

پردازش سری زمانی تداخل سنجی تصاویر راداری COSMO-SkyMed به منظور محاسبه نرخ فرونشست در محدوده سازه‌های زمینی و زیرزمینی در شهر تهران

سید ساسان بابایی^{۱*}، صفا خزایی^۲، فروزان قاصر مبارکه^۳

^۱ دانشجوی دکتری ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
s.sasan_babaei@email.kntu.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران - دانشگاه جامع امام حسین (ع)
skhazai@ihu.ac.ir

^۳ کارشناس ارشد ژئودزی - گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده عمران و حمل‌ونقل - دانشگاه اصفهان
fghasser@yahoo.com

(تاریخ دریافت خرداد ۱۳۹۵، تاریخ تصویب اسفند ۱۳۹۵)

چکیده

بررسی تغییرات سطحی بویژه فرونشست اتفاق افتاده در محدوده سازه‌های مهم زمینی و زیرزمینی و شناسایی رفتار دینامیک سطحی این سازه‌ها همواره یکی از چالش‌های بزرگ و مهم در دهه‌های اخیر بوده است که هزینه‌های زیادی را نیز متوجه ارگان‌های مختلف کرده است. یکی از فناوری‌های نسبتاً جدید برای بررسی این جابه‌جایی‌ها فناوری تداخل سنجی راداری است، لذا در این پژوهش از این فناوری با تکیه بر تصاویر راداری COSMO-SkyMed با قدرت تفکیک بالا برای بررسی فرونشست در محدوده برخی از سازه‌های زمینی و زیرزمینی مهم شهر تهران بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ استفاده شده است. برای آنالیز سری زمانی تداخل سنجی در این پژوهش از روش پراکنش کننده‌های دائمی در پکیج StaMPS تحت دو رویکرد PS و SBAS استفاده شد و نتایج هر دو روش پردازش نشان داد که در قسمت جنوب غربی شهر تهران و در مناطق شهرداری ۹، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۱ فرونشست معناداری در فاصله زمانی این یک سال اتفاق افتاده است که متوسط نرخ آن در جهت خط دید ماهواره چیزی در حدود ۶۱ میلی‌متر در سال می‌باشد. همچنین در ادامه این پژوهش با تکیه بر نتایج بدست آمده از پردازش سری زمانی تداخل سنجی راداری و شناسایی مناطق خطر، به بررسی تغییر شکل‌های اتفاق افتاد در محل برخی از سازه‌های مهم از جمله؛ برج میلاد، استادیوم آزادی، برج آزادی، فرودگاه مهرآباد و همچنین تغییرات سطحی در مسیر متروی تهران پرداخته شده تا مناطقی که در معرض خطر هستند را شناسایی کرده و جهت انجام اقدامات پیشگیرانه مناسب در آینده به ارگان‌های زیربط معرفی شوند. نتایج و آنالیزها نشان می‌دهد که در محدوده برج و میدان آزادی ما شاهد فرونشستی به اندازه ۳۰ میلی‌متر در سال و برای محدوده فرودگاه مهرآباد این مقدار بسیار چشمگیر و به میزان ۶۰ میلی‌متر در سال در جهت خط دید ماهواره است، در مناطق ۵ و ۲۲ شهرداری نیز رفتار جابه‌جایی دو سازه مهم برج میلاد و استادیوم آزادی را در میدان تغییر شکل سری زمانی بررسی کردیم که در محدوده برج میلاد ما شاهد فرونشستی به اندازه ۱۶ میلی‌متر در سال و در اطراف و خود استادیوم آزادی شاهد فرونشستی نبود و این جابه‌جایی تقریباً صفر در این نواحی محاسبه شده است، در متروی تهران وضعیت سه مسیر اصلی؛ خط ۱ (کهریزک به سمت تجریش)، خط ۲ (صادقیه به سمت فرهنگسرا)، خط ۳ (آزادگان به سمت قائم) با نتایج استخراج شده از تحلیل سری زمانی تداخل سنجی تطبیق داده شد. نتایج پردازش نشان می‌دهد که خوشبختانه در طول مدت این یک سال فرونشست معنی‌داری در مسیر این خطوط اتفاق نیفتاده است.

واژگان کلیدی: سری زمانی تداخل سنجی، فرونشست، تصاویر COSMO-SkyMed، پراکنش کننده‌های دائمی، طول مبنای کوتاه، سازه‌های زمینی و زیرزمینی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

بررسی و پایش میدان جابه‌جایی ناشی از تغییر شکل‌های سطح زمین از مطالعات مهم و کاربردی در مباحث مختلف زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی است که در پیشگیری و رفتارشناسی سوانح طبیعی از قبیل زلزله، فرونشست و زمین‌لغزش نقش بسزایی دارد. در این میان روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری‌های ژئودتیکی و پایش این تغییرشکل‌ها وجود دارد که از میان آن‌ها می‌توان به روش ترازیبی، سیستم تعیین موقعیت جهانی^۱ و اخیراً فناوری تداخل‌سنجی راداری اشاره نمود. در حال حاضر سیستم تعیین موقعیت جهانی کاربرد زیادی در نمایش جابه‌جایی پوسته زمین در مقیاس‌های بزرگ دارد. به کمک آن می‌توان جابه‌جایی نسبی صفحات زمین و تغییرشکل‌های بزرگ مقیاس در صفحات زمین را محاسبه نمود. بنابراین اگر در یک منطقه شبکه‌ای از نقاط کنترل در مقیاس بزرگ با دقت بالا موجود باشد می‌توان جابه‌جایی پوسته زمین را در اثر نشست، زلزله، رانش و ... نمایش داد. اما باید توجه داشت که به دلیل محدودیت در تعداد ایستگاه‌های گیرنده زمینی این روش فقط در مورد مناطقی که به تعداد کافی دارای این ایستگاه‌ها می‌باشند کاربرد دارد [۱-۳].

امروزه تکنیک تداخل‌سنجی راداری به عنوان یک تکنیک متداول برای اندازه‌گیری تغییرشکل سطحی پوسته زمین معرفی شده است. پوشش سراسری و رزولوشن خوب تصاویر راداری و دقت قابل قبول این روش، این تکنیک را به عنوان ابزار نیرومند برای مطالعه پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی همچون زلزله، نشست، زمین‌لغزش و ... مطرح کرده است. تداخل‌سنجی راداری جابه‌جایی سطح زمین را با دقت ارتفاعی سانتی‌متر و رزولوشن مکانی چند ده متر در منطقه‌ای به وسعت هزاران کیلومتر مربع اندازه‌گیری می‌کند. با این تکنیک به صحت در حد میلی‌متر یا سانتی‌متر برای سرعت تغییرشکل زمین می‌توان دست یافت. علاوه بر این‌ها در این فناوری، امکان تصویربرداری در تمامی شرایط آب و هوایی به دلیل قابلیت نفوذ و عبور امواج راداری (ماکروویو) از آبر یا قطرات باران و شرایط گردوغبار و هوای مه آلود و حتی در شب نیز وجود دارد [۲، ۴-۸].

بررسی تغییرات سطحی بویژه فرونشست اتفاق افتاده در سازه‌ها و اهداف مهم زمینی و زیرزمینی و شناسایی رفتار دینامیک سطحی این سازه‌ها همواره یکی از چالش‌های بزرگ و مهم در دهه‌های اخیر می‌باشد که هزینه‌های زیادی را نیز متوجه ارگان‌های مختلف می‌کند، علاوه بر این، شناسایی مکان‌های مناسب برای احداث این اهداف همواره مورد توجه بوده لذا در این پژوهش از آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی تصاویر راداری COSMO-SkyMed^۲ با قدرت تفکیک مکانی بالا (۳ متر) به منظور محاسبه نرخ فرونشست سازه‌ها و اهداف زمینی در شهر تهران بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ استفاده شده است. برای انجام آنالیز سری زمانی از روش تداخل‌سنجی با پراکنش کننده‌های دائمی^۳ در نرم افزار StaMPS کمک گرفته شده است [۹، ۱۰].

