سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (سال هشتم / شماره سوم) پاییز ۱۳۹۶
نمایه شده در سایت: پایگاه استنادی علوم جهان اسلام، جهاد دانشگاهی، مگ ایران، نورمگز
آدرس وب سایت : http://girs.iaubushehr.ac.ir

مقایسه میزان جابجایی عمودی زمین با استفاده از الگـوریتم SBAS در بانـدهای راداری X وC (مطالعهٔ 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 نقشه‌برداری، واحد تفت، دانشگاه آزاد اسلامی، تفت، ایران

چکیده

پوسته جامد زمین طی تاریخ زمین‌شناسی ثابت نبوده، بلکه تحت تأثیر عوامل داخلی و خارجی به طور دائم در حال تغییر شکل است. بالاآمدگی 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 جابه‌جایی 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 روزنه 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. بازهٔ 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 ۰/۷۶۱ میلی‌متر در روز و برای سنجنده TERRA SAR به طور میانگین ۰/۷۷۷ میلی‌متر در روز است. همچنین نتایج نشان داد که برخی نقاط بالاآمدگی داشته‌اند که میزان بالاآمدگی برای سنجنده ASAR به طور میانگین ۰/۵۲۹ میلی‌متر در روز و برای سنجنده TERRA SAR به طور میانگین ۰/۴۷۶ میلی‌متر در روز است. بطور کلی با وجود یکسان نبوده تاریخ و طول موج تصاویر مورد استفاده، نتایج بدست آمده برای مناطق نشست و بالاآمدگی برای هر دو سنجنده نزدیک به هم است.

مشخصات مقاله

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

واژه‌های کلیدی:
تداخل‌سنجی تفاضلی
الگوریتم SBAS
جابه‌جایی عمودی زمین

* پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: almodaresi@gmail.com

مقدمه

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 روزنه 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 (۲٤). 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). سنجش 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 اختلاف‌فاز 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 (۱٤). این تکنیک اولین بار در سال ۱۹۸٦ برای تولید نقشه توپوگرافی مورداستفاده قرار گرفت (۱۳)، پس‌ازآن به‌سرعت در کاربردهای مختلف مانند برآورد جابجایی ناشی از زلزله، مطالعه آتشفشان (۱۸) بررسی فرونشست و بالاآمدگی ناشی از فعالیت گسل‌های زیرزمینی مورداستفاده قرار گرفت (۵). پیکسل‌های پراکنش کننده دائمی با وجود خط مبناهای زمانی و مکانی بزرگ کوهرنسی بالایی دارند و از نبود همبستگی تصاویر SAR کمتر تأثیر می‌پذیرند.

گرچه ارائه این روش‌ها گامی مؤثر در یک کاهش محدودیت‌های روش تداخل سنجی راداری سنتی بوده است، ولی هر یک از روش‌های پردازش پراکنش کننده‌های 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 SBSA توانایی خود را در پایش تغییرات زمانی سطح زمین نشان داده است به منظور کاهش اثر عدم همبستگی زمینی ناشی از اراضی، تنها اینترفروگرام های با طول خط مبنای زمانی کوتاه در تحلیل سری زمانی ایجاد می‌شود. لی و همکاران (۱٦) به بررسی تغییرات آتش‌فشان اگوستین 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 و

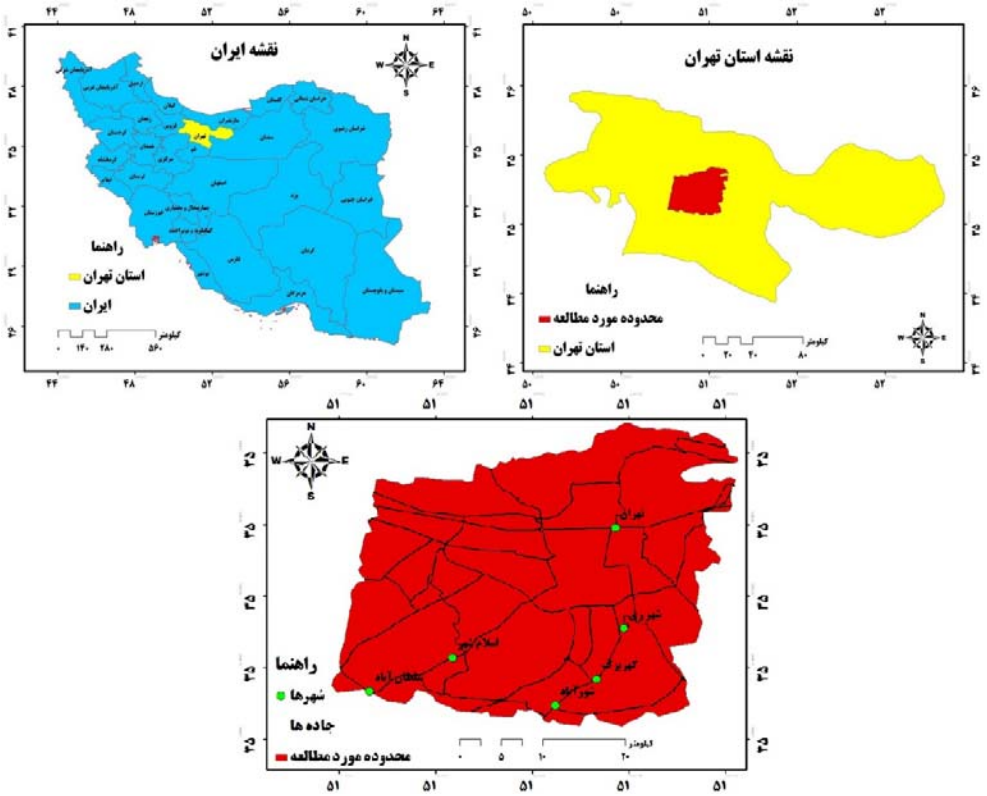
با استفاده از تصاویر COSMO SKY در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ در منطقه پیانا دگلی در ایتالیا توسط ۳۶ تصویر بالاگذر و ۳۸ تصویر پایین‌گذر انجام گرفت که نتایج آن به این گونه است. بیشترین نرخ لغزش زمین ۵/۵ تا ٦/٤ میلی‌متر در سال تا نرخ متوسط کلی ۰/٦ میلی‌متر در سال برای تصاویر بالاگذر و ۰/۱ میلی‌متر برای تصاویر پایین‌گذر است که بیانگر لغزش بسیار آهسته و حتی کم‌تر از آن در سال است. باتسون و همکاران (٦) 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 بالاآمدگی سطح زمین در سال است که این بالاآمدگی در نتیجه جهش آب زیرزمینی توسط لایه‌های زمین‌شناسی که دارای زغال‌سنگ است اتفاق افتاده است. ژانگ و همکاران (۲٦) در منطقهٔ آنهیو چین با استفاده از الگوریتم PS و SBAS و تصاویر RADARSAT1,2 در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳ به مطالعهٔ فرونشست زمین پرداختند که نتایج آن بیانگر نرخ تغییرات ۵ سانتیمتری فرونشست در سال است. سوتر و سیگنا (۲٤) 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 منطقهٔ 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 (٤) 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 پژوهش نشان‌دهنده نرخ رانش افقی سطح زمین بین ۷ تا ۱۰ سانتیمتر در سال است. القارباوی 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 ٦/۹ 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 ماهوارهٔ 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 به‌منظور 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 گرفته‌شده 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 به‌دست‌آمده آهنگ قابل‌توجه فرونشست را ٤۸ میلی‌متر در ماه‌نشان 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

