



سنجش از دور

و

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال چهارم، شماره اول، بهار ۱۳۹۱
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.4, No.1, Spring 2012

۹۷-۱۱۰

معرفی و مقایسه دو روش تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌کننده دائمی به‌منظور اندازه‌گیری فرونشست زمین (مطالعه موردی: جنوب غربی دشت تهران)

زهرا صادقی*^۱، محمدجواد ولدان زوج^۲، مریم دهقانی^۳

۱. کارشناس ارشد سنجش از دور، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. دانشیار، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شیراز

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۷/۱۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۰/۱۰

چکیده

روش‌های سنتی و نوین تداخل‌سنجی راداری با اینکه در برآورد جابه‌جایی بسیار توانمندند، اما به دلیل پاره‌ای محدودیت‌ها، قادر به پایش جابه‌جایی در مناطق عاری از عوارض دست‌ساز بشری با نرخ جابه‌جایی بالا با دسترسی تصاویر راداری با نمونه‌برداری زمانی مناسب نیستند. لذا در این مقاله دو روش جدید به منظور بهبود الگوریتم تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی (روش‌های جدید) در برآورد جابه‌جایی در مناطق خارجی شهری با نرخ جابه‌جایی بالا با رفتار نسبتاً خطی ارائه شده است. روش نخست، تلفیقی از دو روش جدید DePSI (Delft implementation of Persistent Scatterer) و StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterer) و روش دوم بهبودی بر روش StaMPS است. هدف عمده در دو روش، بهبود عملکرد بازیابی فاز پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی است که با روش StaMPS انتخاب شدند. هدف اصلی مقاله، مقایسه عملکرد این دو روش در منطقه واقع در خارج شهر و با رفتار جابه‌جایی سریع است، به همین دلیل منطقه‌ای با حداکثر سرعت جابه‌جایی در جنوب غربی دشت تهران تحت تأثیر پدیده فرونشست به منظور بررسی انتخاب شد. پس از اجرای هر دو روش مورد مطالعه در این منطقه با استفاده از داده‌های مسیر ۱۴۹، نتایج با نقشه نرخ جابه‌جایی متوسط استخراجی از روش تداخل‌سنجی راداری سنتی و با استفاده از داده‌های مسیر ۳۷۸ مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS، با وجود سرعت عملکرد بالاتر تحت تأثیر خطای بازیابی فاز بیشتری قرار دارند و در نتیجه صحت نتایج حاصل از آن کمتر است.

کلیدواژه‌ها: تداخل‌سنجی راداری، پراکنش‌کننده دائمی، فرونشست، الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی، روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولیعصر (عج)، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده نقشه‌برداری، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور
Email: atena_sadeghi_ak@yahoo.com

۱- مقدمه

با ورود ماهواره‌های راداری از دهه ۱۹۹۰، تکنیک تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای به عنوان ابزاری مفید در پایش جابه‌جایی‌های سطح زمین معرفی شد. این روش از نظر صرفه‌جویی در هزینه و زمان، و فراوانی مکانی و زمانی در مقایسه با روش‌های دیگر قابلیت بسیار بالایی دارد؛ تا جایی که امروزه استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به‌جای ترازیبی و سامانه مکان‌یابی جهانی در اندازه‌گیری‌های سطح زمین بسیار تداوم یافته است. در ایران نیز در چند سال اخیر از این تکنیک در پایش تغییر شکل‌های مختلف سطح زمین استفاده شده است. به‌رغم مزیت‌های روش تداخل‌سنجی راداری در مقایسه با دیگر روش‌های پایش جابه‌جایی، این روش دارای عوامل محدودکننده‌ای است که کارایی آن را در بعضی موارد کاهش می‌دهد. به‌طور کلی، در دسترس نبودن تصاویر راداری با توزیع زمانی مناسب نسبت به نرخ جابه‌جایی در منطقه، مؤلفه‌ای است که تمامی روش‌های موجود در تکنیک تداخل‌سنجی راداری را در صحیح برآورد کردن نرخ جابه‌جایی محدود می‌کند. از جمله عوامل محدودکننده تکنیک تداخل‌سنجی راداری سنتی^۱، عدم همبستگی زمانی و هندسی^۲ است. عدم همبستگی زمانی مربوط به تغییر سریع در شکل ظاهری و ویژگی‌های پراکنشی سطح زمین در بازه زمانی بین تصویر پایه^۳ و تصویر پیرو^۴ و عدم همبستگی هندسی ناشی از بلند بودن طول مبنای مکانی (فاصله دو ایستگاه تصویربرداری) بین دو تصویر پایه و پیرو است (Sadeghi et al., 2011c).

تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی^۵ که نخستین بار فرتی آن را مطرح کرد، به دلیل انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی با رفتار پراکنشی ثابت در زمان، محدودیت‌های روش تداخل‌سنجی راداری سنتی را از بین برد و امکان اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی سطح زمین را حتی به میزان چند میلی‌متر فراهم آورد (Ferreti et al., 2001).

پیکسل‌های پراکنش‌کننده‌های دائمی در طول زمان دارای ویژگی‌های بازپراکنشی^۶ نسبتاً ثابتی هستند و با وجود خط مبنای زمانی و مکانی بزرگ، کوهرنسی بالایی دارند و از عدم همبستگی تصاویر SAR کمتر تأثیر می‌پذیرند. گرچه ارائه این روش گامی مؤثر در کاهش محدودیت‌های تکنیک تداخل‌سنجی راداری سنتی به‌شمار می‌آید، لیکن هر یک از روش‌های پردازش پراکنش‌کننده‌های دائمی دارای معایبی است که استفاده بهینه از آنها را در شرایط مختلف با مشکل مواجه می‌سازد. تا سال ۲۰۰۶ الگوریتم‌های پردازشی متفاوتی مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی ارائه شد که مهم‌ترین ویژگی همگی آنها استفاده از اطلاعات دامنه و نیز مدل جابه‌جایی از پیش تعیین‌شده در شناسایی پراکنش‌کننده‌های دائمی است. به‌دلیل استفاده از اطلاعات دامنه تنها پراکنش‌کننده‌های دائمی دارای بازگشت قوی به سمت سنسور رادار - که عمدتاً عوارض ساخت دست بشرند - شناسایی می‌گردند. نیاز به دانش مدل جابه‌جایی از پیش تعیین‌شده نسبت به زمان و در دست نبودن ساختارهای متعدد دست‌ساز بشر در منطقه مورد مطالعه، از عوامل محدودکننده این الگوریتم‌ها از جمله الگوریتم DePSI به‌شمار می‌آید (Ketelaar, 2008 and Kampes, 2005). الگوریتم StaMPS^۷ را هوپر در سال ۲۰۰۶ معرفی کرد که به علت استفاده از اطلاعات فاز علاوه بر اطلاعات دامنه در مرحله انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی می‌تواند در مناطق غیرشهری (بدون عوارض دست‌ساز بشر) و بدون نیاز به دانش رفتار جابه‌جایی نسبت به زمان، پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی را تعیین و نرخ جابه‌جایی را برآورد کند (Hooper et al. 2007).

