

بازیابی میدان سرعت جابجایی سه‌بعدی با استفاده از پراکنش‌گرهای دائمی تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی فرونشست شهر اصفهان)

سعید زعفرانیه^۱، حمید مهربانی^{۲*}، فاطمه دلال‌زاده عطوفی^۳

^۱ کارشناسی ارشد ژئودزی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان
saeedzaferanieh@yahoo.com

^۲ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان
h.mehrabi@eng.ui.ac.ir

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان
sadri.dallalzadeh@gmail.com

(دریافت: تیر ۱۴۰۲، تصویب: فروردین ۱۴۰۳)

چکیده

تداخل‌سنجی راداری در سال‌های اخیر به عنوان ابزاری مفید و کارآمد در بررسی تغییرات سطح زمین مورد استفاده قرار گرفته‌است. در این روش اکثر مناطق زمین تحت پوشش تصاویر راداری قرار گرفته‌اند. در این پژوهش با تحلیل سری زمانی داده‌های تداخل‌سنجی راداری، میدان جابجایی سه‌بعدی شهر اصفهان مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، تعداد ۱۶۹ تصویر ماهواره‌ای Sentinel-1A در یک مدار بالاگذر و دو مدار پایین‌گذر از ژانویه سال ۲۰۱۷ تا دسامبر سال ۲۰۲۱ برای فواصل زمانی یک ماهه مورد استفاده قرار گرفت. این تصاویر مربوط به سه مدار مختلف ماهواره است و در نتیجه امکان سه‌بعدی‌سازی میدان جابجایی فراهم گردید. نتایج این پژوهش که از پردازش سری زمانی InSAR به دست آمده‌است با نتایج حاصل از داده‌های ۴ ایستگاه GPS واقع در مناطق ۱۲، ۱۳، ۱۴ و اجلاس سران، مورد ارزیابی قرار گرفت که مشابهت در نتایج حاصل از این داده‌ها با داده‌های تداخل‌سنجی راداری، صحت این نتایج را تایید می‌نماید. پس از انجام پردازش‌ها و محاسبات مربوطه، بیشترین مقدار متوسط فرونشست برابر با ۱۳۱ میلی‌متر بر سال در شمال شرق اصفهان کشف گردید. این پدیده در حال ورود به مناطق مرکزی شهر می‌باشد که می‌تواند در آینده مشکلاتی از جمله ایجاد فروچاله‌ها در سطح خیابان‌های شهر، آسیب به بافت مسکونی به وجود آورد و همچنین آسیب جدی به آثار تاریخی و گردشگری مهم این شهر وارد کند.

واژگان کلیدی: تداخل‌سنجی راداری، آنالیز سری زمانی، پراکنش‌گرهای دائمی، فرونشست زمین، میدان جابجایی سه‌بعدی

* نویسنده مسئول

۱- مقدمه

رادار با دهانه مصنوعی (SAR^۱) یک سیستم مایکروویو فعال است که شامل دو تصویر فاز و دامنه است. با استفاده از تصاویر فاز و تکنیک تداخل سنجی می‌توان جابجایی در راستای دید ماهواره (LOS^۲) را بدست آورد. با استفاده از تصاویر دامنه و به کمک تکنیک همبستگی متقابل^۳، می‌توان جابجایی در راستای LOS و در راستای آزیموت^۴ را با دقتی کمتر از فاز بدست آورد [۱]. در این تکنیک با استفاده از آنالیز اختلاف فاز بین دو تصویر اصلی و پیرو SAR می‌توان مدل رقومی زمین (DEM^۵) و همچنین جابجایی‌های پوسته زمین را اندازه‌گیری نمود [۲، ۳]. با استفاده از مدل رقومی SRTM و همچنین تبدیل موجک دوبعدی در بخشی از شمال شهر تهران، روشی جهت بهبود مدل‌های رقومی حاصل از تداخل سنجی راداری ارائه شده است [۴]. از قابلیت‌های تداخل سنجی راداری^۶ (InSAR) می‌توان به پوشش مکانی بالا، قدرت تفکیک مکانی مناسب، دقت اندازه‌گیری بالا و عدم نیاز به ابزار زمینی اشاره نمود. بر این مبنا، می‌توان تداخل سنجی راداری را ابزاری کارآمد در آنالیز جابجایی زمین و فرونشست در یک منطقه وسیع توصیف نمود. InSAR در برابر تمام مزایایی که دارد، دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد، از جمله این محدودیت‌ها، عدم همبستگی مکانی-زمانی تصاویر و همچنین تاخیر اتمسفری ایجاد شده در فاز هر تصویر می‌باشد [۱]. برای رفع این محدودیت، الگوریتم‌های متعدد آنالیز سری زمانی تداخل سنجی راداری^۷ ارائه شده‌است، از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم پراکنش‌گرهای دائمی^۸ [۵] و طول مبنای کوتاه^۹ [۶] اشاره نمود. برای بررسی فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی در رفسنجان، از سری زمانی تداخل سنجی راداری استفاده شده و نتایج، حاکی از آن است که برداشت آب‌های زیرزمینی عامل مهمی در

فرونشست است [۷]. تحقیق دیگری در دشت اردبیل نشان می‌دهد که بیشترین نرخ فرونشست ناشی از برداشت آب-های زیرزمینی ۴۵ میلی‌متر در سال بوده‌است [۸]. از تکنیک تداخل سنجی راداری برای پایش فرونشست در نیشابور با استفاده از الگوریتم طول مبنای کوتاه، استفاده شده‌است که نتایج نشان داده نرخ فرونشست تا ۱۹ سانتی‌متر در سال بوده‌است [۹]. نتایج متعدد حاصل از تکنیک تداخل سنجی راداری با پراکنش‌گرهای دائمی، نشان می‌دهد که این روش برای پایش فرونشست بسیار کارآمد می‌باشد [۱۰].

یکی از محدودیت‌های InSAR، اندازه‌گیری جابجایی در راستای خط دید ماهواره می‌باشد. برای رفع این محدودیت نیز روش‌هایی برای استخراج میدان جابجایی دوبعدی یا سه‌بعدی ارائه شده‌است. ترکیب اندازه‌گیری‌ها در راستای خط دید ماهواره در چند عبور (بالاگذر و پایین‌گذر)، ترکیب اندازه‌گیری‌های D-InSAR و Offset-Tracking، ترکیب اندازه‌گیری‌های D-InSAR و MAI^{۱۰}، فقط استفاده از اندازه‌گیری‌های Offset-Tracking، ترکیب داده‌های InSAR و GPS و ترکیب داده‌ها در چند عبور با مدل‌های ژئوفیزیکی از جمله این روش‌ها برای بدست آوردن میدان جابجایی سه‌بعدی می‌باشد [۱، ۱۱]. از تلفیق داده‌های GPS و InSAR بر روی سد گیوی در اردبیل برای بهبود دقت نظارت بر جابجایی سدها بهره‌گیری شده‌است و مشخص شد که این دو روش می‌توانند مکمل بسیار خوبی برای کشف نقاط جابجا شده و نیز اعتبارسنجی نتایج باشند [۱۲]. برای برآورد میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای بادی ریگ یلان در بیابان لوت، از روش Offset-Tracking استفاده شد که در این روش مقدار جابجایی‌های افقی با محاسبه میزان انحراف یا همبستگی بین دو تصویر راداری که به صورت مشترک از یک منطقه گرفته شده‌اند محاسبه می‌شود که در این روش بهترین تطابق بین دو تصویر با به حداکثر رساندن همبستگی نرمال متقابل بین تصاویر بدست می‌آید [۱۳]. با ترکیب اندازه‌گیری‌ها در جهت خط دید ماهواره و راستای آزیموت در حداقل ۲ عبور متفاوت، می‌توان نقشه جابجایی سه بعدی را با استفاده از کمترین مربعات وزن‌دار بازتولید نمود. فیالکو و همکاران (۲۰۰۱) با استفاده از تداخل نماهای تشکیل شده از تصاویر ماهواره ERS در دو مدار بالاگذر و پایین‌گذر و همچنین جابجایی

۱ Synthetic Aperture Radar

۲ Line of Sight

۳ Cross-correlation

۴ Azimuth Offset

۵ Digital Elevation Model

۶ SAR Interferometry

۷ Time Series InSAR (TS-InSAR) / Multi Temporal InSAR (MT-InSAR)

۸ Persistent Scatterers (PS)

۹ Small Baseline Subset (SBAS)

۱۰ Multi Aperture Interferometry

در راستای آزمون بدست آمده از تصاویر دامنه در مدار پایین گذر همین ماهواره، میدان جابجایی سه بعدی زلزله هکتور-ماین در کالیفرنیا را استخراج کردند [۱۴]. در این تحقیق RMSE محاسبه شده در سه جهت U-D و E-W و N-S به ترتیب برابر ۴/۹ و ۵/۹ و ۲۰/۵ سانتی متر بدست آمد. جانگ و همکاران (۲۰۱۱) با ترکیب اندازه گیری‌های D-InSAR و MAI در هر دو مدار بالا گذر و پایین گذر، میدان جابجایی سه بعدی حاصل از فوران آتشفشان Kilauea شیلی در سال ۲۰۰۷ را بدست آوردند [۱۵]. وانگ و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از تکنیک Offset-Tracking به تنهایی، در هر دو مدار بالاگذر و پایین گذر تصاویر EnviSAT ASAR، میدان جابجایی سه بعدی حاصل از زلزله ۷/۶ ریشتری کشمیر در سال ۲۰۰۵ را، استخراج نموده‌اند [۱۶].