در چند سال اخیر محققین متعددی با استفاده از تصاویر راداری و فناوری تداخل‌سنجی راداری به بررسی تغییرات در سازه‌های زمینی و زیرزمینی پرداختند که از جمله این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره نمود؛ فارکو و کوکسلی^۴ در فعالیت پژوهشی خود به بررسی پتانسیل تداخل‌سنجی راداری در شناسایی تغییرات سطحی و فرونشست حاصل از سازه‌های زیرزمینی در مناطق شهری پرداختند. آن‌ها مطالعه خود را بر روی تونل‌سازی در شهر بلبائو^۵ و فرونشست حاصل از متروی بارسلونا در کشور اسپانیا انجام دادند که در این پژوهش از تصاویر راداری TerraSAR-X و COSMO-SkyMed استفاده شد. نتایج فرونشست سطحی اتفاق افتاده به خوبی نشان دهنده‌ی مسیر این سازه‌های زیرزمینی و موقعیت آن‌ها بود [۱۱]. وینسنت^۶ و همکاران (۲۰۰۳) به بررسی رفتار فرونشست سطحی در یک سایت اتمی زیرزمینی در نوادای آمریکا پرداختند. در این مطالعه با فناوری تداخل‌سنجی راداری سیگنال فرونشست را قبل، حین و بعد از ساخت و انجام آزمایشات اتمی مورد ارزیابی قرار داده و مشاهده شد در منطقه‌ی مورد مطالعه فرونشستی دائمی در حال اتفاق افتادن می‌باشد که علاوه بر شناسایی موقعیت سایت اتمی می‌تواند باعث به خطر افتادن سازه‌های

^۲ Constellation of Small Satellites for Mediterranean Basin Observation

^۳ Permanent scatterer

^۴ Farago & Cooksley

^۵ Bilbao

^۶ Vincent

^۱ GPS (Global Positioning System)

SkyMed اخذ شده بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ پرداختیم. مجموعه COSMO-SkyMed شامل چهار ماهواره می‌باشد که در مدارهای پایین تصاویر راداری را با امواج ماکروویو و در طول موج X برداشت می‌کنند، اولین و دومین ماهواره از این مجموعه در سال ۲۰۰۷ و سومین ماهواره در سال ۲۰۰۸ و ماهواره چهارم در سال ۲۰۰۹ ماموریت‌های خود را شروع کردند.

جدول ۱- خلاصه‌ای از اطلاعات مداری مجموعه ماهواره‌های COSMO-SkyMed [۱۷]

نوع مدار	خورشید آهنگ
زاویه انحراف ^۳	۹۷٫۸۶ درجه
دوره چرخش مداری	۱۶ روزه
خروج از مرکز	۰٫۰۰۱۱۸
آرگومان پریجی	۹۰ درجه
نصف قطر اطول مسیر	۷۰۰۳٫۵۲ کیلومتر
ارتفاع	۶۱۹٫۶ کیلومتر
تعداد ماهواره	۴ ماهواره

۲-۱- داده‌های راداری

تصاویری که در این پژوهش استفاده شده شامل ۱۵ تصویر راداری HIMAGE از زیر مجموعه مُد تصویربرداری Stripmap با قدرت تفکیک ۳ متر و ناحیه تحت پوشش ۴۰*۴۰ کیلومتر مربعی با زاویه دید ۳۶ درجه می‌باشند (شکل ۱). تصاویر انتخاب شده مربوط به ماهواره شماره ۲ و در مُد پلاریزاسیون HH هستند. پلاریزاسیون در واقع جهت نوسان بردار میدان الکتریکی نسبت به محور انتشار موج است و همواره پلاریزاسیون‌های همسان (HH, VV) بازگشت قوی‌تری دارند. پردازش‌های تداخل‌سنجی راداری معمولاً توسط نرم افزارهایی مثل SARscape، نرم افزار تجاری Gamma، اخیراً نرم افزار ESA-SNAP و پکیج‌های کد باز مثل DORIS، ADORE DORIS و StaMPS/MTI انجام می‌گیرد [۱۸]، که در این پژوهش برای پیاده‌سازی سری‌های زمانی تداخل‌سنجی PS^۴ و SBAS^۵ از پکیج نسبتاً جدید، به روز شده و کد باز StaMPS/MTI تحت سیستم عامل لینوکس استفاده شد.

این سایت در آینده نیز شود [۱۲]. ونگ^۱ و تیم تحقیقاتیش (۲۰۱۱) با استفاده از تصاویر راداری COSMO-SkyMed و فناوری تداخل‌سنجی راداری به بررسی فرونشست حاصل از تونل متروی شهر شانگهای در چین پرداختند. نتایج حاصل از تداخل‌سنجی نشان داد که بیشتر مسیرهای این مترو باعث ایجاد فرونشست در سطح زمین شده‌اند و در اکثر ایستگاه‌های مترو نرخ بالایی (حدود ۵-۲۰ میلی‌متر در سال) از نشست سطحی مشاهده شد [۱۳]. وینسنت و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی رفتار غیر عادی بالا آمدگی سطح زمین ناشی از فعالیت‌های سایت آزمایشات اتمی لوپ نور^۲ در چین با استفاده از فناوری تداخل‌سنجی رادار پرداختند، در این مطالعه از داده‌های راداری ماهواره ERS بین سال‌های ۱۹۹۷-۱۹۹۹ استفاده و مشخص شد که سطح زمین در مرکز موقعیت این سایت اتمی به علت فعالیت‌ها و انجام آزمایش‌های اتمی و تشکیل جریان‌ات گرمایی دارای یک سیگنال بالا آمدگی پیوسته در بازه زمانی برداشت داده‌ها بوده و این مقدار را حدود ۲٫۷ سانتی‌متر تخمین زدند [۱۴]. کریمزاده (۲۰۱۵) فرونشست حوضه‌ی تبریز را با ترکیب روش‌های پراکنش‌کننده‌های دائمی، طول مبنای کوتاه با استفاده از ۱۷ تصویر راداری ASAR بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ انجام داد و ماکزیمم فرونشستی به اندازه‌ی ۴۰ میلی‌متر را برآورد نمود [۱۵]. بابایی و همکاران (۲۰۱۶) با آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS) نرخ فرونشست دشت قزوین را بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ برابر با ۳۰ تا ۳۵ میلی‌متر در سال محاسبه نمود [۱۶].

در ادامه این پژوهش ابتدا در بخش دوم داده‌ها و روش تحقیق معرفی شده و در قسمت سوم نتایج تجربی پردازش شامل پیش پردازش‌ها و تجزیه و تحلیل این نتایج ارائه شده و در نهایت در قسمت چهارم مقاله نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش با استفاده از آنالیز سری‌های زمانی تداخل‌سنجی PS، SBAS به بررسی رفتار فرونشست شهر تهران با استفاده از تصاویر ماهواره راداری COSMO-

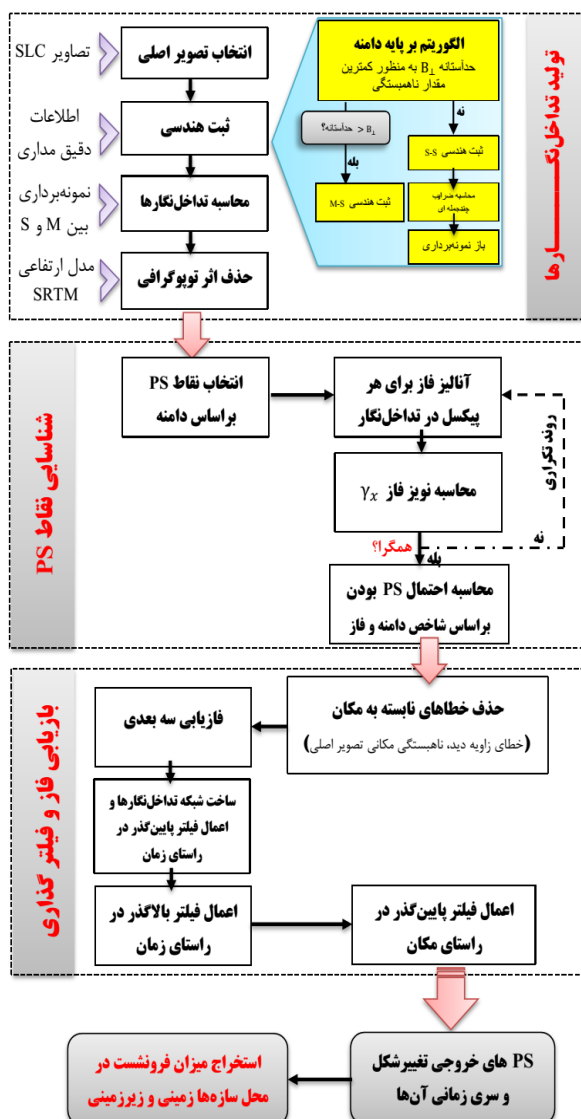
^۳ Inclination

^۴ Persistent Scatterer

^۵ Small Baseline Subset

^۱ Wang

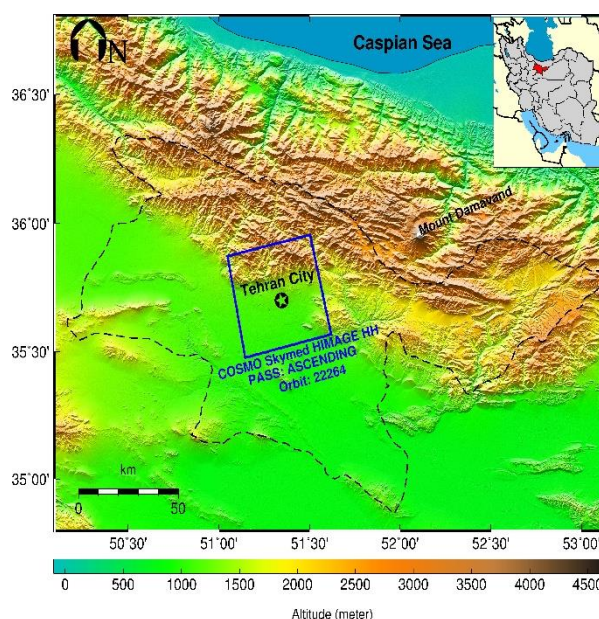
^۲ Lop Nor



شکل ۲-۲. فلوچارت مراحل ایجاد تداخل نگار در پکیج StaMPS همراه با مراحل شناسایی نقاط PS، تعدیل خطاهای موجود در این نقاط و بازبینی فاز این نقاط به منظور تحلیل سری زمانی PS و SBAS (M) بیان گر تصویر اصلی و S بیان گر تصویر فرعی است.

