

تلفیق دو روش متفاوت تداخل سنجی راداری بر پایه پراکنش کننده‌های دائمی به منظور پایش فرونشست

زهرا صادقی^۱، محمد جواد ولدان زوج^۲ و مریم دهقانی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه راه، ساختمان و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۷/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۰۸

چکیده

نبرد همبستگی مکانی و زمانی در تصاویر راداری در دسترس، استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری سنتی را برای پایش جابه‌جایی سطح زمین محدود می‌کند. روش‌های تداخل‌سنجی راداری بر پایه پراکنش کننده‌های دائمی ارائه شده برای کاهش محدودیت‌های روش سنتی، به دلیل استفاده از تحلیل دامنه و مدل جا به جایی از پیش تعیین شده برای انتخاب پیکسل‌های پراکنش کننده دائمی، نمی‌تواند جابه‌جایی را در مناطق برون‌شهری پایش کند. همچنین روش نوین تداخل‌سنجی راداری بر پایه پراکنش کننده‌های دائمی (StaMPS)، که از تحلیل دامنه و فاز بدون نیاز به دانش رفتار جابه‌جایی در مناطق غیر شهری برای انتخاب پیکسل‌های پراکنش کننده دائمی استفاده می‌کند، به علت نرخ بالای جابه‌جایی در برخی مناطق و نقض شرط مورد نیاز مرحله بازیابی فاز (شرط نایکوئیست) دچار خطاهای بزرگ بازیابی فاز شده و نرخ جابه‌جایی بسیار کمتر از واقعیت برآورد می‌کند. بنابراین در این پژوهش روشی برای پایش جابه‌جایی در مناطق غیر شهری با نرخ جابه‌جایی بالا و رفتار به نسبت خطی و با استفاده از تصاویر راداری با توزیع زمانی نامناسب ارائه شد. این روش، گامی مؤثر در روش‌های پردازشی پراکنش کننده‌های دائمی است که از مزایای روش‌های متفاوت تداخل‌سنجی راداری بر پایه پراکنش کننده‌های دائمی در انتخاب پیکسل‌های پراکنش کننده دائمی و بازیابی فاز استفاده می‌کند. پیکسل‌های پراکنش کننده دائمی بر پایه اطلاعات دامنه و استحکام فاز مطابق با الگوریتم StaMPS شناسایی می‌شوند که اثر اتمسفر و خطای مداری و جابه‌جایی با رفتار غیر خطی با به کارگیری فیلتر در فضای زمان از هم جدا و از روی فاز آنها کم می‌شود. مرحله بازیابی فاز و برآورد سرعت جابه‌جایی خطی با استفاده از روش LAMBDA و بدون در نظر گرفتن شرط نایکوئیست انجام می‌شود که این روش در برآورد مجهولات روشی بهینه و دارای سرعت بالای پردازشی است. روش پیشنهادی روی تصاویر ENVISAT ASAR در جنوب باختری دشت تهران برای پایش فرونشست و داده‌های شبیه‌سازی شده اجرا و نتایج دشت تهران با داده‌های ترازایی دقیق اعتبارسنجی شد. نتایج به دست آمده موفقیت الگوریتم پیشنهادی در برآورد نرخ جابه‌جایی با درستی بالا را به اثبات رساند.