GPS رایج‌ترین تکنیک ژئودتیکی برای اندازه‌گیری جابجایی سه بعدی سطح زمین است. در حالت پیوسته فعال، دقت اندازه‌گیری GPS می‌تواند به زیر سانتی متر به ویژه در جهت مسطحاتی برسد. با این حال، اندازه‌گیری های GPS به دلیل محدودیت استقرار تجهیزات و هزینه عملیاتی بالای هر ایستگاه، توزیع جغرافیایی خیلی متراکم ندارد. به طوری که در بهترین حالت توزیع مکانی، قدرت تفکیک مکانی بهتر از ۱۰ کیلومتر ندارد [۱، ۱۷]. با این وجود، ادغام مشاهدات GPS و InSAR به دلیل ماهیت مکمل آن‌ها، بسیار مطلوب است [۱۸]. گودمونسون و همکاران (۲۰۰۲) روش ادغام داده‌های GPS و InSAR را برای برآورد میدان‌های سرعت جابجایی سه بعدی جزیره‌ای در جنوب غربی ایسلند، پیشنهاد نمودند. در این تحقیق با استفاده از روش‌های درون‌یابی و پایدارسازی، روشی برای استخراج بهینه میدان جابجایی سه بعدی ارائه دادند [۱۹].

فرونشست در دره مشهد با استفاده از روش InSAR، GPS و ترازبایی دقیق بررسی شد که نتایج تطابق خوبی با یک-دیگر داشته‌اند [۲۰]. نتایج حاصل از ترازبایی دقیق و تکنیک تداخل سنجی راداری نیز در استان یزد، به طور دقیق با یک‌دیگر مطابقت داشتند [۲۱].

بررسی رفتار زمین و سیر تغییرات پوسته زمین از گذشته می‌تواند در بسیاری موارد همچون مدیریت شهری، مدیریت مصرف آب‌های زیرزمینی و دیگر موارد، کمک شایانی به دستگاه‌های مسئول کند. شهر اصفهان به عنوان یک شهر استراتژیک با پیشینه تاریخی غنی و همچنین

جمعیت بالا و معضلات به وجود آمده در رابطه با منابع آبی استان، نیاز مبرم به پایش جابجایی‌های ناشی از فرونشست دارد. استفاده از ابزار به روز و پرکاربردی همچون تداخل سنجی راداری می‌تواند این مهم را رقم بزند. چرا که هزینه آن به مراتب از نصب تجهیزات ژئودتیکی همچون ایستگاه‌های دائمی GPS کمتر است و دقت مطلوبی را هم فراهم می‌کند. از این رو با استفاده از این روش می‌توان در کمترین زمان و با کمترین هزینه این جابجایی‌ها را بدست آورد و چه بسا در موارد بحرانی بتواند موجب حفظ سرمایه‌های انسانی و ملی کشور شود. در این تحقیق با استفاده از ۱۶۹ تصویر راداری ماهواره سنتینل، میدان جابجایی سه بعدی شهر اصفهان بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ مورد مطالعه قرار گرفته‌است.

۲- تداخل سنجی راداری

دو روش کلی برای بدست آوردن جابجایی زمین در راستای خط دید ماهواره با استفاده از تداخل سنجی راداری وجود دارد، این دو روش تداخل سنجی تفاضلی^{۱۱} و آنالیز سری زمانی^{۱۲} می‌باشند.

۲-۱- تداخل سنجی تفاضلی

با در اختیار داشتن دو تصویر راداری اخذ شده در دو زمان متفاوت، می‌توان با به کارگیری فناوری تداخل سنجی تفاضلی، یک تداخل‌نما تشکیل داد و با حذف فازهای توپوگرافی، مداری و جوی، فاز جابجایی مربوط به هر پیکسل را در راستای خط دید ماهواره به دست آورد. رابطه-۱ بین فاز جابجایی (ϕ_{defo}) و مقدار جابجایی (Δx_{LOS}) در امتداد خط دید ماهواره با رابطه (۱) بیان می‌گردد [۲۲]:

$$\phi_{defo} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta x_{LOS} \quad (1)$$

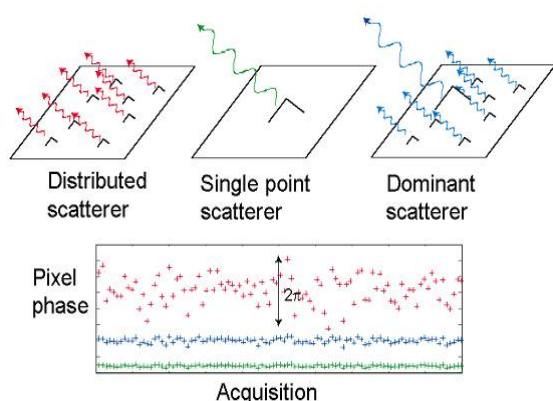
در این رابطه، λ طول موج سیگنال سنجنده می‌باشد. همچنین به طور قراردادی در رابطه (۱)، جابجایی بدست آمده با علامت مثبت به مفهوم دور شدن از سنجنده (فرونشست) و علامت منفی به معنای نزدیک شدن به سنجنده (بالا آمدگی) است.

۱۱ Differential interferometry

۱۲ Time Series Analysis

۲-۲- آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری (InSAR)

چندین روش برای انتخاب PS مناسب توسعه داده شده‌است [۵]، [۲۵]، [۲۶]، [۲۴]. روش دانشگاه استنفورد برای انتخاب PSها تحت عنوان StaMPS شناخته می‌شود [۲۴] که از روش همبستگی مکانی فاز برای تشخیص پیکسل‌های PS به‌جای آنالیز دامنه استفاده می‌کند. از مزایای این استراتژی قابلیت کشف PSهای با دامنه پایین می‌باشد که بیشتر در زمین طبیعی موضوعیت دارد، چرا که انتخاب PS در مناطق مسکونی و شهری با توجه به وجود گوشه‌های ساختمان‌ها و دیگر عوارض مناسب پیچیدگی خاصی ندارد. استفاده از سری زمانی تصاویر رادار در روش‌های PS و SBAS که برای غلبه بر نواقص روش مرسوم تداخل‌سنجی ارائه شد، بیشتر مناسب مناطق با همدوسی پایین مثل زمین‌های با پوشش گیاهی، مناطق با بارش برف و باران، مناطق با تغییرات زیاد جوی (میزان بخار آب و...) و مناطق با حرکات بین‌لرزه‌ای^{۱۴} می‌باشد.



شکل ۱- مدل‌های مختلف از سازوکار پراکنش در یک پیکسل از تصویر SAR. شکل قرمز پراکنش‌کننده‌های توزیع‌شده (DS). شکل سبز یک پراکنش‌کننده نقطه‌ای ایده‌آل و شکل آبی PS یا پراکنش‌کننده دائمی. پیکسل پراکنش‌کننده دائمی، تغییرات فاز کمتری نسبت به پیکسل پراکنش‌کننده‌های پخش‌شده (توزیع‌شده) دارد [۵].

۲-۳- بازبایی میدان جابجایی سه‌بعدی

جابجایی اندازه‌گیری شده در هر پیکسل، تصویر جابجایی واقعی در راستای دید ماهواره است، بدین معنا که جابجایی سه‌بعدی به‌صورت یک‌بعدی تصویر شده‌است. اسکالر بودن جابجایی حاصل از تداخل‌نما یکی از اشکالات ساختاری InSAR می‌باشد که قابلیت‌های آن برای تشخیص

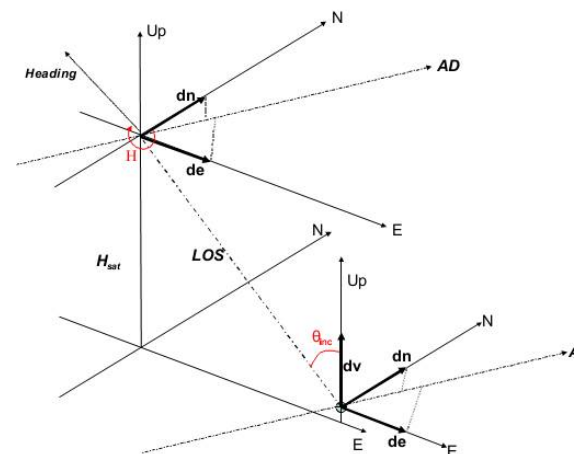
برای غلبه بر عدم همدوسی ناشی از تغییرات (فیزیکی یا شیمیایی) سطح زمین و اثرات نویز اتمسفری، استفاده از سری زمانی تصاویر و آنالیز و تشخیص پیکسل دائمی (PS) مطرح‌شده است [۵]. در این راستا دو روش پراکنش‌کننده‌های دائمی و روش طول مبنای کوچک ارائه شده‌است. روش SBAS بر اساس ایجاد یک ترکیب مناسب از همه تداخل‌نماهایی که دارای طول مبنای زمانی و مکانی کوچک باشند، شکل‌گرفته‌است و مبنای روش همان تشخیص پیکسل‌های پایدار تصاویر می‌باشد. پیکسل‌های پایدار (PS)، عوارضی هستند که ویژگی‌های پراکنشی آن‌ها در طول زمان ثابت می‌ماند و در طول زمان دارای ثبات دامنه موج برگشتی هستند، این نقاط دچار عدم همدوسی زمانی نمی‌شوند. سیگنال برگشتی از یک پیکسل زمینی به میزان بازتابندگی عوارض داخل آن پیکسل و توزیع آن‌ها در پیکسل بستگی دارد [۲۳].

