

بررسی بایاس فاز در شبکه‌ی تداخل نما در الگوریتم SBAS و تأثیر آن در پوشش‌های متفاوت

ابراهیم کرمی^{۱*}، سعید آزاد نژاد^۲، یاسر مقصودی مهرانی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور-دانشکده مهندسی نقشه‌برداری-دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
ebrahimkarami3335@gmail.com

^۲ دانشجوی دکتری مهندسی عمران-دانشگاه UCD (University College Dublin)
saeed.azadnejad@ucdconnect.ir

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری-دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
ymaghsoudi@kntu.ac.ir

(دریافت: تیر ۱۴۰۲، تصویب: اسفند ۱۴۰۲)

چکیده

تحلیل سری زمانی به کمک روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) توانایی خود در پایش تغییرات زمانی فرونشست را نشان داده‌است. رایج‌ترین روش‌های تداخل‌سنجی جهت پایش تغییرات سطح زمین، روش SBAS و PSI هستند. اخیراً بیان شده‌است که مالتی‌لوک کردن پیکسل‌ها و استفاده از تداخل‌نماهای کوتاه‌مدت در الگوریتم SBAS یک فاز مزاحم در اندازه‌گیری جابجایی ایجاد می‌کند. هدف اصلی این تحقیق بررسی شبکه‌های تداخل نمای متفاوت در الگوریتم SBAS به منظور کشف و کاهش فاز مزاحم می‌باشد. تحلیل‌های سری زمانی به کمک ۶۲ تصویر Sentinel-1 در بازه‌ی زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ مورد پردازش قرار گرفتند. برای بررسی این اثر نیاز به یک نقشه‌ی جابجایی مرجع و بدون بایاس بود، برای این منظور دو نقشه‌ی جابجایی با دو الگوریتم SBAS (تعداد اتصال کامل) و PSI تولید شدند. نقشه‌ی بدست‌آمده با الگوریتم PSI با توجه به ماهیت این اثر که برگرفته از مالتی‌لوک کردن پیکسل‌ها در الگوریتم SBAS می‌باشد، بدون بایاس فاز هست. بعد از مقایسه‌ی دو نقشه‌ی تولید شده، مقدار همبستگی ۹۶/۳ درصد نشان داد شبکه با اتصال کامل در الگوریتم SBAS نیز بدون مقدار بایاس فاز هست و به عنوان مرجع در این پژوهش در نظر گرفته شد. برای بررسی تأثیر این مقدار در برآورد جابجایی، تعداد اتصال بین تصاویر و طول تداخل‌نماهای مورد استفاده در شبکه‌های تداخل‌نمای متفاوت بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش اتصال ۱ تا ۸ بین تصاویر و طول تداخل‌نماها در شبکه‌ی تداخل‌نما، مقدار همبستگی بین نقشه‌های جابجایی تولید شده از ۶۶/۴ درصد به ۸۱/۳ درصد افزایش و مقدار بایاس فاز کاهش پیدا کرد. همچنین، با توجه به متفاوت بودن مقدار بایاس فاز در پوشش‌های زمینی مختلف، در این تحقیق سه پوشش شهر، کشاورزی و خاک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اختلاف بین مقادیر بایاس فاز در تعداد اتصال ۱ تا ۸ بین تصاویر در سه محدوده‌ی کشاورزی، شهری و خاکی به ترتیب مقادیر ۱/۲۲۸-، ۰/۲۵- و ۰/۶۷۲- را نشان داد. بیشترین اختلاف مربوط به محدوده‌ی کشاورزی و کمترین مقدار مربوط به محدوده‌ی شهری است. در نهایت، بایاس فاز در پوشش کشاورزی بیشترین و در پوشش شهری کمترین تأثیر را دارد.

واژگان کلیدی: فرونشست، بایاس فاز، شبکه‌ی تداخل‌نما، الگوریتم PS و الگوریتم SBAS

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

یکی از مواردی که امروزه به شکل یک مخاطره‌ی جدی، محیط‌های شهری و غیرشهری را مورد تهدید قرار داده است فرونشست زمین می‌باشد. فرونشست به‌عنوان پدیده‌ای مورفولوژیک، نوعی تغییر شکل سطح زمین است که با دگرشکلی عمودی و یا حرکت رو به پایین سطح زمین و همچنین نشست تدریجی یا دفعی مواد سطحی همراه است [۱].

پدیده فرونشست به عوامل مختلفی بستگی دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به عوامل انسانی (احداث سازه‌ها، حفاری، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی) و طبیعی (زلزله، آتشفشان و رانش) اشاره کرد [۲].

در این راستا برای بررسی میزان جابه‌جایی سطح، متناسب با نیاز و نوع منطقه موردنظر، روش‌ها و داده‌های زیادی به کار گرفته می‌شود. در دو دهه‌ی اخیر روش تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان ابزاری کارآمد و توانمند در مطالعه کلیه پدیده‌هایی که سبب تغییر شکل سطح زمین می‌شوند مطرح شده و به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

اولین کاربردهای InSAR^۱ برای مطالعات توپوگرافی سطح زمین و تغییرات آن توسط زبکر و گلدستاین (۱۹۸۶) و گابریل و همکاران (۱۹۸۹) انجام پذیرفت [۳-۴].

فناوری تداخل‌سنجی راداری، به‌عنوان یکی از قدرتمندترین روش‌های سنجش‌ازدور، قابلیت‌های منحصربه‌فردی در ابعاد، هزینه، زمان و دقت نسبت به دیگر تکنیک‌های سنجش همانند روش‌های غیرژئودتیکی نظیر ترازبایی دقیق، سیستم‌های تعیین موقعیت تداخل پایه‌ی بسیار طولانی (SLR^۲)، تداخل خط پایه‌ی بسیار طولانی (VLBI^۳)، سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS^۴) دارد [۵]. با استفاده از روش تداخل‌سنجی جابجایی‌های رخ داده در سطح زمین با دقت ارتفاعی سانتیمتر و تفکیک مکانی چند ده متر اندازه‌گیری می‌شود. [۶-۸].

در حال حاضر دو روش کلی جهت برآورد فرونشست زمین وجود دارد که عبارتند از: PSI^۴ و SBAS^۵. اساس کار

آن‌ها برآورد فاز تجمعی در زمان‌های تصویر برداری می‌باشد. علاوه بر این با میانگین‌گیری‌های موجود در الگوریتم این روش‌ها میزان مولفه‌های ایجاد کننده نویز در تداخل نگار (مولفه‌ی اتمسفری و مداری و...) تا حد زیادی تعدیل شوند.

روش PSI توسط فرتی و همکاران در سال ۲۰۰۱ ارائه شد [۹]. هدف اصلی این روش شناسایی پیکسل‌هایی از تصویر است که در بازه‌ی زمانی اخذ داده‌های مورد استفاده همدوس باقی می‌مانند. این روش با بهره‌گیری از نقاط پراکنش‌گر دائمی (PS) امکان پردازش سری زمانی بلند مدت را فراهم می‌نماید. نقاط پراکنش‌گر دائمی برخی از عوارض سطح زمین هستند که در طول چندین ماه و حتی سال ویژگی‌های بازپراکنشی نسبتاً پایداری دارند، ابعاد این عوارض از یک پیکسل کوچکتر بوده و از عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی تصاویر SAR کمتر تأثیر می‌پذیرند [۱۰]. همچنین روش SBAS برای تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی توسط براردینو و همکاران در سال ۲۰۰۲ پیشنهاد شد [۱۱]. در روش SBAS تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می‌گیرند که مؤلفه‌ی قائم خط مبنای آن‌ها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنا باشد، همچنین خط مبنا زمانی آن‌ها نیز همزمان کمینه باشد. به این ترتیب، فقط تداخلنماهایی تشکیل می‌شوند که کیفیت مناسبی داشته باشند. پس از تشکیل این تداخلنماها، یک شبکه از تصاویر ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابه‌جایی هر پیکسل تخمین زده می‌شود.