مرحله اول تشکیل تداخل نگار است، به طور معمول با تصحیح هندسی یکی از تصاویر مختلط بر پایه تصویر دیگر انطباق هندسی صورت می گیرد (شامل دو مرحله؛ ثبت- هندسی نادقیق و ثبت هندسی دقیق). در این میان، نمونه برداری دوباره به طور معمول با روش های درون یابی در حوزه مکانی انجام می شود و حفظ محتوی طیفی تصویر در طراحی فیلتر در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب تداخل نگار خود یک تصویر مختلط بوده و فاز آن اختلاف فاز سیگنالی است که توپوگرافی و تغییر شکل را با هم در زمان های تصویربرداری دربرمی گیرد. در این میان از مدل ارتفاع رقومی برای حذف اثر توپوگرافی استفاده

برای حذف اثر فاز ناشی از توپوگرافی از روی تداخل- نگارها ایجاد شده از مدل ارتفاع رقومی ماهواره راداری ناسا (SRTM) با قدرت تفکیک ۹۰ متر کمک گرفته شده است.



شکل ۱- موقعیت استان تهران با خط چین های سیاه رنگ مشخص شده است. کادر مستطیلی آبی رنگ وضعیت تصاویر COSMO-SkyMed اخذ شده در مدار صعودی با شماره مدار ۲۲۲۶۴ در مَد HIMAGE و با پلاریزاسیون HH را بر روی مدل ارتفاع رقومی (SRTM) منطقه نشان می دهد.

۲-۲- روش انجام تحقیق

برای رفتارسنجی تغییر شکل یک پدیده نیازمند بررسی سری زمانی آن پدیده در منطقه مورد نظر هستیم. بنابراین می بایست چندین تصویر در بازه های زمانی متفاوت از آن منطقه در دسترس بوده و چندین تداخل- نگار بین بازه های زمانی متفاوت برای محاسبه نرخ تغییر- شکل در محاسبات وارد گردد، که به تحلیل سری زمانی تداخل سنجی معروف می باشد [۱۹، ۲۰].

مراحل و الگوریتم پردازش تصاویر راداری و انجام تحلیل سری زمانی با این تصاویر در پکیج StaMPS که ضمن این پژوهش از آن استفاده شده در شکل ۲ آورده شده است.

دامنه در پژوهش‌های مختلف معمولاً حد آستانه ۰/۴ یا ۰/۴۲ را در نظر می‌گیرند که باعث می‌شود تمام نقاط کاندیدای انتخاب شده در مجموعه نقاط PS قرار نگرفته و فقط نقاطی که مقدار شاخص پراکندگی دامنه آن‌ها بیشتر از حد آستانه است انتخاب شوند [۶]، در اینجا ما مقدار ۰/۴ را برای حد آستانه شاخص پراکندگی دامنه در نظر گرفته‌ایم. در پکیج StaMPS علاوه بر شاخص پراکندگی دامنه، PS های نهایی بر مبنای برآورد پایداری فاز از طریق تحلیل فاز انتخاب می‌شوند که این باعث شناسایی تراکم مناسبی از PS ها در مناطق غیرشهری می‌شود که یکی از محدودیت‌های روش‌های قدیمی انتخاب پراکنش کننده‌های دائمی در مناطق غیرشهری و کوهستانی است [۱، ۷، ۸]. همچنین در مرحله شناسایی نقاط پراکنش‌گر پایدار پایدار نیازی به اطلاعات اولیه از مدل جابه‌جایی در زمان در روش پراکنش کننده‌های دائمی پکیج StaMPS نداریم، این در حالی است که در روش‌های قدیمی برای شناسایی نقاط PS و به منظور بازیابی فاز نیاز به اطلاعات اولیه از مدل جابه‌جایی در زمان می‌باشد. آشنایی با مدل جابه‌جایی در یک منطقه همیشه امکان پذیر نخواهد بود. لذا پکیج StaMPS از این نظر بر روش‌های دیگر برتری دارد [۹، ۱۰، ۲۴].

پیکسل‌های پراکنش کننده‌ی دائمی نهایی براساس میزان استحکام فاز حاصل از آنالیز فاز انتخاب می‌شوند. در واقع پراکنش کننده‌های دائمی پیکسل‌هایی هستند که سهم نویز آن‌ها بقدری کوچک باشد که سیگنال بطور کامل از بین نرود. برای این منظور یک کمیت کوهرنس زمانی γ_x از تغییرات فاز باقیمانده که معیاری است از PS بودن، در هر مرحله از تکرار محاسبه می‌شود [۶، ۱۰]:

$$\gamma_x = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \exp \{ j(\phi_{int,x,i} - \bar{\phi}_{int,x,i} - \Delta\hat{\phi}_{\varepsilon,x,i}) \} \right| \quad (2)$$

که $\phi_{int,x,i}$ فاز بازیابی نشده پیکسل x ام در تداخل‌نگار $\bar{\phi}_{int,x,i}$ برآوردی از فاز بازیابی نشده پیکسل x ام که در یک شعاع معین از پیکسل‌های مجاور تعیین شده، $\Delta\hat{\phi}_{\varepsilon,x,i}$ برآوردی از مؤلفه ناهمبسته در مکان (فاز باقی مانده از توپوگرافی) و N تعداد کل تداخل‌نگارها می‌باشد. بعد از هر تکرار، تغییرات RMS در γ تعیین شده و زمانی که این مقدار از حد آستانه انتخاب شده کمتر باشد همگرا شده و الگوریتم تکرار را خاتمه می‌دهد.

می‌شود. با آگاهی از اطلاعات مداری و مدل ارتفاع رقومی، امکان شبیه‌سازی تداخل‌نگار توپوگرافی و حذف آن از تداخل‌نگار مورد نظر وجود دارد.

بعد از تولید تداخل‌نگارها و تصحیح آنها نسبت به خطاهای موجود در تداخل‌سنجی، یک مجموعه از تداخل‌نگارها از یک منطقه حاصل می‌شود که در بازه‌های زمانی مختلف می‌باشند. عدم همبستگی زمانی و مکانی بین تصاویر سبب می‌شود تا تقریباً هر تداخل‌نگار شامل مناطق بزرگی باشد که در آن‌ها همبستگی پایین است و اندازه‌گیری انجام شده در این مناطق قابل اطمینان نیست و یا اصلاً قابل انجام نیست. این محدودیت‌ها سبب می‌شود تا روش تداخل‌سنجی، به تنهایی ابزاری کامل جهت نظارت و اندازه‌گیری اعوجاجات سطح زمین و تغییرات توپوگرافی نباشد. تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی تا حدود زیادی باعث غلبه بر این محدودیت‌ها در تداخل‌سنجی می‌شود [۳، ۵، ۲۰-۲۳].

برای پردازش سری زمانی تداخل‌سنجی در این پژوهش با انتخاب پیکسل‌های پراکنش کننده دائمی در کل منطقه، رفتار سری زمانی این پیکسل‌ها با استفاده از روش پراکننده‌های دائمی (PS) و طول مبنای کوتاه (SBAS) بررسی می‌شود، بنابراین طبق بلوک دوم فلوچارت شکل ۲ ابتدا با استفاده از روش تحلیل سری زمانی PS اقدام به شناسایی نقاط PS موجود در تداخل‌نگارهای ایجاد شده می‌کنیم.

