



مقایسه میزان جابجایی عمودی زمین با استفاده از الگوریتم SBAS در باندهای راداری X و C (مطالعه موردی: اراضی تهران)

مجتبی زارع کمالی^۱، سید علی الحسینی المدرسی^{۲*}، کریم نقدی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران
۲. دانشیار دانشکده فنی مهندسی، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران
۳. مربی گروه نقشه برداری، واحد تفت، دانشگاه آزاد اسلامی، تفت، ایران

مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:
دریافت: ۳۱ فروردین ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۶ مهر ۱۳۹۶
دسترسی اینترنتی: ۲۰ آبان ۱۳۹۶

واژه‌های کلیدی:

تداخل‌سنجی تفاضلی
الگوریتم SBAS
جابجایی عمودی زمین

چکیده

پوسته جامد زمین طی تاریخ زمین‌شناسی ثابت نبوده، بلکه تحت تأثیر عوامل داخلی و خارجی به طور دائم در حال تغییر شکل است. بالآآمدگی یا فروریختگی نقطه‌ای از قشر جامد زمین بخصوص در مناطق سست پوسته جامد زمین باعث ایجاد تغییراتی در سطح زمین می‌شود که می‌تواند باعث تخریب پدیده‌های طبیعی و انسان‌ساخت روی سطح زمین شود. در این پژوهش میزان جابجایی عمودی سطح زمین در اراضی تهران با استفاده از تحلیل سری زمانی بر مبنای الگوریتم طول خط مبنای مکانی کوتاه (SBAS) و تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی رادار با روزه مصنوعی (DINSAR) مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور از ۱۹ تصویر باند C سنجنده ASAR و ۱۱ تصویر باند X سنجنده (TERRA SAR) استفاده شد. بازه زمانی این تصاویر به ترتیب ۱۶۸۰ و ۱۸۷ روز بود. پس از پردازش تصاویر، نقشه‌های جابجایی سطح زمین برای تمامی تاریخ‌ها نسبت به تصویر اولیه محاسبه شد و نقشه میزان جابجایی عمودی سطح زمین در روز برای هر سنجنده تهیه گردید. بررسی نتایج دو سنجنده نشان داد که میزان نشست برای سنجنده ASAR به طور میانگین $0/761$ میلی‌متر در روز و برای سنجنده TERRA SAR به طور میانگین $0/777$ میلی‌متر در روز است. همچنین نتایج نشان داد که برخی نقاط بالآآمدگی داشته‌اند که میزان بالآآمدگی برای سنجنده ASAR به طور میانگین $0/529$ میلی‌متر در روز و برای سنجنده TERRA SAR به طور میانگین $0/476$ میلی‌متر در روز است. بطور کلی با وجود یکسان نبوده تاریخ و طول موج تصاویر مورد استفاده، نتایج بدست آمده برای مناطق نشست و بالآآمدگی برای هر دو سنجنده نزدیک به هم است.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: almodaresi@gmail.com

گرچه ارائه این روش‌ها گامی مؤثر در یک کاهش محدودیت‌های روش تداخل سنجی راداری سنتی بوده است، ولی هر یک از روش‌های پردازش پراکنش‌کننده‌های دائمی معایبی دارد که استفاده بهینه از آن را در شرایط مختلف با مشکل روبه‌رو می‌سازد (۱). تحلیل سری زمانی به کمک تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) با استفاده از الگوریتم SBAS توانایی خود را در پایش تغییرات زمانی سطح زمین نشان داده است به منظور کاهش اثر عدم همبستگی زمینی ناشی از اراضی، تنها اینترفروگرام‌های با طول خط مبنای زمانی کوتاه در تحلیل سری زمانی ایجاد می‌شود. لی و همکاران (۱۶) به بررسی تغییرات آتش‌فشان آگوستین در جنوب غربی آلاسکا که با استفاده از الگوریتم SBAS و سنجنده ERS 1 و ۲ در سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۵ به تغییرات مخروط آتش‌فشان پرداخته‌اند که نتایج نشان‌دهنده تغییرات نرخ ۲ تا ۸ سانتی‌متر در سال در دهانه آتش‌فشان را نشان می‌دهد که علت این تغییر فعال بودن آتش‌فشان و تغییرات ماگما بوده است. شانکر و همکاران (۲۳) در مطالعه‌ای با استفاده از داده‌های ERS (سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۰) در جنوب سانفرانسیسکو به مقایسه تکنیک PS و SBAS پرداخته‌اند. نتایج تکنیک SBAS نشان‌دهنده تغییرات سطح حدود ۱ میلی‌متر تا ۵ میلی‌متر در سال را نشان داد که نتایج آن بهتر از PS برای تغییرات سطح بود. دانگ و همکاران (۱۰) در منطقه دشت دلتای رود واقع در شهر شانگهای چین که یکی از مناطق مستعد برای فرونشست به دلیل استفاده بیش از حد از آب‌های زیرزمینی و گسترش بی‌رویه شهری و توسعه اقتصادی است که در این مطالعه با استفاده از الگوریتم SBAS در سری زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ با استفاده از ۲۰ تصویر از سنجنده ALOSE PALSAR که نتایج به طور کلی نشان‌دهنده ۵/۰ سانتی‌متر فرونشست در مناطق شهری که نرخ یک تا سه سانتی‌متر در سال در اطراف بزرگراه‌ها و خطوط مترو و ساختمان‌های بلند به دست آمد و در مناطق حاشیه شهر نرخ بسیار پایینی را نشان می‌دهد و در مناطقی که در حال توسعه است نرخ یک سانتی‌متر در سال را نشان می‌دهد. سیگنا و همکاران (۹) در مطالعه‌ای تحت عنوان محاسبه زمین‌لغزش با تکنیک SBAS

تغییرات سطح زمین به میزان قابل توجهی باعث افزایش روند بلایای طبیعی می‌شوند که اثر این بلایا باعث خسارت شدید به عوارض روی سطح زمین می‌شود و با بهره‌گیری از تکنیک‌های راداری که به منظور شناسایی و هشدار و کاهش خسارات مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۸). در طول ۲۵ سال گذشته پردازش تصویر به روش تداخل سنجی رادار با روزه مصنوعی (INSAR) به طور گسترده‌ای مورد استفاده برای تشخیص حرکات کوچک زمین و تغییرات سطح زمین به خصوص در طول ۱۰ سال گذشته با افزایش ماهواره‌های راداری موجود در جو که توانایی بهبود و پردازش الگوریتم‌های اندازه‌گیری تغییرات سیگنال در تغییرات زمین را دارند (۲۴). تکنیک (INSAR) توانای بالقوه‌ای برای ایجاد نقشه‌های تغییرات شکل زمین که در اثر حوادث مختلف مانند سیل، زلزله، آتشفشان و هر گونه بلایای طبیعی که باعث تغییر شکل زمین می‌شود را دارد (۸). سنجنش از دور فعال دارای سنجنده‌هایی است که امواجی را از خود تولید می‌کنند و با ارسال آن به سمت هدف مورد نظر و دریافت انرژی برگشتی از آن، به هندسه یا ویژگی‌های هدف پی می‌برند (۲۲). در سال‌های اخیر روش‌های نوینی بر پایه روش تداخل سنجی راداری ارائه شده است که تنها از نقاطی که در طول زمان ویژگی‌های بازپراکنشی (Back-scatterer) برای پایش تغییرات استفاده می‌کنند (۱۳). تداخل سنجی 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 پوسته زمین است (۱۴). این تکنیک اولین بار در سال ۱۹۸۶ برای تولید نقشه توپوگرافی مورد استفاده قرار گرفت (۱۳)، پس از آن به سرعت در کاربردهای مختلف مانند برآورد جابجایی ناشی از زلزله، مطالعه آتشفشان (۱۸) بررسی فرونشست و بالا آمدگی ناشی از فعالیت گسل‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت (۵). پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی با وجود خط مبنای زمانی و مکانی بزرگ کوه‌رنسی بالایی دارند و از نبود همبستگی تصاویر SAR کمتر تأثیر می‌پذیرند.