کلیدواژه‌ها: پراکنش کننده‌های دائمی، StaMPS، LAMBDA

*نویسنده مسئول: زهرا صادقی

E-mail: atena_sadeghi_ak@yahoo.com

۱- پیش‌گفتار

دائمی با وجود خط‌مناهای زمانی و مکانی بزرگ کوه‌رنسی بالایی دارند و از نبود همبستگی تصاویر SAR کمتر تأثیر می‌پذیرند. گرچه ارائه این روش‌ها گامی مؤثر در کاهش محدودیت‌های روش تداخل‌سنجی راداری سنتی بوده است، ولی هر یک از روش‌های پردازش پراکنش کننده‌های دائمی معایبی دارد که استفاده بهینه از آنها را در شرایط مختلف با مشکل روبه‌رو می‌سازد. روش تداخل‌سنجی راداری بر پایه پراکنش کننده‌های دائمی برای اولین بار توسط Ferretti (2000) ارائه شد و الگوریتم‌های پردازشی همانندی در سال‌های بعد مانند روش ارائه شده توسط دانشگاه Delft (که اصطلاحاً به آن (Delft implementation of Persistent Scatterer InSAR) DePSI گفته می‌شود) بهبود داده شد. استفاده از اطلاعات دامنه و نیز مدل جابه‌جایی از پیش تعیین شده در شناسایی پراکنش کننده‌های دائمی از مهم‌ترین ویژگی این روش‌هاست. به دلیل استفاده از اطلاعات دامنه تنها پراکنش کننده‌های دائمی با دامنه بازگشت قوی به‌سوی رادار که بیشتر عوارض ساخت دست بشرند شناسایی می‌شوند. نیاز به دانش مدل جابه‌جایی از پیش تعیین شده نسبت به زمان و نبود شمار زیادی ساختارهای دست ساز بشر در منطقه مورد مطالعه، عوامل محدودکننده این الگوریتم‌هاست. به منظور کاهش نقاط ناتوانی الگوریتم‌های موجود، روش Hooper (2006) (Stanford Method for Persistent Scatterer) StaMPS توسط (Hooper (2006) معرفی شد که به کمک آن می‌توان در مناطق غیر شهری (بدون عوارض دست‌ساز بشر) و بدون نیاز به دانش رفتار جابه‌جایی نسبت به زمان، پیکسل‌های پراکنش کننده دائمی را تعیین و نرخ جابه‌جایی را برآورد کرد. ولی در مناطق با نرخ جابه‌جایی بالا شرط مورد نیاز مرحله بازیابی فاز (Phase Unwrapping) که شرط نمونه‌برداری

با توجه به این که در ایران به دلیل برداشت و مصرف بی‌رویه آب در فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، پدیده فرونشست در بسیاری از دشت‌ها از مهم‌ترین رویدادهای جا به جایی سطح زمین است، به منظور شناسایی و کاهش پیامدهای ناشی از پدیده فرونشست نیاز به یک سامانه پایش فرونشست بیش از پیش در کشور احساس می‌شود. با وجود مزیت‌های روش تداخل‌سنجی راداری نسبت به دیگر روش‌های پایش جابه‌جایی، این روش عوامل محدودکننده دارد که کارایی آن را در برخی موارد کاهش می‌دهد. به طور کلی در دسترس نبودن تصاویر راداری با پراکنندگی زمانی مناسب نسبت به نرخ جابه‌جایی در منطقه عاملی است که همه روش‌های موجود در روش تداخل‌سنجی راداری را در دسترس برآورد کردن نرخ جابه‌جایی محدود می‌کند. از عوامل محدودکننده روش تداخل‌سنجی راداری سنتی، نبود همبستگی زمانی و هندسی (Temporal and Geometrical decorrelation) است. نبود همبستگی زمانی مربوط به تغییر سریع در شکل ظاهری و ویژگی‌های پراکنشی سطح زمین در بازه زمانی میان تصویر پایه (Master) و تصویر پیرو (Slave) و نبود همبستگی هندسی ناشی از بلند بودن طول مبنای مکانی (فاصله دو ایستگاه تصویربرداری) میان دو تصویر پایه و پیرو است.

در سال‌های اخیر روش‌های نوینی بر پایه روش تداخل‌سنجی راداری ارائه شده است که تنها از نقاطی که در طول زمان ویژگی‌های بازپراکنشی (Back-scatterer) به نسبت ثابتی دارند با عنوان پراکنش کننده‌های دائمی (Persistent Scatterer) برای پایش جابه‌جایی استفاده می‌کنند (Ferreti et al., 2000 & 2001; Kamps, 2005; Hooper, 2004; Lyons et al., 2003). پیکسل‌های پراکنش کننده

در مناطق با نرخ جابه‌جایی بالا، به منظور برآورد نرخ جابه‌جایی در منطقه از الگوریتم StaMPS استفاده نمی‌شود. با توجه به این که مرحله بازیابی فاز الگوریتم DePSI نیاز به برقراری شرط نمونه‌برداری نایکوئیست ندارد و در مناطق با نرخ جابه‌جایی بالا دچار خطای بازیابی فاز نمی‌شود، الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش مرحله بازیابی فاز را مطابق با الگوریتم DePSI انجام می‌دهد. بنابراین این الگوریتم پس از انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی و حذف بخش اصلی غیرهم‌بسته در مکان از سیگنال، مطابق با الگوریتم DePSI یک شبکه مکانی از پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی تشکیل می‌دهد و با فرض آنکه مؤلفه اصلی جابه‌جایی در منطقه نسبت به زمان رفتار خطی دارد، فاز ناشی از مؤلفه خطی جابه‌جایی را برای هر فاز تفاضلی از دو پراکنش‌کننده هم‌سایه (یک آرک در شبکه) با اجرای روش LAMBDA (Kampes & Hanssen, 2004) و سپس برای همه پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی نسبت به یک نقطه مرجع برآورد می‌کند. پس از به‌کارگیری فیلتر زمانی و مکانی روی اختلاف فاز جابه‌جایی خطی برآوردی از فاز اولیه، سهم فاز ناشی از اثرات اتمسفر و جابه‌جایی غیر خطی تقریب زده شده، از فاز اولیه پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی کم و مؤلفه خطی جابه‌جایی دوباره برآورد می‌شود.