در سال‌های اخیر محققان متعددی با استفاده از تصاویر راداری و فناوری راداری ذکرشده به بررسی میزان فرونشست زمین در نواحی مختلف پرداختند که ازجمله از مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

دهقانی و همکاران (۲۰۰۹) فرونشست دشت نیشابور را با استفاده از تصاویر راداری ASAR برداشت‌شده بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ را به روش SBAS مورد مطالعه قرار داده و بیشترین مقدار فرونشست ۱۹ سانتیمتر برای این ناحیه برآورد کردند [۱۲]. کینگا و همکاران برای پایش میزان جابجایی در منطقه‌ی موریلیا مکزیک از ۲۲ تصویر راداری ENVISAT در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ استفاده کردند که نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها میزان جابجایی ۷ تا ۸ سانتی‌متر در جهت شرقی غربی موازی با

^۱ Interferometric synthetic aperture radar

^۲ Very Long Baseline

^۳ Global Positioning System

^۴ Persistent Scatterer Interferometry

^۵ Small baseline subset

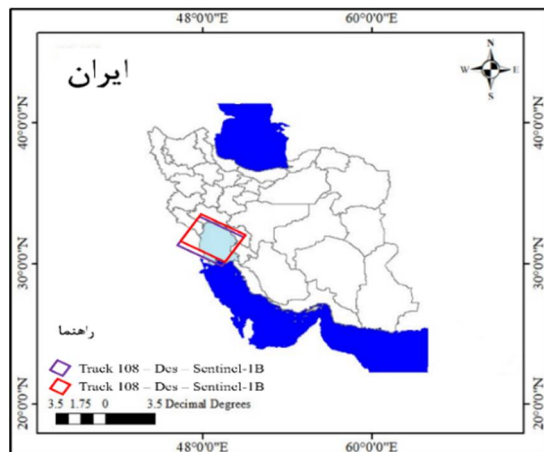
گسل اصلی نشان داد [۱۳]. ایوانا و همکاران (۲۰۱۷) روش P_SBAS را برای محاسبه سری زمانی تغییر شکل سطح زمین و نقشه سرعت متوسط مناطق بزرگ در منطقه‌ی کالیفرنیا شمالی در آمریکا با استفاده از ۱۲۸ تصویر سنجنده‌ی COSMO_SkyMed پیشنهاد دادند که امکان پردازش بدون نظارت حجم‌های بزرگ داده SAR، از داده‌های خام (سطح-۰) تصاویر تا نسل سری‌های زمانی و نقشه‌های مربوطه DInSAR را فراهم کرده است [۱۴]. پرسینو همکاران (۲۰۰۹) به مطالعه و کنترل جابجایی و نرخ فرونشست در مناطق شهری و سازه‌های بزرگ ساخت بشر پرداخته‌اند. مناطق مطالعه آن‌ها شانگهای، تیانجین و تری گرجس بوده‌اند [۱۵]. کریم زاده و همکاران (۱۳۹۵) فرونشست حوضه‌ی تبریز را با ترکیب روش‌های PS و SBAS با استفاده از ۹۷ تصویر راداری ASAR بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ انجام داد و ماکزیمم فرونشستی به‌اندازه‌ی ۴۰ میلی‌متر را برآورد نمود [۱۶]. آنتونیو پپ و همکاران (۲۰۲۱) روش MSBAS را ارائه دادند، که در آن از روش MT_SBAS برای شناسایی بهترین Spatial Baseline بر اساس ۴۸ تصویر سنجنده‌ی ASAR از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ استفاده شده است [۱۷]. در تحقیقی دیگر، یوموریشیتا و همکاران (۲۰۲۰) به حل چالش بهره‌برداری کامل در برآورد و استفاده از داده‌های راداری در مناطق وسیع پرداختند. بدین منظور، یک بسته تجزیه و تحلیل سری زمانی (InSAR)، تحت عنوان LiCSBAS ارائه شد [۱۸]. سامسونوف و همکاران (۲۰۲۱) روش MSBAS را برای به دست آوردن تغییر شکل سری‌های زمانی چندبعدی به روش دیگری توسعه داد. MSBAS تغییر شکل را بر اساس فاز تداخلنما محاسبه می‌کند. این روش از تصاویر سری زمانی SAR از مدارهای سعودی و نزولی استفاده و زمان داده آن‌ها را در یک جدول زمانی یکسان با یک عامل جبران زمانی یکسان می‌کند [۱۹].

همان‌طور که ذکر شد در سال‌های اخیر محققان متعددی از الگوریتم تداخل‌سنجی SBAS برای اهداف مختلف استفاده کرده‌اند که جزو رویکردهای کارآمد و توانمند در زمینه تداخل‌سنجی راداری شناخته می‌شوند. با این‌حال، دقت اندازه‌گیری‌های روش SBAS در معرض خطاهای مختلفی از جمله بایاس‌های فازی است که می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر کیفیت و قابلیت اطمینان اندازه‌گیری‌های تغییر شکل مشتق‌شده تأثیر بگذارد؛

بنابراین، شناسایی و کاهش اثر بایاس فاز برای اطمینان از دقت و اثربخشی نتایج SBAS از اهمیت بالایی برخوردار است. در ادامه به بررسی چندین مطالعه مرتبط در ارتباط با بررسی اثر بایاس فاز پرداخته شده است.

انصاری و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای به محاسبه‌ی بایاس‌های سیستماتیک در اندازه‌گیری جابجایی سطح زمین با روش تداخل سنجی راداری پرداختند، که در آن جهت شناسایی بایاس‌های اندازه‌گیری شده از ۱۸۴ تصویر ماهواره‌ی Sentinel_1(A,B) با دوره تناوب ۶ روزه از اکتبر ۲۰۱۴ تا سپتامبر ۲۰۱۸ استفاده کردند. در مطالعه مذکور به بررسی وجود یک سیگنال تداخل سنجی جدید در تداخل‌های راداری (SAR) پرداخته شد، که اثبات شد نمی‌توان آن‌ها را به تغییرات توپوگرافی جوی یا سطح زمین نسبت داد [۲۰]. مقصودی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی اثر بایاس فاز در منطقه‌ای در غرب ترکیه با استفاده از ۶۰ تصویر ماهواره‌ی sentinel-1 پرداختند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از تداخلنماهای کوتاه‌مدت می‌تواند نتایج حاصل از جابجایی را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد [۲۱]. Falabella و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تأثیر مالتی لوک کردن پیکسل‌ها و تداخلنماهای کوتاه مدت بر روی مقدار بایاس فاز در شبکه‌های مختلف تداخلنما در الگوریتم SBAS پرداختند. آن‌ها نشان دادند با افزایش ابعاد پنجره‌ی مالتی لوک پیکسل‌ها مقدار بایاس فاز افزایش پیدا کرد [۲۲]. یوژی ژنگ و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی اثر بایاس فاز در مدل‌سازی تغییر شکل با استفاده از روش تداخل‌سنجی پرداختند، آن‌ها یک الگوریتم برای پیش‌بینی و تصحیح بایاس فاز ارائه دادند همچنین شناسایی کردند مقدار بایاس فاز در شبکه‌های اینترفروگرام متفاوت، مقداری متفاوت دارد [۲۳].