در یک تصویر SAR، دامنه و فاز یک پیکسل، حاصل سهم همه پراکنش‌کننده‌های موجود در آن المان می‌باشد. اگر در یک پیکسل، پراکنش‌کننده‌هایی با انرژی بازگشتی بالاتری نسبت به بقیه وجود داشته باشد، مقدار عدم همدوسی فاز کاهش خواهد یافت [۲۴] و این پیکسل همانند یک پراکنش‌کننده نقطه‌ای دائم رفتار می‌کند که تحت نام PS شناخته می‌شود. با توجه به شکل (۱) اگر یکی از پراکنش‌کننده‌های پیکسل، روشن‌تر از بقیه باشد، تداخل از دیگر پراکنش‌کننده‌ها حداقل و سیگنال دریافتی مستحکم‌تر خواهد شد و حرکت پراکنش‌کننده غالب را می‌توان از فاز تداخل‌سنجی تعیین نمود. چنین پیکسل‌هایی، مدل پراکنش‌کننده تداخل‌سنجی یا PSI را شکل می‌دهد [۵]. معمولاً از تکنیک‌های آماری برای تشخیص پیکسل‌هایی با یک پراکنش‌کننده غالب (PS) استفاده می‌شود به‌صورتی که این پیکسل‌ها کمتر تحت تأثیر عدم همدوسی قرار داشته باشند. در سری‌های زمانی تداخل‌نما-ها هر PS نقش بالایی برای بررسی تغییر شکل دارد، به‌صورتی که نقش آن‌ها در بعضی مقالات به مثابه نقاط کنترل زمینی در بررسی جابجایی‌ها تلقی شده‌است.

^{۱۴} Interseismic

^{۱۳} Permanent Scattered

درست و جامع میدان‌های جابجایی و تغییر شکل و علل ایجاد فعل‌وانفعالات پوسته زمین را با محدودیت مواجه ساخته است [۲۷]. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی در راستای ارائه راهکاری برای بازیابی میدان جابجایی سه‌بعدی (3D) از اندازه‌گیری‌های InSAR انجام شده است، صرف‌نظر کردن از یک یا دو مؤلفه جابجایی (در صورتی که سازوکار جابجایی معلوم باشد)، استفاده از مشاهده LOS حداقل در سه هندسه مستقل [۱۱، ۲۸]، ترکیب مشاهدات LOS با مشاهدات در راستای آزیموت (MAI و Offset-tracking) [۲۹]، تلفیق بردارهای جابجایی حاصل از GPS با InSAR [۱۹]، استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و بهینه‌سازی [۳۰] و [۳۱]، همپوشانی برست‌ها در ماهواره Sentinel [۳۲] و ترکیب مدل‌های ژئوفیزیکی با داده‌های InSAR [۳۳] از جمله تحقیقات انجام‌شده در این زمینه است. گاهی مواقع اطلاع دقیقی از سازوکار جابجایی وجود دارد، به‌عنوان مثال، مواقعی که دیگر مشاهدات ژئودتیکی (از قبیل وجود شبکه‌های ترازبایی یا GNSS در سطح منطقه) نشان دهد که منطقه فقط دارای بالآمدگی^{۱۵} یا فرونشست^{۱۶} یا فقط دارای جابجایی‌های مسطحاتی است، یعنی اینکه یک یا دو مؤلفه از جابجایی حذف شود، در این وضعیت شکل معادلات به فرم ساده‌ای تبدیل خواهد شد. شکل (۲) وضعیت مؤلفه‌های سه‌بعدی بردار جابجایی را در مقایسه با جابجایی LOS را نمایش می‌دهد [34].



شکل ۲- وضعیت مؤلفه‌های سه‌بعدی بردار جابجایی در مقایسه با جابجایی LOS

یک حالت از تقریب مسئله مربوط به زمانی است که بدانیم، منطقه فقط دارای جابجایی ارتفاعی است، در این حالت با توجه به شکل (۲) می‌توان رابطه ساده زیر را نوشت:

$$dv = d_{los} / \cos \theta_{inc} \quad (2)$$

در رابطه فوق، d_{los} جابجایی در راستای دید ماهواره و θ_{inc} زاویه راستای LOS با بردار نرمال بر سطح می‌باشد. واضح است که با داشتن θ_{inc} برای هر پیکسل و مقدار جابجایی در راستای LOS برای آن پیکسل، مقدار جابجایی قائم به دست می‌آید، قاعدتاً صرف‌نظر کردن از مؤلفه‌های افقی می‌تواند خطای قابل‌توجهی را وارد محاسبات نماید. حالت دیگر مربوط به مواقعی است که جابجایی LOS حداقل در سه هندسه کاملاً مستقل تعیین شده باشد. در این وضعیت با تشکیل حداقل سه معادله امکان حل سه مجهول جابجایی سه‌بعدی فراهم می‌شود. دو هندسه می‌تواند مربوط به مدار بالاگذر و پایین‌گذر یک ماهواره (مثلاً Sentinel-1) و یک مدار از ماهواره‌های دیگر (مثلاً ALOS-2) باشد [۱۱]. در این روش علاوه بر مشاهدات LOS که عمود بر مسیر حرکت ماهواره هستند می‌توان از مشاهدات در راستای دید ماهواره یعنی MAI و Azimuth-Offset نیز استفاده کرد. تصویر بردار جابجایی سه‌بعدی $d = [U_n U_e U_u]$ در راستای عمود بر مسیر حرکت (d_{los}) و در راستای حرکت ماهواره (d_{azo}) به ترتیب به‌صورت زیر می‌باشد [۲۸]:

$$[U_n \sin \alpha - U_e \cos \alpha] \sin \lambda + U_u \cos \lambda + \delta_{los} = d_{los} \quad (3)$$

$$U_n \cos \alpha + U_e \sin \alpha + \delta_{azo} = d_{azo} \quad (4)$$

در این روابط α آزیموت ماهواره، λ زاویه فرود^{۱۷}، U_n مؤلفه شمالی-جنوبی، U_e مؤلفه شرقی-غربی و U_u مؤلفه ارتفاعی بردار جابجایی می‌باشد. d_{azo} همان جابجایی‌های MAI و Offset-tracking می‌باشد. روش MAI بر روی فاز و Offset-tracking بر روی دامنه موج حامل تعریف می‌شوند و حساسیت هردوی آن‌ها به مؤلفه شمالی-جنوبی جابجایی بیشتر از حساسیت جابجایی LOS به آن مؤلفه است [۳۵]. بنابراین تلفیق این دو دسته مشاهده به مشاهدات LOS

۱۷ Incidence Angle

۱۵ Uplift

۱۶ Subsidence

$$x = [U_e \ U_n \ U_u] \quad (8)$$

بنابراین با تشکیل معادلات مشاهدات با حداقل سه مشاهده جابجایی، امکان حل مجهولات مسئله بازیابی مؤلفه‌های سه‌بعدی میدان جابجایی فراهم می‌شود. تصویر بردار جابجایی x در راستای خط دید (d_{LOS}) و آزیموت ماهواره (d_{az}) به ترتیب به صورت روابط (۳) و (۴) می‌باشد. بنابراین ماتریس ضرایب مجهولات (A) برای مشاهدات جابجایی در راستای خط دید و آزیموت ماهواره به صورت زیر خواهد شد:

$$A_{range} = [-\cos\alpha * \sin\lambda \ \sin\alpha * \sin\lambda \ \cos\lambda] \quad (9)$$

$$A_{az} = [\cos\alpha \ \sin\alpha \ 0] \quad (10)$$

دقت جابجایی حاصل از تداخل‌سنجی راداری تابعی از دقت برآورد فازهای وارد بر تداخل نماها (مثل اثر اتمسفر)، اندازه طول مبنای قائم، مقدار همدوسی تصاویر و طول موج مورد استفاده در ماهواره‌های SAR می‌باشد. این دقت را می‌توان به صورت ریاضی برای مؤلفه‌های جابجایی در راستای خط دید و آزیموت بیان کرد [۳۶]:

$$\sigma_{LOS}^2 = \frac{1-\gamma^2}{2N\gamma^2} \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 + \sigma_{APS}^2 \quad (11)$$

$$\sigma_{Az}^2 = \frac{3}{2N} \frac{1-\gamma^2}{(\pi\gamma)^2} \rho_{Az}^2 + \sigma_{APS}^2 \quad (12)$$

در روابط (۱۱) و (۱۲)، γ همدوسی سیگنال، N تعداد نمونه‌های استخراج شده، ρ_{az} قدرت تفکیک در راستای آزیموت و σ_{aps} خطای اتمسفری می‌باشند.