1. Conventional Interferometry
2. Temporal and Geometrical decorrelation
3. Master
4. Slave
5. Persistent Scatterer
6. Back-Scatterer
7. Stanford Method for Persistent Scatterer

از طرف دیگر با توجه به عدم کارایی الگوریتم StaMPS در مناطق با نرخ جابه‌جایی بالا و ناتوانی الگوریتم DePSI در انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی در مناطق عاری از عوارض دست‌ساز بشر، روش جدیدی مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی به منظور برآورد جابه‌جایی در مناطق خارج شهری و با نرخ جابه‌جایی بالا با عنوان الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی ارائه شد (Sadeghi et al., 2011c, 2011b). این روش از الگوریتم StaMPS در مرحله انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی و از الگوریتم DePSI در مرحله بازیابی فاز استفاده می‌کند. از آنجا که هر دو روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS و الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی، گامی مؤثر در روش‌های پردازشی پراکنش‌کننده‌های دائمی در برآورد جابه‌جایی با رفتار نسبتاً خطی با نرخ بالا در مناطق عاری از عوارض دست‌ساز بشر (خارج شهری) قلمداد می‌شوند، مقایسه نحوه عملکرد و میزان موفقیت این دو روش هدف اصلی پژوهش حاضر است.

در این مقاله منطقه مورد مطالعه، داده‌های مورد استفاده و معرفی دو روش پیشنهادی مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی در بخش ۲، نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش‌ها در منطقه مورد مطالعه در بخش ۳، مقایسه دو روش ارائه شده در بخش ۴ و نتیجه‌گیری در بخش ۵ ارائه شده‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد

استفاده

به منظور مقایسه عملکرد دو روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS و الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر

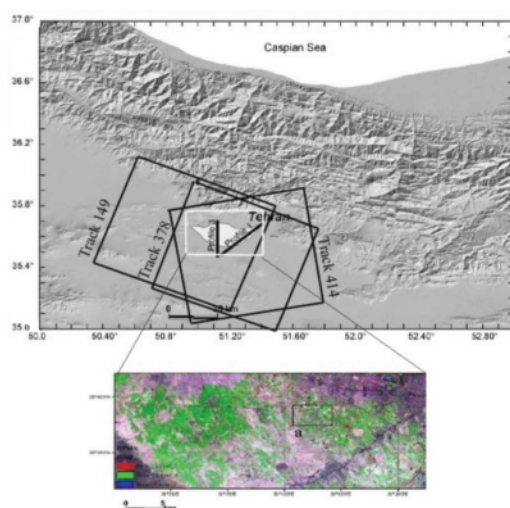
این در حالی است که در مناطق با نرخ جابه‌جایی بالا، شرط مورد نیاز مرحله بازیابی فاز^۱ که شرط نمونه‌برداری نایکوئیست^۲ نامیده می‌شود، نقض می‌گردد و این الگوریتم در برآورد جابه‌جایی موفق عمل نمی‌کند (Dehghani et al., 2009c).

دهقانی و همکاران در سال ۲۰۰۹ به منظور افزایش کارایی الگوریتم StaMPS در مناطق با نرخ جابه‌جایی بالا، روش تلفیقی^۳ را ارائه کردند (Dehghani, et al., 2009c). در این روش که تلفیق روش تداخل‌سنجی راداری سنتی و الگوریتم StaMPS است. کوشش شد که ابتدا نرخ جابه‌جایی کاهش یابد و سپس از شرط نایکوئیست در عملیات بازیابی فاز استفاده شود. بدین منظور مؤلفه خطی جابه‌جایی که در منطقه مورد مطالعه مؤلفه اصلی جابه‌جایی بود به کمک پشته‌سازی^۴ اینترفروگرام‌های همبسته که به وسیله ماتریس کوهرنسی (Rocca, 2007) انتخاب شدند برآورد و از فاز پراکنش‌کننده‌های دائمی کسر شد. لیکن نیاز به وجود تصاویر با نمونه‌برداری زمانی مناسب و در نتیجه تشکیل اینترفروگرام‌های همبسته، عامل محدودکننده این روش است. لذا به منظور بهبود الگوریتم StaMPS در برآورد جابه‌جایی با نرخ بالا بدون نیاز به تشکیل اینترفروگرام‌های همبسته به منظور استخراج نرخ جابه‌جایی از روش سنتی، روش جدیدی ارائه شد که از الگوریتم پریودوگرام در تقریب اولیه مؤلفه خطی جابه‌جایی استفاده می‌کرد (Sadeghi et al., 2011a, 2011c, 2012). در این روش پیش از مرحله بازیابی فاز الگوریتم StaMPS به منظور برقراری شرط نمونه‌برداری نایکوئیست، مؤلفه خطی جابه‌جایی از فازهای بازیابی نشده پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی به روش پریودوگرام^۵ (Ferreti et al., 2001). تقریب زده می‌شوند و از فاز اولیه پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی کسر می‌گردند. سپس با فرض برقراری شرط نمونه‌برداری نایکوئیست، مرحله بازیابی فاز و برآورد مؤلفه جابه‌جایی به روش StaMPS انجام می‌شود. در مقاله حاضر از این روش با عنوان روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS یاد می‌شود.

1. Phase Unwrapping
2. Nyquist
3. Hybrid method
4. Stacking
5. Periodogram

پرازشی زمان‌بری خواهند داشت. به‌منظور سرعت بخشیدن به عملیات، منطقه مورد مطالعه به منطقه‌ای با ابعاد ۴/۵ در ۲/۷ کیلومتر در جنوب‌غربی دشت تهران محدود شد؛ این محدوده مطابق با نقشه جابه‌جایی تهیه‌شده در منطقه دشت تهران به روش تداخل‌سنجی راداری بیشترین تأثیرپذیری را از پدیده فرونشست و حداکثر نرخ جابه‌جایی (۲۵- سانتی‌متر در سال در بازه ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸) را دارد (Dehghani et al., 2009c). داده‌های راداری ENVISAT ASAR که منطقه دشت تهران را پوشش می‌دهد شامل سه مسیر مختلف، دو گذر پایین و یک گذر بالا با شماره‌های مسیر به ترتیب ۳۷۸، ۱۴۹ و ۴۱۴ است (شکل ۱). از آنجا که داده‌های مربوط به مسیر ۳۷۸ تنها در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ است، لذا از داده‌های این مسیر در آنالیز پراکنش‌کننده‌های دائمی استفاده نشد. تعداد ۲۲ تصویر از مسیر ۱۴۹ (گذر پایین) مربوط به بازه زمانی ۲۰۰۳ و ۲۰۰۸ از آژانس فضایی اروپا خریداری شد. نوع تصویربرداری ماهواره در گذر پایین ۱۲ است که در آن زاویه دید ماهواره برای مرکز تصویر در گذر پایین ۲۳ درجه قرار دارد.