پژوهش نشان‌دهنده نرخ رانش افقی سطح زمین بین ۷ تا ۱۰ سانتیمتر در سال است. الفارباوی و تامورا (۱۱) به بررسی اثر زلزله توکوهو ژاپن با استفاده از تصاویر سنجنده ASAR و الگوریتم SBAS به این نتیجه دست یافتند که این زلزله تغییرات ۶/۹ سانتیمتر در سطح زمین ایجاد نموده که در مقایسه با نقاط GPS دقیق دارای دقت مناسبی بودند. کیو و همکاران (۲۰) در تالابی در خلیج مکزیک به بررسی میزان تغییرات سطح این تالاب پرداختند که در این پژوهش از تصاویر ماهواره ERS1,2 و ALOSE PALSAR با الگوریتم SBAS استفاده شد که تصاویر اخذ شده بین سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳ و ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ بودند که نتایج بیانگر نرخ ۵/۳ میلی‌متر نشست در سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳ و ۳۰ میلی‌متر در سال برای بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ بودند. حقیقت مهر و همکاران (۲) در مطالعه‌ای تحت عنوان تحلیل سری زمانی فرونشست هشتگرد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و سامانه موقعیت‌یاب جهانی که برای اولین بار در ایران به منظور ارزیابی قابلیت روش تداخل‌سنجی، از مقایسه هم‌زمان مشاهدات سامانه موقعیت‌یاب جهانی GPS و داده‌های راداری در دشت هشتگرد که به علت استخراج نامناسب آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر فرونشست است، استفاده شده است و به منظور تحلیل سری زمانی جابجایی سطح زمین، الگوریتم خط مبنای کوتاه موسوم SBAS به کار گرفته شده است. تحلیل سری زمانی فرونشست با استفاده از شش تداخل‌نگاشت محاسبه شده از چهار تصویر سنجنده ASAR در بازه زمانی چهارماهه در سال ۲۰۰۸ انجام شده است. نتایج حاصل سری زمانی نشان داده که منطقه بطور پیوسته در حال نشست است و نقشه سرعت میانگین تغییر شکل در راستای خط دید ماهواره که از تحلیل سری زمانی به دست آمده آهنگ قابل‌توجه فرونشست را ۴۸ میلی‌متر در ماه نشان داد. دهقانی (۳) در مطالعه‌ای به تحلیل سری زمانی به کمک ۱۲ تصویر ENVISAT ASAR در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ برای مطالعه رفتار زمانی فرونشست با استفاده از الگوریتم SBAS در دشت مشهد پرداخت. هدف اصلی این مطالعه اندازه‌گیری مقدار جابجایی ناشی از فرونشست با رویکرد کاهش انواع خطاها است، بیشترین مقدار نرخ

با استفاده از تصاویر COSMO SKY در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ در منطقه پیانا دگلی در ایتالیا توسط ۳۶ تصویر بالاگذر و ۳۸ تصویر پایین‌گذر انجام گرفت که نتایج آن به این گونه است. بیشترین نرخ لغزش زمین ۵/۵ تا ۶/۴ میلی‌متر در سال تا نرخ متوسط کلی ۰/۶ میلی‌متر در سال برای تصاویر بالاگذر و ۰/۱ میلی‌متر برای تصاویر پایین‌گذر است که بیانگر لغزش بسیار آهسته و حتی کم‌تر از آن در سال است. باتسون و همکاران (۶) با استفاده از تداخل‌سنجی تفاضلی رادار و الگوریتم SBAS به بررسی منطقه والف در جنوب انگلستان با استفاده از سنجنده ERS طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۹ به بررسی حرکت پوسته زمین پرداخته‌اند که نتایج آن بیانگر نرخ رشد ۱ سانتی‌متری بالآمدگی سطح زمین در سال است که این بالآمدگی در نتیجه جهش آب زیرزمینی توسط لایه‌های زمین‌شناسی که دارای زغال‌سنگ است اتفاق افتاده است. ژانگ و همکاران (۲۶) در منطقه آنهپو چین با استفاده از الگوریتم PS و SBAS و تصاویر RADARSAT1,2 در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳ به مطالعه فرونشست زمین پرداختند که نتایج آن بیانگر نرخ تغییرات ۵ سانتیمتری فرونشست در سال است. سوتر و سیگنا (۲۴) در پژوهشی به ارتقاء الگوریتم SBAS پرداختند که در این پژوهش PHASE UNWRAPING برای بیس لاین‌های کوتاه و بلند به طور جداگانه از تکنیک‌های SBAS و ISBAS (SBAS اصلاح شده) استفاده کردند که نتایج ISBAS به وضوح بهتر از SBAS به دست آمد. کیم و همکاران (۱۵) در مطالعه‌ای در منطقه توسان آریزونا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ENVISAT, ALOSE PALSAR به بررسی میزان فرونشست زمین با استفاده از الگوریتم SBSA پرداختند که در این پژوهش به رابطه‌ی مستقیم افت سطح آب زیرزمینی با میزان فرونشست زمین رسیدند که نتایج ALOSE بیانگر نرخ نشست ۳ سانتیمتر در سال و برای ENVISAT 2.9 سانتیمتر در سال به دست آمد. ابیر و همکاران (۴) در منطقه‌ای در شمال پاکستان به بررسی میزان رانش سطح زمین در منطقه فلات نمک کوهات پرداختند، در این مطالعه از الگوریتم SBSA با تصاویر ماهواره‌ای ALOSE PALSAR در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ استفاده نمودند که نتایج حاصل از این

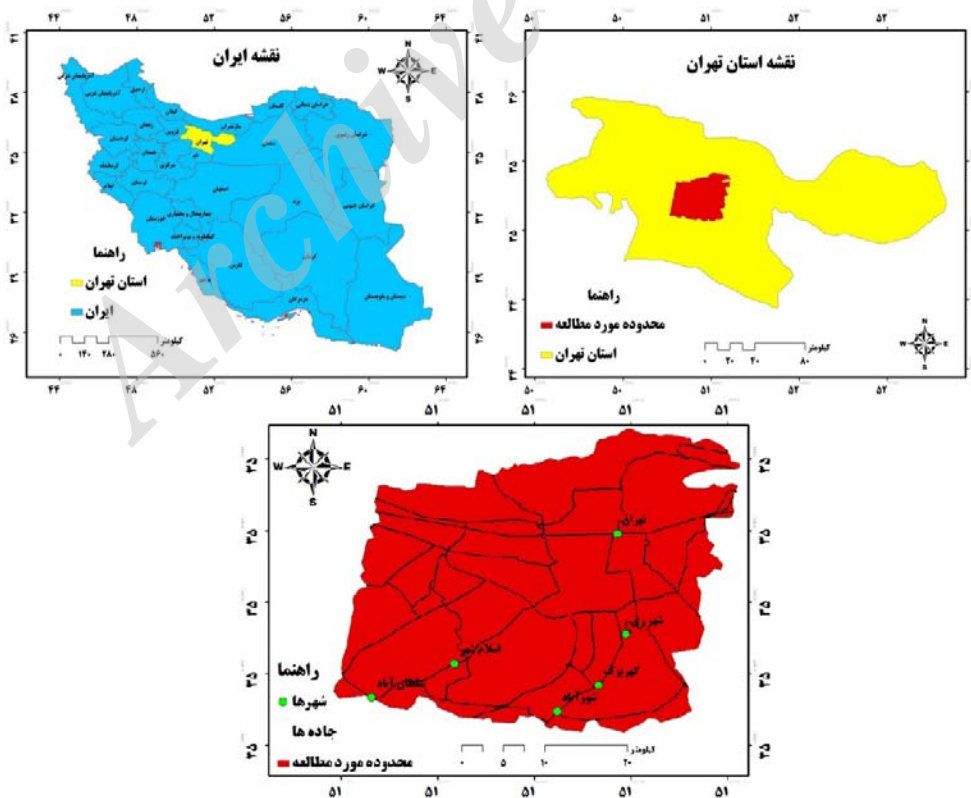
به همراه آنالیز سری زمانی می‌توانیم تغییرات سطح اعم از تغییرات فصلی و تغییرات بلند مدت را با استفاده از باندهای مختلف بدست آورده و نتایج متفاوت به دست آمده از آن‌ها را باهم مقایسه نموده و نتیجه بگیریم که برای به دست آوردن میزان تغییرات جابه‌جایی سطح زمین کدام امواج نتایج بهتری را به ما نشان می‌دهد تا بتوانیم در مناطق مختلف از آن استفاده کنیم.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعه در محدوده $51^{\circ} 06'$ تا $51^{\circ} 38'$ طول شرقی و $35^{\circ} 34'$ تا $35^{\circ} 51'$ عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد بین ۱۸۰۰ متر در شمال تا ۵۶۱۰ متر در مرکز و ۱۰۵۰ متر در جنوب متغیر است (شکل ۱).

فرونشست ۲۳ سانتیمتر در سال برآورد شد. همچنین رابطه تنش- کرنش در سفره آب‌های زیرزمینی با ترکیب اطلاعات سطح آب چاه‌های پیژومتری و نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. هدف این پژوهش اندازه‌گیری مقدار جابجایی ناشی از تغییرات سطح زمین با رویکرد کاهش انواع خطاها است. رابطه تنش- کرنش با استفاده از اندازه‌گیری‌های تداخل سنجی استخراج شد و همچنین ارزیابی مقایسه‌ای اثرات طول‌موج‌های راداری بر تغییرات میزان جابه‌جایی (Displacement) در باندهای راداری x و c با استفاده از الگوریتم SBAS برای یک سری زمانی است که در این پژوهش با نظارت بر تغییر شکل زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان یک ابزار دقیق و اقتصادی برای تصویر مقادیر فرونشست عرصه‌های طبیعی زمین و بالآمدگی آن را فراهم آوردیم که در نهایت برای پیشگیری از فاجعه و کاهش خطرات برای حفاظت از جان و مال مردم است؛ که در نهایت با بکار بردن تعدادی اینترفروگرام