۲-۳-۱- پایدارسازی^{۲۰}

در تلفیق مشاهدات راداری با هندسه‌های نزدیک برای رسیدن به میدان جابجایی سه‌بعدی، مسئله بد وضع^{۲۱} می‌باشد. بنابراین نیاز است تا از یکی از روش‌های پایدارسازی استفاده شود. به عبارتی بازیابی میدان جابجایی، یک مسئله معکوس بد وضع می‌باشد که برای پایدارسازی آن می‌توان یک یا چند قید به تابع هدف مسئله اضافه نمود.

باعث بالا رفتن دقت مؤلفه شمالی-جنوبی خواهد شد. در این راستا اگر جابجایی‌های موجود، در راستای LOS باشد، از معادله (۳) و اگر جابجایی‌ها در راستای آزیموت باشد (MAI و Offset-tracking) از معادله (۴) استفاده می‌شود. در حالتی که فقط مشاهدات در سه هندسه موجود باشد، درجه آزادی صفر و نتایج غیرقابل اعتماد خواهند بود. بنابراین برای ایجاد قابلیت اعتمادپذیری پذیری نتایج، باید از مشاهدات بیشتری بهره برد، اگرچه در مبحث InSAR مشکل پایین بودن تعداد مشاهدات و درجه آزادی همواره وجود دارد. با توجه به هندسه مدار ماهواره‌های SAR، انحراف معیار مؤلفه شمالی بزرگ‌تر از دو مؤلفه دیگر می‌باشد [۳۵]. متناسب با نوع مشاهدات موجود، دستگاهی از معادلات فوق‌الذکر و مجهولات بردار جابجایی سه‌بعدی به ازای هر پیکسل تشکیل می‌شود به صورتی که درجه آزادی حداقل صفر باشد. دستگاه معادله تشکیل شده همان مدل گوس-مارکوف^{۱۸} می‌باشد، که به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$E(y) = Ax, \ D(y) = Q_y \quad (5)$$

در این رابطه y بردار مشاهدات، A ماتریس طراحی، x بردار مجهولات، Q_y ماتریس واریانس کواریانس مشاهدات، D اپراتور واریانس و E اپراتور امید ریاضی می‌باشد. بردار مجهولات و ماتریس واریانس کواریانس آن‌ها بر اساس سرشکنی کمترین مربعات وزن‌دار^{۱۹} (WLS) از روابط زیر به دست خواهد آمد:

$$x = (A^T P A)^{-1} A^T P y \quad (6)$$

$$Q_x = \sigma_0^2 (A^T P A)^{-1} \quad (7)$$

در روابط فوق P ماتریس وزن مشاهدات و σ_0^2 فاکتور واریانس اولیه می‌باشند.

در مسئله بازیابی میدان جابجایی سه‌بعدی، سه مجهول مؤلفه جابجایی در راستای شرقی-غربی (U_e)، مؤلفه جابجایی در راستای شمالی-جنوبی (U_n) و مؤلفه جابجایی در راستای ارتفاعی (U_u) وجود دارد. به صورت کلی بردار مجهولات به صورت رابطه (۸) نوشته می‌شود:

^{۲۰} Regularization

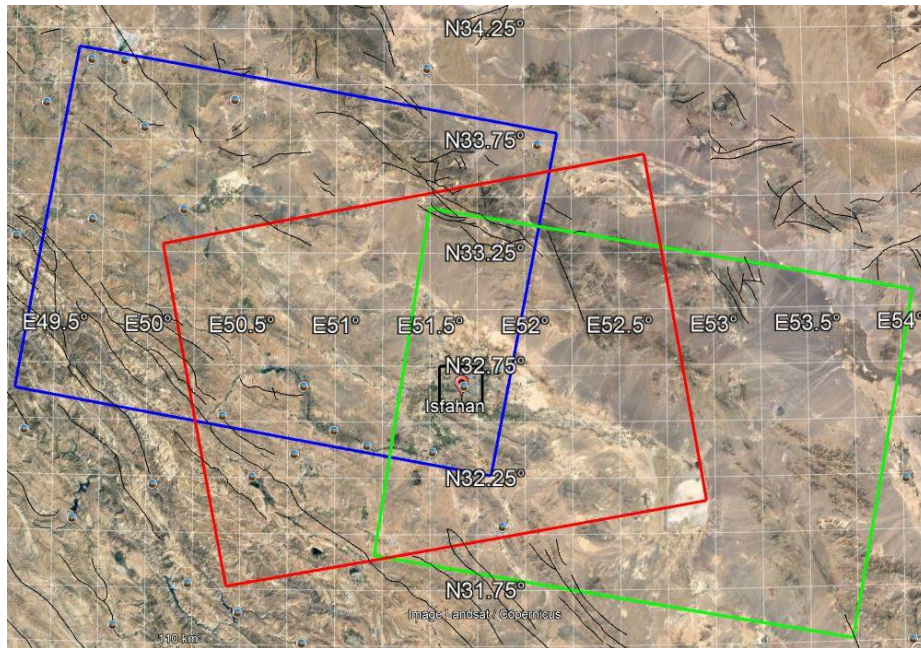
^{۲۱} Ill-posed problem

^{۱۸} Gauss-Markov Observation Equations

^{۱۹} Weighted Least Squares Adjustment

جدول ۱- داده‌های مورد استفاده در آنالیز فرونشست منطقه شهری اصفهان

Sensor	Time	Track	Pass	SLC Number	Polarization	Mode
Sentinel-1A	۲۰۲۱-۲۰۱۷	۲۸	Ascending	۶۰	VV	IW
Sentinel-1A	۲۰۲۱-۲۰۱۷	۳۵	Descending	۵۱	VV	IW
Sentinel-1A	۲۰۲۱-۲۰۱۷	۱۳۷	Descending	۵۸	VV	IW



شکل ۳- پوشش مکانی تصاویر ماهواره Sentinel-1A در دو مدار پایین گذر و یک مدار بالاگذر

$$\hat{x}_{Reg} = (A^T P A + \alpha^2 I)^{-1} A^T P y \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، P ماتریس وزن و I ماتریس همانی می‌باشد. به دلیل استفاده از پایدارسازی و افزودن پارامتر پایدارسازی، نتایج اریب^{۲۴} می‌شوند. مقدار آن توسط رابطه (۱۵) قابل محاسبه می‌باشد:

$$Bias(\hat{x}_{Reg}) = -\alpha^2 (A^T P A + \alpha^2 I)^{-1} \hat{x}_{Reg} \quad (15)$$

در نتیجه بردار مجهولات عاری از بایاس به صورت زیر نوشته می‌شود [۳۷]:

$$\hat{x}_{Unbiased} = \hat{x}_{Reg} - Bias(\hat{x}_{Reg}) \quad (16)$$

با اعمال این قید، پارامتر پایدارسازی مشخص می‌شود که این پارامتر، یک کمیتی مثبت و کوچک بوده که به ماتریس نرمال اضافه می‌شود تا مقدار عدد شرط^{۲۲} کاهش یافته و مسئله پایدار شود [۱۱]. روش‌های مختلفی نظیر L -Curve، VCE، GCV و روش شبه‌بهینه برای برآورد پارامتر پایدارسازی هستند. نرم کمترین مربعات باقی‌مانده‌ها^{۲۳} به علاوه قیدی از بردار مجهولات با اعمال پارامتر پایدارسازی (α)، تابع هدف را تشکیل می‌دهند:

$$\min(\|Ax - y\|_{L_2}^2 + \alpha^2 \|x\|_{L_2}^2) \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، α^2 پارامتر پایدارسازی و $\| \cdot \|$ نرم اقلیدسی می‌باشند. بردار مجهولات با توجه به حل تابع هدف از رابطه (۱۴) به دست می‌آید [۱۱]:

۲۴ Bias

۲۲ Condition number

۲۳ Residuals

۳- داده‌های مورد استفاده

برای بررسی میدان جابجایی سه‌بعدی و به دنبال آن بدست آوردن میزان فرونشست شهر اصفهان و حومه از ۱۶۹ تصویر ماهواره Sentinel-1A در یک مدار بالاگذر و دو مدار پایین‌گذر استفاده شده‌است. از ۱۶۹ تصویر مورد استفاده، تعداد ۶۰ تصویر از مدار بالاگذر در مسیر ۲۸، ۵۱ تصویر از مدار پایین‌گذر در مسیر ۳۵ و ۵۸ تصویر از مدار پایین‌گذر متعلق به مسیر ۱۳۷ بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ می‌باشد که برای تعیین میزان فرونشست منطقه شهری اصفهان و حومه مورد استفاده قرار گرفت. شکل (۳) پوشش مکانی تصاویر را در دو مدار پایین‌گذر و یک مدار بالاگذر و موقعیت منطقه مطالعاتی را در مستطیل مشکی رنگ نشان می‌دهد. خلاصه اطلاعات تصاویر مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده‌است.