پراکنش‌کننده‌های دائمی در منطقه‌ای عاری از عوارض دست‌ساز بشر و دارای جابه‌جایی با رفتار نسبتاً خطی و نرخ بالا، منطقه جنوب‌غربی دشت تهران انتخاب شد (شکل ۱). این منطقه دارای پوشش گیاهی تحت تأثیر پدیده فرونشست ناشی از استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی است و مطابق با گزارش سازمان نقشه‌برداری کشور از اندازه‌گیری‌های شبکه ترازبایی دقیق کشور در سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۲ حداکثر نرخ ۲۰ cm/yr و در سال ۲۰۰۵ حداکثر نرخ ۲۳ cm/yr در منطقه استخراج شده است (Arabi, et al., 2005 and Amighpey et al., 2006). منطقه مورد مطالعه از شمال به رشته کوه البرز، از جنوب به کوه‌های آراد و فشاپویه، از شرق به ارتفاعات سه‌پایه، قوچک، بی‌بی‌شهربانو و در ادامه مسدود به رودخانه شور تا محمودآباد خرابه و از غرب به محدوده شرقی دشت کرج، یعنی از وردآورد تا شهربار در امتداد جاده شهربار به رباط‌کریم محدود می‌شود. از آنجا که دو روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS و الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی در مناطق وسیع با تراکم بالای پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی عملیات



شکل ۱. موقعیت دشت تهران که تحت تأثیر پدیده فرونشست قرار دارد. مسیرهای مختلف داده‌های راداری که منطقه فرونشست را می‌پوشاند (مربع‌های سیاه رنگ) به همراه موقعیت منطقه فرونشست (پلیگون سفیدرنگ) که در بالای شکل نشان داده شده است. در شکل پایین تصویر ETM⁺ منطقه مورد نظر با ترکیب رنگی ۷/۴ و ۲ در کانال‌های قرمز، سبز و آبی به تصویر کشیده شده است. کادر سیاه‌رنگ (a) منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۲-۲- روش‌های تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، روش‌های پردازشی پراکنش‌کننده‌های دائمی که از آنالیز دامنه به‌منظور شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی استفاده می‌کنند (از جمله روش DePSI)، تنها عوارض دست‌ساز بشر را که دارای بازگشت‌های قوی به سمت سنجنده هستند، به عنوان پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی برمی‌گزینند و قادر به انتخاب پیکسل‌های با رفتار ثابت در زمان در مناطق خارج شهری نیستند. از طرف دیگر روش StaMPS که به علت استفاده از آنالیز فاز - علاوه بر آنالیز دامنه - قادر به شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی در مناطق عاری از عوارض دست‌ساز بشر است، در مرحله بازیابی فاز به دلیل لزوم برقراری شرط نمونه‌برداری نایکوئیست، در مناطق با نرخ جابه‌جایی بالا و با در دسترس نبودن داده‌هایی با نمونه‌برداری زمانی مناسب، دچار خطای زیادی می‌شود و نرخ جابه‌جایی را بسیار کمتر از واقعیت برآورد می‌کند. لذا طی تحقیقات گذشته دو روش متفاوت مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی - الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده دائمی و روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS - به‌منظور برآورد جابه‌جایی در مناطق خارج شهری با نرخ جابه‌جایی بالا و رفتار نسبتاً خطی ارائه شد که جزئیات این دو روش را می‌توان در پژوهش صادقی و دیگران (2012, 2011c, 2011b, 2011a) یافت.

در هر دو روش با استفاده از تصاویر راداری اینترفروگرام‌های مستقل نسبت به یک تصویر به عنوان تصویر پایه شکل می‌گیرد. تصویر پایه به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که مجموع عدم همبستگی که تابعی از خط مبنای مکانی، خط مبنای زمانی و فرکانس مرکزی داپلر است، در تمام اینترفروگرام‌ها کمینه گردد (Hooper et al., 2007). پیکسل‌های پراکنش‌کننده

دائمی مطابق با الگوریتم StaMPS و با استفاده از همبستگی مکانی انتخاب می‌شوند. کاندیداهای پیکسل‌های پراکنش‌کننده در ابتدا بر پایه شاخص پراکنش‌کننده دامنه انتخاب می‌شوند (Ferreti et al., 2001). سپس استحکام فاز برای هر کاندیدا در فرایندی تکراری آنالیز می‌شود. پیکسل پراکنش‌کننده دائمی پیکسلی است که سهم نویز فاز در آن در مقایسه با سیگنال کوچک باشد. در آنالیز فاز، اندازه‌ای از سطح نویز فاز از طریق تقریب و حذف سهم‌های همبسته در مکان فاز محاسبه می‌شود که مشابه اندازه‌ای از سطح کوه‌رنسی است. پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی نهایی بر پایه احتمال پراکنش‌کننده دائمی بودن تعیین می‌شوند، که از شاخص پراکنش‌کننده دامنه و کوه‌رنسی زمانی تقریب زده می‌شود. پس از انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی، مطابق با الگوریتم StaMPS، مهم‌ترین سهم بخش ناهمبسته در مکان سیگنال^۱ که مؤلفه غیرهمبسته در مکان مربوط به خطای زاویه دید^۲ و سهم تصویر پایه در بخش غیرهمبسته در مکان سیگنال است، تقریب زده می‌شود و از فاز اولیه قبل از بازیابی فاز حذف می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد مطابق با شرط نمونه‌برداری نایکوئیست، به منظور استفاده از الگوریتم StaMPS اختلاف فاز پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی همسایه می‌بایست از عدد π کوچک‌تر باشد، و این شرط در مناطق با نرخ جابه‌جایی بالا و فاقد تصاویر راداری با توزیع زمانی مناسب نقض می‌شود. دو روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS و الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی دو راهکار متفاوت برای مرحله بازیابی فاز و برآورد جابه‌جایی ارائه کرده‌اند، که در اینجا دو استراتژی متفاوت به منظور بازیابی فاز و برآورد نرخ جابه‌جایی به تفکیک شرح داده شده می‌شود، لازم به ذکر است که از

1. Spatially Uncorrelated Part of Signal
2. Look Angle Error

جابه‌جایی برآورد شده) در هر پیکسل پراکنش‌کننده دائمی شامل فاز ناشی از اثر اتمسفر، خطای مداری و جابه‌جایی مدل‌نشده است، که با اجرای یک فیلتر بالاگذر زمانی سهم جابه‌جایی مدل‌نشده از اتمسفر و خطای مداری جدا می‌شود و از سهم فاز اولیه هر پیکسل پراکنش‌کننده دائمی کسر می‌گردد. در آخرین مرحله بازیابی فاز و برآورد مؤلفه خطی جابه‌جایی از فازهای عاری از اثر اتمسفر و خطای مداری و جابه‌جایی غیرخطی دوباره انجام می‌شود. در این روش به منظور شناسایی و حذف خطای بازیابی فاز، آرک‌هایی با مقادیر بزرگ باقی‌مانده فاز پس از مرحله بازیابی فاز حذف می‌شوند، لذا تعدادی از پیکسل‌های پراکنش‌کننده انتخاب‌شده از دست خواهند رفت (Sdadeghi et al., 2011b). به‌منظور حذف آرک‌های دچار خطای بازیابی فاز از متغیر فاکتور واریانس پسین^۲ استفاده می‌شود که مطابق رابطه (۱) به بردار باقی‌مانده‌های فاز در هر پیکسل پراکنش‌کننده دائمی و ماتریس واریانس کوواریانس مشاهدات فاز وابستگی دارد.