هدف روش PS-InSAR شناسایی پیکسل‌هایی از تصویر است که از این پس آن‌ها را PS می‌نامیم، که در بازه‌ی زمانی اخذ داده‌های مورد استفاده همدوس^۱ باقی می‌مانند [۴، ۱۰]. بنابراین در روش PS-InSAR ابتدا کاندیدای پراکنش کننده‌ی دائمی بر پایه‌ی مقدار شاخص پراکندگی دامنه تعیین می‌شوند. شاخص پراکندگی دامنه^۲ D_A اولین بار توسط فریتی^۳ در سال ۲۰۰۱ طبق فرمول زیر تعریف شد [۸، ۱۰]:

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \leq 0.4 \text{ or } 0.42 \quad (1)$$

که μ_A و σ_A به ترتیب انحراف معیار استاندارد و میانگین مقادیر دامنه در یک پنجره هستند. برای شاخص پراکندگی

^۱ Coherent

^۲ Amplitude Dispersion Index

^۳ Ferretti

۴ Temporal coherence

نویزهای موجود در تداخل نگار می باشد. پارامترهای λ ، R ، $B_{\perp}$ ، Δz و θ در معادله ۴ به ترتیب عبارتند از؛ طول موج، رنج مایل از ماهواره تا نقطه زمینی، طول پایه عمودی^۱، خطای مدل ارتفاع رقومی و زاویه دید می باشند.

اولین ترم از معادله ۴ را می توان به صورت زیر بسط داد [۲۱]:

$$\begin{aligned} \delta\varphi_{def,x,i} &= \frac{4\pi}{\lambda} [d_{x,i}(t_B) - d_{x,i}(t_A)] \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} \sum_{k=t_A}^{t_B-1} v_{k,k+1}(t_{k+1} - t_k) \end{aligned} \quad (5)$$

که در معادله بالا $v_{k,k+1}$ نرخ جابه جایی بین دو تصویر راداری تشکیل دهنده تداخل نگار λ_m می باشد. بنابراین با حل معادله ۵ برای سری زمانی تغییر شکل به روش کمترین مربعات (LS)^۲ و یا روش SVD^۳، سری زمانی تغییر شکل برای هر پیکسل در تمام تداخل نگارها با فاز بازیابی شده بدست می آید.

۳- پیش پردازش الگوریتم های PS و SBAS

برای پیاده سازی الگوریتم PS ابتدا تداخل نگارها را نسبت به یک تصویر که اصطلاحاً تصویر اصلی نامیده می شود، تشکیل دادیم. انتخاب این تصویر بر این اساس صورت گرفت که کمترین مقدار ناهمبستگی را داشته باشد یعنی تصویر انتخاب شده نسبت به بقیه تصاویر دارای کمترین مقدار خط مبناهای عمودی ($B_{\perp}$)، زمانی^۴ (T) و داپلر^۵ (F_{DC}) باشد [۹، ۱۰].

$$\begin{aligned} \rho_{total} &= \rho_{temporal} + \rho_{spatial} + \rho_{doppler} \\ &\quad + \rho_{thermal} \\ &\approx \left[1 - f\left(\frac{T}{T_c}\right)\right] \left[1 - f\left(\frac{B_{\perp}}{B_{\perp c}}\right)\right] \left[1 - f\left(\frac{F_{DC}}{F_{DC c}}\right)\right] \rho_{thermal} \end{aligned} \quad (6)$$

که در این فرمول؛

$$f(x) = \begin{cases} x, & \text{for } x \leq 1 \\ 1, & \text{for } x > 1 \end{cases} \quad (7)$$

که در این فرمول ها ρ میزان همبستگی و اندیس c نشان دهنده مقدار بحرانی هر یک از پارامترها می باشد که با توجه به مجموعه داده های انتخابی مقادیر ثابت و مشخصی هستند.

پس از مرحله انتخاب PS ها، عملیات بازیابی فاز به صورت سه بعدی (دو بعد مکانی، همانند روش تداخل سنجی متداول و یک بعد زمانی) صورت می گیرد. بعد از رفع ابهام یا بازیابی فاز PS ها، هنوز مولفه هایی از خطا بر روی فاز وجود دارد که همبستگی مکانی داشته و در راستای زمان ناهمبسته اند، لذا با اعمال یک فیلتر بالاگذر بر روی داده های رفع ابهام شده در راستای زمان و سپس با اعمال یک فیلتر پایین گذر در راستای مکان، قادر خواهیم بود تا این خطاهای وابسته به مکان را تخمین بزنیم. در نهایت میزان جابه جایی برای هر یک از این نقاط PS نهایی برآورد می شود.

در الگوریتم پراکنش کننده های دائمی با طول خط مبنای کوتاه (SBAS)، تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می گیرند که مؤلفه ی قائم خط مبنای آن ها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنای باشد، همچنین خط مبنای زمانی آن ها نیز همزمان کمینه باشد. به این ترتیب، فقط تداخل نگارهایی تشکیل می شوند که کیفیت مناسبی داشته باشند. پس از تشکیل این تداخل نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد می شود، سپس با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابه جایی هر پیکسل تخمین زده می شود. برای درک بهتر نحو محاسبه جابه جایی هر پیکسل در این روش، فرض کنید که تعداد N تصویر راداری از یک منطقه که در بازه زمانی $(t_1, t_2, \dots, t_N)$ برداشت شد در اختیار داریم. تعداد تداخل نگارهای ایجاد شده از این تصاویر M عدد می باشد. مقدار M طبق شرط تشکیل تداخل نگارها با طول مبنای کوتاه از فرمول ۳ محاسبه می شود [۲۱]:

$$\frac{N}{2} \leq M \leq \frac{N-1}{2}N \quad (3)$$

در تداخل نگار λ_m بعد از حذف فاز ناشی از توپوگرافی و مسطح بودن زمین فاز باقی مانده پیکسل x را می توان به صورت زیر نوشت [۲۱]:

$$\begin{aligned} \delta\varphi_{x,i} &= \varphi_{x,i}(t_B) - \varphi_{x,i}(t_A) \\ &\approx \frac{4\pi}{\lambda} [d_{x,i}(t_B) - d_{x,i}(t_A)] + \frac{4\pi B_{\perp,x,i} \Delta z}{\lambda R \sin\theta} \\ &\quad + \varphi_{atm,x,i}(t_B) - \varphi_{atm,x,i}(t_A) + \delta\varphi_{n,x,i} \end{aligned} \quad (4)$$

که در اینجا t_A و t_B ($t_B > t_A$) زمان اخذ دو تصویر راداری در تداخل نگار λ_m ($i = 1, 2, \dots, M$) و $d_{x,i}$ فاصله پیکسل λ_m در تداخل نگار λ_m تا سنجنده هستند. اولین ترم از معادله بالا نشان دهنده فاز جابه جایی در راستای خط دید ماهواره، ترم دوم نشان دهنده خطا در فاز توپوگرافی، ترم سوم و چهارم نشان دهنده تاخیر فاز اتمسفری و ترم آخر

^۱ Perpendicular baseline

^۲ Least square

^۳ Singular value decomposition

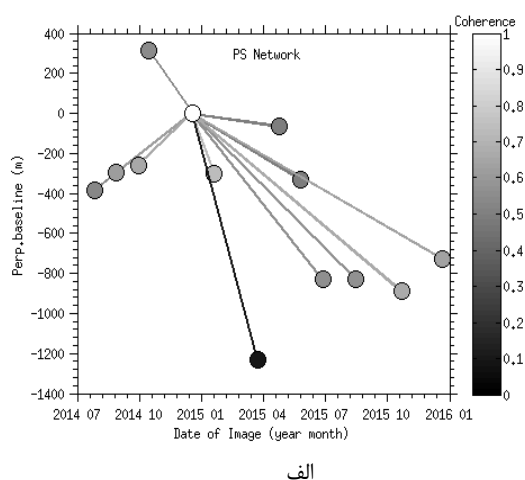
^۴ Temporal

^۵ Doppler

$$p = \frac{|\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_1(i,j) C_2(i,j)^*|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_1(i,j) C_2(i,j)^*} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_1(i,j) C_2(i,j)^*}} \quad (8)$$

$$0 \leq p \leq 1$$

در اینجا C_1 و C_2 به ترتیب نشان دهنده تصویر اصلی و تصویر فرعی، $c(i,j)$ مقدار مختلط پیکسل (i,j) که در راستای رنج و j در راستای آزیموت، $c(i,j)^*$ مزدوج مختلط $c(i,j)$ و در نهایت N تعداد پیکسل‌ها در جهت رنج و M تعداد پیکسل‌ها در جهت آزیموت می‌باشند. میزان هم‌دوسی بین دو تصویر وابسته به اندازه طول پایه مکانی و زمانی آن‌ها می‌باشد و با افزایش هر کدام از این پارامترها میزان هم‌دوسی تصاویر کاهش می‌یابد، و زمانی که هر دوی این پارامترها کمینه شوند بیشترین میزان هم‌دوسی و متناظر آن افزایش کیفیت تداخل‌نگار متناظرش را شاهد خواهیم بود. افزایش کیفیت تداخل‌نگارهای تولیدی باعث می‌شود بتوانیم به دقت بالایی در برآورد تغییر شکل‌های سطحی در زمین دست پیدا کنیم لذا در این پژوهش همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌کنید، سعی بر آن شده که تداخل‌نگارها را برای هر دو الگوریتم PS (شکل ۳-الف) و SBAS (شکل ۳-ب) به نحوی تشکیل دهیم که میزان بالای از هم‌دوسی را داشته باشیم و میانگین هم‌دوسی هر تداخل‌نگار بیشتر از ۰/۵ باشد. برای محاسبه میانگین هم‌دوسی از تعداد ۲۱*۲۱ پنجره با ابعاد ۲۵۶*۲۵۶ استفاده شده است. بعد از محاسبه میانگین هم‌دوسی برای تمام تداخل‌نگارها آن‌هایی که میزان هم‌دوسی کمتری داشتند کنار گذاشته شدند.