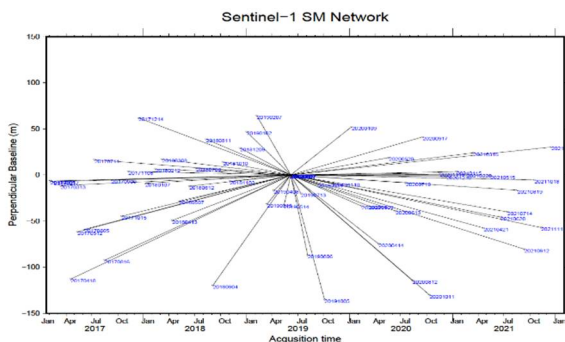
۴- پردازش در نرم افزار StaMPS

الگوریتم و نرم افزار StaMPS در سال ۲۰۰۶ توسط Hooper معرفی شد که به کمک آن می‌توان در مناطق مختلف شهری و غیر شهری و مناطق دارای پوشش گیاهی، بدون نیاز به دانستن رفتار جابجایی نسبت به زمان، پراکنش گرهای دائمی را تعیین و نرخ جابجایی را برآورد کرد [۳۸]. در بسته نرم افزاری ارائه شده توسط توسعه‌دهندگان این روش، ۵ مرحله ابتدایی باید در نرم افزارهای دیگر مورد پردازش قرار گیرد. در این تحقیق ۵ مرحله اول ذکر شده در بسته نرم افزاری GMTSAR پردازش شده است. در ادامه مراحل انجام شده همراه با خروجی‌های مربوطه شرح داده خواهد شد.

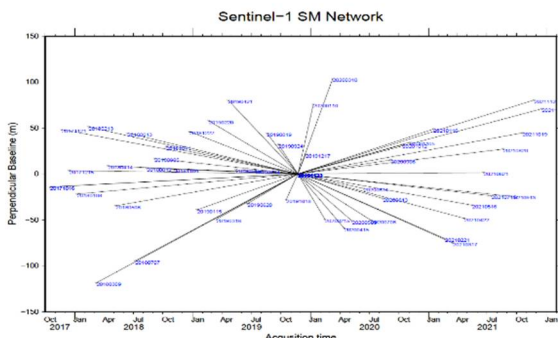
۴-۱- انتخاب تصویر مرجع پردازش سری زمانی و ثبت هندسی تصاویر پیرو

از آنجا که نتایج تداخل سنجی راداری به صورت نسبی، نسبت به یک زمان و مکان مشخص محاسبه می‌گردد، ابتدا در هر مسیر، تصویر مرجع که نسبت به بقیه تصاویر همبستگی خط مبنای مکانی و زمانی بالاتر دارد، تعیین می‌گردد. پس از انتخاب تصویر پایه، تمامی تصاویر پیرو

نسبت به آن تطابق هندسی^{۲۵} می‌شوند. در ادامه و با تشکیل شبکه گراف تداخل‌نماها در هر سه مسیر، ادامه روند پردازش میسر می‌شود. در شکل‌های ۴ تا ۶ شبکه تداخل‌نماهای ایجاد شده برای مسیرهای ۲۸، ۳۵ و ۱۳۷ شامل تصویر مرجع و تصاویر پیرو مشاهده می‌شود. نقطه وسط نشان‌دهنده تصویر پایه، و دیگر نقاط نشان‌دهنده تصاویر پیرو و خطوط ارتباطی نشان‌دهنده تداخل‌نماهای تولید شده بین جفت تصویر می‌باشد. در این گراف‌ها محور افقی زمان اخذ تصاویر و محور عمودی طول مبنای عمودی تصاویر را نسبت به تصویر پایه نشان می‌دهد. بدین ترتیب در مسیر ۲۸ که مربوط به مدار بالاگذر می‌باشد، تصویر (۲۰۱۹۰۶۰۷) به عنوان تصویر پایه، در مسیر ۳۵ که مربوط به یکی از مدارهای پایین‌گذر می‌باشد، تصویر (۲۰۱۹۱۱۲۳) به عنوان تصویر پایه و در مسیر ۱۳۷ که مربوط به دیگر مدار پایین‌گذر است، تصویر (۲۰۱۹۰۸۲۶) به عنوان تصویر پایه در نظر گرفته شد.



شکل ۴- شبکه گراف تداخل‌نماهای ایجاد شده برای تصاویر مدار بالاگذر (مسیر ۲۸)



شکل ۵- شبکه گراف تداخل‌نماهای ایجاد شده برای تصاویر مدار پایین‌گذر (مسیر ۳۵)

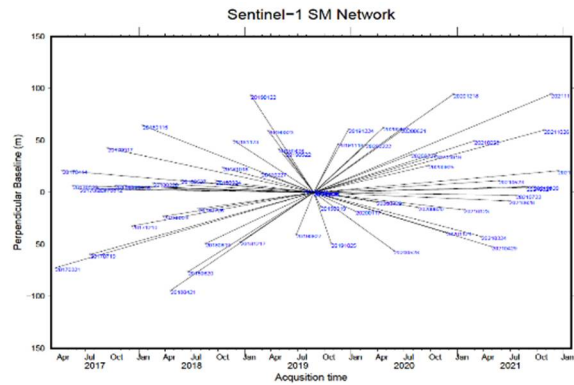
عدد، در مسیر ۳۵ پایین گذر تعداد ۵۰ عدد و در مسیر ۱۳۷ پایین گذر تعداد ۵۷ تداخل نما تشکیل خواهد شد. به دلیل کاهش مدت پردازش و جلوگیری از پردازش های اضافه در نقاط خارج از منطقه مطالعاتی، تداخل نماها در منطقه ای محدود به مرز مشترک هر سه مدار پردازش گردید. در این مرحله با استفاده از فایل های مداری دقیق منتشر شده ماهواره برای هر تاریخ مربوط به تصاویر، خطای به وجود آمده ناشی از مدار ماهواره حذف می گردد. با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی با قدرت تفکیک ۳۰ متر (یا ۹۰ متر)، خطای اثر توپوگرافی حذف می گردد.

۵- میدان سرعت جابجایی در جهت خط دید ماهواره

خروجی پردازش، میدان سرعت جابجایی در جهت خط دید ماهواره است؛ که این داده ها، ورودی مرحله بعدی برای بدست آوردن میدان جابجایی سه بعدی می باشد. شکل ۷ میدان سرعت جابجایی در جهت خط دید ماهواره برای مدار پایین گذر ۱۳۷، مدار پایین گذر ۳۵ و مدار بالاگذر ۱۲۸ را نمایش می دهد.

۵-۱- میدان سرعت جابجایی سه بعدی شهر اصفهان

تصاویر جابجایی حاصل از روش تداخل سنجی راداری، در راستای خط دید ماهواره هستند. برای آنالیز درست روند تغییر شکل باید مؤلفه های سه بعدی میدان جابجایی برآورد شوند. در این پژوهش با استفاده از ترکیب ۳ تصویر جابجایی LOS، میدان جابجایی سه بعدی شهر اصفهان برآورد شد. در این پژوهش از روش TSVD^{۲۶} برای پایدارسازی برآورد میدان جابجایی سه بعدی استفاده گردید. برای برآورد پارامتر پایدارسازی، روش L-Curve به کار گرفته شد. تصاویر (۱۰ و ۹ و ۸) به ترتیب مؤلفه سرعت جابجایی در راستای شمالی-جنوبی (Un)، شرقی-غربی (Ue)، و ارتفاعی (Uu) را نشان می دهند.



شکل ۶- شبکه گراف تداخل نماهای ایجاد شده برای تصاویر مدار پایین گذر (مسیر ۱۳۷)

۴-۲- تصحیح فاز اتمسفری

روش های مختلفی برای حذف اثر اتمسفری وجود دارد، یکی از نرم افزارهای بسیار کاربردی برای حذف این اثر در تداخل سنجی راداری، نرم افزار TRAIN است. این نرم افزار با استفاده از روش های مختلفی از جمله استفاده از داده های خارجی مانند داده های سنجنده های MODIS و MERIS و همچنین با استفاده از مدل های تعریف شده اقدام به کاهش اثر اتمسفری می نماید [۳۹]. در جدول زیر بعضی از روش های موجود در این نرم افزار نشان داده شده است. در این پژوهش، اثر اتمسفر با استفاده از روش تصحیح خطی بر پایه فاز کاهش داده شده است.