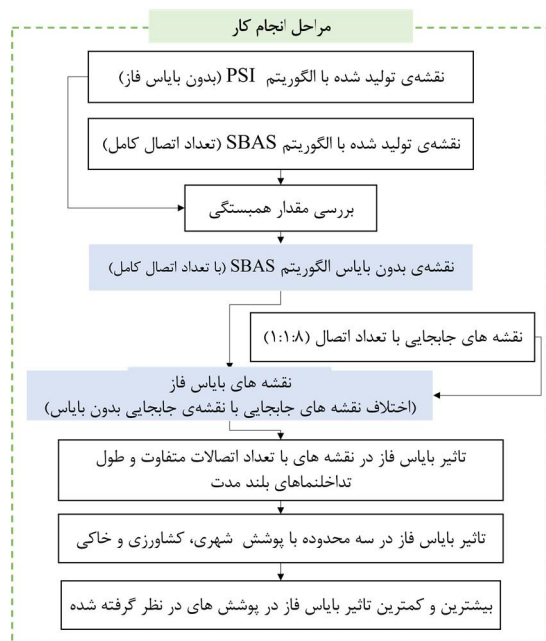
علی‌رغم پژوهش‌هایی که در زمینه‌ی برآورد فرونشست با استفاده از الگوریتم SBAS و حل چالش‌های متفاوت آن صورت گرفته‌است، تا کنون پژوهشی در زمینه‌ی بررسی بایاس فاز در شبکه‌های مختلف تداخلنما و ارتباط بایاس فاز با پوشش‌های مختلف زمینی صورت نگرفته‌است. ساختار پژوهش حاضر به این صورت است: در بخش ۲ منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده، بخش ۳ روش تحقیق، بحث و نتایج در بخش ۴ و نتایج کلی در بخش ۵ ارائه شده است.



شکل ۲- داده‌های مورد استفاده

۳- روش تحقیق

در مرحله‌ی اول با استفاده از نرم‌افزار ^۳ISCE و ^۴MintPy نقشه‌های جابجایی با شبکه‌های تداخلنمای متفاوت در الگوریتم SBAS تولید شده‌اند.



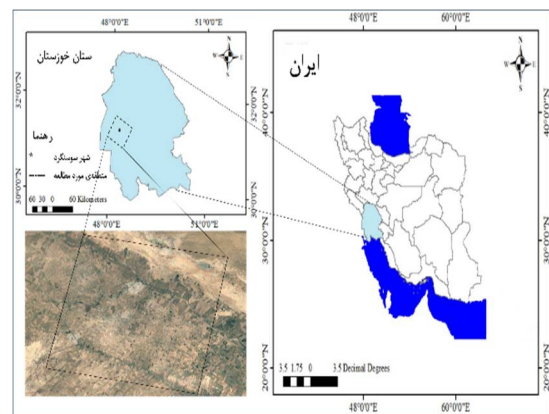
شکل ۳- مراحل انجام کار

در مرحله‌ی دوم با استفاده از پکیج ^۵G2S، یک نقشه‌ی جابجایی با استفاده از روش PSI، برای مقایسه‌ی شبکه‌ی تداخلنمای تولیدشده در الگوریتم SBAS با تعداد اتصال

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه تحت مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب غرب ایران در استان خوزستان، شهر سوسنگرد می‌باشد. محدوده‌ی انتخابی دارای سه نوع پوشش زمینی از جمله مناطق شهری، کشاورزی و خاکی هست. این محدوده طول جغرافیایی ۴۸،۰۵ درجه تا ۴۸،۵۰ درجه و عرض جغرافیایی ۳۱،۴۰ درجه تا ۳۱،۷۰ درجه را شامل می‌شود.



شکل ۱- منطقه‌ی مورد مطالعه

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه از داده‌های ماهواره‌ی Sentinel-1 با قدرت تفکیک ۵ متر در جهت آزیموت^۱ و ۲۰ متر در جهت رنج^۲ استفاده شده‌است. این ماهواره توسط سازمان فضایی اروپا توسعه و طراحی شده‌است. سکوی A پروژه Sentinel-1 در تاریخ ۹ آپریل سال ۲۰۱۴ و سکوی B در تاریخ ۲۵ آپریل ۲۰۱۶ به فضا پرتاب شدند. این تصاویر با دوره‌ی زمانی ۶ روزه با باند C در قطبش عمودی VV می‌باشند. تصاویر سری زمانی، از ۲۰۲۰/۱۸/۰۸ تا ۲۰۲۱/۰۸/۱۸ (۳۱ تصویر Sentinel-1A و ۳۱ تصویر Sentinel-1B) اخذ شده‌اند این تصاویر در گذر نزولی از مسیر ۱۰۸ و فریم ۱۷۴ می‌باشند. همچنین برای حذف فاز مؤلفه توپوگرافی از DEM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شده‌است.

^۳ InSAR Scientific Computing Environment

^۴ The Miami InSAR Timeseries software in Python

^۵ GMTSAR2StaMPS

^۱ Azimuth

^۲ Range

کامل به دست می‌آید. در ادامه برای بررسی تاثیر بایاس فاز، شبکه‌های مختلف تداخلنما (از نظر تعداد و طول تداخلنما) ایجاد و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین برای بررسی تاثیر بایاس فاز در پوشش‌های متفاوت، سه پوشش شهر، کشاورزی و خاکی نیز در منطقه‌ی مورد مطالعه مشخص و مورد بررسی قرار گرفت شکل (۳).

۳-۱-۳ تولید نقشه‌های جابجایی در الگوریتم SBAS

۳-۱-۱-۳ مراحل انجام پیش پردازش با نرم افزار

ISCE یک نرم‌افزار رایگان است که برای پردازش داده‌های راداری به منظور ساخت تداخل‌نماها که برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین استفاده می‌شوند، به کار می‌رود. این نرم‌افزار شامل چندین مرحله پیش پردازش است که به‌طور معمول برای داده‌های SAR خام به کار می‌روند تا تداخل‌نماها ساخته شوند و اندازه‌گیری‌های تغییر شکل به دست آید [۲۴].

۳-۱-۱-۳-۱ پیش‌پردازش داده‌ها

در این مرحله تصحیحاتی شامل نویز حرارتی، اصلاح انحراف در فاصله و زاویه، تصحیح مداری و تصحیح فاز ناشی توپوگرافی، تعیین ابعاد پنجره‌ی مالتی لوک انجام می‌شود، همچنین تعداد برت^۱های مورد پردازش در تصاویر نیز مشخص می‌شود [۲۵].

۳-۱-۱-۳-۲ ثبت هندسی تصاویر^۲

از ترکیب متقابل و تکنیک‌های زیر پیکسلی برای دستیابی به دقت سطح پیکسل استفاده می‌کند. خروجی این مرحله دو تصویر SAR هستند که به‌طور کامل با یکدیگر هم‌راستا شده‌اند [۲۵].

۳-۱-۱-۳-۳ تولید تداخلنما

تداخل‌نماها با محاسبه تراکم متقابل بین تصاویر پایه و پیرو تولید می‌شوند. تداخل‌نما حاصل‌شده، حاوی اطلاعات

مقدار فاز است. که برای تخمین تغییر شکل سطح زمین به کار می‌روند.