فرونشست ۲۳ سانتیمتر در سال برآورد شد. همچنین رابطه تنش- کرنش در سفره آب‌های زیرزمینی با ترکیب اطلاعات سطح آب چاه‌های پیزومتری 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 بالاآمدگی آن را فراهم آوردیم که درنهایت برای پیشگیری از فاجعه و کاهش خطرات برای حفاظت از جان و مال مردم است؛ که در نهایت با بکار بردن تعدادی اینترفروگرام 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

محدوهٔ مطالعه در محدودهٔ ′۰۶ °۵۱ تا ′۳۸ °۵۱ طول شرقی و ′۳٤ °۳۵ تا ′۵۱ °۳۵ عرض شمالی واقع‌شده است. ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد بین ۱۸۰۰ متر در شمال تا ۵٦۱۰ متر در مرکز و ۱۰۵۰ متر در جنوب متغیّر است (شکل ۱).



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه

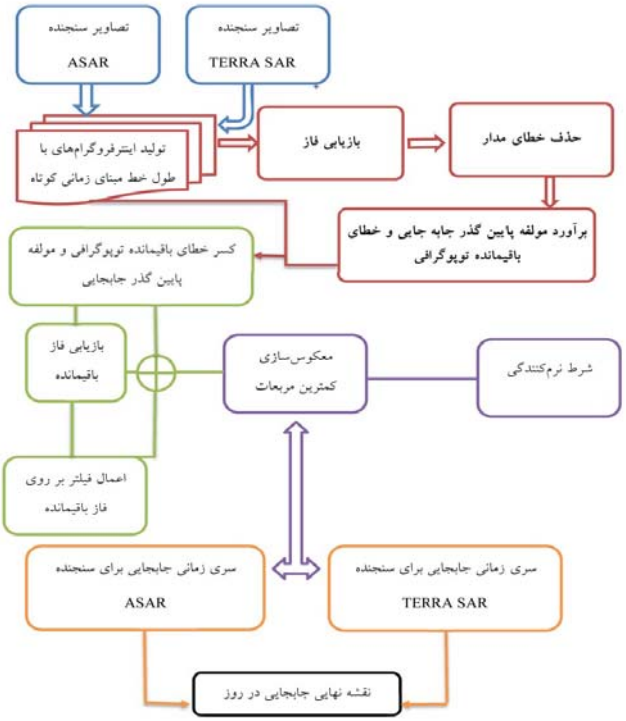
داده‌های مورد استفاده

داده‌های ماهواره 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 مایکرویوی 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 بازهٔ زمانی سال ۲۰۰٤ تا ۲۰۰۹ از محدودهٔ منطقه مورد مطالعه استفاده گردید (۲۹). تصاویر سنجنده ASAR مورداستفاده قرار گرفته دارای پلاریزاسیون HH و جهت گذر ماهواره پایین گذر می‌باشند. مراحل انجام تحقیق در این مطالعه در شکل ۲ آورده شده است.



شکل۲. مراحل انجام تحقیق

روش تحقیق

تکنیک تداخل‌سنجی 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

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 تداخل سنجی، 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 تداخل سنجی 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 تداخل سنجی باید بیشترین جزییات سطح را نشان دهد باید از زوج تصویری با طول باز کوتاه‌تر حاصل شود. درجاهایی 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 تداخل سنجی 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 فرینج‌های ۲ ساختگی در تداخل سنجی 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 میزان تغییر ارتفاع منطقه (نشست یا بالاآمدگی) مورد استفاده قرار می‌گیرد، بر اساس دادهٔ 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 مبناهای مکانی بلند و رسیدن به تداخل نماهای 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 رابطهٔ (N*(N-1))/2 تداخل‌نگار مشخص و ماکزیمم تداخل‌نگارهایی که می‌تواند از N تصویر ایجاد شود، تعیین گردید (۲۱).Conection 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 ٤٥ تا ٥٠ 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).

تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری

تداخل‌سنجی 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 اینترفروگرم‌ها 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 تداخل‌سنجی راداری که از اختلاف فاز دو تصویر پایه حاصل می‌شود از رابطهٔ ۱ تعیین می‌گردد.

$$\psi_{x,i}=W\{\phi_{D,x,i}+\phi_{A,x,i}+\Delta\phi_{S,x,i}+\Delta\phi_{topo,x,i}+\phi_{N,x,i}\} \qquad [۱]$$

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 ϕ 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. درنتیجه 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 رابطهٔ 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.

$$\phi(t_i)=\bar{v}.(t_i-t_o)+\frac{1}{2}\bar{a}.(t_i-t_o)^2+\frac{1}{6}\Delta\bar{a}.(t_i-t_o)^3 \qquad [۲]$$

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 گرفت یک فیلتر تطبیقی نویز هر اینترفروگرم 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.

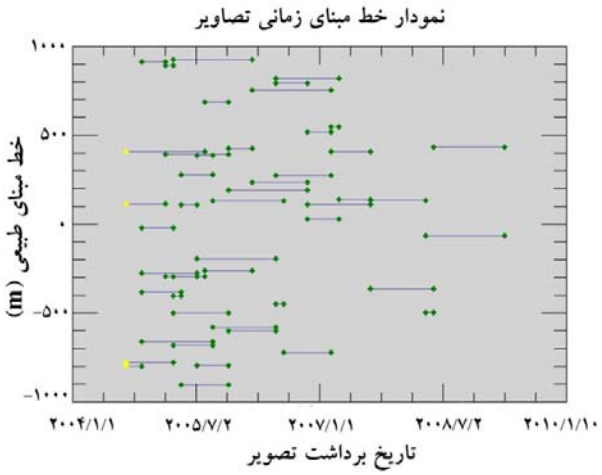
نتایج

بیس‌لاین (Baseline) سنجنده ENVISAT ASAR

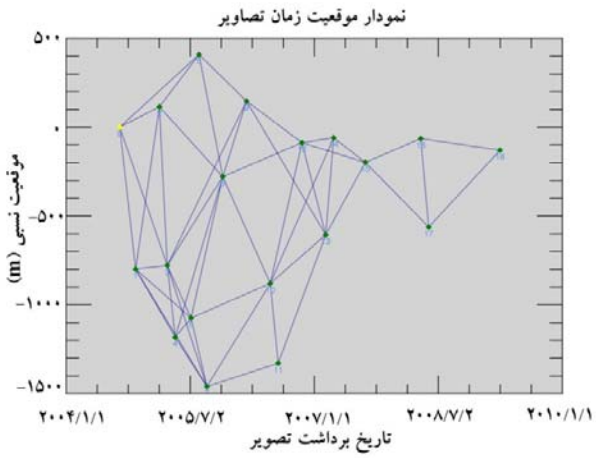
در مرحله اول اینترفرومتری میزان بیس لاین در تصاویر مورد نظر اندازه‌گیری می‌شود تا اندازه بیس‌لاین‌های زمانی و مکانی بررسی شود که در شکل ۳ بیس‌لاین‌های زمانی تصاویر و در شکل ٤ بیس‌لاین‌های مکانی تصاویر نسبت به هم را مشاهده و در جدول ۱ نتایج مقادیر بیس‌لاین برای سنجنده ASAR ارائه شده است.

جدول۱. مقادیر و نتایج بیس‌لاین (خط مبنا) سنجنده ASAR

جابجایی در جهت رنج (متر)	جابجایی در جهت ازیموت (متر)	ابهام ارتفاعی (متر)	حداکثر فاصله مکانی مناسب (متر)	فاصله مکانی (متر)	فاصله زمانی (روز)	تاریخ	مد تصویر
۱۷۰۵/۲۳	٤/٥٥٧٧	۲۳/۱۲۲۳	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	-۷۹۹	۷۰	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰۰٤/۱۱/۰۲	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	٥/٤۲۷۸	۱٦۱/۷۳٥	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	۱۱٤	۱۷٥	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰٥/۰۲/۱٥	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	٦/۷۷٥٦	۲۳/۷٤۱٤	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	-۷۷۸	۲۱۰	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰٥/۰۳/۲۲	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	۲/٥٦۰۹	۱٥/٦۳۱٦	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	-۱۱۸۲	۲٤٥	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰٥/۰٤/۰٦	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	٥/۳۳٦۷	۱۷/۲۰٦٦	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	-۱۰۷٤	۳۱٥	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰٥/۰۷/۰٥	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	-٤/۰۳٥۹	٤٥/۲٤۸۲	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	٤۰۸	۳٥۰	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰٥/۰۸/۰۹	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	۲/۲۰٦۱	۱۲/٦٥٦۳	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	-۱٤٦۰	۳۸٥	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰٥/۰۹/۱۳	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	-۱۹/۷۳٥۲	٦٦/٤۱۸٦	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	-۲۷۸	٤٥٥	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰٥/۱۱/۲۲	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	-۷/۸٤۹٥	۱۲٥/٥٥۸	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	۱٤۷	٥٦۰	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰٦/۰۳/۰۷	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	-٥/٤۹٦۰	۲۱/۰۰۸٥	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	-۸۷۹	٦٦٥	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰٦/۰٦/۲۰	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	-۱٦/۲٦۳٦	۱۳/۹۰۸۸	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	-۱۳۲۸	۷۰۰	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰٦/۰۷/۲٥	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	-۱۲/٤٤٥۸	۲۱۰/۹	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	-۸۷	۸۰٥	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰٦/۱۱/۰۷	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	-۱۱/۷۲٤۸	۳۰/٤۹٤۹	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	-٦۰٥	۹۱۰	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰۷/۰۲/۲۰	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	-۱۰/٥۱۷۱	۳۱۰/٥۳۸	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	-٥۹	۹٤٥	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰۷/۰۳/۲۷	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	-۱۹/٦۳۰٦	۹۳/۲۹۸۸	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	-۱۹۸	۱۰۸٥	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰۷/۰۸/۱٤	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	-۹/٤۲۰۲	۲۸٦/۸۰۸	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	-٦٤	۱۳۳۰	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰۸/۰٤/۱٥	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	-۱٤/٤٥٤۳	۳۲/۸۷٥۲	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	-٥٦۲	۱۳٦٥	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰۸/۰٥/۲۰	ASAR IMS
۱۷۰۵/۲۳	-۷/۷۳۰۸	۱٤۲/٤۸٥	-۲۱۵۹/٦۲ ۲۱۵۹/٦۲	-۱۲۹	۱٦۸۰	۲۰۰٤/۰۸/۲٤ ۲۰۰۹/۰۳/۳۱	ASAR IMS