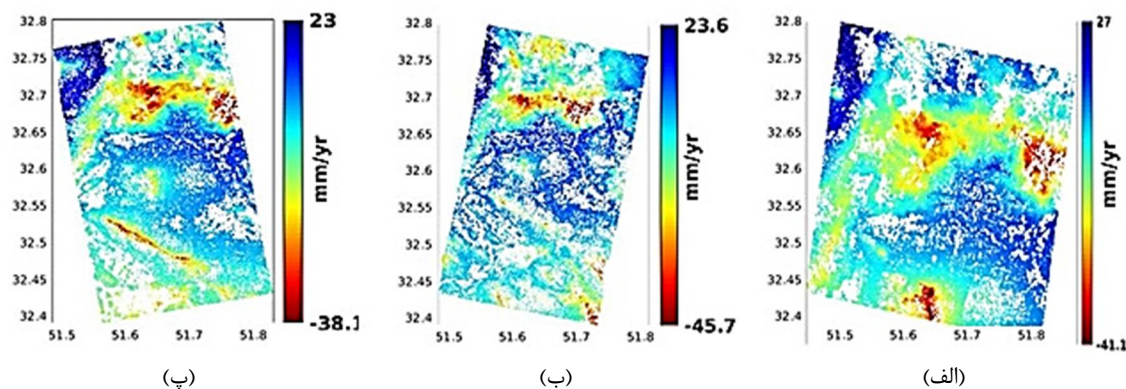
جدول ۲- روش های مورد استفاده در نرم افزار TRAIN

Techniques	Hydrostatic delay	Wet delay
MERIS (Spectrometer)	NO*	YES - Including turbulent
MODIS (Spectrometer)	NO*	YES - Including turbulent
WRF (Weather model)	YES	YES - Including turbulent
ERA (weather model)	YES	YES - Including turbulent
MERRA/MERRAZ (weather model)	YES	YES - Including turbulent
GACOS (weather model-based)	Yes - Combined (Including turbulent)	
Linear correction (uniform troposphere)	Yes - Combined (no turbulence)	
Power-law correction (spatially-varying troposphere)	Yes - Combined (no turbulence)	

۴-۳- تشکیل تداخل نماها

پس از مشخص شدن تصویر پایه و شبکه تداخل نماها، تداخل نماها تشکیل می گردد. با توجه به اینکه در روش PS تعداد تداخل نماها یکی کمتر از تعداد تصاویر است، پس تعداد تداخل نماها در مدار بالاگذر ۵۹

^{۲۶} Truncated Singular Value Decomposition



شکل ۷- میدان سرعت جابجایی در جهت خط دید ماهواره (الف) مدار پایین‌گذر ۱۳۷ (ب) مدار پایین‌گذر ۳۵ (پ) مدار بالاگذر ۱۲۸

شکل ۱۱ مناطق دارای بیشترین نرخ فرونشست که واقع در شمال و شمال شرق شهر اصفهان می‌باشد را نشان می‌دهد.

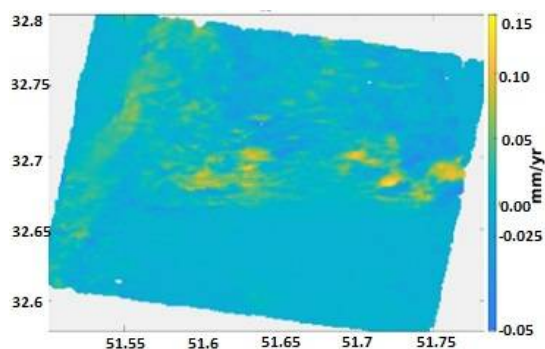
میزان انحراف معیار مؤلفه های شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و ارتفاعی برای هر پیکسل برآورد شد که میانگین این مقادیر برای مؤلفه ها در جدول (۳) ارائه شده است. مؤلفه ارتفاعی به طور متوسط با دقت ۱/۱۷ سانتی‌متر، مؤلفه شرقی-غربی به طور متوسط با دقت ۳/۳۹ سانتی‌متر و مؤلفه شمالی-جنوبی به طور متوسط با دقت ۷/۰۹ سانتی‌متر برآورد شده‌اند. بر این اساس مقادیر ناچیز نرخ جابجایی برای مؤلفه های شرقی-غربی (۱/ میلی‌متر بر سال) و شمالی جنوبی (۱/۵ میلی‌متر بر سال) معنادار نمی‌باشند، زیرا این مقادیر در بازه خطای این مؤلفه‌ها قرار گرفته‌اند. بدین صورت جابجایی این دو مؤلفه قابل تفسیر نمی‌باشند و باید از آن‌ها صرف‌نظر نمود. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، دقت ارزیابی نتایج در راستای شمالی-جنوبی به دلیل قطبی بودن ماهواره‌های راداری، از دقت پایینی برخوردار است. این مساله در مؤلفه شرقی-غربی کمی بهتر بوده ولی در مؤلفه ارتفاعی این دقت مطلوب می‌باشد.

جدول ۳- میانگین انحراف معیار برای هر مؤلفه جابجایی

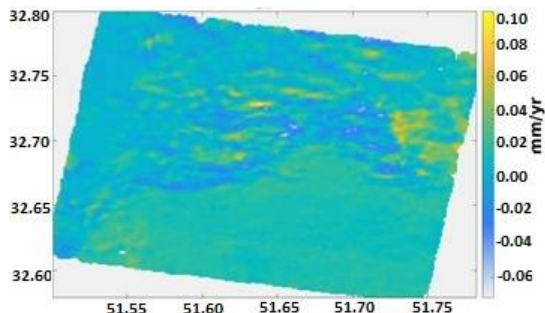
مؤلفه	شمالی-جنوبی (متر)	شرقی-غربی (متر)	ارتفاعی (متر)
Mean(σ)	۰/۰۷۰۹	۰/۰۳۳۹	۰/۰۱۱۷

۵-۲- اعتبارسنجی داده‌ها با داده‌های GPS

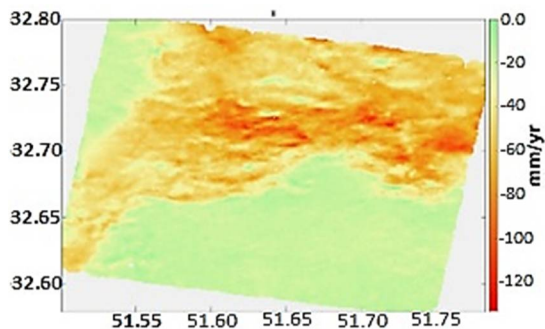
در شهر اصفهان ۴ ایستگاه دائمی GPS توسط شهرداری اصفهان تاسیس گردیده‌است. این ایستگاه‌ها در مناطق ۱۲،



شکل ۸- میدان سرعت جابجایی در جهت شمالی-جنوبی در منطقه مطالعاتی برای بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱



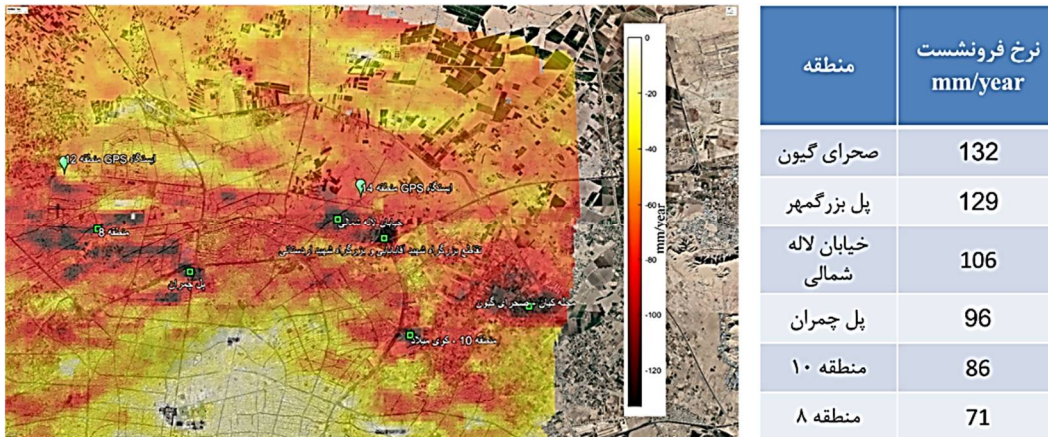
شکل ۹- میدان سرعت جابجایی در جهت شرقی-غربی در منطقه مطالعاتی برای بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱



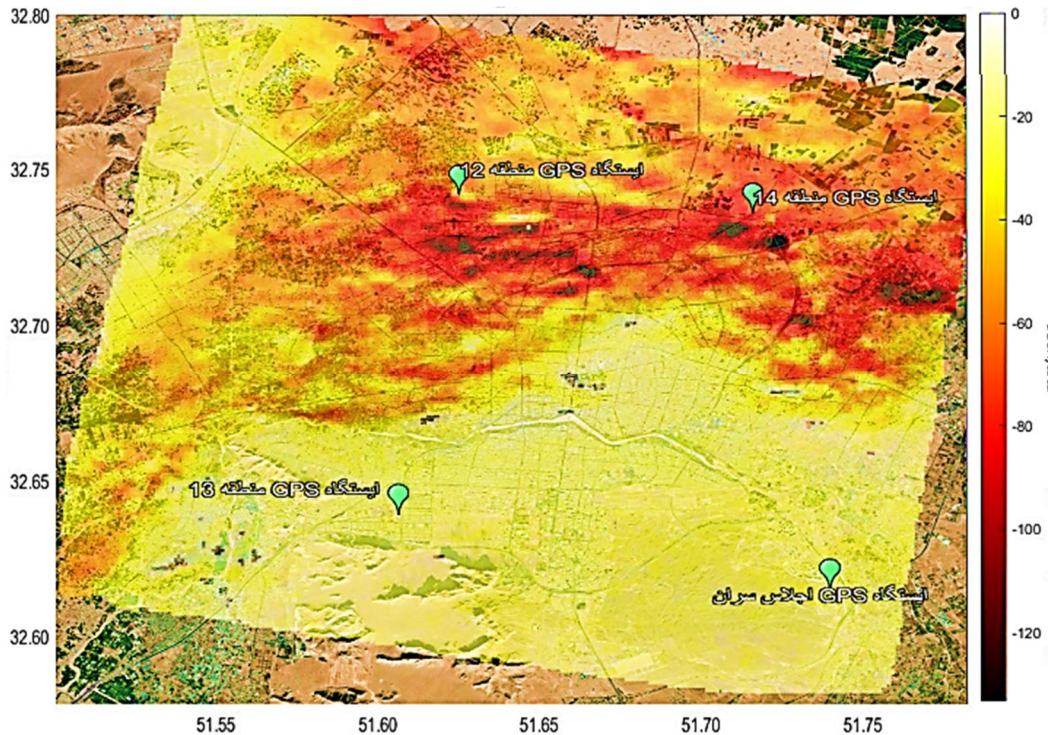
شکل ۱۰- میدان سرعت جابجایی در جهت ارتفاع (فرونشست) در منطقه مطالعاتی برای بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱

۲۰۲۱ در سایت NRCAN به روش تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP) پردازش گردید، اختلاف دو مختصات، بردارهای جابجایی مطلق خواهند بود.

۱۴ و ۱۳ شهریاری و ساختمان اجلاس سران در جنوب شرقی اصفهان واقع شده‌اند، (شکل ۱۲). مختصات این ایستگاه‌ها برای تاریخ اول اکتبر ۲۰۱۷ و تاریخ اول اکتبر



شکل ۱۱- مناطق دارای بیشترین نرخ فرونشست واقع در شمال و شمال شرق شهر اصفهان



شکل ۱۲- میدان جابجایی در جهت ارتفاع (فرونشست) و ایستگاه‌های GPS

جدول ۴- نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری و ایستگاه‌های GPS (مولفه شمالی-جنوبی)

نام ایستگاه	مختصات در تاریخ (m) ۲۰۱۷/۱۰/۱	مختصات در تاریخ (m) ۲۰۲۲/۱۰/۱	میزان جابجایی (m)	جابجایی بدون اثر حرکت صفحه‌های (m)	نرخ جابجایی (m/year) InSAR	جابجایی در ۵ سال حاصل از InSAR (m)
اجلاس سران	۳۶۰۶۲۵۶/۶۱۲	۳۶۰۶۲۵۶/۷۲۳	-۰/۱۱۱	۰	۰/۰۰۳۹	۰/۰۱۹۵
منطقه ۱۲	۳۶۲۰۴۷/۱۲۴	۳۶۲۰۴۷/۲۱۷	-۰/۰۹۳	-۰/۰۱۸	۰/۰۱۳۸	۰/۰۶۹
منطقه ۱۳	۳۶۰۸۷۰۷/۹۲۸	۳۶۰۸۷۰۸/۰۳۵	-۰/۱۰۷	-۰/۰۰۴	۰/۰۰۴۸	۰/۰۲۴
منطقه ۱۴	۳۶۱۹۴۴۰/۱۷۹	۳۶۱۹۴۴۰/۲۹۶	-۰/۱۱۷	۰/۰۰۶	۰/۰۱۱۷	۰/۰۵۸۵

جدول ۵- نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری و ایستگاه‌های GPS (مولفه شرقی-غربی)

نام ایستگاه	مختصات در تاریخ (m) ۲۰۱۷/۰۱/۰۱	مختصات در تاریخ (m) ۲۰۲۲/۰۱/۰۱	میزان جابجایی (m)	جابجایی بدون اثر حرکت صفحه‌ای (m)	نرخ جابجایی InSAR(m/year)	جابجایی در ۵ سال حاصل از InSAR (m)
اجلاس سران	۵۶۹۹۶۰/۹۷۶	۵۶۹۹۶۱/۱۱۱	۰/۱۳۵	۰	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۹
منطقه ۱۲	۵۵۹۲۹۴/۸۸۷	۵۵۹۲۹۵/۰۱۴	۰/۱۲۷	-۰/۰۰۸	۰/۰۰۷۴	۰/۰۳۷
منطقه ۱۳	۵۵۷۷۹۳/۹۳۲	۵۵۷۷۹۴/۰۶۶	۰/۱۳۴	-۰/۰۰۱	۰/۰۰۴۴	۰/۰۲۲
منطقه ۱۴	۵۶۷۸۹۸/۵۹۷	۵۶۷۸۹۸/۷۳۴	۰/۱۳۷	-۰/۰۰۲	۰/۰۰۶۳	۰/۰۳۱

جدول ۶- نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری و ایستگاه‌های GPS (مولفه ارتفاعی)

نام ایستگاه	مختصات در تاریخ (m) ۲۰۱۷/۰۱/۰۱	مختصات در تاریخ (m) ۲۰۲۲/۰۱/۰۱	میزان جابجایی (m)	نرخ جابجایی InSAR(m/year)	جابجایی در ۵ سال حاصل از InSAR (m)
اجلاس سران	۱۵۷۸/۳۲۳	۱۵۷۸/۳۲۴	۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱۶۲	-۰/۰۱۱
منطقه ۱۲	۱۵۹۲/۸۵۳	۱۵۹۲/۵۳۲	-۰/۳۲۱	-۰/۰۶۵۴	-۰/۳۲۷
منطقه ۱۳	۱۶۳۴/۸۴۶	۱۶۳۴/۸۴۴	-۰/۰۰۲	-۰/۰۰۰۱	-۰/۰۰۷
منطقه ۱۴	۱۵۶۵/۲۲۹	۱۵۶۴/۹۵۵	-۰/۲۷۴	-۰/۰۵۷۳	-۰/۲۸۷

جابجایی‌های حاصل از ایستگاه‌های GPS، مطلق هستند و جابجایی‌های حاصل از InSAR، نسبی هستند. با توجه به این موضوع، لازم است برای مقایسه دو بردار جابجایی GPS و InSAR، جابجایی مسطحاتی یکی از ایستگاه‌های GPS (در اینجا، ایستگاهی که کمترین میزان جابجایی را دارد) صفر در نظر گرفته شود و این تصحیح به منظور حذف اثر ترند^{۲۷} [۱۱] و تحت عنوان تصحیح حرکت صفحات به بقیه ایستگاه‌ها اعمال گردد. با توجه به نبود گسل فعال در اصفهان، این مسئله قابل پیش بینی بود و جابجایی در راستای مسطحاتی نداشته و این جابجایی‌ها مربوط به اثر حرکت صفحه‌ای پوسته زمین است. این نتایج در جداول (۴) تا (۶) قابل مشاهده است.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتایج بدست آمده در این تحقیق به خوبی نشان می‌دهد که فناوری تداخل سنجی راداری روش مناسبی جهت برآورد جابجایی‌های سطحی زمین در سطح بزرگ و به صورت پیوسته است. این در حالی است که روش‌های سنتی

ژئودتیکی قادر به تعیین جابجایی با قدرت تفکیک در حد میکسل نیستند. این فناوری بسیار ارزان‌قیمت، سریع و با دقت مطلوب می‌تواند تغییرات سطح زمین را به خوبی اندازه‌گیری نموده و در کوتاه‌ترین زمان ممکن امکان مطالعه منطقه مورد نظر را فراهم سازد. از این رو این فناوری در مدیریت بحران و پیشگیری از مخاطرات حاصل از فرونشست زمین، می‌تواند به گروه مطالعات و مسئولان مربوط کمک شایانی دهد. برای تعیین میزان فرونشست حتماً باید میدان جابجایی در سه بعد استخراج گردد و ارائه نتایج در راستای خط دید ماهواره برآورد درستی از میزان فرونشست نخواهد داد. نتایج جابجایی حاصل از پردازش ۱۶۹ تصویر SAR در سه مسیر ۳۵، ۲۸ و ۱۳۷ نشان می‌دهد که در بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۷ تا دسامبر ۲۰۲۱ بیشترین نرخ فرونشست در شهر اصفهان ۱۳۳ میلی‌متر در سال بوده است که مربوط به منطقه پل بزرگمهر و حوالی روستای راران و کیان می‌باشد. دقت برآورد مولفه‌های مسطحاتی به ترتیب در راستای شمالی-جنوبی ۷/۰۹ سانتی‌متر، شرقی-غربی ۳/۳۹ سانتی‌متر و ارتفاعی برابر با ۱/۱۷ سانتی‌متر بوده است. با توجه به مقدار متوسط انحراف معیار روی سه مولفه مختصاتی می‌توان ادعا نمود که نتایج جابجایی حاصل از InSAR روی مولفه شمالی-جنوبی (ستون سمت راست

جدول ۴) و مولفه های شرقی-غربی (ستون سمت راست جدول ۵) معنادار و قابل تفسیر نیستند. این درحالی است که نتایج حاصل از InSAR روی مولفه ارتفاعی به خوبی معنا دار و قابل تفسیر می باشد. بنابراین ایستگاه های اجلاس سران و منطقه ۱۳ بدون فرونشست در نظر گرفته می شوند. داده های راداری فراوانی وجود دارد که به صورت رایگان در اختیار عموم قرار داده شده است، این موضوع می تواند به پیش

مستمر نقاط بحرانی در بحث فرونشست و پایش مناطق زلزله خیز کمک نماید. نصب کرنر رفلکتور نیز می تواند به اندازه گیری میزان فرونشست در مناطق با همدوسی پایین کمک نماید. بررسی نقاط حاد، از نظر فرونشست نامتقارن و تفکیک آن از مناطق با فرونشست متقارن و پهنه بندی ریسک ناشی از فرونشست در مناطق مسکونی می تواند موضوع تحقیقات بعدی در شهر اصفهان باشد.