۳-۱-۱-۴ بازجایی^۳ فاز

در تداخل‌نماها، مقادیر فاز در حدود 2π پیچیده شده‌اند در این مرحله نرم افزار ISCE از مدل SNAPHU برای بازجایی فاز و به دست آوردن مقادیر دقیق فاز استفاده می‌کند [۲۴].

۳-۱-۲ مراحل انجام نرم‌افزار (The Miami InSAR Timeseries software in Python) MintPy

یک نرم افزار رایگان، که برای بدست آوردن نقشه‌های جابجایی با استفاده از الگوریتم SBAS مورد استفاده قرار می‌گیرد. مراحل پردازشی این نرم افزار به ترتیب شامل:

۳-۱-۲-۱ ورودی

تداخل‌نماهای خام تولیدشده در مرحله‌ی پیش پردازش نرم افزار (ISCE)، فایل‌های مربوط به آن‌ها و ... به‌صورت فایل‌های ورودی بارگیری می‌شوند. در این مرحله محدوده موردنظر از منطقه نیز مشخص می‌شود.

۳-۱-۲-۲ تصحیح شبکه‌ی تداخل‌نما ایجادشده

این مرحله اجازه می‌دهد تا در صورت نیاز شبکه تداخل‌نما ایجادشده تا حد امکان اصلاح شود. به‌عنوان مثال، شبکه را می‌توان بر اساس آستانه خطوط پایه زمانی و مکانی تغییر داد، یا بر اساس حداکثر تعداد اتصالات می‌توان با حذف جفت‌های خاص آن را اصلاح کرد [۲۶].

۳-۱-۲-۳ انتخاب نقطه‌ی مبنا

در این مرحله یک پیکسل مرجع مشترک برای همه تداخل‌نماها به عنوان نقطه‌ی مبنا معرفی می‌شود. بهتر است که یک پیکسل منسجم و بدون تغییر شکل را انتخاب کنیم. با این حال، از آنجایی که سری زمانی جابجایی InSAR تخمین زده‌شده هم در زمان و هم در مکان نسبی است، بنابراین انتخاب یک پیکسل تغییر شکل نتایج را تغییر نمی‌دهد [۲۶].

^۱ burst

^۲ Co-register

^۳ unwrapping

۳-۱-۲-۴- تصحیح خطای بازیابی شده

تداخل‌نگارهای بازیابی شده‌ی ورودی ممکن است تحت تأثیر خطاهای بازیابی فاز قرار گیرند (پرش‌های فاز اشتباه اضافه‌شده در حین بازیابی فاز). در این تحقیق با استفاده از مدل phase_closure مقدار خطای بازیابی فاز اصلاح شد [۲۶].

۳-۱-۲-۵- محاسبه‌ی سری زمانی فاز خام

این مرحله شبکه تداخل‌نما ایجادشده را برای سری‌های زمانی فاز خام محاسبه می‌کند. سری زمانی فاز در این مرحله شامل تغییر شکل زمین، تأخیر اتمسفر و باقیمانده توپوگرافی ناشی از خطای DEM است [۲۶].

۳-۱-۲-۶- تصحیح خطای تروپوسفری

در این مرحله تأخیر تروپوسفر با استفاده از مدل‌های جوی (GAMs) روی تصاویر تداخلی برآورد و اعمال می‌شود [۲۷].

۳-۱-۲-۷- تصحیح خطای توپوگرافی

در این مرحله باقیمانده فاز ناشی خطای DEM با استفاده از رابطه آن با خط مبنای مکانی سری زمانی اصلاح می‌شود [۲۸].

۳-۱-۲-۸- محاسبه‌ی RMSE بین داده‌ها

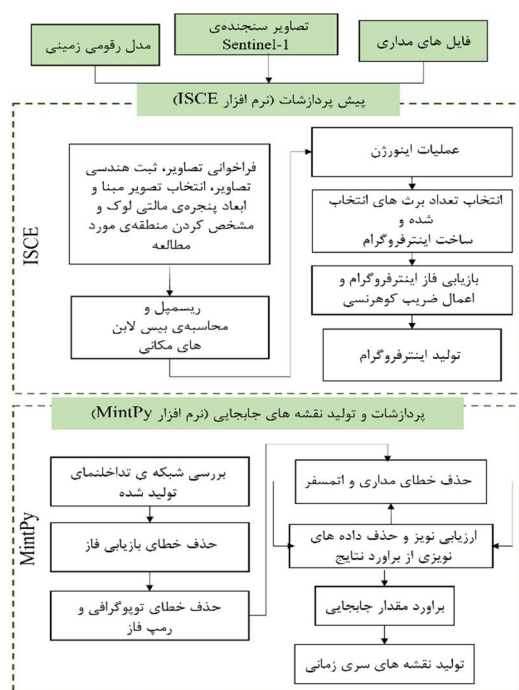
در این مرحله، (RMSE) سری زمانی فاز باقیمانده برای هر داده محاسبه می‌شود. سپس، داده با حداقل مقدار خطا را به‌عنوان تاریخ مرجع بهینه انتخاب می‌کند. داده‌هایی که نویز زیادی دارند را از برآورد جابجایی حذف می‌کند.

۳-۱-۲-۹- زمین مرجع^۱ تصاویر

این مرحله از نرم‌افزار برای به دست آوردن و اندازه‌گیری دقیق تغییر شکل، سری زمانی‌های تولید شده را به سامانه مختصات UTM نسبت می‌دهد.

۳-۱-۲-۱۰- محاسبه‌ی جابجایی

در این مرحله نقشه‌های جابجایی تولید می‌شوند. همچنین داده‌هایی که نویز زیادی دارند شناسایی شده و به‌طور پیش‌فرض در طول تخمین حذف می‌شوند.



شکل ۴- تولید نقشه‌های جابجایی با استفاده از الگوریتم SBAS

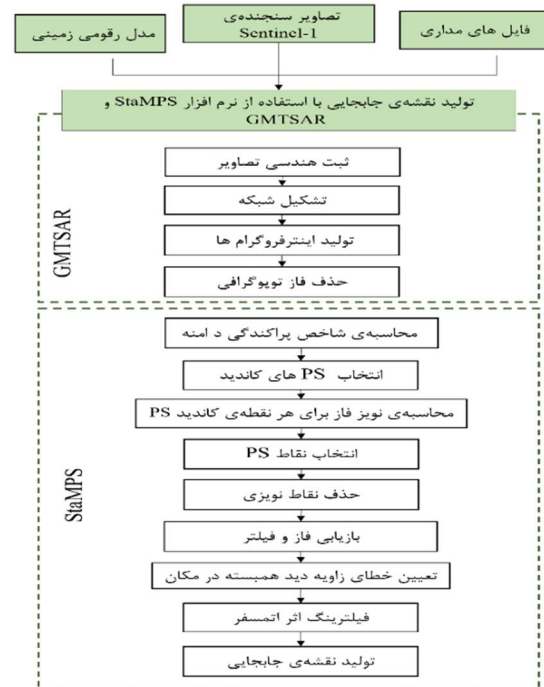
۳-۲- تولید نقشه‌ی جابجایی در الگوریتم PSI