داده‌های مورد استفاده

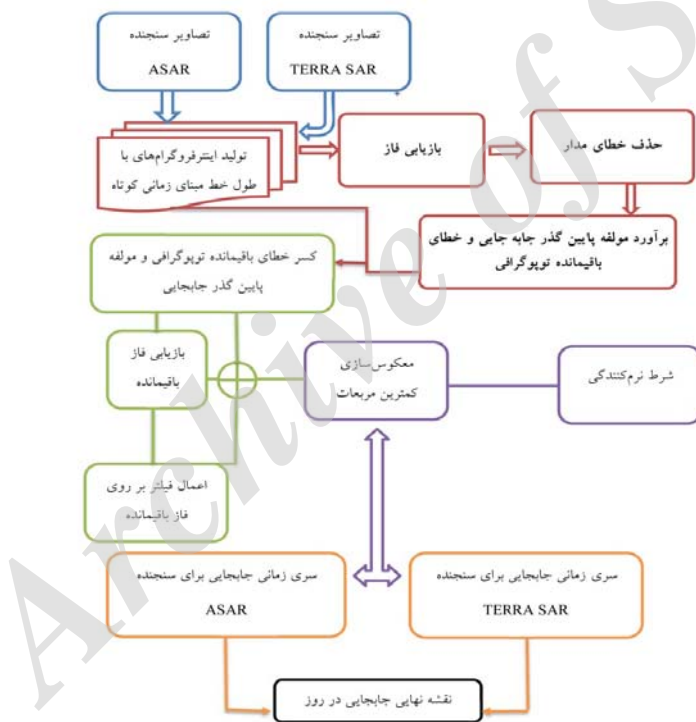
Terra sar x band

در این پژوهش از ۱۱ تصویر ماهواره Terra SAR X در بازه زمانی سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳ در منطقه تهران مورد استفاده قرار گرفت، سنجنده مایکروویوی است که در طول موج X و در حالات مختلفی تصویربرداری می‌کند، این سنجنده جابجایی‌های بیش از نصف طول موج خود را با دقت کمتر از میلی‌متر در سطح زمین نشان دهد گرفت (۲۶). مد تصویربرداری که برای این پژوهش استفاده شده Stripmap است مد Stripmap یک نوار باریک زمینی با توالی مداوم پالس در زمان تصویربرداری است و که در یک ارتفاع خاص و یک

زاویه ثابت شده‌اند و همچنین جهت گذر ماهواره پایین‌گذر و تصاویر دارای پلاریزاسیون HH می‌باشند.

داده‌های ماهواره ENVISAT ASAR

از ۱۹ تصویر ماهواره ENVISAT در بازه زمانی سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۹ از محدوده منطقه مورد مطالعه استفاده گردید (۲۹). تصاویر سنجنده ASAR مورد استفاده قرار گرفته دارای پلاریزاسیون HH و جهت گذر ماهواره پایین‌گذر می‌باشند. مراحل انجام تحقیق در این مطالعه در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲. مراحل انجام تحقیق

روش تحقیق

تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری

روشی برای ترکیب تصاویر SAR اخذ شده از سنجنده‌های راداری نصب شده روی ماهواره یا هواپیما به منظور تهیه نقشه‌های ارتفاعی، جابجایی و تغییرات سطح زمین

و نیز تعیین سرعت حرکت TARGET است تداخل سنجی تفاضلی DINSAR برآوردی از تغییرات سطح (هم از نظر مسطحاتی و هم ارتفاعی) توسط تداخل سنجی را بیان می‌کند (۱۲). اساس آن مشابه نقشه‌برداری زمینی برای جمع‌آوری داده در تهیه نقشه منحنی میزان رستری که ۵ سال قبل تهیه شده

میزان تغییر ارتفاع منطقه (نشست یا بالاآمدگی) مورد استفاده قرار می‌گیرد، بر اساس داده موجود و همچنین بازه زمانی تغییرات (کوتاه یا بلند)، روش‌های متفاوتی استفاده می‌شود. اولین بار ماسونت و فیگل (۱۸) از دو تصویر راداری ERS-1 برای محاسبه جابجایی ناشی از زلزله استفاده گردید. در این مطالعه از مدل رقومی ارتفاعی از پیش تعیین شده منطقه برای حذف فاز ناشی از توپوگرافی استفاده شد. در صورت عدم دسترسی به مدل رقومی ارتفاعی منطقه، می‌توان از سه تصویر راداری (که یک زوج آن با طول خط مبنای زمانی کوتاه قادر به تولید فاز توپوگرافی باشند) برای برآورد جابجایی استفاده کرد (۲۵). یکی از پرکاربردترین روش‌ها در تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی به روش سنتی استفاده از تصاویر سری زمانی راداری با خط مبنای مکانی کوتاه است. در واقع، مبنای این روش استفاده از تصاویری است که از نظر زمانی با هم متفاوت و از نظر مکانی با هم یکسان هستند (۷). همچنین در این روش برای اجتناب از خط مبنای مکانی بلند و رسیدن به تداخل‌نماهای همبسته، به جای تشکیل تداخل‌نماها نسبت به یک تصویر پایه، آن‌ها را با استفاده از زوج تصویرهایی که خط مبنای مکانی و زمانی کوتاهی دارند تولید می‌کنند. ترکیب تصاویر SLC به منظور ایجاد بیس لاین زمانی و مکانی است که اگر تعداد تصاویر موجود N باشد طبق رابطه $(N*(N-1))/2$ تداخل‌نگار مشخص و ماکزیمم تداخل‌نگارهایی که می‌تواند از N تصویر ایجاد شود، تعیین گردید (۲۱) Connection Graph. اجازه می‌دهد تا با انتخاب قابل اعتمادترین زوج تداخل‌نگار و نزدیک‌ترین فاصله زمانی و مکانی تولید شود برای انتخاب بیس لاین و حد درست آن ۴۵ تا ۵۰ درصد بیس لاین بحرانی را می‌توان به عنوان بیس لاین مناسب برای الگوریتم SBAS انتخاب نمود، بیس لاین زمانی برای مناطق خشک می‌تواند حداکثر بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ روز متغیر باشد که در مناطق مرطوب و سرسبز این عدد به شدت کاهش پیدا می‌کند و برای شرایط آب و هوایی دیگر نیز همین اتفاق می‌افتد و دلیل آن این است که تصاویر سنجنده نمی‌تواند Coregister گردد (۲۱).

است و یک نقشه منحنی میزان رستری که یک هفته قبل تهیه شده است (نقشه رستری که از پیکسل‌هایی ساخته شده که مقادیر عددی پیکسل‌ها بیانگر ارتفاعات است). اختلاف بین دو حاصل از تداخل‌سنجی، تغییرات موجود در سطح زمین را نشان می‌دهد. برای تولید دو DEM، از چهار تصویر SAR با فرمت SLC استفاده گردید. از آنجا که اولین DEM حاصل از تداخل‌سنجی باید تقریب خوبی از ارتفاع سطح زمین را بیان کند، پس باید توسط یک زوج تصویر رادار با طول باز بلند تولید شده باشد. درحالی که چون دومین DEM حاصل از تداخل‌سنجی باید بیشترین جزئیات سطح را نشان دهد باید از زوج تصویری با طول باز کوتاه‌تر حاصل شود. در جاهایی که تارگتی (نظیر کوه یخی) در حرکت است طول باز برای دومین زوج تصویر SAR با فرمت SLC باید کوتاه‌تر باشد. طول خط باز باید به ترتیب از مرتبه ۳۰۰ متر، ۲۰ متر و ۵ متر برای تولید DEM، برای بررسی جابجایی زمین و کاربردهای تجزیه و تحلیل حرکت باشد (۱۹). برای اینکه DINSAR با موفقیت همراه باشد، میزان همبستگی پایین بین دو تداخل‌سنجی باید تا حد امکان کوچک باشد. در مناطق آبی، یا نواحی با پوشش جنگلی، همبستگی پایین به سرعت رخ می‌دهد بطوری که جدا کردن اثرات تغییر شکل زمین، فرونشست زمین یا حرکت توده یخی از اثرات همبستگی پایین غیرممکن می‌شود. طول‌موج‌های بلند کمتر از طول‌موج‌های کوتاه همبستگی پایین دارند، بطوری که آن‌ها در کاناپه ۱ گیاهان بیشتر نفوذ می‌کنند و کمتر تحت تأثیر هندسه کاناپه گیاهان قرار می‌گیرند. عیب دوم آن است که جابجایی تنها در طول خط دید SAR اندازه‌گیری می‌شود. اثرات اتمسفری ممکن است فرینچ‌های ۲ ساختگی در تداخل‌سنجی تولید کند، بویژه اگر فاصله بین تاریخ‌های اخذ دو تصویر نسبتاً زیاد باشد. اگرچه روش DINSAR از دیدگاه نظری قادر است جابه‌جایی‌ها را تا حد میلی‌متر اندازه‌گیری کند (۲۰).