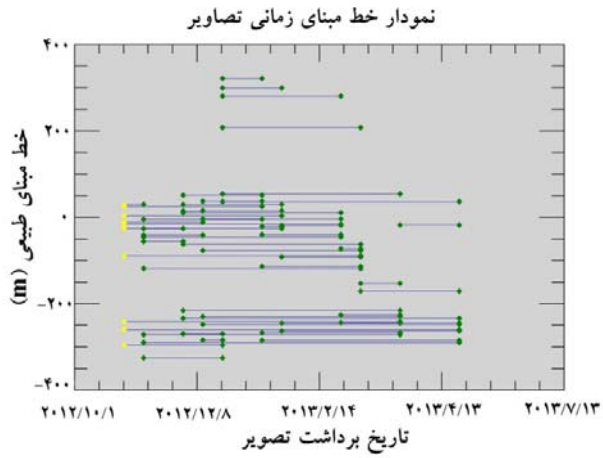
شکل۳. بیس‌لاین زمانی سنجنده ASAR



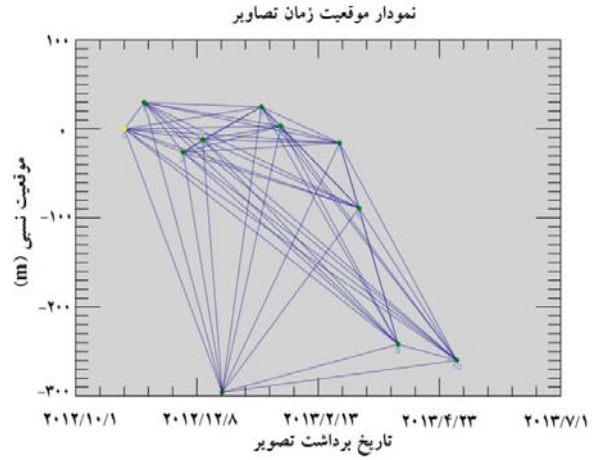
شکل۴. بیس‌لاین مکانی سنجنده ASAR

بیس‌لاین (Baseline) سنجنده TERRA SAR

در این مرحله از اینترفرومتری، میزان بیس لاین در تصاویر سنجنده TERRA SAR اندازه‌گیری می‌شود تا اندازه بیس لاین های زمانی و مکانی بررسی شود که در شکل ٤ بیس لاین های زمانی تصاویر و در شکل ۵ بیس لاین های مکانی تصاویر نسبت به هم را مشاهده و در جدول ۲ می‌توان مقادیر بیس لاین و نتایج آن را مشاهده کرد.



شکل۵. بیس‌لاین زمانی سنجنده TERRA SAR



شکل۶. بیس‌لاین مکانی سنجنده TERRA SAR

جدول۲. مقادیر و نتایج بیس‌لاین (خط مبنا) سنجنده TERRA SAR

جابجای در جهت ریج (متر)	جابجایی در جهت ازیموت (متر)	ابهام ارتفاعی (متر)	حداکثر فاصله مکانی مناسب (متر)	فاصله مکانی (متر)	فاصله زمانی (روز)	تاریخ	مد تصویر
-۲۵/۱۷۷	٦۵/۷۲٤	٦٤/۷۰	۳۸۳۹/۵۲۷	۷۲٤/۲۹	۱۲	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۲/۱۱/۰۸	Strip map
۳۷/۸۷۸	-۷۰/٦	٦۸/٦۹	۳۸۳۹/۵۲۷	۵۵/۲۲۲	۳۳	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۲/۱۱/۳۰	Strip map
۱۳/٤۱٦	٤/۹٦۳	۵۰/۵٤	۳۸۳۹/۵۲۷	٤۱/۲۱۹	٤٤	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۲/۱۲/۱۱	Strip map
-۲٤/٤۹	-۱۹۷/۹۱	٦۳/٤۳	۳۸۳۹/۵۲۷	۸٦/۵۳٤	۵۵	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۲/۱۲/۲۲	Strip map
-٦/۲۵۳	-۵۵/۰۲۹	۳۱/٤۵	۳۸۳۹/۵۲۷	٦۳/۳۳۲	۸٦	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۳/۰۱/۱۳	Strip map
٤۲/۲۲۳	۱۵۸/٦٦۳	۲۲/۸۸	۳۸۳۹/۵۲۷	۸۸/٦۵۱	۹۷	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۳/۰۱/۲٤	Strip map
۰/٦۸۲	۳۵/۱۷۵	۱۹/۹۸	۳۸۳۹/۵۲۷	۹۸/٤۱۷	۱۳۰	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۳/۰۲/۲٦	Strip map
-۲۹/۷۰٦	-٤/۱۷۸	۲۳/٦۲	۳۸۳۹/۵۲۷	۷۳/۱۰۷	۱٤۱	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۳/۰۳/۰۹	Strip map
۱۲/۷۰۳	-۹/۵۵٦	۲٤/۱۰	۳۸۳۹/۵۲۷	۹٦/۲۸۹	۱٦۱	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۳/۰۳/۳۱	Strip map
۳/٦۱۰	۳٤/۰۱۲	۲۳/۷۲	۳۸۳۹/۵۲۷	۹۹/٤۳	۱۹۵	۲۰۱۲/۱۰/۲۸ ۲۰۱۳/۰۵/۰۳	Strip map