در این مطالعه جهت تولید نقشه‌ی جابجایی با استفاده از الگوریتم PSI از ابزار G2S^۲ استفاده شده‌است. برای پردازش مجموعه تصاویر راداری تا مرحله‌ی تولید تداخل‌نما از نرم‌افزار GMTSAR [۲۹] و برای پردازش و تحلیل سری زمانی PSI از نرم‌افزار StaMPS استفاده می‌شود [۳۰]. در گام اول با استفاده از نرم‌افزار GMTSAR یک تصویر به عنوان تصویر مبنا انتخاب و تصاویر ثبت هندسی می‌شوند. در ادامه شبکه‌ی تداخل‌نما ایجاد و خطای توپوگرافی حذف می‌شود. در مرحله‌ی بعد از نرم‌افزار StaMPS برای شناسایی پیکسل‌های کاندید PS از تحلیل دامنه و فاز استفاده می‌شود. برای انتخاب پیکسل‌های PS کاندید با استفاده از پارامتر شاخص پراکندگی دامنه (D_A) استفاده می‌شود. این شاخص به عنوان یک واحد آستانه جهت شناسایی پراکنشگرها استفاده می‌شود. از اینرو پیکسل‌هایی

^۲ GMTSAR2StaMPS

^۱ Geocoding

که مقدار این شاخص برای آن‌ها کمتر حد آستانه باشد به عنوان کاندیدهای اولیه پراکنشگر انتخاب می‌شوند. در این تحقیق شاخص پراکندگی دامنه برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد. در نهایت نقشه‌ی سری زمانی تولید می‌شود (شکل ۵).



شکل ۵- تولید نقشه‌ی جابجایی با استفاده از الگوریتم PSI

۳-۳- بررسی شبکه‌های تداخل‌نماهای متفاوت

برای شناسایی بایاس فاز، شبکه‌های تداخل‌نمای متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفتند. این ارزیابی‌ها شامل مقایسه‌ی اختلاف فازهای تداخلی مشاهده شده در شبکه‌ی تداخل‌نما بدون بایاس (اتصال کامل) و شبکه‌ی تداخل‌نما با تعداد اتصال و تداخل‌نماهای متفاوت بین تصاویر (از اتصال ۱ تا ۸) است. نتایج این ارزیابی، نکاتی را درباره شناسایی و تاثیر بایاس فاز در شبکه‌های مختلف ارائه می‌کند.

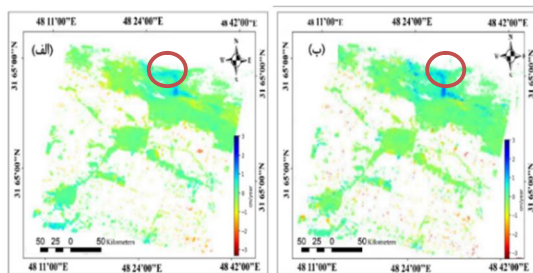
۳-۴- بررسی مقدار بایاس فاز در پوشش‌های زمینی متفاوت

از آنجایی که اثر بایاس فاز در محدوده و پوشش‌های مختلف متفاوت است [۲۲]، لذا برای بررسی این اثر در منطقه‌ی مورد مطالعه، سه پوشش کشاورزی، شهری و خاکی در نظر گرفته شد. پس از میانگین‌گیری از مقادیر نقشه‌های بایاس فاز در سه پوشش مذکور، مقادیر سری زمانی آن‌ها رسم شد.

۴- ارائه نتایج

۴-۱- تولید نقشه‌ی جابجایی با الگوریتم PSI و SBAS (بررسی میزان بایاس فاز)

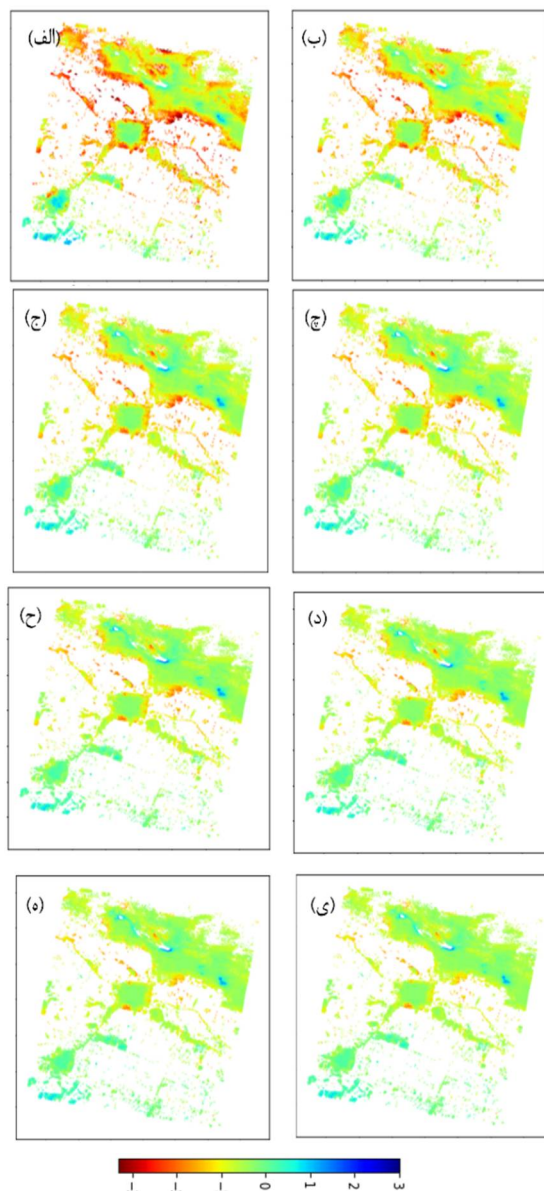
در ابتدا برای بررسی اثر بایاس فاز در شبکه‌های مختلف تداخل‌نما در الگوریتم SBAS نیاز به یک نقشه‌ی جابجایی مرجع و بدون مقدار بایاس فاز است. برای این منظور دو نقشه‌ی جابجایی با دو الگوریتم SBAS (تعداد اتصال کامل با تعداد تداخل‌نما ۱۸۱۹) و PSI تولید شد، نقشه‌ی تولید شده در الگوریتم PSI با توجه به ماهیت اثر که برگرفته از مالتی‌لوک کردن پیکسل‌ها و تشکیل شبکه با استفاده از تداخل‌نماهای کوتاه مدت می‌باشد عاری از این خطا است [۲۴].



شکل ۶- نقشه‌های جابجایی تولیدشده با الگوریتم، الف) SBAS تعداد اتصال کامل ب) الگوریتم PSI

به علت داشتن پوشش کشاورزی در منطقه‌ی مورد مطالعه تعداد پیکسل‌های استخراج شده در الگوریتم SBAS بیشتر از الگوریتم PSI بوده‌است. به همین دلیل فقط پیکسل‌های متناظر در هر دو نقشه انتخاب شدند. همانطور که مشاهده می‌شود دو نقشه‌ی تولید شده با دو الگوریتم PSI و SBAS از نظر کیفی به جز منطقه‌ی مشخص شده با دایره‌ی قرمز در شکل (۶) (محدوده‌ای با توپوگرافی نسبتاً شدید می‌باشد) به طور کامل یک دیگر را تایید می‌کنند. جهت مقایسه‌ی نقشه‌های تولید شده از نمودار توزیع همبستگی استفاده شده‌است. نقشه‌ی تولید شده با الگوریتم PSI را به عنوان مبنا در نظر گرفته و توزیع همبستگی بین مقادیر دو نقشه رسم شد.