الگوریتم SBAS

در روش سنتی تداخل‌سنجی تفاضلی که به‌منظور برآورد

تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری

تداخل سنجی راداری برای ایجاد سری زمانی جابجایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. معکوس‌سازی کمترین مربعات برای محاسبه سری زمانی جابجایی به شرط اینکه تعداد اینترفروگرام‌ها کافی و زنجیره اینترفروگرام‌ها گسسته نباشد به کار می‌رود. در تحلیل سری زمانی، مقادیر جابجایی، برای هر تاریخ اخذ تصویر با در نظر گرفتن تاریخ اول به صورت معلوم برآورد می‌شوند. فاز تداخل سنجی راداری که از اختلاف فاز دو تصویر پایه حاصل می‌شود از رابطه ۱ تعیین می‌گردد.

$$\psi_{x,i} = W \{ \phi_{D,x,i} + \phi_{A,x,i} + \Delta\phi_{S,x,i} + \Delta\phi_{topo,x,i} + \phi_{N,x,i} \} \quad [1]$$

در این رابطه؛ $\phi_{D, x, i}$ مؤلفه فاز مربوط به جابجایی سطح، $\phi_{A, x, i}$ مؤلفه مربوط به اثر اتمسفر، $\Delta\phi_{S, x, i}$ فاز مربوط به اثر خطاهای مداری، $\Delta\phi_{topo, x, i}$ فاز مربوط به اثر توپوگرافی باقیمانده ناشی از عدم دقت مدل ارتفاعی (DEM) استفاده شده و $\phi_{N, x, i}$ فاز نویز ناشی از عدم همبستگی است. از میان مؤلفه‌های بالا اثر مربوط به توپوگرافی و اثر اتمسفر منجر به کاهش دقت نتایج حاصل از سری زمانی می‌شود. در این مطالعه سعی در کاهش این دو اثر در بهبود نتایج تحلیل سری زمانی داریم. مؤلفه‌های ناشی از خطای مدار و عدم همبستگی نیز در الگوریتم پیشنهادی کاهش می‌یابند. برای جلوگیری از کمبود رتبه در ماتریس ضرایب حل کمترین مربعات اینترفروگرام‌های با طول مبنای مکانی بلند نیز پردازش شده است. با افزایش طول خط مبنای مکانی خطای باقیمانده توپوگرافی نیز در اینترفروگرام افزایش می‌یابد. در نتیجه اینترفروگرام‌ها باید قبل از ورود به تحلیل سری زمانی اصلاح شوند. پس از مرحله باریابی فاز، خطای مداری با برازش یک صفحه در خارج از منطقه جابجایی و کم نمودن آن صفحه از اینترفروگرام‌ها حذف گردید. در مرحله بعد روشی برای کاهش اثر توپوگرافی باقیمانده مورد استفاده قرار گرفت. همانگونه که در رابطه ۲ بیان شده است، در این روش فرض می‌شود که فاز تابعی از سرعت جابجایی، v ، شتاب جابجایی، a و تغییرات شتاب دل‌تا a است.

$$\phi(t_i) = \bar{v} \cdot (t_i - t_o) + \frac{1}{2} \bar{a} \cdot (t_i - t_o)^2 + \frac{1}{6} \Delta \bar{a} \cdot (t_i - t_o)^3 \quad [2]$$

در این رابطه؛ $\phi(t_i)$ مؤلفه پایین‌گذر جابجایی است. منظور از مؤلفه پایین‌گذر، مؤلفه‌ای از جابجایی است که در زمان دارای تغییرات آهسته است و به راحتی آن را بتوان مدل نمود. مثل مؤلفه خطی، درجه ۲ یا ۳. پارامترهای مؤلفه جابجایی شامل سرعت، شتاب و تغییرات شتاب به همراه خطای توپوگرافی ناشی از عدم دقت مدل ارتفاعی برآورد می‌گردد. مؤلفه پایین‌گذر برآورد شده به همراه اثر توپوگرافی به صورت فاز بازیابی نشده از هر اینترفروگرام کسر می‌گردد. این عمل منجر به کاهش نرخ فرینج در اینترفروگرام‌ها می‌شود. در نتیجه به راحتی می‌توان با بکار گرفتن یک فیلتر تطبیقی نویز هر اینترفروگرام را بدون نگرانی از تخریب فرینج‌ها کاهش داد. کاهش نویز منجر به افزایش دقت بازیابی می‌گردد. فاز بازیابی شده نهایی اصلاح شده با برگرداندن مؤلفه پایین‌گذر به اینترفروگرام‌ها حاصل می‌شود. در این مرحله اینترفروگرام‌ها از طریق حل کمترین مربعات به مقادیر جابجایی در هر تاریخ تبدیل می‌شوند. به منظور کاهش اثرات اتمسفر و خطای بازیابی فاز، یک شرط نرم‌کنندگی به مسأله معکوس‌سازی حل کمترین مربعات اضافه می‌شود. این شرط نرم‌کنندگی بر مبنای تقریب تفاضل محدود برای مشتق درجه دوم سری زمانی با استفاده از مفهوم خم کمیته یعنی سرعت ثابت می‌باشد (۱۷). پس از حل کمترین مربعات، مقدار جابجایی در هر تاریخ بدست می‌آید.

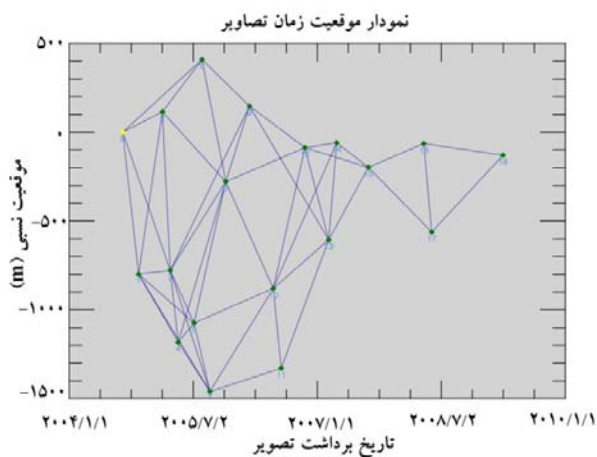
نتایج

بیس‌لاین (Baseline) سنجنده ENVISAT ASAR

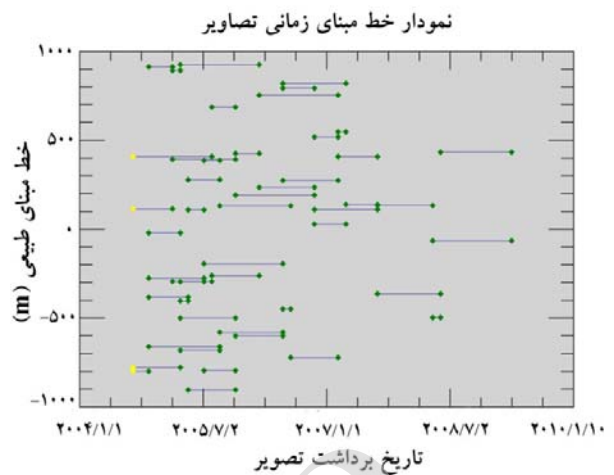
در مرحله اول اینترفرومتری میزان بیس‌لاین در تصاویر مورد نظر اندازه‌گیری می‌شود تا اندازه بیس‌لاین‌های زمانی و مکانی بررسی شود که در شکل ۳ بیس‌لاین‌های زمانی تصاویر و در شکل ۴ بیس‌لاین‌های مکانی تصاویر نسبت به هم را مشاهده و در جدول ۱ نتایج مقادیر بیس‌لاین برای سنجنده ASAR ارائه شده است.

جدول ۱. مقادیر و نتایج بیس لاین (خط مبنا) سنجنده ASAR

مدت تصویر	تاریخ	فاصله زمانی (روز)	فاصله مکانی (متر)	حداکثر فاصله مکانی مناسب (متر)	ابهام ارتباطی (متر)	جابجایی در جهت ازیموت (متر)	جابجایی در جهت رنج (متر)
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۷۰	-۷۹۹	-۲۱۵۹/۶۲	۲۳/۱۲۲۳	۴/۵۵۷۷	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۴/۱۱/۰۲			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۱۷۵	۱۱۴	-۲۱۵۹/۶۲	۱۶۱/۸۳۵	۵/۴۲۷۸	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۵/۰۲/۱۵			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۲۱۰	-۷۷۸	-۲۱۵۹/۶۲	۲۳/۷۴۱۴	۶/۷۷۵۶	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۵/۰۳/۲۲			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۲۴۵	-۱۱۸۲	-۲۱۵۹/۶۲	۱۵/۶۳۱۶	۲/۵۶۰۹	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۵/۰۴/۰۶			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۳۱۵	-۱۰۷۴	-۲۱۵۹/۶۲	۱۷/۲۰۶۶	۵/۳۳۶۷	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۵/۰۷/۰۵			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۳۵۰	۴۰۸	-۲۱۵۹/۶۲	۴۵/۲۴۸۲	-۴/۰۳۵۹	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۵/۰۸/۰۹			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۳۸۵	-۱۴۶۰	-۲۱۵۹/۶۲	۱۲/۶۵۶۳	۲/۲۰۶۱	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۵/۰۹/۱۳			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۴۵۵	-۲۷۸	-۲۱۵۹/۶۲	۶۶/۴۱۸۶	-۱۹/۷۳۵۲	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۵/۱۱/۲۲			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۵۶۰	۱۴۷	-۲۱۵۹/۶۲	۱۲۵/۵۵۸	-۷/۸۴۹۵	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۶/۰۳/۰۷			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۶۶۵	-۸۷۹	-۲۱۵۹/۶۲	۲۱۰۰۸۵	-۵/۴۹۶۰	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۶/۰۶/۲۰			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۷۰۰	-۱۳۲۸	-۲۱۵۹/۶۲	۱۳/۹۰۸۸	-۱۶/۲۳۳۶	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۶/۰۷/۲۵			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۸۰۵	-۸۷	-۲۱۵۹/۶۲	۲۱۰/۹	-۱۲/۴۴۵۸	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۶/۱۱/۰۷			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۹۱۰	-۶۰۵	-۲۱۵۹/۶۲	۳۰/۴۹۴۹	-۱۱/۷۲۴۸	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۷/۰۲/۲۰			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۹۴۵	-۵۹	-۲۱۵۹/۶۲	۳۱۰/۵۳۸	-۱۰/۵۱۷۱	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۷/۰۳/۲۷			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۱۰۸۵	-۱۹۸	-۲۱۵۹/۶۲	۹۳/۲۹۸۸	-۱۹/۶۳۰۶	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۷/۰۸/۱۴			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۱۳۳۰	-۶۴	-۲۱۵۹/۶۲	۲۸۶/۸۰۸	-۹/۴۲۰۲	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۸/۰۴/۱۵			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۱۳۶۵	-۵۶۲	-۲۱۵۹/۶۲	۳۲/۸۷۵۲	-۱۴/۴۵۴۳	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۸/۰۵/۲۰			۲۱۵۹/۶۲			
ASAR IMS	۲۰۰۴/۰۸/۲۴	۱۶۸۰	-۱۲۹	-۲۱۵۹/۶۲	۱۴۲/۴۸۵	-۷/۷۳۰۸	۱۷۰۵/۲۳
	۲۰۰۹/۰۳/۳۱			۲۱۵۹/۶۲			