در ادامه به ساختار الگوریتم پیشنهادی و نتایج برآمده از اجرای آن روی بخشی از منطقه جنوب باختری تهران پرداخته می‌شود. به منظور اعتبارسنجی نتایج از داده‌های ترازیبی دقیق استفاده شد و نیز برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، این الگوریتم روی داده‌های شبیه‌سازی شده اجرا شد که نتایج آن موجود است.

۲- روش پیشنهادی

همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، روش پیشنهادی از برتری روش StaMPS در انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی در منطقه غیر شهری و از برتری روش DePSI در بازیابی فاز با وجود نرخ بالای جابه‌جایی در منطقه استفاده می‌کند.

در اولین مرحله با استفاده از تصاویر راداری اینترفروگرام‌های مستقل نسبت به یک تصویر به عنوان تصویر پایه شکل می‌گیرد. تصویر پایه به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که مجموع نبود همبستگی که تابعی از خط برپایه مکانی، خط مبنای زمانی و فرکانس مرکزی داپلر است، در تمام اینترفروگرام‌ها کمینه شود (Hooper et al., 2007a). پس از انتخاب تصویر پایه، همه تصاویر پیرو نسبت به آن ثبت هندسی و باز نمونه‌برداری می‌شوند. در این الگوریتم پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی مطابق با الگوریتم StaMPS انتخاب می‌شوند. کاندیدای پیکسل‌های پراکنش‌کننده در ابتدا بر پایه شاخص پراکنندگی دامنه (Amplitude dispersion Index) انتخاب می‌شوند (Ferreti et al., 2001). با اعمال حد آستانه مناسب روی شاخص پراکنندگی دامنه مجموعه پیکسل‌هایی انتخاب می‌شود که بیشتر آنها می‌تواند پراکنش‌کننده دایمی باشد. سپس استحکام فاز برای هر کاندید در یک فرایند تکراری بررسی می‌شود. پیکسل پراکنش‌کننده دایمی پیکسلی است که سهم فاز نوفه (نویز) در آن در مقایسه با سیگنال کوچک باشد. در تحلیل فاز، سهم نوفه فاز با تقریب و حذف سهم‌های فاز هم‌بسته در مکان محاسبه می‌شود که مشابه سطح کوهرنس در زمان است. پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی پایانی بر پایه احتمال اینکه یک پیکسل پراکنش‌کننده دایمی است تعیین می‌شوند که این احتمال به کمک شاخص پراکنندگی دامنه و کوهرنس زمانی تقریب زده می‌شود (Hooper et al., 2007).

فاز بازیابی نشده پیکسل x از اینترفروگرام λ را می‌توان پس از حذف فاز توپوگرافی به‌صورت حاصل جمع المان‌های مختلف به‌صورت زیر نوشته شود:

$$\Psi_{x,i} = W \{ \phi_{D,x,i} + \phi_{atmo,x,i} + \Delta \phi_{orbit,x,i} + \Delta \phi_{\theta,x,i} + \phi_{N,x,i} \} \quad (1)$$

که در آن $\phi_{D,x,i}$ فاز ناشی از جابه‌جایی زمین، $\phi_{atmo,x,i}$ فاز اتمسفری برآمده از تأخیر