بنابراین تصویری به عنوان تصویر اصلی انتخاب می‌شود که مقدار $\sum_{i=1}^N \rho_{total}$ به ازای N تصویر موجود، بیشترین مقدار باشد. در این پژوهش تصویر با تاریخ اخذ ۱۸-۱۲-۲۰۱۴ به عنوان تصاویر اصلی در نظر گرفته شد.

بعد از خواندن تصاویر در نرم‌افزار و معرفی تصویر اصلی، با توجه به این که پردازش برای کل تصویر حجیم و زمان‌بر است، قسمتی از تصویر را که محدوده مورد مطالعه داخل آن قرار دارد انتخاب کرده و از کل تصویر برش می‌دهیم تا پردازش‌ها فقط برای آن محدوده انجام شود^۱.

بنابراین تعداد ۱۲ تداخل‌نگار نسبت به تصویر اصلی ایجاد شد و برای پیاده سازی الگوریتم سری زمانی PS مورد ارزیابی قرار گرفتند تا نقاط پراکنش کننده پایدار شناسایی شوند. در تحلیل دامنه حد آستانه استفاده شده برای پراکندگی دامنه ۰/۴ انتخاب شد. همچنین در آنالیز پایداری فاز مقدار γ^{thresh} برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

در الگوریتم تحلیل سری به روش SBAS از یک شبکه تداخل‌نگار استفاده شد به طوری که برای تشکیل هر تداخل‌نگار از جفت تصویری استفاده شد که دارای کمترین خط مبنا از نظر زمانی و مکانی باشند. تداخل‌نگارها در این روش باید به گونه‌ای تشکیل شوند که در انتها همگی آن‌ها به نوعی با یکدیگر مرتبط باشند، تا در حل معادلات سرشکنی به منظور برآورد فاز دچار کمبود مرتبه نشویم. تعداد تداخل‌نگارها تشکیل شده در این الگوریتم برابر با ۲۱ عدد می‌باشد.

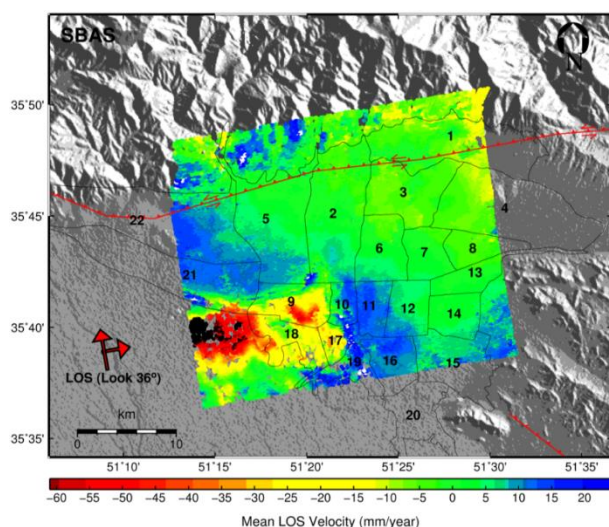
هم‌دوسی بیانگر میزان همبستگی فاز بین دو تصویر می‌باشد، که مقدار آن بین ۰ تا ۱ است. مقدار ۰ بیان کننده ماکزیمم ناهمبستگی و عدم وجود فاز مربوط به اطلاعات و ۱ نشان دهنده عدم وجود نویز فازی در تداخل‌نگار است. فاصله ۰/۷ تا ۱ بهترین مقدار برای آن است و همچنین به عنوان پارامتری برای تشخیص عوارض نیز می‌تواند به کار رود. هم‌دوسی خیلی پایین معمولاً نشان دهنده آب، هم‌دوسی متوسط اغلب نشان دهنده گیاهان در حال رشد و هم‌دوسی بالا نمایشگر شهرها می‌باشد. در پردازش سری‌های زمانی PS و SBAS و هنگام تشکیل تداخل‌نگارها میزان متوسط هم‌دوسی را برای هر جفت تداخل‌نگار تشکیل شده، محاسبه شد. محاسبه هم‌دوسی هر جفت تصویر از طریق فرمول زیر انجام شد [۲۲]:

^۱ Crop area

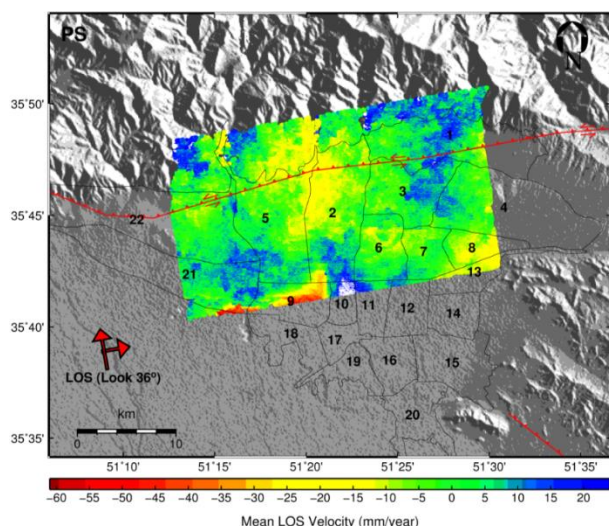
جابه‌جایی در راستای قائم با فرض این که در راستای افقی جابه‌جایی نداریم از فرمول زیر استفاده می‌شود [۲۱].

$$\Delta r_{vert} = \Delta r_{LOS} / \cos(\theta) \quad (9)$$

که θ زاویه دید سنجنده، Δr_{LOS} جابه‌جایی در راستای دید سنجنده و Δr_{vert} جابه‌جایی در راستای قائم (فرونشست) می‌باشند. مقدار زاویه دید برای تصاویر COSMO-SkyMed برابر ۳۶ درجه است، لذا مقدار ۶۱ میلی‌متر در سال معادل فرونشستی به اندازه ۷۵ میلی‌متر در سال است.

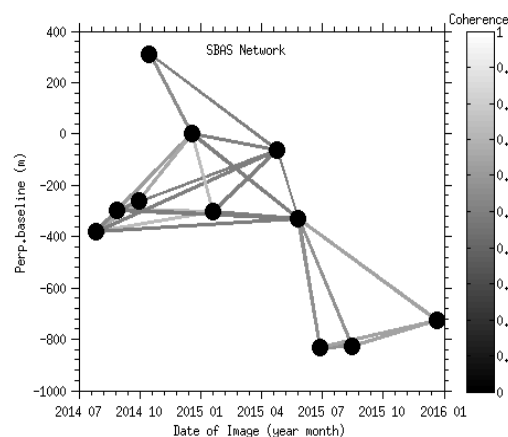


الف



ب

شکل ۴- نتایج حاصل از پردازش سری‌های زمانی SBAS (تصویر الف) و PS (تصویر ب) که بر روی مدل ارتفاع رقومی منطقه ترسیم شده است. علت اختلاف اندازه نتایج، مربوط به اندازه منطقه بریده شده از تصویر برای مطالعه دارد. مناطق دارای فرونشست با رنگ قرمز مشخص شده‌اند، همچنین محدوده مناطق مختلف شهرداری تهران همرا با گسل شمالی تهران نیز بر روی تصاویر مشخص شده‌اند.



ب

شکل ۳- شبکه گراف ترسیم شده تداخل‌نگارهای ایجاد شده برای هر کدام از روش‌های تحلیل سری زمانی PS (شکل الف) و SBAS (شکل ب) را نشان می‌دهند. نقاط سیاه نشان دهنده تصاویر و خطوط ارتباطی نشان دهنده تداخل‌نگار تولید شده بین جفت تصویر می‌باشد. در این گراف‌ها محور افقی زمان اخذ تصاویر و محور عمودی خط مبنا عمودی تصاویر را نسبت به تصویر اصلی نشان می‌دهد.