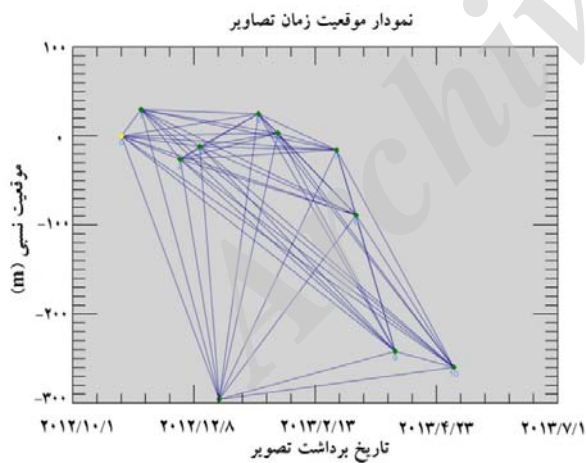
شکل ۴. بیس لاین مکانی سنجنده ASAR



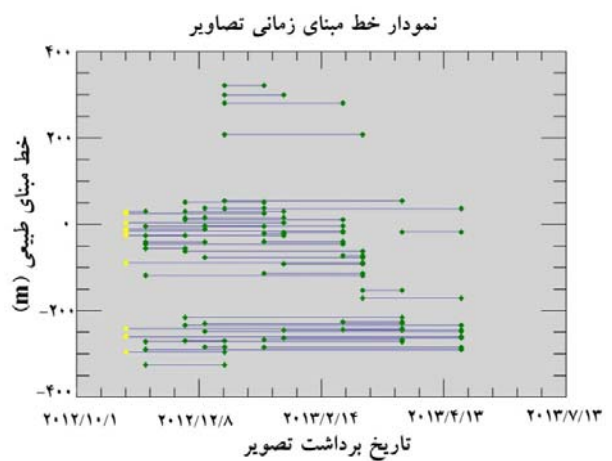
شکل ۳. بیس لاین زمانی سنجنده ASAR

لاین های زمانی تصاویر و در شکل ۵ بیس لاین های مکانی تصاویر نسبت به هم را مشاهده و در جدول ۲ می توان مقادیر بیس لاین و نتایج آن را مشاهده کرد.

بیس لاین (Baseline) سنجنده TERRA SAR
در این مرحله از اینترفرومتری، میزان بیس لاین در تصاویر سنجنده TERRA SAR اندازه گیری می شود تا اندازه بیس لاین های زمانی و مکانی بررسی شود که در شکل ۴ بیس



شکل ۶. بیس لاین مکانی سنجنده TERRA SAR



شکل ۵. بیس لاین زمانی سنجنده TERRA SAR

جدول ۲. مقادیر و نتایج بیس لاین (خط مبنا) سنجنده Terra SAR

مقدار تصویر	تاریخ	فاصله زمانی (روز)	فاصله مکانی (متر)	جدولگر فاصله مکانی مناسب (متر)	اهتمام ارتفاعی (متر)	جابجایی در جهت ازیموت (متر)	جابجایی در جهت رنج (متر)
Strip map	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۲/۱۱/۰۸	۱۲	۷۲۴/۲۹	۳۸۳۹/۵۲۷	۶۴/۷۰	۶۵/۷۲۴	-۲۵/۱۷۷
Strip map	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۲/۱۱/۳۰	۳۳	۵۵/۲۲۲	۳۸۳۹/۵۲۷	۶۸/۶۹	-۷۰/۶	۳۷/۸۷۸
Strip map	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۲/۱۲/۱۱	۴۴	۴۱/۲۱۹	۳۸۳۹/۵۲۷	۵۰/۵۴	۴/۹۶۳	۱۳/۴۱۶
Strip map	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۲/۱۲/۲۲	۵۵	۸۶/۵۳۴	۳۸۳۹/۵۲۷	۶۳/۴۳	-۱۹۷/۹۱	-۲۴/۴۹
Strip map	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۳/۰۱/۱۳	۸۶	۶۳/۳۳۲	۳۸۳۹/۵۲۷	۳۱/۴۵	-۵۵/۰۲۹	-۶/۲۵۳
Strip map	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۳/۰۱/۲۴	۹۷	۸۸/۶۵۱	۳۸۳۹/۵۲۷	۲۲/۸۸	۱۵۸/۶۶۳	۴۲/۲۲۳
Strip map	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۳/۰۲/۲۶	۱۳۰	۹۸/۴۱۷	۳۸۳۹/۵۲۷	۱۹/۹۸	۳۵/۱۷۵	۰/۶۸۲
Strip map	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۳/۰۳/۰۹	۱۴۱	۷۳/۱۰۷	۳۸۳۹/۵۲۷	۲۳/۶۲	-۴/۱۷۸	-۲۹/۷۰۶
Strip map	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۳/۰۳/۳۱	۱۶۱	۹۶/۲۸۹	۳۸۳۹/۵۲۷	۲۴/۱۰	-۹/۵۵۶	۱۲/۷۰۳
Strip map	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۳/۰۵/۰۳	۱۹۵	۹۹/۴۳	۳۸۳۹/۵۲۷	۲۳/۷۲	۳۴/۰۱۲	۳/۶۱۰

مقادیر جابجایی سنجنده ASAR برحسب میلی‌متر شدند که نتایج حد آستانه‌های تغییرات در داخل‌نگارها پس از پردازش نهایی در نرم‌افزار جابجایی به همراه بازه‌های زمانی سنجنده ASAR در جدول ۳ SARSCAPE تبدیل به مقادیر جابجایی در راستای قائم ارائه شده است.

جدول ۳. حد آستانه‌های تغییرات جابجایی به همراه بازه‌های زمانی سنجنده ASAR

سنجنده ASAR	تصویر پایه	بازه زمانی بین تصاویر	بالا آمدگی (میلی‌متر)	فرونشست (میلی‌متر)	میزان بالا آمدگی در روز (میلی‌متر)	میزان فرونشست در روز (میلی‌متر)
۱	۲۰۰۴/۰۲/۱۱	۷۰	۱۸۵/۸۷	-۱۳۱/۹۷	۰/۶۵۴	-۰/۸۸۵۲۹
۲	۲۰۰۵/۰۲/۱۵	۱۷۵	۱۱۴/۵۶	-۲۰۵/۳۳	۰/۶۵۴۶۲۹	-۰/۸۷۳۳۱
۳	۲۰۰۵/۰۳/۲۲	۲۱۰	۱۸۹/۶۱	-۱۹۸/۴۹	۰/۹۰۲۹۰۵	-۰/۹۴۵۱۹
۴	۲۰۰۵/۰۴/۲۶	۲۴۵	۱۹۰/۹	-۲۳۵/۴۷	۰/۷۷۹۱۸۴	-۰/۹۶۱۱
۵	۲۰۰۵/۰۷/۰۵	۳۱۵	۱۷۹/۱۸	-۲۴۹/۸	۰/۵۶۸۸۲۵	-۰/۷۹۳۰۲
۶	۲۰۰۵/۰۸/۰۹	۳۵۰	۲۱۰/۱۹	-۲۵۰/۱	۰/۶۰۰۵۴۳	-۰/۷۱۴۵۷
۷	۲۰۰۵/۰۹/۱۳	۳۸۵	۱۹۱/۱۲	-۲۶۱/۷۸	۰/۴۹۶۴۱۶	-۰/۶۷۹۹۵
۸	۲۰۰۵/۱۱/۲۲	۴۵۵	۲۰۹/۱۹	-۳۰۲/۷۹	۰/۴۵۹۴۷۵۸	-۰/۶۶۵۴۷
۹	۲۰۰۶/۰۳/۰۷	۵۶۰	۲۲۸/۰۳۲	-۳۳۳/۸۵	۰/۴۰۷۲	-۰/۵۹۶۱۶
۱۰	۲۰۰۶/۰۶/۲۰	۶۶۵	۲۰۰/۹	-۴۲۹/۷۵	۰/۳۰۲۱۰۵	-۰/۶۴۶۲۴
۱۱	۲۰۰۶/۰۷/۲۵	۷۰۰	۱۹۲/۰۹	-۴۴۱/۲۶	۰/۲۷۴۴۱۴	-۰/۶۳۰۳۷
۱۲	۲۰۰۶/۱۱/۰۷	۸۰۵	۲۴۱/۰۹	-۴۴۶/۹۵	۰/۲۹۹۴۹۱	-۰/۵۸۰۰۶
۱۳	۲۰۰۷/۰۲/۲۰	۹۱۰	۲۳۵/۷	-۵۲۴/۴۷	۰/۲۵۹۰۱۱	-۰/۵۷۶۳۴
۱۴	۲۰۰۷/۰۳/۲۷	۹۴۵	۲۱۵/۸۶	-۵۴۵/۹۴	۰/۲۲۸۴۲۳	-۰/۵۷۷۷۱
۱۵	۲۰۰۷/۰۸/۱۴	۱۰۸۵	۲۲۰/۰۶	-۶۲۴/۶۱	۰/۲۰۲۸۲	-۰/۵۷۵۶۸
۱۶	۲۰۰۸/۰۴/۱۵	۱۳۳۰	۲۱۵/۲۱	-۷۶۰/۶۱	۰/۱۶۱۸۱۲	-۰/۵۷۱۸۹
۱۷	۲۰۰۸/۰۵/۲۰	۱۳۶۵	۲۰۴/۵۷	-۷۸۸/۱۴	۰/۱۴۹۸۶۸	-۰/۵۷۷۳۹
۱۸	۲۰۰۹/۰۳/۳۱	۱۶۸۰	۲۲۰/۵۶	-۹۳۳/۳۶	۰/۱۳۱۲۸۶	-۰/۵۵۵۵۷
جمع کل		۱۲۲۵۰	۳۶۴۴/۶۰۲	-۷۶۸۴/۶۷	۰/۵۲۹۵۹۴	-۰/۷۶۱۴۱