مقادیر جابجایی سنجنده ASAR

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

جدول۳. حد آستانه‌های تغییرات جابجایی به همراه بازه‌های زمانی سنجنده ASAR

سنجنده ASAR	تصویر پایه ۲۰۰٤/۰۸/۲٤	بازه زمانی بین تصاویر	بالاآمدگی (میلیمتر)	فرونشت (میلیمتر)	میزان بالاآمدگی در روز (میلیمتر)	میزان فرونشست در روز (میلیمتر)
۱	۲۰۰٤/۰۲/۱۱	۷۰	۱۸۵/۸۷	-۱۳۱/۹۷	۰/٦۵٤	-۰/۸۸۵۲۹
۲	۲۰۰۵/۰۲/۱۵	۱۷۵	۱۱٤/۵٦	-۲۰۵/۳۳	۰/٦۵٤٦۲۹	-۰/۸۷۳۳۱
۳	۲۰۰۵/۰۳/۲۲	۲۱۰	۱۸۹/٦۱	-۱۹۸/٤۹	۰/۹۰۲۹۰۵	-۰/۹٤۵۱۹
٤	۲۰۰۵/۰٤/۲٦	۲٤۵	۱۹۰/۹	-۲۳۵/٤۷	۰/۷۷۹۱۸٤	-۰/۹٦۱۱
۵	۲۰۰۵/۰۷/۰۵	۳۱۵	۱۷۹/۱۸	-۲٤۹/۸	۰/۵٦۸۸۲۵	-۰/۷۹۳۰۲
٦	۲۰۰۵/۰۸/۰۹	۳۵۰	۲۱۰/۱۹	-۲۵۰/۱	۰/٦۰۰۵٤۳	-۰/۷۱٤۵۷
۷	۲۰۰۵/۰۹/۱۳	۳۸۵	۱۹۱/۱۲	-۲٦۱/۷۸	۰/٤۹٦٤۱٦	-۰/٦۷۹۹۵
۸	۲۰۰۵/۱۱/۲۲	٤۵۵	۲۰۹/۱۹	-۳۰۲/۷۹	۰/٤۵۹٤۷۵۸	-۰/٦٦۵٤۷
۹	۲۰۰٦/۰۳/۰۷	۵٦۰	۲۲۸/۰۳۲	-۳۳۳/۸۵	۰/٤۰۷۲	-۰/۵۹٦۱٦
۱۰	۲۰۰٦/۰٦/۲۰	٦٦۵	۲۰۰/۹	-٤۲۹/۷۵	۰/۳۰۲۱۰۵	-۰/٦٤٦۲٤
۱۱	۲۰۰٦/۰۷/۲۵	۷۰۰	۱۹۲/۰۹	-٤٤۱/۲٦	۰/۲۷٤٤۱٤	-۰/٦۳۰۳۷
۱۲	۲۰۰٦/۱۱/۰۷	۸۰۵	۲٤۱/۰۹	-٤٤٦/۹۵	۰/۲۹۹٤۹۱	-۰/۵۸۰۰٦
۱۳	۲۰۰۷/۰۲/۲۰	۹۱۰	۲۳۵/۷	-۵۲٤/٤۷	۰/۲۵۹۰۱۱	-۰/۵۷٦۳٤
۱٤	۲۰۰۷/۰۳/۲۷	۹٤۵	۲۱۵/۸٦	-۵٤۵/۹٤	۰/۲۲۸٤۲۳	-۰/۵۷۷۷۱
۱۵	۲۰۰۷/۰۸/۱٤	۱۰۸۵	۲۲۰/۰٦	-٦۲٤/٦۱	۰/۲۰۲۸۲	-۰/۵۷۵٦۸
۱٦	۲۰۰۸/۰٤/۱۵	۱۳۳۰	۲۱۵/۲۱	-۷٦۰/٦۱	۰/۱٦۱۸۱۲	-۰/۵۷۱۸۹
۱۷	۲۰۰۸/۰۵/۲۰	۱۳٦۵	۲۰٤/۵۷	-۷۸۸/۱٤	۰/۱٤۹۸٦۸	-۰/۵۷۷۳۹
۱۸	۲۰۰۹/۰۳/۳۱	۱٦۸۰	۲۲۰/۵٦	-۹۳۳/۳٦	۰/۱۳۱۲۸٦	-۰/۵۵۵۵۷
جمع کل		۱۲۲۵۰	۳٦٤٤/٦۰۲	-۷٦۸٤/٦۷	۰/۵۲۹۵۹٤	-۰/۷٦۱٤۱