۴- نتایج اولیه حاصل از سری‌های زمانی

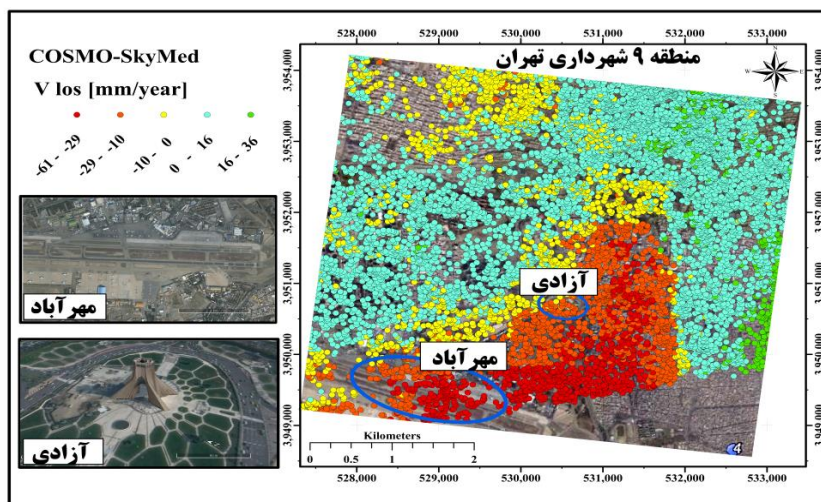
با تشکیل شبکه گراف تداخل‌نگارها و تولید آن‌ها، برای پردازش سری زمانی تداخل‌سنجی اقدام به شناسایی نقاط پراکنش کننده دائمی شد که برای روش PS تعداد پراکنش کننده‌های پایدار نهایی ۹۷۲۲۸۴ و برای روش SBAS تعداد این نقاط ۵۱۳۲۰ می‌باشند. پس از پردازش نقاط پراکنش کننده شناسایی شده و حذف خطای باقیمانده توپوگرافی و خطای مداری از نتایج در نهایت نرخ جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره برای هر دو الگوریتم PS و SBAS بدست آمد، که در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند. این نتایج همخوانی خوبی با یکدیگر دارند. نکته‌ای که در نتایج هر دو سری زمانی وجود دارد، رخ داد فرونشستی به اندازه ۶۱ میلی‌متر در سال در جنوب غربی شهر تهران و در مناطق ۹، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۱ می‌باشد. این ناحیه قبلاً در پژوهش‌ها و گزارشات مختلف به عنوان منطقه دارای فرونشست گزارش شده بود [۲۳، ۲۴]. نرخ بالای فرونشست اتفاق افتاده در این مدت دو ساله نشان می‌دهد که این ناحیه در معرض خطر می‌باشد.

نقشه‌های نرخ جابه‌جایی محاسبه شده در هر دو الگوریتم SBAS (شکل ۴-الف) و PS (شکل ۴-ب) نشان دهنده جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره می‌باشد، که باید به جابه‌جایی در راستای افقی و قائم تبدیل شود. در مطالعات مربوط به فرونشست برای تبدیل این مقدار جابه‌جایی به

۵- جابه‌جایی در سازه‌های مهم شهر تهران

برای بررسی رفتار دینامیکی در اطراف چند سازه مهم در شهر تهران، رفتار نقاط پراکنش گر دائمی شناسایی شده در اطراف این سازه‌ها را بررسی می‌کنیم. این نقاط پراکنش گر دائمی همانگونه که قبلاً گفته شده مانند شبکه طبیعی جی‌پی‌اس در منطقه عمل می‌کنند که می‌توانند نرخ تغییر شکل را در هر نقطه برای ما مشخص کنند. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که تراکم مناسبی از نقاط پراکنش گر دائمی در محدوده شهر تهران داریم که باعث می‌شود ما دقت

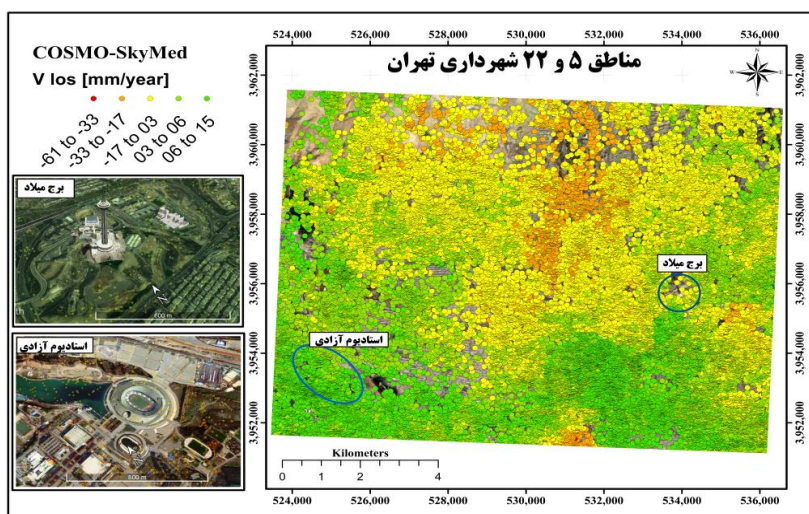
بالایی در برآورد جابه‌جایی در منطقه داشته باشیم. در منطقه ۹ شهرداری تهران عمده فرونشست رخ داده است و نتایج پردازش هر دو سری زمانی PS و SBAS نیز تایید کننده این موضوع می‌باشند. در این منطقه ما دارای سازه‌های مهمی هستیم که از بین آن‌ها میدان نرخ جابه‌جایی برج آزادی و فرودگاه مهرآباد را بررسی کرده و همانطور که در شکل ۵ مشخص است، برای برج و میدان آزادی ما شاهد نرخ فرونشستی به اندازه ۳۰ میلی‌متر در سال و برای محدوده فرودگاه مهرآباد این مقدار بسیار چشمگیر و به میزان ۶۰ میلی‌متر در سال می‌رسد.



شکل ۵- میدان جابه‌جایی با نقاط پراکنش گر دائمی حاصل از تحلیل سری زمانی تصاویر COSMO SkyMed در منطقه ۹ شهرداری تهران و موقعیت میدان آزادی و فرودگاه مهرآباد در این میدان تغییر شکل با بیضی‌های آبی رنگ

شاهد فرونشستی نبود و این جابه‌جایی تقریباً صفر در این نواحی می‌باشد. همان گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود در نواحی مرکزی و شمال شهر تهران ما شاهد میدان فرونشستی با نرخ ناچیز و حدود ۵ تا ۲۰ میلی‌متر در سال هستیم.

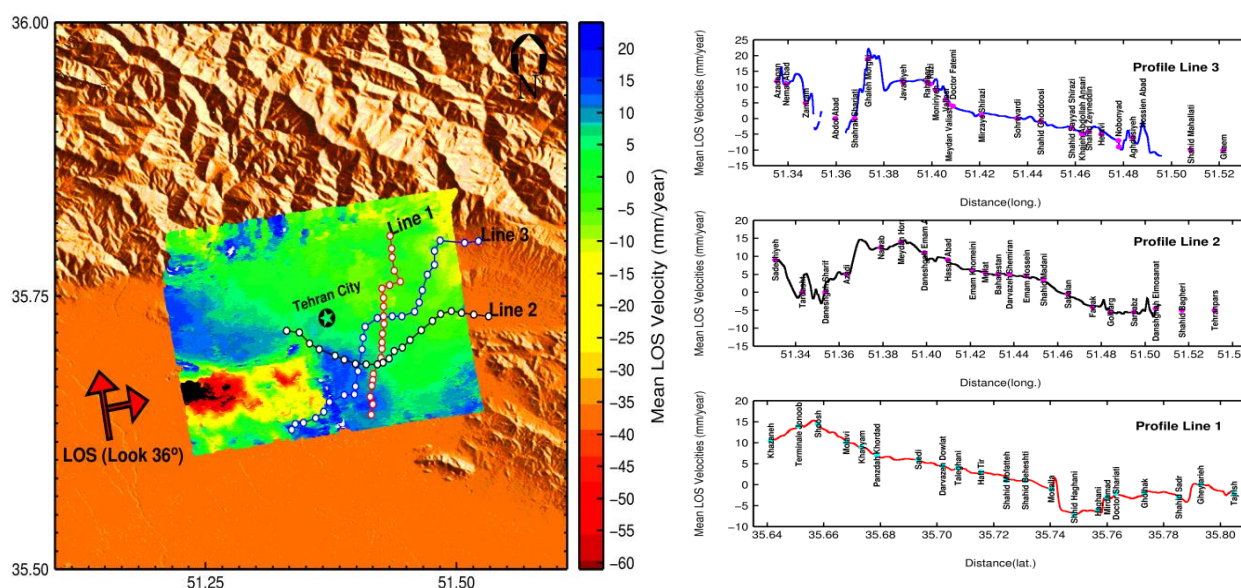
در مناطق ۵ و ۲۲ شهرداری نیز رفتار جابه‌جایی دو سازه مهم برج میلاد و استادیوم آزادی را در میدان تغییر شکل سری زمانی بررسی کردیم که در برج میلاد ما شاهد نرخ فرونشستی به اندازه ۱۶ میلی‌متر در سال و در اطراف و خود استادیوم آزادی