مقادیر جابجایی سنجنده TERRA SAR

پس از تداخل سنجی با روش SBAS تداخل نگارهای به دست آمده از سنجنده TERRA SAR مورد بررسی قرار گرفت. این تداخل نگارها پس از پردازش نهایی در نرم افزار

SARSCOPE تبدیل به مقادیر جابجایی در راستای قائم بر حسب میلی متر شدند که نتایج جدول ۴. حد آستانه های تغییرات جابجایی به همراه بازه های زمانی سنجنده TERRA SAR در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. حد آستانه های تغییرات جابجایی به همراه بازه های زمانی سنجنده TERRA SAR

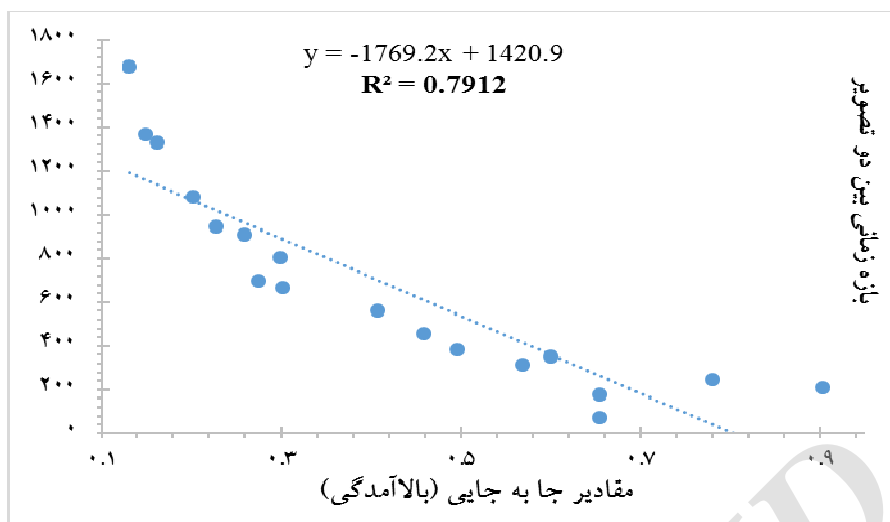
سنجنده TERRA	تصویر پایه ۲۰۱۲/۱۰/۲۸	بازه زمانی بین تصاویر	بالا آمدگی (میلی متر)	فرو نشست (میلی متر)	میزان بالا آمدگی در روز (میلی متر)	میزان فرو نشست در روز (میلی متر)
۱	۲۰۱۲/۱۱/۰۸	۱۱	۱۱/۲۲۹	-۱۵/۷۹	۰/۵۲۰۸۱۸	-۰/۷۱۰۸۲
۲	۲۰۱۲/۱۱/۳۰	۳۳	۱۹/۸۵۶	-۲۸/۸۱	۰/۶۰۱۶۹۷	-۰/۸۷۳۰۳
۳	۲۰۱۲/۱۲/۱۱	۴۴	۲۲/۸۵۳	-۲۹/۷۱	۰/۵۱۹۳۸۶	-۰/۶۷۵۲۳
۴	۲۰۱۲/۱۲/۲۲	۵۵	۲۹/۹۴۸	-۳۴/۵۴	۰/۵۳۷۷۰۹	-۰/۶۲۸
۵	۲۰۱۳/۰۱/۱۳	۷۷	۲۹/۵۷۴	-۳۹/۳۵	۰/۳۸۸۹۳۵	-۰/۵۱۱۰۴
۶	۲۰۱۳/۰۱/۲۴	۷۷	۳۳/۰۹۴	-۳۹/۴۵	۰/۳۷۶۰۶۸	-۰/۴۴۸۳
۷	۲۰۱۳/۰۲/۲۶	۱۲۱	۳۹/۶۴۶	-۴۷/۲۶	۰/۳۲۷۶۵۳	-۰/۳۹۰۵۸
۸	۲۰۱۳/۰۳/۰۹	۱۳۲	۴۴/۱۵۱	-۵۰/۴۱	۰/۳۳۴۴۷۷	-۰/۳۸۱۸۹
۹	۲۰۱۳/۰۳/۳۱	۱۵۴	۵۲/۸۶۷	-۵۹/۶۱	۰/۳۴۳۲۹۲	-۰/۳۸۷۰۸
۱۰	۲۰۱۳/۰۵/۰۳	۱۸۷	۵۹/۵۵۹	-۷۶/۸۴	۰/۳۱۸۴۹۷	-۰/۴۱۰۹۱
جمع کل	-	۹۰۲	۳۴۲/۷۷۷	-۴۳۹/۷۷	۰/۴۷۶۸۵۳	-۰/۷۷۷۷۹

بودن تغییرات است (جدول ۳). روند تغییرات جابجایی عمودی سطح زمین در روز برای سنجنده ENVISAT ASAR و رابطه خطی برای تداخل نگارها به همراه ضریب تعمیم در شکل های ۷ و ۸ آورده شده است.

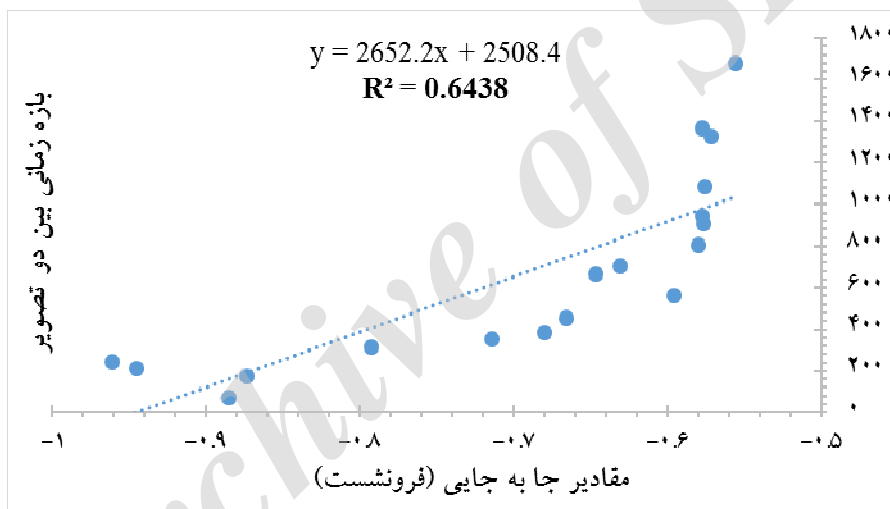
صحت نتایج خروجی الگوریتم SBAS برای سنجنده ENVI

SAT ASAR

صحت نتایج الگوریتم SBAS بیشینه و کمینه هر تداخل نما و میزان تغییرات جابجایی برای هر بازه و روند تغییرات نشان می دهد که حد بیشینه و کمینه برای کل سری زمانی دارای حد مناسب و نرمال است و نشان دهنده جهت دار



