رفتن دقت تحلیل کمک می‌کند.

مراجع

- [۱] Fialko, Y., Simons, M. and Agnew, D., 2001, The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw7.1 Hector Mine earthquake, California, 234 from space geodetic observations, *Geophysical Research Letters* 28(16) 2353063–3066.
- [۲] Howard A. Zebker, Richard M. Goldstein. 1986 Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations
- [۳] K. Gabriel, Richard M. Goldstein, Howard A. Zebker at 1989 Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry Andrew.
- [۴] Wright, T. J., Parsons, B. E. and Lu, Z., 2004, Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR, *Geophys. Res. Lett.*, 31,L01607, doi:10.1029/2003GL018827.

- [۵] Yasser Maghsoudi, Sahel Mahdavi, "Principle of Radar"
- [۶] S Karimzadeh, M Matsuoka, M Miyajima, B Adriano, A Fallahi , J Karashi, " Sequential SAR Coherence Method for the Monitoring of Buildings in Sarpole-Zahab, Iran", *Remote sensing and Envirment*, 10, 1255,2018
- [۷] Berberian, M. (1995) Master Blind Thrust Faults Hidden under the Zagros Folds: Active Basement Tectonics and Surface Morphotectonics. *Tectonophysics Journal*, 241, 193-224.
- [۸] H Beran GUNCE, B Taner SAN, " Measuring Earthquake-Induced Deformation in the South of Halabjah (Sarpol-e-Zahab) Using sentinel-1 data on November 12, 2017", *Proceedings*, 2, 346,2018.
- [۹] C Tolomei, N Svigkas, A Fathian Baneh, S Atzori, G Pezzo, " Surface Deformation and Source Modeling For The MW 7.3 IRAN Earthquake (November 12, 2017) Exploiting Sentinel-1 AND ALOS-2 INSAR Data ", *IGARSS*, Vol. 14, 3071-4, 2018.
- [۱۰] M Motage , S Vajedian, R Behling, M Haghshenas Haghighi, D scheffler, S Roessner, B Akbari, H Wetzel, and A Darabi, " 12 November 2017 Mw 7.3 Sarpol-e Zahab, Iran, earthquake: Results from combining radar and optical remote sensing measurements with geophysical modeling and field mapping ", *EGU General Assembly*, Vol. 20, EGU2018-10528-4, 2018.
- [۱۱] Okada, Y. (1985). "Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), 1135-1154.
- [۱۲] Pakdaman, Z golshadi, et. al (2017). Effect parameters are optimized for viewing satellite detected fault Persian date Esfand 1383 Zarand earthquake, based on radar interferometry method.
- [۱۳] Nissen, E., Yamini-Fard, F., Tatar, M., Gholamzadeh, A., Bergman, E., Elliott, J. R. Parsons, B. (2010). "The vertical separation of mainshock rupture and microseismicity at Qeshm island in the Zagros fold-and-thrust belt, Iran", *Earth and Planetary Science Letters*, 296(3-4), 181-194. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2010.04.049>.
- [۱۴] Nissen, E., Jackson, J., Jahani, S., & Tatar, M. (2014). "Zagros "phantom earthquakes" reassessed—The interplay of seismicity and deep salt flow in the Simply Folded Belt?", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*.
- [۱۵] 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.
- [۱۶] Marquardt, D. (1963). "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters", *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), 431-441. doi:10.1137/0111030
- [۱۷] R. Azzaro, S. Del Mese, G. Martini, S. Paolini, A. Screpanti, V. Verrubbi, and A. Tertulliani, "Rilievo macrosismico per il terremoto dell'isola di Ischia del 21 agosto 2017, Internal Report, doi:10.5281/zenodo.849091.