رابطه (۱)

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{e^T Q_{\phi}^{-1} e}{r}$$

که e بردار باقی‌مانده‌های فاز (اختلاف فاز مشاهداتی از فاز جابه‌جایی برآوردشده) و Q_{ϕ} ماتریس واریانس کوواریانس مشاهدات فاز و r درجه آزادی مدل است. هر چه اندازه بردار باقی‌مانده‌های فاز بزرگ‌تر باشد، این فاکتور مقدار بزرگ‌تری به خود نسبت می‌دهد. شکل ۲ فلوجارت روش پیشنهادی را نمایش می‌دهد.

آنجا که در بسیاری از دشت‌های ایران از جمله دشت‌های تهران، نیشابور و مشهد، به‌دلیل برداشت مداوم از سفره، مقدار مؤلفه خطی فرونشست در مقایسه با تأثیرات فصلی بالاست (Dehghani et al., 2009a, 2009b, 2009c, 2010)، لذا مدل جابه‌جایی خطی برای هر دو روش در نظر گرفته شد.

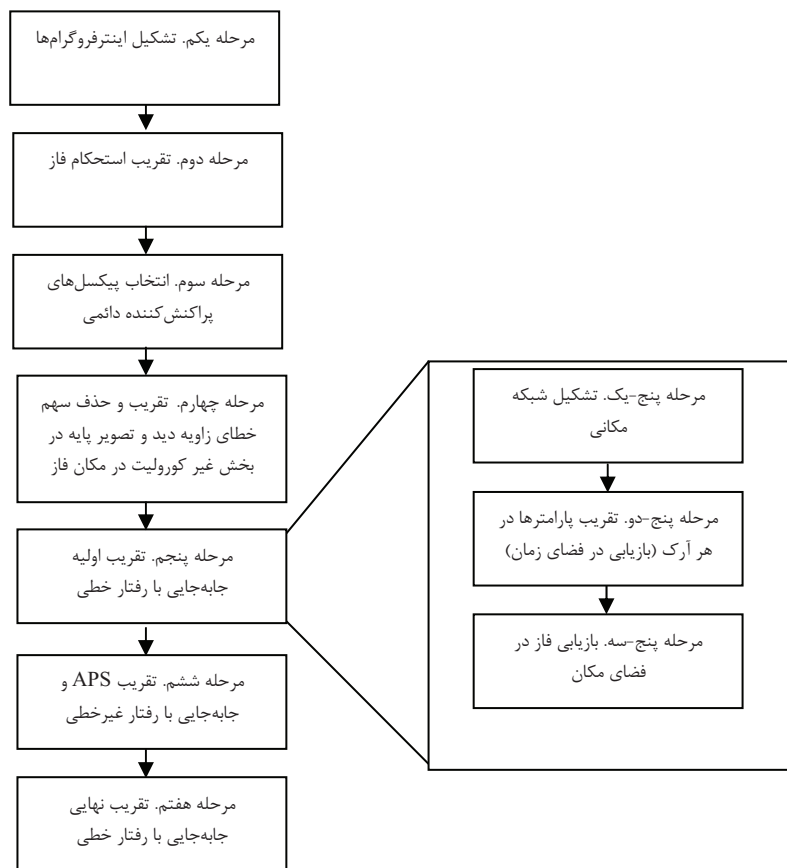
۲-۲-۱- روش بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی

الگوریتم بهبود یافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی نرخ جابه‌جایی بالا را به‌طور مستقیم از فازهای بازیابی نشده در طول فرایند بازیابی فاز تقریب می‌زند. مرحله بازیابی فاز به منظور برآورد ابهام فاز^۱ (سیکل‌های کامل فاز) با استفاده از روش ارائه‌شده در DePSI انجام می‌شود. در واقع این روش از الگوریتم StaMPS در شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی و از الگوریتم DePSI در مرحله بازیابی فاز استفاده می‌کند. در گام نخست پس از شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی و حذف بخش غیرهمبسته در مکان فاز، تقریب اولیه‌ای از مؤلفه خطی جابه‌جایی انجام می‌شود که در این مرحله از طریق اتصال پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی به روش مثلث‌بندی دلونی یک شبکه مکانی و در نتیجه بازیابی نشده نسبی در طول هر آرک ساخته می‌شود. روش بازیابی فاز مطابق با الگوریتم DePSI ابتدا در فضای زمان و سپس در فضای مکان انجام می‌شود. به منظور مرحله بازیابی فاز در فضای زمان از روش بهینه LAMBDA (Kampes and Hanssen, 2004) استفاده می‌شود که طی آن مجهولات ابهام فاز و سرعت جابه‌جایی در طول آرک‌ها برآورد می‌شود.

در مرحله بازیابی فاز در فضای مکان، سرعت جابه‌جایی برای هر پیکسل پراکنش‌کننده دائمی نسبت به یک نقطه مرجع حاصل می‌شود. فاز باقی‌مانده از مرحله بازیابی فاز (اختلاف فاز مشاهداتی از فاز

1. Phase ambiguity
2. Posterior variance factor

معرفی و مقایسه دو روش تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌کننده دائمی به منظور اندازه‌گیری فرونشست زمین



شکل ۲. نمودار مراحل مختلف الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی

دائمی کسر می‌گردد. در واقع در این روش هم پس از تشکیل شبکه مکانی از پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی، سرعت جابه‌جایی نسبی در طول آرک‌ها از روش پریودوگرام تقریب زده می‌شود و پس از حذف آرک‌هایی با مقادیر بزرگ باقی‌مانده فاز حاصل از مرحله قبل، سرعت جابه‌جایی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی باقی‌مانده نسبت به یک نقطه مرجع برآورد می‌شود. در این روش به منظور حذف آرک‌های دچار خطای بازبایی فاز از متغیر کوهرنسی زمانی مطابق رابطه (۲) استفاده می‌شود و آرک‌هایی که کوهرنسی زمانی کمتر از یک حد آستانه دارند حذف می‌شوند.