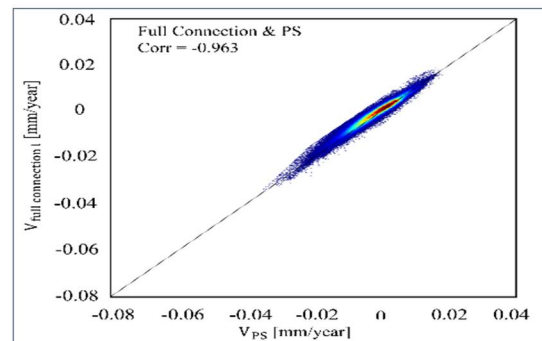
همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، نمودار پراکندگی تمام پیکسل‌های تولید شده برای دو الگوریتم SBAS و PSI رسم شده‌است. مشخص است که توزیع نرخ جابجایی مربوط به هر الگوریتم تا حد زیادی بر روی خط



شکل ۸- نقشه‌های اختلاف تعداد اتصال متفاوت و نقشه با اتصال کامل (نقشه‌های بایاس فاز) (الف) تداخلنماهای ۶ روزه (ب) تداخلنماهای ۶ و ۱۲ روزه (ج) تداخلنماهای ۶ و ۱۲ و ۱۸ روزه (د) تداخلنماهای ۶ و ۱۲ و ۱۸ و ۲۴ روزه (ه) تداخلنماهای ۶ و ۱۲ و ۱۸ و ۲۴ و ۳۰ و ۳۶ روزه (و) تداخلنماهای ۶ و ۱۲ و ۱۸ و ۲۴ و ۳۰ و ۳۶ و ۴۲ روزه (ز) تداخلنماهای ۶ و ۱۲ و ۱۸ و ۲۴ و ۳۰ و ۳۶ و ۴۲ و ۴۸ روزه

برای بررسی تأثیر افزایش طول تداخلنماهای بکاربرده شده در شبکه، علاوه بر مقایسه کیفی نقشه‌های بایاس فاز به صورت کمی نیز مقایسه شدند. برای رسم نمودار همبستگی نقاط، با توجه به بدون بایاس فاز بودن نقشه‌ی جابجایی با اتصال کامل، این نقشه به عنوان نقشه‌ی مبنا در نظر گرفته شد و برای اتصالات ۱ تا ۸ نقشه‌ی همبستگی تولید شد. شکل (۹).

$y=x$ قرار دارند و مقدار همبستگی دو نقشه‌ی جابجایی ۹۶٫۳ درصد را نشان می‌دهد.



شکل ۷- توزیع همبستگی بین دو نقشه‌ی تولید شده با الگوریتم PSI و SBAS

این موضوع بیانگر عملکرد یکسان دو الگوریتم در برآورد مقادیر جابجایی به ازای هر پیکسل می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده در ادامه برای بررسی و کشف اثر بایاس فاز در شبکه‌های تداخلنمای متفاوت، نقشه‌ی تولید شده با استفاده از الگوریتم SBAS (تعداد اتصال کامل) به عنوان مبنا و بدون بایاس فاز در نظر گرفته شد.

۴-۲- بررسی تعداد اتصال بین تصاویر برای کشف میزان بایاس فاز

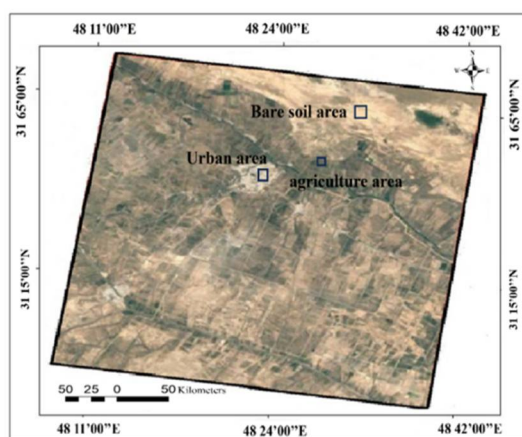
در این مرحله از تحقیق با هدف بررسی اثر بایاس فاز در شبکه‌های تداخلنمای متفاوت، شبکه‌هایی با تداخلنماهای ۶ تا ۴۸ روزه (تعداد اتصالات ۱ تا ۸) بین تصاویر در نظر گرفته و ۸ نقشه‌ی جابجایی تولید شد. برای نشان دادن تأثیر بایاس فاز در این مرحله، از اختلاف نقشه‌های بدست آمده با تعداد اتصال متفاوت با نقشه با اتصال کامل (بدون بایاس) در مرحله قبل استفاده شده‌است، تفاوت در نقشه‌های اختلاف ایجاد شده، با توجه به یکسان بودن مقدار جابجایی، نشان دهنده‌ی تأثیر بایاس فاز در هر یک از نقشه‌های جابجایی می‌باشند.

همانطور که در شکل (۸) از نقشه‌های بایاس تولید شده مشخص است. با افزایش طول تداخلنماهای استفاده شده در هر شبکه از شکل (۸-الف) تا (۸-ی) مقدار بایاس فاز کاهش پیدا کرده‌است. جایی که بیشترین اثر بایاس فاز مربوط به نقشه با تداخلنماهای ۶ روزه و کمترین اثر بایاس فاز مربوط به نقشه با تداخلنماهای ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۳۰، ۳۶، ۴۲ و ۴۸ روزه می‌باشد.

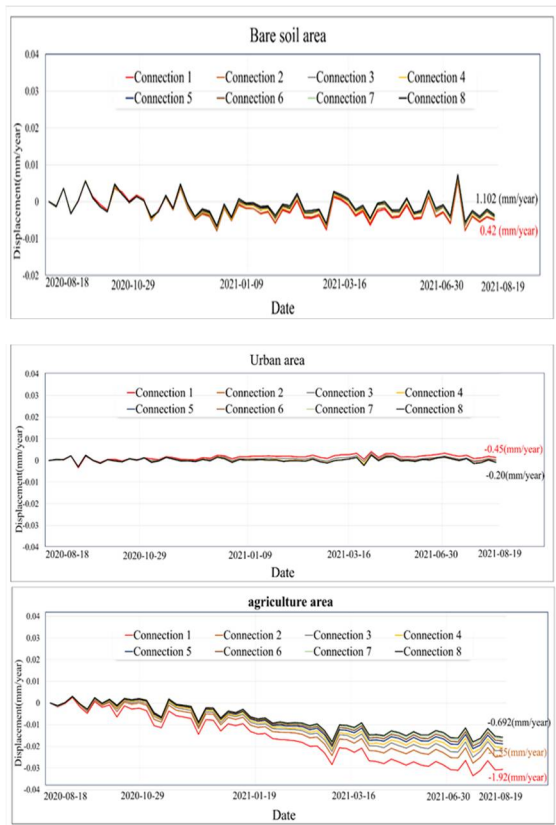
اتصالات و طول تداخلنماهای استفاده شده در شبکه، دقت و صحت اندازه‌گیری‌های تداخلی بهبود و مقدار بایاس فاز در شبکه‌های تداخل نما کاهش می‌یابد.