شکل ۶- میدان جابه‌جایی با نقاط پراکنش گر دائمی حاصل از تحلیل سری زمانی تصاویر COSMO SkyMed در منطقه ۵ و ۲۲ شهرداری تهران و موقعیت برج میلاد و استادیوم آزادی در این میدان تغییر شکل با بیضی‌های آبی رنگ

برای بررسی رفتار سطحی و فرونشست در متروی تهران وضعیت سه مسیر اصلی؛ خط ۱ (کهریزک به سمت تجریش)، خط ۲ (صادقیه به سمت فرهنگسرا)، خط ۳ (آزادگان به سمت قائم) با نتایج استخراج شده از تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی تطبیق داده شد. نتایج پردازش نشان می‌دهد که خوشبختانه در طول مدت این یک سال فرونشست معنی داری در مسیر این خطوط اتفاق نیفتاده است. رسم پروفیل‌های نرخ جابه‌جایی در شکل ۷ برای این سه مسیر نشان می‌دهد که ماکزیمم فرونشست اتفاق

افتاده در طول این سه مسیر چیزی حدود ۱۰ تا ۱۳ میلی‌متر در سال بوده است، برای خط ۱ ماکزیمم نرخ فرونشست به اندازه ۶ میلی‌متر در سال در ایستگاه شهید حقانی و در خط ۲ بیشترین نرخ فرونشست ۵ میلی‌متر در سال برای مسیرهای دانشگاه شریف، آزادی، فدک و گلبرگ همچنین برای خط ۳ ایستگاه‌های تازه تاسیس نوبنیاد، حسن آباد و هروی شاهد ماکزیمم فرونشستی به اندازه ۱۳ میلی‌متر در سال بودیم.



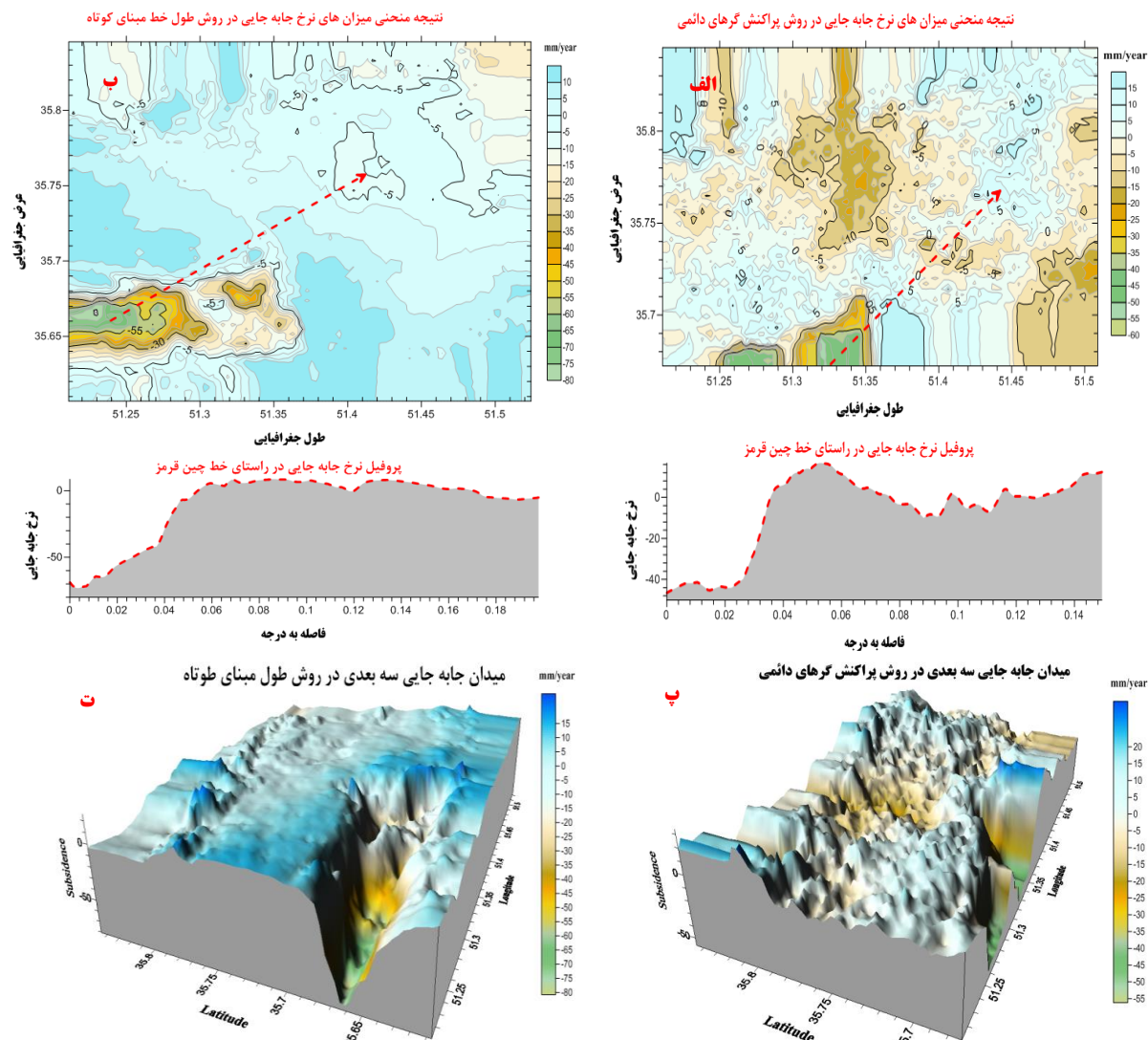
شکل ۷- رسم پروفیل‌های نرخ جابه‌جایی استخراج شده از تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی در امتداد خطوط مترو (خط ۱، خط ۲، خط ۳) به همراه اسامی ایستگاه‌ها مشخص شده بر روی هر پروفیل

۵-۱- تجزیه و تحلیل نتایج نهایی

نتایج پردازش تصاویر راداری با استفاده از الگوریتم سری زمانی تداخل‌سنجی PS و SBAS نشان داد که منطقه‌ی وسیعی از جنوب غربی و تا حدودی مرکز شهر تهران در دوره زمانی بین ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ دارای رفتار فرونشست بودند. که با استفاده از پردازش‌های انجام گرفته الگو و نرخ این فرونشست بدست آمد.

ماکزیمم نرخ جابه‌جایی که پس از پردازش با سری زمانی PS بدست آمد در بازه بین ۱۵ و ۵۵- میلی‌متر در سال و در راستای خط دید ماهواره و همچنین ماکزیمم نرخ جابه‌جایی که توسط الگوریتم سری زمانی SBAS حاصل شده برابر ۱۰ و ۶۵- میلی‌متر در سال و در راستای خط دید ماهواره می‌باشد. که این نتایج همخوانی نسبتاً خوبی با همدیگر دارند.

با توجه به شکل ۸ برای هر یک از الگوریتم‌های آنالیز سری PS و SBAS میدان جابه‌جایی در قالب نقشه منحنی میزان به همراه یک پروفیل از میزان جابه‌جایی در محدوده فرونشست و مدل جابه‌جایی سه بعدی با استفاده از نقاط PS شناسایی شده به کمک نرم افزار Surfer ترسیم شد، که به خوبی گویای میزان جابه‌جایی اتفاق افتاده در منطقه هستند.