مقادیر جابجایی سنجنده TERRA SAR

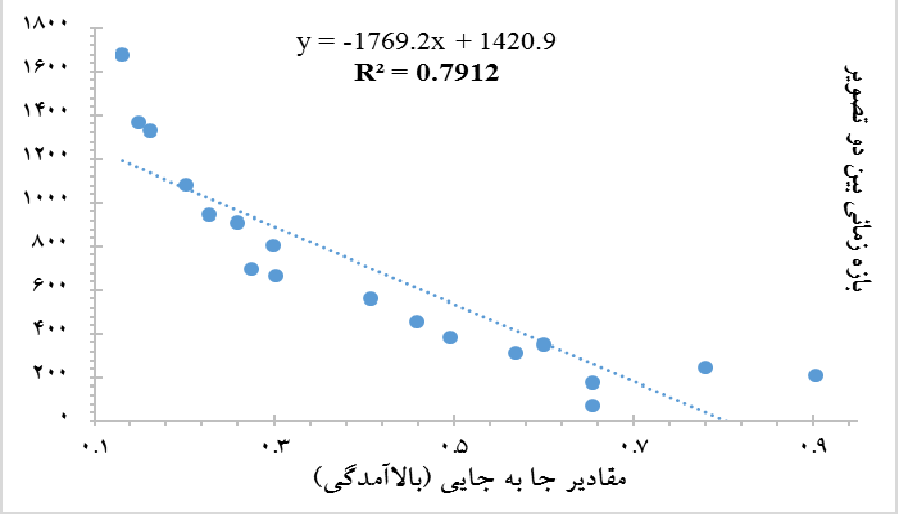
پس از تداخل‌سنجی با روش SBAS تداخل‌نگارهای به دست آمده از سنجنده TERRA SARمورد بررسی قرار گرفت. این تداخل‌نگارها پس از پردازش نهایی در نرم‌افزار SARSCAPE تبدیل به مقادیر جابجایی در راستای قائم بر حسب میلی‌متر شدند که نتایج جدول٤. حد آستانه‌های تغییرات جابجایی به همراه بازه‌های زمانی سنجنده TERRA SAR در جدول ٤ آورده شده است.

جدول۴. حد آستانه‌های تغییرات جابجایی به همراه بازه‌های زمانی سنجنده TERRA SAR

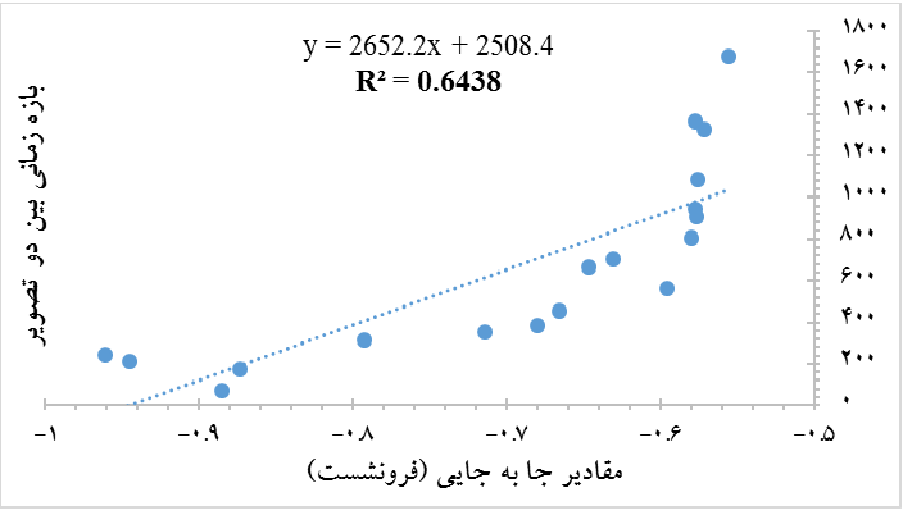
سنجنده TERRA	تصویر پایه ۲۰۱۲/۱۰/۲۸	بازه زمانی بین تصاویر	بالاآمدگی (میلیمتر)	فرونشت (میلیمتر)	میزان بالاآمدگی در روز (میلیمتر)	میزان فرونشست در روز (میلیمتر)
۱	۲۰۱۲/۱۱/۰۸	۱۱	۱۱/۲۲۹	-۱۵/۷۹	۰/۵۲۰۸۱۸	-۰/۷۱۰۸۲
۲	۲۰۱۲/۱۱/۳۰	۳۳	۱۹/۸۵٦	-۲۸/۸۱	۰/٦۰۱٦۹۷	-۰/۸۷۳۰۳
۳	۲۰۱۲/۱۲/۱۱	٤٤	۲۲/۸۵۳	-۲۹/۷۱	۰/۵۱۹۳۸٦	-۰/٦۷۵۲۳
٤	۲۰۱۲/۱۲/۲۲	۵۵	۲۹/۹٤۸	-۳٤/۵٤	۰/۵۳۷۷۰۹	-۰/٦۲۸
۵	۲۰۱۳/۰۱/۱۳	۷۷	۲۹/۵۷٤	-۳۹/۳۵	۰/۳۸۸۹۳۵	-۰/۵۱۱۰٤
٦	۲۰۱۳/۰۱/۲٤	۷۷	۳۳/۰۹٤	-۳۹/٤۵	۰/۳۷٦۰٦۸	-۰/٤٤۸۳
۷	۲۰۱۳/۰۲/۲٦	۱۲۱	۳۹/٦٤٦	-٤۷/۲٦	۰/۳۲۷٦۵۳	-۰/۳۹۰۵۸
۸	۲۰۱۳/۰۳/۰۹	۱۳۲	٤٤/۱۵۱	-۵۰/٤۱	۰/۳۳٤٤۷۷	-۰/۳۸۱۸۹
۹	۲۰۱۳/۰۳/۳۱	۱۵٤	۵۲/۸٦۷	-۵۹/٦۱	۰/۳٤۳۲۹۲	-۰/۳۸۷۰۸
۱۰	۲۰۱۳/۰۵/۰۳	۱۸۷	۵۹/۵۵۹	-۷٦/۸٤	۰/۳۱۸٤۹۷	-۰/٤۱۰۹۱
جمع کل	-	۹۰۲	۳٤۲/۷۷۷	-٤۳۹/۷۷	۰/٤۷٦۸۵۳	-۰/۷۷۷۷۹