۳-۴- بررسی میزان بایاس فاز در پوشش‌های زمینی

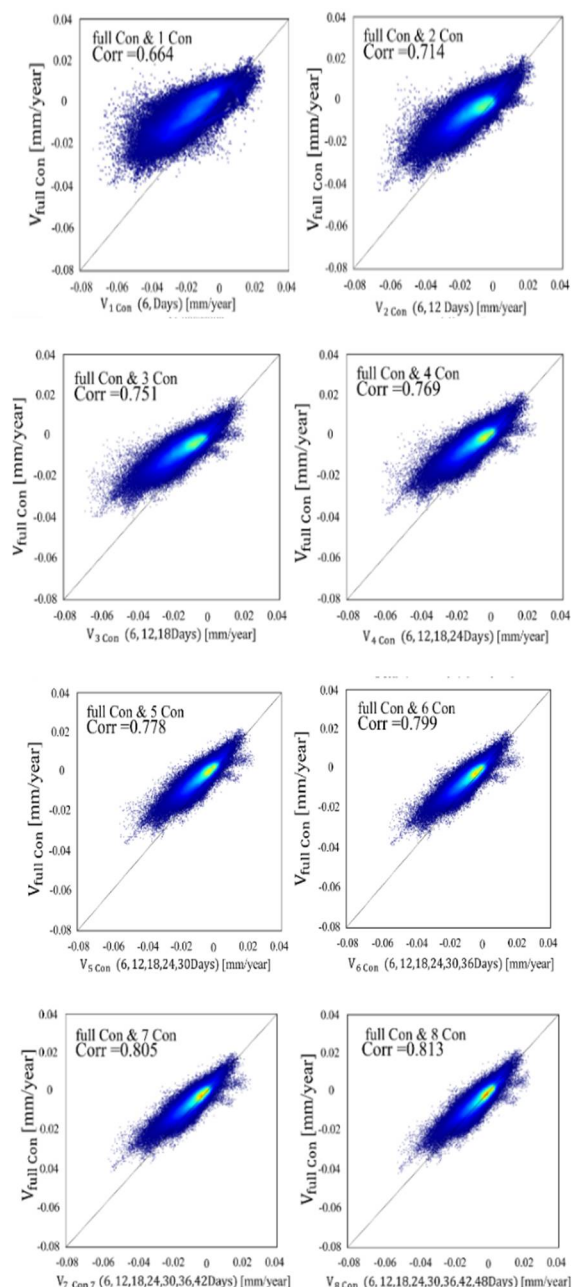
با توجه به نتایج به دست آمده تأثیر بایاس فاز در محدوده‌ها و پوشش‌های مختلف، متفاوت می‌باشد.



شکل ۱۰- سه پوشش گیاهی، خاک و شهری در نظر گرفته شده در محدوده‌ی مورد مطالعه



شکل ۱۱- میانگین سری‌های زمانی بدست آمده در سه محدوده‌ی خاکی، شهری و کشاورزی



شکل ۹- نقشه‌های همبستگی در شبکه با افزایش اتصال بین تصاویر

همانطور که از شکل (۹) مشخص است، پراکندگی نقشه‌های همبستگی با افزایش تعداد اتصال و طول تداخلنماهای بکاربرده شده در شبکه کمتر و نمودارهای تولید شده حالت متقارن تری به خود می‌گیرند. جایی که شبکه‌های تولید شده با تداخلنماهای ۶ روزه و ۶-۱۲ روزه بیشترین پراکندگی و کمترین مقدار همبستگی ۶۶ و ۷۱ درصد را دارند. همچنین بیشترین همبستگی مربوط به نقشه‌ی تولید شده با ۸ اتصال و تداخلنماهای ۶-۱۲-۱۸-۲۴-۳۰-۳۶-۴۲-۴۸ روزه با مقدار ۸۱ درصد می‌باشد. نتایج بدست آمده در بالا نشان می‌دهند که با افزایش تعداد

برای بررسی بیشتر این موضوع در منطقه‌ی مورد مطالعه سه پوشش مختلف کشاورزی، شهری و خاکی در نظر گرفته و بعد از میانگین گیری از نقشه‌ی بایاس فاز از سه محدوده‌ی مشخص شده، سری زمانی این سه محدوده رسم شده‌اند. این نکته قابل ذکر است که سری‌های زمانی در نظر گرفته شده از اختلاف نقشه‌ی با اتصال کامل در الگوریتم SBAS و نقشه‌های بدست آمده با تعداد اتصال ۱ تا ۸ هستند. شکل (۱۰) سه محدوده‌ی مشخص شده‌ی شهری، کشاورزی و خاکی قابل مشاهده هستند. همانطور که از شکل (۱۱) مشخص است در هر سه پوشش (خاکی، شهری و کشاورزی) مقادیر میانگین‌های بایاس فاز یک الگوی مشابه و کاهشی را با افزایش تعداد اتصال و طول تداخل نما را دنبال می‌کنند.

جدول ۱- مقادیر میانگین اتصال ۱ و ۸ بایاس فاز در سه محدوده‌ی مشخص شده.

اختلاف مقدار میانگین بایاس فاز (اتصال ۱ و ۸) mm/year	مقدار میانگین بایاس فاز (اتصال ۸) mm/year	مقدار میانگین بایاس فاز (اتصال ۱) mm/year	
-(۱/۲۲۸)	-(۱/۹۲)	-(۰/۶۹۲)	محدوده کشاورزی
-(۰/۲۵)	-(۰/۲۰)	-(۰/۴۵)	محدوده شهری
-(۰/۶۷۲)	-(۱,۱۰۲)	-(۰/۴۳)	محدوده خاکی

در هر سه پوشش خاکی، شهری و کشاورزی با افزایش تعداد اتصال و طول تداخل نماهای استفاده شده در شبکه مقدار بایاس فاز کاهش پیدا کرده‌است. بیشترین تأثیر بایاس فاز مربوط به منطقه‌ی کشاورزی با اختلاف ۱/۲۲۸- بین اتصال ۱ تا ۸ و کمترین تأثیر بایاس فاز مربوط به منطقه‌ی شهری با اختلاف ۰/۲۵- می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که بایاس فاز در تعداد اتصالات در پردازش داده‌های InSAR بر روی دقت و نتایج نهایی در مناطق شهری تأثیر چندانی نداشته و بیشترین تأثیر این مقدار بایاس مرتبط با مناطق کشاورزی و حاوی پوشش گیاهی است.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از تحلیل سری زمانی تداخلسنجی راداری تحت الگوریتم SBAS رفتار بایاس فاز در شبکه‌های مختلف تداخل نما مورد بررسی قرار گرفت. بعد از

مقایسه‌ی نقشه‌ی تولید شده با اتصال کامل در الگوریتم SBAS و نقشه‌ی تولید شده در الگوریتم PSI، با استفاده از نقشه‌ی همبستگی و مقدار همبستگی بالای ۹۶ درصد نتایج نشان داد که دو نقشه به طور نزدیکی با یکدیگر هم‌تراز شده و الگوهای مشابهی نشان می‌دهند. در نهایت نقشه‌ی تولید شده با روش SBAS با اتصال کامل بدون بایاس فاز، و این نقشه به عنوان مبنا در نظر گرفته شد در ادامه برای بررسی بایاس فاز، شبکه‌های تداخلنمای متفاوت از نظر تعداد اتصال و طول تداخل نما در الگوریتم SBAS مورد بررسی قرار گرفتند. همان‌طور که نقشه‌های بایاس و نقشه‌های همبستگی نشان دادند هر چه تعداد اتصال بین تصاویر افزایش پیدا کرد، تأثیر بایاس فاز کم شد، جایی که از اتصال ۱ تا ۵ تغییرات شدید بایاس فاز با مقادیر همبستگی ۶۶/۴ تا ۷۷/۸ درصد و از اتصال ۷ تا ۸ تغییرات بایاس فاز با مقادیر همبستگی ۸۰/۵ تا ۸۱/۳ درصد بسیار نرم و کمتر شد. بهترین شبکه، شبکه با اتصال ۸ و بایاس ترین شبکه نیز شبکه با اتصال ۱ شد. در نهایت به این نتیجه رسیدیم که هر چه طول تداخل نماهای استفاده شده و تعداد اتصال بین تصاویر بیشتر باشد مقدار بایاس فاز کمتر می‌شود. در مرحله‌ی بعد، پس از بررسی و تأثیر بایاس فاز در محدوده‌ها با پوشش‌های متفاوت نتایج نشان داد بایاس فاز در محدوده‌ی کشاورزی با افزایش تعداد اتصال و طول تداخل نماهای بکار برده شده در شبکه، تغییرات شدید تری نسبت به دو محدوده‌ی دیگر دارد. جایی که اختلاف بایاس فاز در اتصال ۱ تا اتصال ۸ بین تصاویر در این محدوده برابر ۱/۲۲۸- شد. در پوشش شهری هم بایاس فاز نسبت به دو پوشش دیگر حداقل مقدار ۰/۲۵- را دارد، و با افزایش تعداد اتصال بین تصاویر تفاوت کمتری نسبت به پوشش کشاورزی داشتیم.