مراجع

- [۱] J. Hu, Z. Li, X. Ding, J. Zhu, L. Zhang, and Q. Sun, "Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review," *Earth-Science Reviews*, vol. 133, pp. 1-17, 2014.
- [۲] H. A. Zebker and R. M. Goldstein, "Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 91, no. B5, pp. 4993-4999, 1986.
- [۳] A. Gabriel, R. Goldstein, and H. Zebker, "Mapping small evaluation changes over large areas: Differential radar interferometry," *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, no. B7, 1989.
- [۴] A. R. Moradi and M. A. Ghannadi, "Presenting a method for the improvement of Sentinel-1 generated DEM, using SRTM and 2D wavelet transform," *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, vol. 29, no. 115, pp. 35-48, 2020.
- [۵] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 1, pp. 8-20, 2001.
- [۶] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 40, no. 11, pp. 2375-2383, 2002.
- [۷] M. Motagh *et al.*, "Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements," *Engineering geology*, vol. 218, pp. 134-151, 2017.
- [۸] Z. Ghorbani, A. Khosravi, Y. Maghsoudi, F. F. Mojtahedi, E. Javadnia, and A. Nazari, "Use of InSAR data for measuring land subsidence induced by groundwater withdrawal and climate change in Ardabil Plain, Iran," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, p. 13998, 2022.
- [۹] M. Dehghani, M. J. Valadan Zoej, I. Entezam, A. Mansourian, and S. Saatchi, "InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran," *Geophysical Journal International*, vol. 178, no. 1, pp. 47-56, 2009.
- [۱۰] A. A. Mohammadi Fatehabad, Seyed Ali "Automated processing based on interferometer technique with permanent dispersers for subsidence monitoring (Case study of Herat and Marvast aquifers)," *Journal of RS and GIS for Natural*, vol. 13, no. 3, 2021.
- [۱۱] H. Mehrabi, B. Voosoghi, M. Motagh, and R. F. Hanssen, "Three-dimensional displacement fields from InSAR through tikhonov regularization and least-squares variance component estimation," *Journal of Surveying Engineering*, vol. 145, no. 4, p. 04019011, 2019.
- [۱۲] P. Javadi and Z. Ghorbani, "Combining GPS and InSAR Data to Improve the Accuracy of Dams Displacement Monitoring (Case Study: Givi Dam - Iran)," *Journal of New Approaches in Civil Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 42-57, 2020.
- [۱۳] N. Karimi, "Monitoring the movement of windy sand dunes of Rige Yalan in the Loot desert using SAR satellite images," *Iranian Journal of Range and Desert Research*, vol. 28, no. 2, pp. 341-356, 2021.
- [۱۴] Y. Fialko, M. Simons, and D. Agnew, "The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw7. 1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations," *Geophysical research letters*, vol. 28, no. 16, pp. 3063-3066, 2001.
- [۱۵] H.-S. Jung, Z. Lu, J.-S. Won, M. P. Poland, and A. Miklius, "Mapping three-dimensional surface deformation by combining multiple-aperture interferometry and conventional interferometry: Application to the June 2007 eruption of Kilauea volcano, Hawaii," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 34-38, 2010.
- [۱۶] H. Wang, L. Ge, C. Xu, and Z. Du, "D coseismic displacement field of the 2005 Kashmir earthquake inferred from satellite radar imagery," *Earth, planets and space*, vol. 59, no. 5, pp. 343-349, 2007.
- [۱۷] K. W. Hudnut, Y. Bock, J. E. Galetzka, F. H. Webb, and W. H. Young, "The southern California integrated GPS network (SCIGN)," in *The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements*, 2001, pp. 19-22: Orange California, USA.
- [۱۸] X. Tong, D. Sandwell, and B. Smith-Konter, "High-resolution interseismic velocity data along the San Andreas fault from GPS and InSAR," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 118, no. 1, pp. 369-389, 2013.
- [۱۹] S. Gudmundsson, F. Sigmundsson, and J. M. Carstensen, "Three-dimensional surface motion maps estimated from combined interferometric synthetic aperture radar and GPS data," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 107, no. B10, 2002.
- [۲۰] M. Motagh, Y. Djamour, T. R. Walter, H.-U. Wetzell, J. Zschau, and S. Arabi, "Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS," *Geophysical Journal International*, vol. 168, no. 2, pp. 518-526, 2007.

- [۲۱] M. Amighpey and S. Arabi, "Studying land subsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and levelling measurements," *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 4, pp. 1-8, 2016.
- [۲۲] D. Massonnet and K. L. Feigl, "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface," *Reviews of geophysics*, vol. 36, no. 4, pp. 441-500, 1998.
- [۲۳] P. Agram and M. Simons, "A noise model for InSAR time series," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 120, no. 4, pp. 2752-2771, 2015.
- [۲۴] A. Hooper, "A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches," *Geophysical Research Letters*, vol. 35, no. 16, 2008.
- [۲۵] B. M. Kampes and R. F. Hanssen, "Ambiguity resolution for permanent scatterer interferometry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 11, pp. 2446-2453, 2004.
- [۲۶] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Process for radar measurements of the movement of city areas and landsliding zones," ed: Google Patents, 2003.
- [۲۷] N. Bechor, "Extending interferometric synthetic aperture radar measurements from one to two dimensions," Stanford University, 2006.
- [۲۸] Y. Fialko, M. Simons, and D. Agnew, "The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 28, pp. 306۲۰۰۱, ۳-۳۰۶۶
- [۲۹] G. J. Funning, B. Parsons, T. J. Wright, J. A. Jackson, and E. J. Fielding, "Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) earthquake from Envisat advanced synthetic aperture radar imagery," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 110, no. B9, 2005.
- [۳۰] S. Samsonov and K. Tiampo, "Analytical optimization of a DInSAR and GPS dataset for derivation of three-dimensional surface motion," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 107-111, ۲۰۰۶
- [۳۱] S. Samsonov, K. Tiampo, J. Rundle, and Z. Li, "Application of DInSAR-GPS optimization for derivation of fine-scale surface motion maps of Southern California," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 2, pp. 512-521, 20۰۷
- [۳۲] R. Grandin, E. Klein, M. Métois, and C. Vigny, "Three-dimensional displacement field of the 2015 Mw8. 3 Illapel earthquake (Chile) from across-and along-track Sentinel-1 TOPS interferometry," *Geophysical Research Letters*, vol. 43, no. 6, pp. 2552, ۲۰۱۶, ۲۵۶۱-
- [۳۳] S. Samiee-Esfahany, R. Hanssen, K. van Thienen-Visser, and A. Muntendam-Bos, "On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates," in *Proceedings of The Fringe 2009 Workshop, Frascati, Italy, 2009*, vol. 30.
- [۳۴] E. Erten, A. Reigber, and O. Hellwich, "Generation of three-dimensional deformation map at low resolution using a combination of spectral diversity via least square approach," in *Proc. ENVISAT Symp.*, 2007, pp. 23-27.
- [۳۵] T. J. Wright, B. E. Parsons, and Z. Lu, "Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR," *Geophysical Research Letters*, vol. 31, no. 1, 2004.
- [۳۶] R. Bamler and M. Eineder, "Accuracy of differential shift estimation by correlation and split-bandwidth interferometry for wideband and delta-k SAR systems," *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 151-155, 2005.
- [۳۷] G. H. Golub, P. C. Hansen, and D. P. O'Leary, "Tikhonov regularization and total least squares," *SIAM journal on matrix analysis and applications*, vol. 21, no. 1, pp. 185-194, 1999.
- [۳۸] A. J. Hooper, *Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation*. Stanford University, 2006.
- [۳۹] D. Bekaert, R. Walters, T. Wright, A. Hooper, and D. Parker, "Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques," *Remote Sensing of Environment*, vol. 170, pp. 40-47, 2015.