شکل ۸- تصاویر الف و ب به ترتیب منحنی میزان میدان جابه‌جایی پس از حذف مؤلفه‌های خطا برای هر دو روش PS (تصویر الف) و SBAS (تصویر ب) همرا با یک پروفیل جابه‌جایی در منطقه فرونشست را نشان می‌دهند. همچنین در پایین مدل‌سازی سه بعدی میدان جابه‌جایی رخ داده شده پس از حذف مؤلفه‌های خطا برای هر دو روش PS (تصویر پ) و SBAS (تصویر ت) به تصویر کشیده شده است

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش با استفاده از آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری تحت دو الگوریتم PS و SBAS رفتار فرونشست شهر تهران را در بازه زمانی جولای ۲۰۱۴ تا دسامبر ۲۰۱۵ مورد بررسی قرار دادیم. تصاویر راداری سنجنده ایتالیایی COSMO-SkyMed با قدرت تفکیک ۳ متر برای این آنالیز به کار گرفته شد و پس از پردازش این تصاویر در پکیج StaMPS میدان جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره برای نقاط پراکنش‌گر دائمی استخراج شد. در بررسی اولیه مشخص شد که در قسمت جنوب غربی شهر تهران و در مناطق شهرداری ۹، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و

۲۱ فرونشست معناداری در فاصله زمانی این یک سال اتفاق افتاده است که متوسط نرخ این فرونشست چیزی حدود ۶۱ میلی‌متر در سال است. در گام دوم رفتار جابه‌جایی در محدوده چند سازه مهم شهر تهران از جمله؛ میدان آزادی، فرودگاه مهرآباد، برج میلاد، استادیوم آزادی و خطوط ۱، ۲ و ۳ مترو که در محدوده پردازش بودند را مطالعه نمودیم که مشخص شد در سازه‌هایی مثل میدان و برج آزادی و فرودگاه مهرآباد که در نزدیکی محدوده نشست قرار دارند به ترتیب فرونشستی با ماکزیمم نرخ ۳۰ و ۶۰ میلی‌متر در سال داریم که به شدت سلامت این سازه‌ها را تحت شعاع قرار می‌دهد. همچنین در محدوده سازه برج میلاد ما شاهد نرخ اندک فرونشست به اندازه ۱۳

ميلي متر در سال بوده كه علاوه بر نرخ كم آن ولي ممكن است در سال هاي آتي خطر آفرين باشد، استاديوم آزادي و محدوده هاي اطراف آن نيز تقريباً بدون جابه جايي بوده و تغييرات نقاط پراكش كننده دائمي در اين محدوده نزديك به صفر برآورد شده بود. براي بررسي تغييرات در مسيري متروى تهران نيز پروفيل جابه جايي براي سه خط ۱، ۲، ۳ رسم شد كه اين پروفيل ها نشان مي دهند در مسير هر سه خط فرونشست بسيار اندك بوده، ماكزيمم فرونشست اتفاق افتاده در طول اين سه مسير چيزي حدود ۱۰ تا ۱۳ ميلي متر در سال بوده است، براي خط ۱ ماكزيمم فرونشست به اندازه ۶ ميلي متر در سال در ايستگاه شهيد حقاني و در خط ۲ بيشترين فرونشست ۵ ميلي متر در سال براي مسيرهاي دانشگاه شريف، آزادي، فدك و گلبرگ همچنين براي خط ۳ ايستگاه هاي تازه تاسيس نوبنياد، حسن آباد و هروي شاهد ماكزيمم فرونشستي به اندازه ۱۳ ميلي متر در سال بوديم.

براي كارهاي آينده و بهبود نتايج پيشنهاده مي شود كه اثر فاز ناشي از اتمسفر از روش هاي متداول محاسبه شده و

مراجع

از نتايج حذف شوند. همچنين مي توان بجاي مدل ارتفاع رقومي SRTM كه در اين پژوهش استفاده شده از مدل ارتفاع رقومي ASTER با قدرت تفكيك ۳۰ نيز استفاده شود. علاوه بر اين ها، هرچند كه روش تحليل سري زماني يكي از دقيق ترين و قابل اعتمادترين روش ها در پژوهش هاي مختلف عنوان شده است ولي با استفاده از نتايج ساير روش ها مثل جی پی اس و روش ترازبایي در مناطق فرونشسته مي تواند صحت نتايج را ارزايابي نمود.

سپاسگزارى

مؤلفان اين مقاله از آژانس فضايي اروپا به خاطر همكاري در ارتباط و ايجاد زمينه جهت اخذ داده هاي راداري COSMO-SkyMed پس از تنظيم و ارائه پروپوزال به اين سازمان با شماره اختصاصي C1F.31725 و همچنين از آژانس فضايي ايتاليا به خاطر در اختيار قرار دادن اين داده هاي راداري با Order Ref. CAT1 31725 و e-Geos Order Ref: 16- 00051 كمال تشكر و سپاسگزارى را دارند.

- [1] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 40, pp. 2375-2383, 2002.
- [2] A. Aobpaet, M. C. Cuenca, A. Hooper, and I. Trisirisatayawong, "Land subsidence evaluation using InSAR time series analysis in Bangkok metropolitan area," in *Fringe 2009 Workshop*, edited by: Lacoste-Francis, H., Frascati, Italy, 2009.
- [3] S. Karimzadeh, Z. Cakir, B. Osmanoğlu, G. Schmalzle, M. Miyajima, R. Amiraslanzadeh, et al., "Interseismic strain accumulation across the North Tabriz Fault (NW Iran) deduced from InSAR time series," *Journal of Geodynamics*, vol. 66, pp. 53-58, 2013.
- [4] A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes, "A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers," *Geophysical research letters*, vol. 31, 2004.
- [5] R. F. Hanssen, *Radar interferometry: data interpretation and error analysis* vol. 2: Springer Science & Business Media, 2001.
- [6] A. Ferretti, C. Prati, and F. L. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry," in *Remote Sensing*, 1999, pp. 139-145.
- [7] T. Li, J. Liu, and M. Liao, "Land subsidence monitoring with Envisat and ERS-1/2 satellites," in *MIPPR 2005 SAR and Multispectral Image Processing*, 2005, pp. 60432Y-60432Y-8.
- [8] Z. Lu, "InSAR imaging of volcanic deformation over cloud-prone areas—Aleutian Islands," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 73, pp. 245-257, 2007.
- [9] A. Hooper, P. Segall, and H. Zebker, "Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), vol. 112, 2007.
- [10] A. J. Hooper, *Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation*, 2006.
- [11] M. de Faragó, G. Cooksley, B. Payàs, R. Morris, A. Arnaud, D. Albiol, et al., "Urban tunneling and the advantages of using InSAR SPN satellite technology to detect and monitor surface deformation effects".

- [12] P. Vincent, S. Larsen, D. Galloway, R. J. Lacznia, W. R. Walter, W. Foxall, et al., "New signatures of underground nuclear tests revealed by satellite radar interferometry," *Geophysical Research Letters*, vol. 30, 2003.
- [13] Z. Wang, D. Perissin, and H. Lin, "Subway tunnels identification through Cosmo-SkyMed PSInSAR analysis in Shanghai," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2011 IEEE International, 2011, pp. 1267-1270.
- [14] P. Vincent, S. Buckley, D. Yang, and S. Carle, "Anomalous transient uplift observed at the Lop Nor, China nuclear test site using satellite radar interferometry time-series analysis," *Geophysical Research Letters*, vol. 38, 2011.
- [15] S. Karimzadeh, "Characterization of land subsidence in Tabriz basin (NW Iran) using InSAR and watershed analyses," *Acta Geodaetica et Geophysica*, pp. 1-15, 2015.
- [16] sasan babaee, zahra mousavi, and mahasa roostaei, "Time series analysis of SAR images using Small Baseline Subset (SBAS) and Persistent Scatterer (PS) approaches to determining subsidence rate of Qazvin plain," *Journal of Geomatics Science and Technology*, vol. 5, May 2016.
- [17] I. S. Agency, "COSMO-SkyMed System Description & User Guide," ed: COSMO-SkyMed, 2009, pp. 5-6.
- [18] E. Simonetto and J.-M. Follin, "An overview on interferometric SAR software and a comparison between DORIS and SARSCAPE packages," in *Geospatial free and open source software in the 21st century*, ed: Springer, 2012, pp. 107-122.
- [19] F. Amelung, D. L. Galloway, J. W. Bell, H. A. Zebker, and R. J. Lacznia, "Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation," *Geology*, vol. 27, pp. 483-486, 1999.
- [20] M. Motagh, Y. Djamour, T. R. Walter, H.-U. Wetzel, J. Zschau, and S. Arabi, "Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS," *Geophysical Journal International*, vol. 168, pp. 518-526, 2007.
- [21] J. J. Sousa, A. M. Ruiz, R. F. Hanssen, L. Bastos, A. J. Gil, J. Galindo-Zaldívar, et al., "PS-InSAR processing methodologies in the detection of field surface deformation—Study of the Granada basin (Central Betic Cordilleras, southern Spain)," *Journal of Geodynamics*, vol. 49, pp. 181-189, 2010.
- [22] X. Zhou, N.-b. Chang, and S. Li, "Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research," pp. 1876-1912, 2009.
- [23] S. Alipour, M. Motgah, M. Sharifi, and T. Walter, "InSAR time series investigation of land subsidence due to groundwater overexploitation in Tehran, Iran," in *2008 Second Workshop on Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas*, 2008, pp. 1-5.
- [24] M. Mahmoudpour, M. Khomehchiyan, M. Nikudel, and M. Gassemi, "Characterization of regional land subsidence induced by groundwater withdrawals in Tehran, Iran," *Geopersia*, vol. 3, pp. 49-62, 2013.