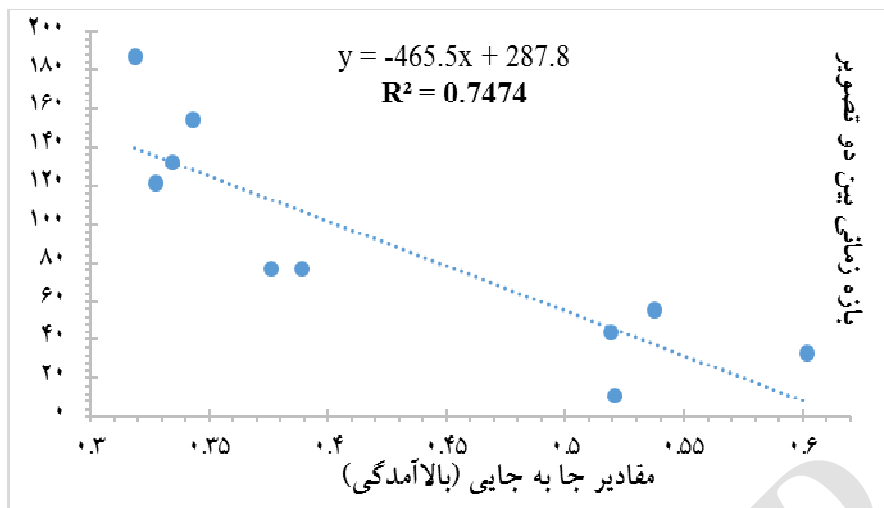
شکل ۷. نمودار تغییرات جابجایی (بالا آمدگی) در روز سنجنده ASAR



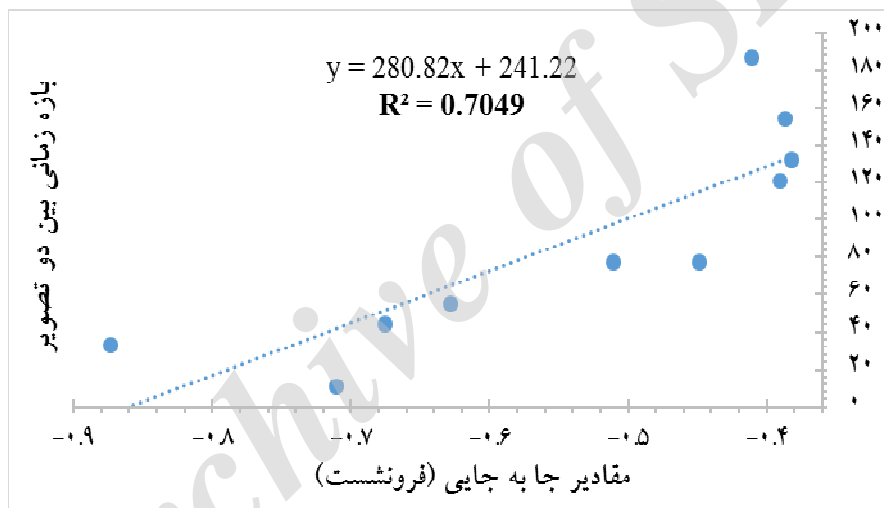
شکل ۸. نمودار تغییرات جابجایی (فرونشست) در روز سنجنده ASAR

بودن تغییرات است (جدول ۴). در شکل های ۹ و ۱۰ روند تغییرات جابجایی عمودی سطح زمین در روز بر حسب میلی متر و رابطه خطی درجه اول بین تداخل نماها به همراه میزان ضریب تعمیم برای سنجنده TERRA SAR نشان داده شده است.

صحت نتایج خروجی الگوریتم SBAS برای سنجنده TERRA SAR
صحت نتایج الگوریتم SBAS بیشینه و کمینه هر تداخل نما و میزان تغییرات جابجایی برای هر بازه و روند تغییرات نشان می دهد که حد بیشینه و کمینه برای کل سری زمانی دارای حد مناسب و نرمال است و نشان دهنده جهت دار



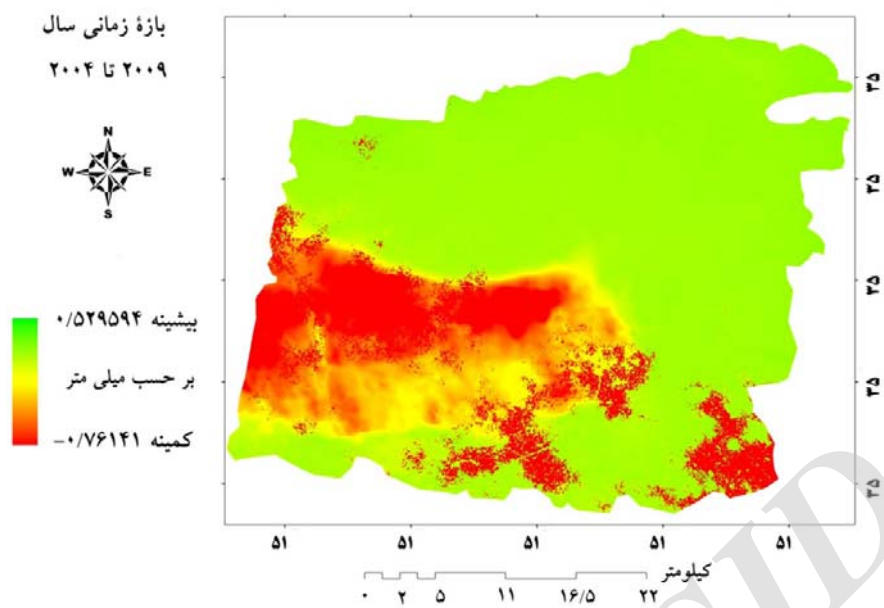
شکل ۹. نمودار تغییرات جابجایی (بالا آمدگی) در روز سنجنده Terra SAR



شکل ۱۰. نمودار تغییرات جابجایی (فرونشست) در روز سنجنده Terra SAR

تداخل نماهای ایجاد شده از سری زمانی تداخل سنجی تفاضلی رادار با روزنه مصنوعی بدست آورد که در شکل ۱۱ نقشه میزان جابجایی عمودی سطح زمین در روز را برای سنجنده ASAR در بازه زمانی سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۹ ارائه شده است.

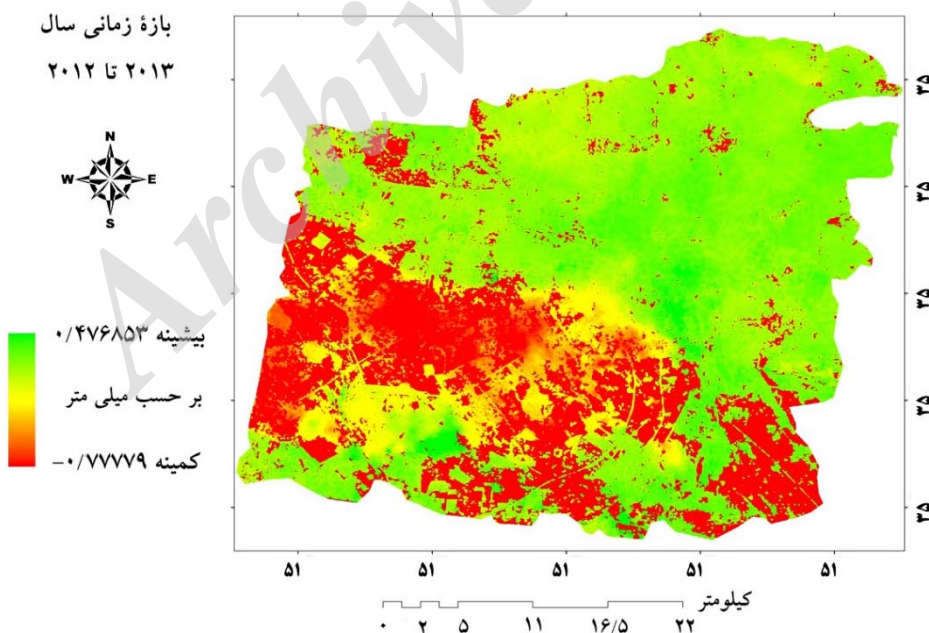
مدل نهایی الگوریتم SBAS برای سنجنده ENVISAT ASAR الگوریتم SBAS دارای توانایی ایجاد نقشه میزان جابه جایی عمودی سطح زمین در واحد زمان مانند سال است که این نقشه را هم می توان از طریق رابطه خطی بین



شکل ۱۱. نقشه میزان جابجایی عمودی سطح زمین در روز از سنجنده ASAR

سنجنده TERRA SAR، با استفاده از تداخل سنجی تفاضلی رادار با الگوریتم SBAS، نقشه نهایی میزان جابجایی عمودی سطح زمین در روز تولید گردید (شکل ۱۲).