رابطه (۲)

$$\gamma_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \exp(jW_1^k)$$

که در آن W_1^k تفاوت بین فاز مدل شده و فاز نسبی مشاهداتی برای کمان l ام در اینترفروگرام k ام و N

۲-۲-۲- روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS

روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS بهبودی بر الگوریتم StaMPS برای استفاده در مناطقی با نرخ جابه‌جایی بالا است که در آنها شرط مورد نیاز مرحله بازبایی فاز نقض می‌شود و جابه‌جایی بسیار کمتر از واقعیت برآورد می‌شود. در این روش پس از انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی، فاز پیکسل‌ها به منظور برقراری شرط نمونه‌برداری نایکوئیست طی دو مرحله کاهش می‌یابد. در مرحله یک مطابق با الگوریتم StaMPS بخش غیرهمبسته در مکان فاز برآورد و حذف می‌شود. نوآوری این روش در مرحله دوم این بخش است که مؤلفه خطی جابه‌جایی با فرض آنکه به عنوان مؤلفه اصلی جابه‌جایی باعث نقض شرط نمونه‌برداری نایکوئیست می‌شود، به روش پریودوگرام برآورد می‌شود و از فاز پیکسل‌های پراکنش‌کننده

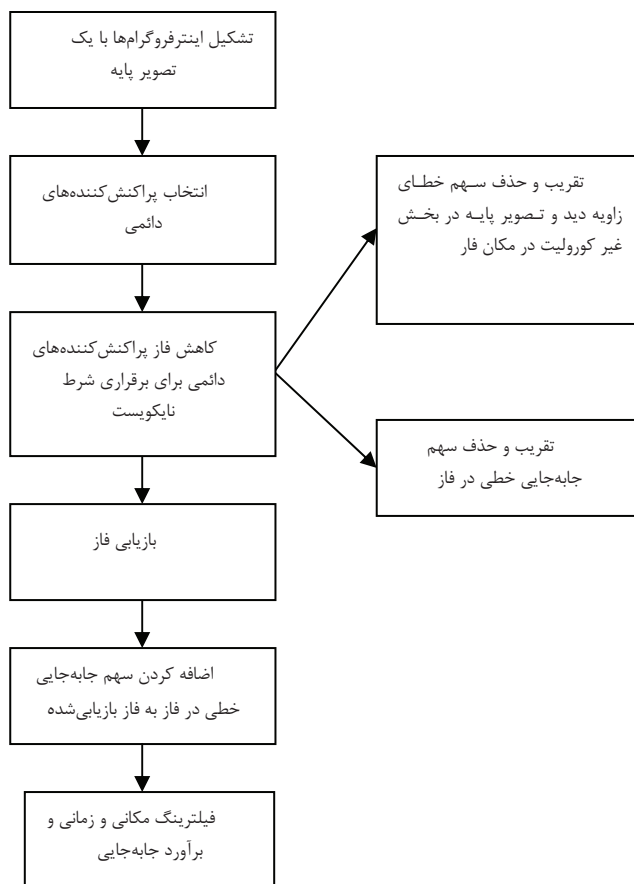
و روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS بر روی داده‌ها و منطقه ارائه شده در بخش ۲ اجرا شد. تصویر پایه در هر دو روش با بیشینه کردن همبستگی خط مبنای مکانی، زمانی و داپلر، تصویر ۲۴ دسامبر ۲۰۰۴ تعیین شد و کاندیداهای پیکسل‌های پراکنش کننده دائمی با در نظر گرفتن حد آستانه ۰/۴ برای شاخص پراکنندگی دامنه شناسایی و در نهایت پس از آنالیز فاز کاندیدا ۶۸۰ پیکسل پراکنش کننده دائمی انتخاب شدند. پس از انتخاب پیکسل‌های پراکنش کننده دائمی، بخش فاز غیرهمبسته در مکان ناشی از خطای زاویه دید و فاز غیرهمبسته در مکان از تصویر پایه برآورد و از فاز اولیه پیکسل‌های پراکنش کننده دائمی حذف شد.

تعداد اینترفروگرام‌ها است.

پس از کسر سهم فاز جابه‌جایی برآورد شده به صورت بازیابی نشده (در بازه $[-\pi, \pi]$) از سهم فاز اولیه به ازای پیکسل‌های پراکنش کننده دائمی با فرض برقراری شرط نمونه برداری نایکوئیست، بازیابی فاز برای فاز باقی مانده مطابق الگوریتم StaMPS انجام می‌شود و پس از آن فاز جابه‌جایی تقریب زده شده به فاز حاصل از مرحله بازیابی فاز اضافه می‌گردد و مؤلفه جابه‌جایی به روش StaMPS برآورد می‌شود (Sadeghi et al., 2011a). شکل ۳ دیگرام نحوه عملکرد روش پیشنهادی در این بخش را نشان می‌دهد.

۳- نتایج

الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش کننده‌های دائمی



شکل ۳. نمودار مراحل مختلف روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS

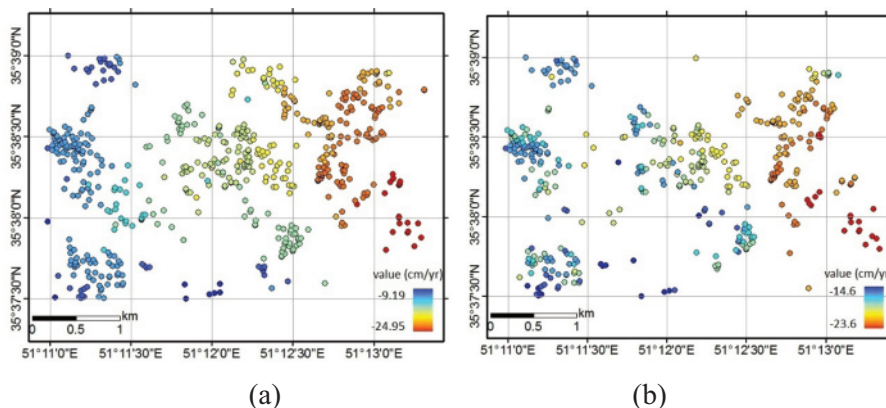
تفسیر کرد. در روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS پس از انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی و حذف بخش غیرهمبسته در مکان فاز، به منظور برقراری شرط نمونه‌برداری نایکوئیست، مؤلفه خطی جابه‌جایی تقریب زده شد و مقدار آن از فاز بازیابی نشده کسر گردید. به منظور تقریب جابه‌جایی، پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی به هم متصل شدند و یک شبکه مکانی ایجاد شد و ابتدا به روش پریودوگرام سرعت جابه‌جایی در هر آرک تقریب زده شد و سپس برای پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی نسبت به یک نقطه مرجع حاصل شد.

با در نظر گرفتن حد آستانه ۰/۴ برای متغیر کوه‌رنسی زمانی، ۴۴۲ پیکسل پراکنش‌کننده دائمی باقی ماندند که علت حذف تعدادی از پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی را علاوه بر خطی نبودن مدل جابه‌جایی، می‌توان خطای بازیابی فاز ناشی از اثر اتمسفر، خطای مداری، و جابه‌جایی مدل نشده برشمرد. شکل ۴ نقشه نرخ استخراجی از الگوریتم بهبود یافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی و از روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که مقادیر متغیر فاکتور واریانس پسین و متغیر کوه‌رنسی زمانی در منطقه مورد مطالعه با روش سعی و خطا انتخاب شده‌اند.