نایکوئیست (Nuquist) نامیده می‌شود، نقض می‌شود و این الگوریتم در برآورد جابه‌جایی موفق نخواهد بود (Dehghani et al., 2009c). شرط نمونه‌برداری نایکوئیست (Nuquist) بیان می‌دارد که اختلاف فاز پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی در دو زمان تصویربرداری متوالی نباید از π تجاوز کند. ولی در مواقعی که نرخ جابه‌جایی زیاد باشد این شرط نقض می‌شود و عملیات بازیابی فاز به درستی انجام نمی‌پذیرد و در نتیجه نرخ جابه‌جایی کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌شود. (Dehghani et al., 2009c) به‌منظور افزایش کارایی الگوریتم StaMPS در مناطق با نرخ جابه‌جایی بالا، روش تلفیقی (Hybrid method) را ارائه کردند. در این روش که تلفیق روش تداخل سنجی راداری سنتی و الگوریتم StaMPS است، سعی شد 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 (Stacking) اینترفروگرام‌های هم‌بسته که به‌وسیله ماتریس کوهرنسی (Rocca, 2007) انتخاب شدند برآورد و از فاز پراکنش‌کننده‌های دایمی کم شد. ولی نیاز به وجود اینترفروگرام‌های هم‌بسته عامل محدودکننده این روش است. از سوی دیگر (Wegmuller et al., 2010) به منظور اجرای الگوریتم پراکنش‌کننده دایمی برای پایش جابه‌جایی‌های با نرخ بالا و غیریکنواخت، از تصاویر با وضوح (Resolution) بالا TerraSAR-X با فواصل کوتاه ۱۱ روز و اینترفروگرام‌هایی با تصاویر پایه متفاوت استفاده کردند که دسترسی به تصاویر TerraSAR-X با کمترین فواصل زمانی رمز موفقیت این روش است (Wegmuller et al., 2010).

نرخ بالای جابه‌جایی (بیش از ۱۵ سانتی‌متر در سال) و نیز تغییر سریع سیمای سطح زمین که به کاهش همبستگی میان تصاویر راداری می‌انجامد، از ویژگی‌های آشکار پدیده فرونشست در بیشتر مناطق ایران است. همچنین در بسیاری از موارد، مجموعه داده راداری مناسب با طول خطوط مبنای زمانی و مکانی کوتاه که از شروط لازم در پردازش‌های تداخل سنجی راداری سنتی به‌شمار می‌آید، در اختیار نیست، بنابراین در پایش فرونشست در مناطقی که دچار نبود همبستگی زمانی هستند و یا مجموعه مناسبی از داده‌های راداری در اختیار نباشد، روش تداخل سنجی راداری سنتی روش مناسبی نیست. همچنین استفاده از روش DePSI که بر پایه پراکنش‌کننده‌های دایمی است، به علت کمبود ساختارهای دست‌ساز بشر در مناطق دارای پوشش گیاهی در مرحله انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی دچار مشکل می‌شود. از سوی دیگر در مناطق دارای نرخ جابه‌جایی بالا، مرحله بازیابی فاز در روش StaMPS که یکی دیگر از روش‌های بر پایه پراکنش‌کننده‌های دایمی است، به علت نقض شرط نمونه‌برداری نایکوئیست دچار خطا شده و نرخ جابه‌جایی بسیار کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌شود. همچنین روش تلفیقی نیاز به داشتن اینترفروگرام‌های هم‌بسته دارد و در روش Wegmuller استفاده از تصاویر TerraSAR-X الزامی است.

بنابراین با توجه به ناتوانی روش سنتی در پایش فرونشست در مناطق با داده‌های راداری با پراکنندگی زمانی نامناسب و از سوی دیگر ناکارآمدی روش‌های مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دایمی در مناطق برون شهری با نرخ جابه‌جایی بالا، در این پژوهش روشی نوین بر پایه روش تداخل سنجی راداری برپایه پراکنش‌کننده‌های دایمی به‌منظور پایش پدیده فرونشست در مناطق بدون پدیده‌های دست‌ساز بشر (برون شهری) و دارای نرخ جابه‌جایی بالا و با استفاده از مجموعه داده راداری در دسترس ارائه شد. نوآوری الگوریتم پیشنهادی، استفاده از برتری‌های روش‌های موجود به‌طور هم‌زمان به منظور برآورد درست مقدار جابه‌جایی است. از آنجا که الگوریتم StaMPS در انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی در مناطق بدون پدیده‌های دست‌ساز بشر موفق خواهد بود، الگوریتم پیشنهادی به منظور انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی از تحلیل دامنه و فاز مطابق الگوریتم StaMPS استفاده می‌کند. به‌دلیل نقض شرط مورد نیاز عملیات بازیابی فاز الگوریتم