برای کارهای آینده نیز پیشنهاد می‌شود تأثیر بایاس فاز در سنجنده‌هایی با دوره‌ی زمانی کوتاه تر (بررسی تداخل نماهای کوتاه تر از ۶ روز) بررسی شود. همچنین نوع خاک نیز بر روی فاز ناشی از بایاس بررسی شود.

سپاسگزاری

در پایان نویسندگان قصد دارند از تمام افراد و سازمان‌هایی که زمینه ایجاد این پژوهش را فراهم آورده‌اند تشکر کنند: آژانس فضایی اروپا جهت رایگان در اختیار قرار دادن داده‌های سنتینل-۱ و نرم افزارهای رایگان.

مراجع

- [۱] Gabriel, Andrew K., Richard M. Goldstein, and Howard A. Zebker. "Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 94.B7 (1989): 9183-9191.
- [۲] Wright, T. J., Parsons, B. E. and Lu, Z., 2004, Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR, *Geophys. Res. Lett.*, 31,L01607, doi:10.1029/2003GL018827.
- [۳] Devanthery, N., Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., & Crippa, B. (2018). Deformation monitoring using Sentinel-1 SAR data. Paper presented at the Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings
- [۴] Terzaghi, K. (1925). Principles of soil mechanics, IV—Settlement and consolidation of clay. *Engineering News-Record*, 95(3), 874-878.
- [۵] Zisk, S. H. "A new, earth-based radar technique for the measurement of lunar topography." *The moon* 4.3-4 (1972): 296-306.
- [۶] Bamler, R., Principles of synthetic aperture radar. *Surveys in Geophysics*, 2000. 21(2-3): p. 147-157.
- [۷] Ferretti, A., C. Prati, and F.L. Rocca. Permanent scatterers in SAR interferometry. in *Remote Sensing*. 1999. International Society for Optics and Photonics.
- [۸] Massonnet, D. and K.L. Feigl, Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *REVIEWS OF GEOPHYSICS-RICHMOND VIRGINIA THEN WASHINGTON-*, 1998. 36: p. 441-500.
- [۹] Ferretti, A., C. Prati, and F.L. Rocca. Permanent scatterers in SAR interferometry. in *Remote Sensing*. 1999. International Society for Optics and Photonics.
- [۱۰] Tapete, D., Fanti, R., Cecchi, R., Petrangeli, P., & Casagli, N. (2012). Satellite radar interferometry for monitoring and early-stage warning of structural instability in archaeological sites. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9(4), S10-S25.
- [۱۱] Berardino, P., et al., A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2002. 40(11): p. 2375-2383.
- [۱۲] Dehghani, M., et al., InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. *Geophysical Journal International*, 2009. 178(1): p. 47-56.
- [۱۳] Cigna, F., Osmanoğlu, B., Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., & Wdowinski, S. (2012). Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 117, 146-161.
- [۱۴] M. Voegelé, R. Frauenfelder, and Y. Larsen, "Displacement monitoring at Svartevatn dam with interferometric SAR," in 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012, pp. 3895-3898.
- [۱۵] pp. 3895-3898. [۴] D. Perissin, C. Prati, F. Rocca, and T. Wang, "PSInSAR analysis over the Three Gorges Dam and urban areas in China," in 2009 Joint Urban Remote Sensing Event, 2009, pp. 1-5.
- [۱۶] Karimzadeh, S., Characterization of land subsidence in Tabriz basin (NW Iran) using InSAR and watershed analyses. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2015: p. 1-15.
- [۱۷] Pepe, Antonio. "Multi-temporal small baseline interferometric SAR algorithms: Error budget and theoretical performance." *Remote Sensing* 13.4 (2021): 557.
- [۱۸] Morishita, Yu, et al. "LiCSBAS: An open-source InSAR time series analysis package integrated with the LiCSAR automated Sentinel-1 InSAR processor." *Remote Sensing* 12.3 (2020): 424.
- [۱۹] Singhroy, V. "SAR integrated techniques for geohazard assessment." *Advances in Space Research* 15.11 (1995): 67-78.
- [۲۰] Ansari, Homa, Francesco De Zan, and Alessandro Parizzi. "Study of systematic bias in measuring surface deformation with SAR interferometry." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 59.2 (2020): 1285-1301.
- [۲۱] Maghsoudi, Yasser, et al. "Characterizing and correcting phase biases in short-term, multilooked interferograms." *Remote Sensing of Environment* 275 (2022): 113022.
- [۲۲] Falabella, F., & Pepe, A. (2022). On the Phase Nonclosure of Multilook SAR Interferogram Triplets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-17.

- [۲۳] Yujine Zheng, Heresh Fattahi, ET 1L 2019 On Closure Phase and Systematic Bias in Multi-looked SAR Interferometry: IEEE TRANSACTION OF GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING . DOI 10.1109/TGRS.2022.3167648, IEEE
- [۲۴] Gurrola, E. M., Rosen, P. A., & Sacco, G. F. (2015). ISCE updates: Improved InSAR processing and new tools for science analysis. In IGARSS 2015-2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 3156-3159). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326544>
- [۲۵] Yunjun, Z., Fattahi, H., & Amelung, F. (2019). Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. Computers & Geosciences, 133, 104331.
- [۲۶] Jolivet, R., R. Grandin, C. Lasserre, M. P. Doin, and G. Peltzer (2011), Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data, Geophysical Research Letters, 38(17), L17311, doi:10.1029/2011GL048757.
- [۲۷] Fattahi, H., and F. Amelung (2013), DEM Error Correction in InSAR Time Series, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 51(7), 4249-4259, doi:10.1109/TGRS.2012.2227761.
- [۲۸] Yun, S.-H., Fielding, E.J., Agram, P., Hensley, S., Yun, H., Simons, M., Webb, F., Rosen, P.A., 2020. MintPy: A Python Package for Interferometric Synthetic Aperture Radar Time Series Analysis. Journal of Open-Source Software 5, 2283. <https://doi.org/10.21105/joss.02283>
- [۲۹] Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Xu, X., Wei, M., & Wessel, P. http://topex.ucsd.edu/gmtsar/tar/GMTSAR_2ND_TEX.pdf.
- [۳۰] Hooper, A., Bekaert, D., Hussain, E., & Spaans, K. (2018). StaMPS/MTI manual: Version 4.1 b. School of Earth and Environment, University of Leeds. Retrieved October, 15, 2019.