مطابق با آخرین مطالعه‌ای که دهقانی در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ به کمک روش تلفیقی و در بازه ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ به کمک روش تداخل‌سنجی راداری سنتی در منطقه جنوب غربی دشت تهران انجام داد (Dehghani, 2009). مشخص شد که بخش عمده سیگنال جابه‌جایی را سیگنال با رفتار خطی در طول زمان تشکیل می‌دهد و نوسانات فصلی سهم نسبتاً ناچیزی در مقایسه با آن سیگنال از خود نشان می‌دهند. بنابراین مدل جابه‌جایی در این منطقه خطی در نظر گرفته شد و هدف برآورد مؤلفه خطی جابه‌جایی در منطقه مطالعه شد. پس از انجام این مراحل در روش بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی، شبکه مکانی از پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی تشکیل شد و در نهایت پس از تقریب اولیه، سرعت جابه‌جایی در هر پیکسل پراکنش‌کننده دائمی به کمک روش LAMBDA و تقریب و حذف اثر اتمسفر، خطای مداری و جابه‌جایی مدل نشده، جابه‌جایی با رفتار خطی برای پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی برآورد شد.

با در نظر گرفتن حد آستانه ۳/۲ متغیر فاکتور واریانس پسین، در مرحله تکرار دوم حدود ۷۹ درصد پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی اولیه باقی ماندند. در این روش با فرض آنکه اثر اتمسفر، خطای مداری و جابه‌جایی مدل نشده به درستی برآورد و حذف شده باشد، علت حذف تعدادی از پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی اولیه را می‌توان خطی نبودن مدل جابه‌جایی آنها



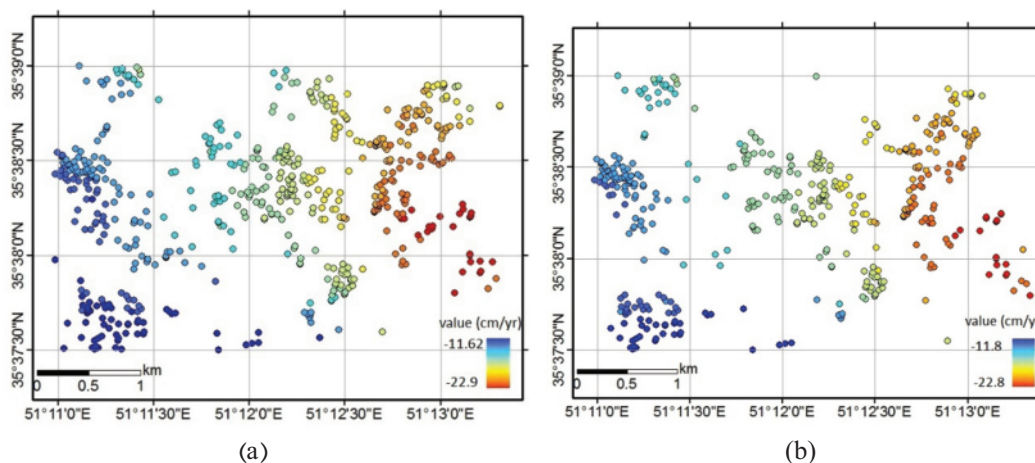
شکل ۴. منطقه مورد مطالعه، جنوب غربی دشت تهران: نرخ متوسط جابه‌جایی در جهت خط دید ماهواره به ازای پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی در بازه زمانی ۱۸ جولای ۲۰۰۳ تا ۲۴ اکتبر ۲۰۰۸ با استفاده از داده‌های مسیر ۱۴۹ و الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی (a) و روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS (b).

۴- بحث

به دلیل توزیع نسبتاً مناسب داده‌های مسیر ۳۷۸ از نظر طول خط مبنای مکانی و زمانی امکان استفاده از روش سنتی وجود داشت. به طور کلی ۱۲ تصویر خام ENVISAT ASAR که مربوط به بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ از مسیر ۳۷۸ است و منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد، مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۵ نقشه نرخ متوسط جابه‌جایی تهیه‌شده را با استفاده از روش SBAS و تصاویر راداری مسیر ۳۷۸ را به ازای پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی باقی مانده الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی (a) و به ازای پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی باقی‌مانده روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS نمایش می‌دهد (Dehghani et al., 2010).

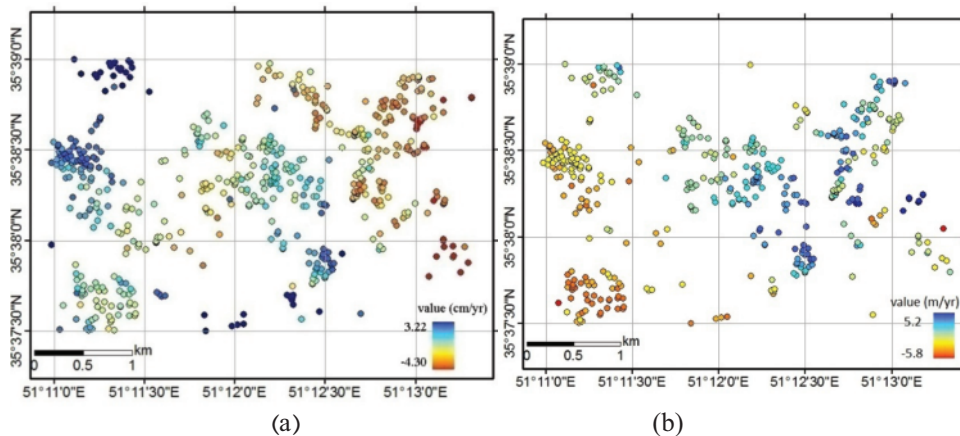
به‌منظور مقایسه بهتر نرخ برآوردی از هر دو روش با نرخ حاصل از روش SBAS نقشه اختلاف نرخ متوسط جابه‌جایی برآوردی با استفاده از روش SBAS از نرخ برآوردی از الگوریتم بهبودیافته مبنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی (شکل ۶. a) و نرخ برآوردی از روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS (شکل ۶. b) ایجاد شد.