مدل نهایی الگوریتم SBAS برای سنجنده TERRA SAR در این مرحله پس از بدست آوردن معادله خطی بین تداخل‌نماهای ایجاد شده از سری زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳



شکل ۱۲. نقشه میزان جابجایی عمودی سطح زمین در روز از سنجنده TERRA SAR

بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش سعی شده با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی و الگوریتم SBAS میزان تغییرات در مقدار جابجایی‌ها در باندهای مختلف راداری X و C را مورد بررسی قرار دهیم، با توجه به مباحثی که توضیح داده شد نشان داده می‌شود که بکارگیری روش تداخل سنجی راداری با استفاده از الگوریتم SBAS در این پژوهش، ظرفیت مناسبی از قابلیت‌های آن در تعیین میزان جابجایی سطح زمین و عرصه‌های طبیعی در بازه زمانی کوتاه مدت و بلند مدت در طول موج‌های X و C را در سطح محدوده مورد مطالعه معرفی کرد. خشکی محیط ناحیه، اثر تغییر فاز ناشی از ترکیبات اتمسفری بویژه مسئله رطوبت را تعدیل کرد و دقت مناسبی از سنجش اختلاف فاز ناشی از جابجایی سطح را فراهم آورد. همچنین امکان سنجش تغییرات فاز در بازه‌های زمانی برای داده‌های C باند و X باند را میسر کرد. همچنین به منظور کاهش اثر اتمسفر حین انجام تحلیل سری زمانی، یک شرط نرم‌کنندگی به حل کم‌ترین مربعات اضافه می‌گردد. این یافته تأکید بر کارایی این روش و داده‌های مورد بحث برای مطالعه تغییرات سطحی پوسته زمین در اغلب نواحی کشور است. یافته‌های حاصل از بکارگیری این روش نشان داد که تغییرات جابجایی عمودی سطح زمین در طول موج‌های X و C نزدیک به هم است که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نقشه‌های جابجایی در روز حاصل از الگوریتم SBAS در بازه زمانی و در شرایط اقلیمی متفاوت بدست آمد که مقایسه بین این دو نقشه جابجایی نشان‌دهنده نزدیک بودن اعداد جابجایی در روز برای دو نقشه با طول موج‌های متفاوت می‌باشد. با توجه به تغییرات اقلیمی منطقه طی چند سال مشاهده می‌کنیم که این روند در دو نقش نهایی تقریباً مشابه می‌باشد. این پژوهش در مقایسه با پژوهشی که باتسون و همکاران (۶) با استفاده از تداخل سنجی تفاضلی رادار و الگوریتم SBAS به بررسی منطقه وال ف جنوب انگلستان با استفاده از سنجنده ERS طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۹ به بررسی حرکت پوسته زمین پرداخته‌اند که نتایج آن بیانگر نرخ رشد ۱ سانتی متری بالآمدگی سطح زمین

در سال است، که این بالآمدگی در نتیجه جهش آب زیرزمینی توسط لایه‌های زمین‌شناسی که دارای زغال‌سنگ است اتفاق افتاده است. ولی این پژوهش برای محدوده مورد مطالعه دارای نرخ ۰/۵۲ میلی‌متر در روز برای سنجنده ASAR و ۰/۴۷ میلی‌متر در روز برای سنجنده TERRA SAR است.

منابع مورد استفاده

۱. حاتمی، ج. ۱۳۹۴. عمق‌سنجی برف با تلفیق طول موج‌های مختلف راداری و تکنیک DINSAR. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد. ۱۱۲ صفحه.
۲. حقیقت‌مهر، پ.، م. ج. ولدان‌زوج، ر. تاجیک، س. جباری، م. ر. صاحبی، ر. اسلامی، م. گنجیان و م. دهقانی. ۱۳۹۱. تحلیل سری زمانی فرونشست هشتگرد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و سامانه موقعیت‌یابی جهانی. علوم زمین، ۲۲(۸۵): ۱۰۵-۱۱۴.
۳. دهقانی، م. ۱۳۹۳. ارائه الگوریتمی جدید بر مبنای تکنیک تداخل‌سنجی راداری به منظور پایش فرونشست سطح زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی. مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۲(۲): ۶۱-۷۳.
4. Abir IA, Khan SD, Ghulam A, Tariq S, Shah MT. 2015. Active tectonics of western Potwar Plateau-Salt Range, northern Pakistan from InSAR observations and seismic imaging. *Remote Sensing of Environment*, 168: 265-275.
5. Amelung F, Galloway DL, Bell JW, Zebker HA, Lacznik RJ. 1999. Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, 27(6): 483-486.
6. Bateson L, Cigna F, Boon D, Sowter A. 2015. The application of the Intermittent SBAS (ISBAS) InSAR method to the South Wales Coalfield, UK. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34: 249-257.
7. Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375-2383.

8. Cascini L, Fornaro G, Peduto D. 2010. Advanced low-and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales. *Engineering Geology*, 112(1): 29-42.
9. Cigna Francesca, Alessandro Novellino, Colm J. Jordan, Andrew Sowter, Massimo Ramondini, Cigna F, Novellino A, Jordan CJ, Sowter A, Ramondini M, Calcaterra D. 2014. Intermittent SBAS (ISBAS) InSAR with COSMO-SkyMed X-band high resolution SAR data for landslide inventory mapping in Piana degli Albanesi (Italy). In: SPIE Proceedings: SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XIV (2014), Amsterdam, Netherlands, 22 Sep.
10. Dong S, Samsonov S, Yin H, Ye S, Cao Y. 2014. Time-series analysis of subsidence associated with rapid urbanization in Shanghai, China measured with SBAS InSAR method. *Environmental Earth Sciences*, 72(3): 677-691.
11. ElGharbawi T, Tamura M. 2015. Coseismic and postseismic deformation estimation of the 2011 Tohoku earthquake in Kanto Region, Japan, using InSAR time series analysis and GPS. *Remote Sensing of Environment*, 168: 374-387.
12. Ferretti A, Monti-Guarnieri A, Prati C, Rocca F, Massonet D. 2007. InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation, ESA Publications. 110 pp.
13. Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20.
14. Hanssen RF. 2001. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. Springer Science & Business Media, 308 pp.
15. Kim J-W, Lu Z, Jia Y, Shum C. 2015. Ground subsidence in Tucson, Arizona, monitored by time-series analysis using multi-sensor InSAR datasets from 1993 to 2011. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 107: 126-141.
16. Li C, Tang X, Ma T. 2006. Land subsidence caused by groundwater exploitation in the Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain, China. *Hydrogeology Journal*, 14(8): 1652-1665.
17. Lundgren P, Usai S, Sansosti E, Lanari R, Tesauro M, Fornaro G, Berardino P. 2001. Modeling surface deformation observed with SAR interferometry at Campi Flegrei aldera. *Journal of Geophysical Research*, 106: 19355-19367.
18. Massonet D, Feigl KL. 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4): 441-500.
19. Mather PM, Koch M. 2011. Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. John Wiley & Sons, 460 pp.
20. Qu F, Lu Z, Zhang Q, Bawden GW, Kim J-W, Zhao C, Qu W. 2015. Mapping ground deformation over Houston-Galveston, Texas using multi-temporal InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 169: 290-306.
21. Richards JA. 2009. Remote sensing with imaging radar. Springer Berlin Heidelberg, 361 pp.
22. Richards MA. 2007. A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing [AESS Tutorial IV]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 22(9): 5-29.
23. Shanker P, Casu F, Zebker HA, Lanari R. 2011. Comparison of persistent scatterers and small baseline time-series InSAR results: a case study of the San Francisco Bay Area. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(4): 592-596.
24. Sowter A, Cigna F. 2015. On the Use of the ISBAS Acronym in InSAR Applications. Comment on Vajedian, S.; Motagh, M.; Nilfouroushan, F. StaMPS Improvement for Deformation Analysis in Mountainous Regions: Implications for the Damavand Volcano and Mosha Fault in Alborz. *Remote Sensing*, 7(9): 11322-11323.
25. Zebker HA, Rosen PA, Goldstein RM, Gabriel A, Werner CL. 1994. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B10): 19617-19634.
26. Zhang Z, Wang C, Tang Y, Fu Q, Zhang H. 2015. Subsidence monitoring in coal area using time-series InSAR combining persistent scatterers and distributed scatterers. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39: 49-55.



Comparing the magnitude of the earth's vertical relocation using the SBAS algorithm in X and C radar bands (Case study: Tehran lands)

M. Zarekamali ¹, S. A. Alhoseini Almodaresi ^{2*}, K. Naghdi ³

1. MSc. Student of Remote Sensing & GIS, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

2. Assoc. Prof. College of Engineering, Department of RS & GIS, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

3. Lecturer, Department of Geodesy, Taft Branch, Islamic University, Taft, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 April 2017

Accepted 8 October 2017

Available online 11 November 2017

Keywords:

DINSAR

SBAS algorithm

Earth's vertical relocation

ABSTRACT

The earth's crust has not been fixed during the geological history and reshaped continually under the influence of internal and external factors. Uplifting or subsidence in some areas of the earth's crust, especially in thin ones has been led to some changes in its surface which cause to destroy natural phenomena and human-made structures. In the present research amount of the earth's vertical displacement in the Tehran lands using a time series analysis based on short location baseline (SBAS) and the differential radar interferometry with synthetic aperture technique (DINSAR) has been assessed. Accordingly, 19 images of the ENVISAT ASAR satellite (C band) and 11 images of the TERRA SAR satellite (X band) have been used in which the time span was 1680 and 187 days, respectively. After the image processing, maps of the earth's surface displacement for all dates were calculated than the primary image and the map of the earth's surface vertical displacement per day was provided for each sensor. Assessing results of two sensors indicated that, subsidence was moderately 0.761 mm and 0.777 mm per day for ASAR and TERRA SAR sensors, respectively. Results also represented that, some areas showed uplifting, in which the amount of uplifting for ASAR and TERRA SAR sensors were 0.529 and 0.476 per day, respectively. Generally, considering that the date and wavelength were different, obtained results for uplifting and subsidence areas were closed for both sensors.

* Corresponding author e-mail address: almodaresi@gmail.com