صحت نتایج خروجی الگوریتم SBAS برای سنجنده ENVI SAT ASAR

صحت نتایج الگوریتم SBAS بیشینه و کمینه هر تداخل‌نما و میزان تغییرات جابجایی برای هر بازه و روند تغییرات نشان می‌دهد که حد بیشینه و کمینه برای کل سری زمانی دارای حد مناسب و نرمال است و نشان‌دهندهٔ جهت‌دار بودن تغییرات است (جدول ۳). روند تغییرات جابجایی عمودی سطح زمین در روز برای سنجنده ENVISAT ASAR و رابطهٔ خطی برای تداخل‌نگارها به همراه ضریب تعمیم در شکل‌های ۷ و ۸ آورده شده است.



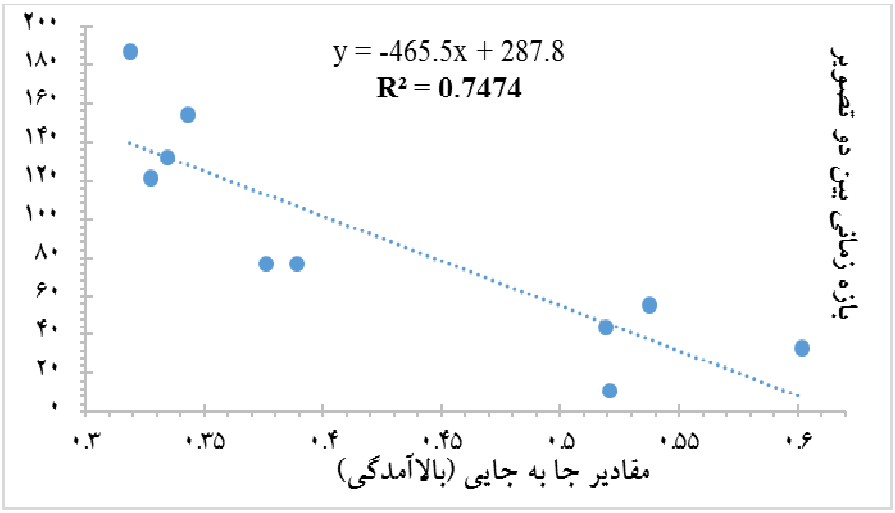
شکل۷. نمودار تغییرات جابجایی (بالاآمدگی) در روز سنجنده ASAR



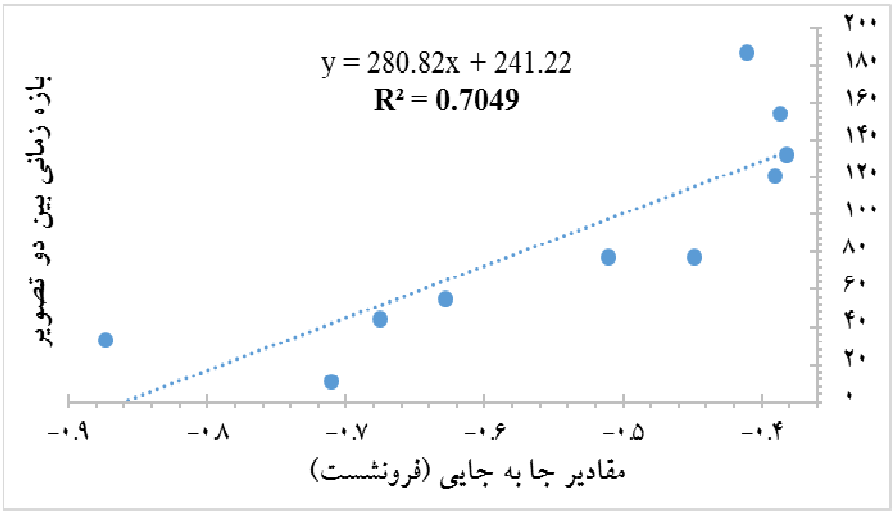
شکل۸. نمودار تغییرات جابجایی (فرونشست) در روز سنجنده ASAR

صحت نتایج خروجی الگوریتم SBAS برای سنجنده TERRA SAR

صحت نتایج الگوریتم SBAS بیشینه و کمینه هر تداخل‌نما و میزان تغییرات جابجایی برای هر بازه و روند تغییرات نشان می‌دهد که حد بیشینه و کمینه برای کل سری زمانی دارای حد مناسب و نرمال است و نشان‌دهندهٔ جهت‌دار بودن تغییرات است (جدول ٤). در شکل‌های ۹ و ۱۰ روند تغییرات جابجایی عمودی سطح زمین در روز بر حسب میلی‌متر و رابطهٔ خطی درجه اول بین تداخل‌نماها به همراه میزان ضریب تعمیم برای سنجنده TERRA SAR نشان داده شده است.