از آنجا که یکی از روش‌های ارزیابی صحت نتایج، استفاده از روش مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری دیگری - مستقل از روش مورد مطالعه - و یا مجموعه داده متفاوت با مجموعه داده مورد استفاده است، به‌منظور مقایسه عملکرد دو روش متفاوت مورد مطالعه نتایج هر روش را جداگانه با نتایج حاصل از روش conventional Small Baseline Subset (SBAS) و داده‌های مسیر ۳۷۸ در منطقه مورد مطالعه مقایسه کردیم. با توجه به اینکه در مطالعات انجام‌شده در ایران، نرخ جابه‌جایی حاصل از روش SBAS دارای خطایی کمتر از ۱ cm/yr نسبت به شبکه ترازیبی دقیق و مدل جهانی GPS است و این مقدار در مقایسه با نرخ جابه‌جایی در منطقه مورد مطالعه ناچیز فرض می‌شود و از طرف دیگر روش SBAS به علت استفاده از اینترفروگرام‌های همبسته کمتر تحت تأثیر خطای بازیبی فاز قرار می‌گیرد، لذا هر کدام از روش‌های مورد مطالعه با داده‌های مسیر ۱۴۹ که دارای نتایج با شباهت بیشتری به نتایج روش SBAS با داده‌های مسیر ۳۷۸ باشد، موفقیت بیشتری در مقایسه با روش دیگر در برآورد جابه‌جایی با نرخ بالا و رفتار نسبتاً خطی خواهد داشت.



شکل ۵. منطقه مورد مطالعه، جنوب غربی دشت تهران: نرخ متوسط جابه‌جایی در جهت خط دید ماهواره در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ با استفاده از داده‌های مسیر ۳۷۸ و روش SBAS به ازای پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی باقی‌مانده حاصل از اجرای الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی (a) و روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS (b).

معرفی و مقایسهٔ دو روش تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌کننده دائمی به منظور اندازه‌گیری فرونشست زمینی



شکل ۶. منطقه مورد مطالعه، جنوب غربی دشت تهران: اختلاف نرخ متوسط برآوردشده به ازای پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی از الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی (a) و روش افزایش کارایی الگوریتم *StaMPS* (b) از نرخ متوسط برآورد شده از روش SBAS با استفاده از تصاویر مسیر ۳۷۸.

SBAS به‌ترتیب $4/30$ cm/yr، $1/2$ cm/yr و حدود صفر است. و همان‌طور که از شکل a.۵ مشخص است حداکثر مقدار اختلاف مربوط به قسمتی از منطقه با حداکثر نرخ فرونشست است. این در حالی است که در شکل b.۶، در اکثر بخش‌ها رفتار سیستماتیکی دیده می‌شود و اندازه حداکثر مقدار این اختلاف (RMSE) نرخ برآوردی از روش افزایش کارایی الگوریتم *StaMPS* و متوسط اختلاف نرخ برآوردی الگوریتم از نرخ روش SBAS به‌ترتیب $5/80$ cm/yr، $1/7$ cm/yr و $1/3$ cm/yr است، که نشان می‌دهد روش افزایش کارایی الگوریتم *StaMPS* در برآورد نرخ جابه‌جایی نسبت به الگوریتم بهبود یافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی دارای خطای بیشتری در برآورد جابه‌جایی است.

همان‌طور که از مقایسه دو شکل a.۴ و b.۴ نمایان است، خطای بازیابی فاز در نقشه نرخ برآوردی از روش افزایش کارایی الگوریتم *StaMPS* به مراتب بیشتر از نقشه نرخ برآوردی از الگوریتم بهبود یافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی است. از طرف دیگر، مقایسهٔ نرخ حاصل از دو روش مورد بررسی با نرخ استخراجی از روش SBAS با داده‌های مجزا، خطای سیستماتیک‌تری را در نرخ برآوردی روش افزایش کارایی الگوریتم *StaMPS* نشان می‌دهد. لذا خطای بازیابی فاز در روش

متفاوت بودن بازه زمانی دو مجموعه تصویر راداری (۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ و ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸) و در نتیجه تغییر نرخ فرونشست بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ و همچنین خطای روش مورد بررسی از دلایل اصلی ایجاد نقشه اختلاف به شمار می‌آیند، که مسلماً هر چه سهم تأثیر خطای روش مورد بررسی در این نقشه بیشتر و اثر آن سیستماتیک‌تر باشد، برآورد جابه‌جایی با موفقیت کمتری صورت گرفته است. رفتار غیرسیستماتیک (نویزی) در نقشه اختلافات را می‌توان به وجود خطای نویز در نرخ برآوردی روش مورد مطالعه نسبت داد. همان‌طور که از شکل a.۶ نمایان است، به جز در بخش شمال غربی و شرقی که رفتار سیستماتیکی در آن مشاهده می‌شود، در بقیه قسمت‌ها تنها رفتار نویزی وجود دارد. رفتار سیستماتیک در نقشهٔ اختلاف را می‌توان به اختلاف بین الگوی فرونشست در دو مجموعه داده (Dehghani, 2009c) و یا به تغییر نرخ فرونشست بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ و یا خطای الگوریتم بهبود یافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی نسبت داد. اندازه حداکثر مقدار این اختلاف (RMSE) نرخ برآوردی از الگوریتم بهبود یافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی و متوسط اختلاف نرخ برآوردی الگوریتم از نرخ روش

الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی به دلیل استفاده از روش LAMBDA در مقایسه با روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS سرعت عملکرد پایین‌تری در مناطق وسیع با تراکم بالای پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی دارد.

یکی دیگر از دلایل بیشتر بودن خطای بازیابی فاز روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS در مقایسه با الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی، وجود اثر اتمسفر و خطای مداری و جابه‌جایی غیرخطی در منطقه است. در روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS پس از تشکیل آرک‌ها، با توجه به همبستگی بالای اثر اتمسفر و خطای مداری در فضای مکان (Ketelaar, 2008) و با فرض ناچیز بودن جابه‌جایی غیرخطی در منطقه، از اثر پدیده‌های ذکرشده در طول آرک‌ها صرف‌نظر شد. اما توجه به این نکته مهم است که در صورت وجود آرک‌هایی با طول بلند (بلندتر از حد همبستگی اثر اتمسفر و خطای مداری در فضای مکان) سهم فاز نسبی ناشی از اثر اتمسفر و خطای مداری ناچیز نخواهد بود. همچنین در بعضی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی در منطقه مورد مطالعه، نمی‌توان از رفتار غیرخطی جابه‌جایی صرف‌نظر کرد. بنابراین مرحله حذف اثر اتمسفر و خطای مداری و جابه‌جایی غیرخطی در منطقه در الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی، از مزایای این روش در مقایسه با روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS به شمار می‌آید.

۵- نتیجه‌گیری

با وجود مزیت‌های روش تداخل‌سنجی راداری به دیگر روش‌های پایش جابه‌جایی، این روش دارای عوامل محدودکننده‌ای است که کارایی آن را در بعضی موارد کاهش می‌دهد. به طور کلی در مناطق عاری از عوارض دست‌ساز بشر با نرخ جابه‌جایی بالا (بالاتر از 15cm/yr) که تصاویر راداری با توزیع زمانی مناسبی در اختیار نیست هیچ کدام از روش‌های موجود تداخل‌سنجی

افزایش کارایی الگوریتم StaMPS را می‌توان علت اصلی نرخ برآوردی نادرست دانست. یکی از دلایل اصلی خطای بازیابی فاز در این روش، استفاده از روش پریودوگرام به منظور برآورد ابهامات فاز و مؤلفه خطی جابه‌جایی است. از آنجا که مجهول ابهام فاز عددی صحیح است، روش پریودوگرام در برآورد مقدار صحیح ابهام فاز از روش integer rounding استفاده می‌کند که ابهام فاز برآوردی غیرصحیح را به نزدیک‌ترین مقدار ممکن گرد می‌کند (Sadeghi et al., 2011a). این روش با وجود سادگی و سرعت عمل، به همبستگی بین ابهامات فاز غیرصحیح توجهی ندارد و تنها زمانی که همبستگی بین ابهامات فاز غیرصحیح ناچیز و یا صفر باشد، پاسخ دقیقی می‌دهد. بنابراین با توجه به همبستگی بین ابهامات فاز هر آرک در اینترفروگرام‌های مختلف، در روش پریودوگرام احتمال صحیح بودن تقریباً مجهولات (success rate) صحیح نیست. این در حالی است که الگوریتم بهبود یافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی، در مرحله برآورد ابهامات فاز و مؤلفه خطی جابه‌جایی از روش LAMBDA استفاده می‌کند (Sadeghi et al., 2011b) که مقدار صحیح ابهام فاز را از روش integer least square (ILS) تقریب می‌زند (Kampes and Hanssen, 2004). روش ILS به تمام همبستگی‌های بین ابهامات فاز غیرصحیح توجه دارد و احتمال صحیح بودن تقریباً مجهولات را حداکثر می‌سازد. بنابراین الگوریتم بهبود یافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی کمتر دچار خطای بازیابی فاز می‌شود. از طرف دیگر روش LAMBDA مورد استفاده در الگوریتم بهبود یافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی به منظور بازسازی ماتریس وارینانس کوواریانس مشاهدات از کمیت از پیش تعیین‌شده انحراف از معیار سرعت جابه‌جایی استفاده می‌کند (Kampes and Hanssen, 2004) که میزان نزدیکی این کمیت از پیش تعیین‌شده به مقدار واقعی در منطقه، تأثیر بسزایی در صحت نتایج این الگوریتم دارد. همچنین توجه به این نکته مهم است که

- Dehghani M., Hooper A., Hanssen R., ValadanZoej M.J., Saatchi S. and Entezam I., 2009c, **Hybrid Conventional and Persistent Scatterer SAR Interferometry for Land Subsidence Monitoring in Tehran Basin, Iran**, 'FRINGE 09' Workshop on ERS SAR Interferometry, Italy.
- Dehghani M., ValadanZoej M.J., Entezam I. and Saatchi S., 2009b, **In SAR Monitoring of Progressive Land Subsidence in Neyshabour; Northeast Iran**, Geophysical Journal International (GJI), Vol. 178, PP. 47-56.
- Dehghani M., ValadanZoej M.J., Biggs J., Mansourian A., Parsons B. and Wright T., 2009a, **RADAR Interferometry Time Series Analysis of Mashhad Subsidence**, Journal of International Society of Remote Sensing (ISRS), India, vol. 37, PP. 147-156.
- Ehghani M., ValadanZoej M.J., Entezam I., Saatchi S. and Shemshaki A., 2010, **Interferometric Measurements of Ground Surface Subsidence Induced by Verexploitation of Groundwater**, Journal of Applied Remote Sensing, vol. 4, 041864, doi: 10.1117/1.3527999.
- Ferreti A., Prati C., and Rocca F, 2001, **Permanent Scatterers in SAR Interferometry**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 1, PP. 8-20.
- Hooper A., Segall P., and Zebker H., 2007, **Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal**
- راداری قادر به پایش جابه‌جایی نیستند. از این رو در مقاله حاضر دو روش بهبود برای روش‌های موجود پردازشی مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی به منظور برآورد جابه‌جایی در مناطق با ویژگی‌های ذکر شده با عنوان‌های الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی و روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS معرفی گردید و عملکرد این دو روش در منطقه جنوب غربی دشت تهران با داده‌های مسیر ۱۴۹ با هم مقایسه شد. به منظور مقایسه نتایج دو روش با هم از نتایج اجرای الگوریتم SBAS با داده‌های مسیر ۳۷۸ در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. نتایج الگوریتم بهبودیافته مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی به علت استفاده از روش بهینه LAMBDA و حذف اثر اتمسفر و خطای مداری و جابه‌جایی مدل‌نشده با وجود این عملیات پردازشی وقت‌گیرتر، صحت بیشتری را در مقایسه با روش افزایش کارایی الگوریتم StaMPS نشان می‌دهد.

۶- منابع

- Amighpey M., Arabi S., Talebi A., and Djamour Y., 2006, **Elevation Changes of the Precise Leveling Tracks in the Iran Leveling Network**, Scientific report published in National Cartographic Center (NCC) of Iran, Tehran, Iran.
- Arabi S., Montazerian A.R., Maleki A., Talebi A., 2005, **Study of Subsidence of Southwestern of Tehran Basin**, journal of National Cartographic Center (NCC) of Iran, 16(69), 14-28.
- Dehghani M., 2010, **Estimation of Deformation Rate and Modeling of Land Subsidence Induced by Groundwater Exploitation Using Interferometry**, Ph.D. thesis, K.N. Toosi University, Tehran, Iran.

- Deformation Analysis With Application to Vacan Alcedo Galapagos**, J. Geophysical Research, vol. 112, B07407, doi: 10.1029/2006JB004763.
- Kampes, B.M. & Hanssen, R.F., 2004, **Ambiguity Resolution for Permanent Scatterer Interferometry**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(11).
- Kampes, B.M., 2005, **Displacement Parameter Estimation Using Permanent Scatterer Interferometry**, Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- Ketelaar V.B.H., 2008, **Monitoring Surface Deformation Induced by Hydrocarbon Production Using Satellite Radar Interferometry**, Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Rocca, F., 2007, **Modeling Interferogram Stacks**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 45(10), 3289-3299.
- Sadeghi Z., 2011c, **An Enhanced Algorithm Based on Persistent Scatterer Interferometry in Order to Estimate the Ground Surface Displacement**, M.Sc. thesis, K.N. Toosi University, Tehran, Iran.
- Sadeghi, Z., ValadanZoej M.J., Dehghani M., 2011(a), **An Improvement in Persistent Scatterer Interferometry Method (StaMPS) to Estimate Deformation Using Periodogram Approach**, accepted in Engineering Journal of Geospatial Information Technology (EJGIT).
- Sadeghi, Z., ValadanZoej M.J., Dehghani M., 2012, **High Surface Displacement Monitoring with Persistent Scatterer Interferometry**, IGARSS 2012, Munich.
- Sadeghi, Z., ValadanZoej. M.J., Dehghani M., 2011(b), **An Improved Persistent Scatterer Method for High Deformation Estimation**, 'FRINGE 11' Workshop on ERS SAR Interferometry, Italy.