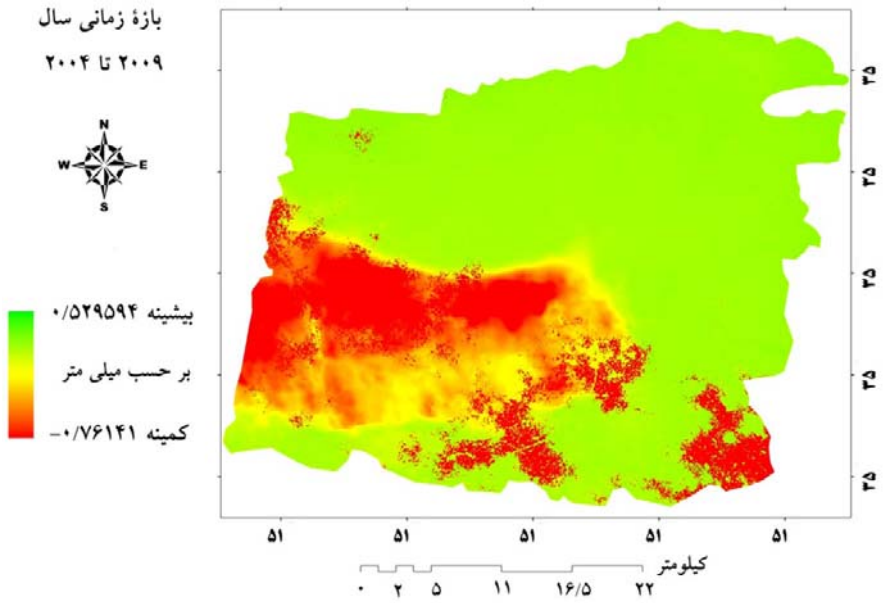
شکل۹. نمودار تغییرات جابجایی (بالاآمدگی) در روز سنجنده TERRA SAR



شکل۱۰. نمودار تغییرات جابجایی (فرونشست) در روز سنجنده TERRA SAR

مدل نهایی الگوریتم SBAS برای سنجنده ENVISAT ASAR

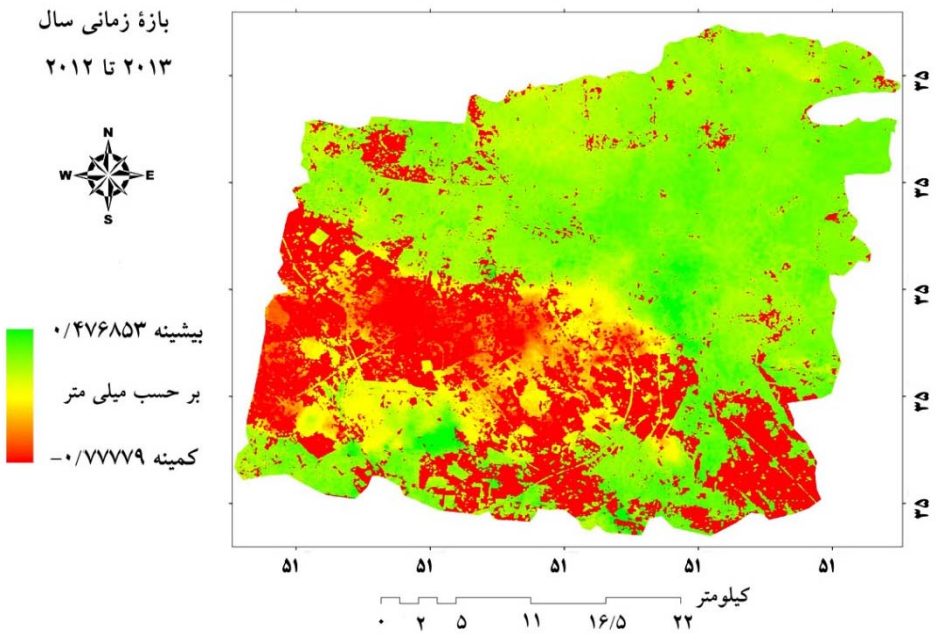
الگوریتم SBAS دارای توانایی ایجاد نقشه میزان جابه‌جایی عمودی سطح زمین در واحد زمان مانند سال است که این نقشه را هم می‌توان از طریق رابطهٔ خطی بین تداخل‌نماهای ایجاد شده از سری زمانی تداخل‌سنجی تفاضلی رادار با روزنه مصنوعی بدست آورد که در شکل ۱۱ نقشه میزان جابجایی عمودی سطح زمین در روز را برای سنجنده ASAR در بازهٔ زمانی سال ۲۰۰٤ تا ۲۰۰۹ ارائه شده است.



شکل۱۱. نقشه میزان جابجایی عمودی سطح زمین در روز از سنجنده ASAR

مدل نهایی الگوریتم SBAS برای سنجنده TERRA SAR

در این مرحله پس از بدست آوردن معادلهٔ خطی بین تداخل‌نماهای ایجاد شده از سری زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳ سنجنده TERRA SAR، با استفاده از تداخل‌سنجی تفاضلی رادار با الگوریتم SBAS، نقشه نهایی میزان جابجایی عمودی سطح زمین در روز تولید گردید (شکل ۱۲).



شکل۱۲. نقشه میزان جابجایی عمودی سطح زمین در روز از سنجنده TERRA SAR

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شده با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی 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 تداخل‌سنجی راداری با استفاده از الگوریتم SBAS در این پژوهش، ظرفیت مناسبی از قابلیت‌های آن در تعیین میزان جابجایی سطح زمین و عرصه‌های طبیعی در بازهٔ زمانی کوتاه مدت و بلند مدت در طول موج‌های X و C را در سطح محدودهٔ 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 بازهٔ زمانی و در شرایط اقلیمی متفاوت بدست آمد که مقایسهٔ بین این دو نقشهٔ جابجایی نشان‌دهندهٔ 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 (٦) 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 بالاآمدگی سطح زمین در سال است، که این بالاآمدگی 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 ۰/٤۷ میلی‌متر در روز برای سنجنده TERRA SAR است.

منابع مورد استفاده

۱. حاتمی، ج. ۱۳۹٤. 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): ۱۰۵-۱۱٤.

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): ٦۱-۷۳.

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, Laczniak 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. Massonnet 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.

RS & GIS for Natural Resources
(Vol. 8/ Issue 3) autumn 2017
Indexed by ISC, SID, Magiran and Noormags
http://girs.iaubushehr.ac.ir

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' 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