پراکنش کننده دائمی نام و زام و T^k خط مبنای زمانی اینترفروگرام k ام هستند. از آنجا که APS (Atmospheric Phase Screen) که تأثیرات ناشی از مجموع تأخیرات اتمسفری و خطای مداری است، به شدت در مکان هم بسته است، می توان از سهم APS در فاز تفاضلی دوگانه برای آرک هایی با طول کوتاه تر از یک حد آستانه چشم پوشی کرد. از سوی دیگر با فرض جابه جایی با رفتار به نسبت خطی نسبت به زمان در منطقه مورد مطالعه، یک مدل سرعت- ثابت برای جابه جایی در نظر گرفته می شود و از سهم فاز ناشی از جابه جایی با رفتار غیر خطی چشم پوشی می شود. همچنین تأثیر نوفه روی سری زمانی هر آرک توسط به کارگیری فیلتر پایین گذر زمانی کاهش پیدا می کند. بنابراین هدف تقریب ابهام فاز درست و سرعت جابه جایی به صورت نسبی از مشاهدات فاز تفاضلی دوگانه بازیابی نشده است. همان گونه که پیش تر بیان شد، به منظور برآورد مجهولات از روش بازیابی فاز در فضای زمان ارائه شده در الگوریتم DePSI استفاده می شود (Ketelaar, 2008; Kampes, 2005). با توجه به این که مجهول ابهام فاز باید عددی صحیح باشد، روش های متفاوتی برای برآورد مجهول به صورت عدد صحیح شناخته شده است. در الگوریتم پیشنهادی ما از روش least squares ambiguity decorrelation adjustment (LAMBDA) برای برآورد مجهولات در مرحله بازیابی فاز در فضای زمان استفاده شد که به پاسخ بهینه می انجامد و روش بسیار سریعی است. جزئیات مربوط به این روش در (Kampes & Hanssen, 2004) موجود است.

از آنجا که در رابطه ۲ پس از چشم پوشی از همه ترم ها به جز ابهام فاز و جابه جایی خطی، برای هر مشاهده فاز تفاضلی دوگانه (برای هر آرک در هر اینترفروگرام)، افزون بر مجهولات ابهام فاز، مجهول سرعت جابه جایی نیز وجود دارد، سامانه معادله مدل تابعی به صورت فرومعین (Underdetermined) است و یک راه برای آنکه این سامانه معادلات مرتبه کامل (Full rank) شود، افزودن شبه مشاهدات برای متغیر سرعت جابه جایی است (Kampes & Hanssen, 2004; Ketelaar, 2008). به طور کلی چهارچوب ریاضی در این مرحله به صورت زیر تعریف می شود:

$$E\{y\} = Aa + Bb = E \left\{ \begin{bmatrix} \psi_{ij}^k k_1 \\ \vdots \\ \psi_{ij}^k k_N \\ V_{ij} \end{bmatrix} \right\} = \underbrace{\begin{bmatrix} -2\pi & & & \\ & \ddots & & \\ & & -2\pi & \\ & & & a_{ij}^k k_1 \\ & & & \vdots \\ & & & a_{ij}^k k_N \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} k_1 \\ \vdots \\ k_N \end{bmatrix}}_a + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{4\pi}{\lambda} T k_1 \\ \vdots \\ -\frac{4\pi}{\lambda} T k_N \\ 1 \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} V_{ij} \\ b \end{bmatrix}}_b \quad (3)$$

$$D\{y\} = Q_y = D\{y\} = \begin{bmatrix} Q_{y_1} & 0 \\ 0 & Q_{y_2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

رابطه ۳ مدل تابعی را نشان می دهد در حالی که $E\{0\}$ عملگر امید ریاضی (Expectation operator) است. ماتریس های A و B ماتریس های ضرایب (Design) به ترتیب برای بردار مجهولات ابهام فاز صحیح (a) و بردار مجهول سرعت جابه جایی (b) هستند. رابطه ۴ مدل آماری را نشان می دهد و $D\{0\}$ عملگر پراکنندگی (Dispersion) است. ماتریس واریانس کواریانس Q_{y_1} ، از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول ماتریس واریانس کواریانس مشاهدات فاز (Q_{y_1}) است که توسط روش Variance Component Estimation (VCE) شکل می گیرد (Kampes, 2005) و بخش دوم شامل واریانس شبه مشاهدات (Q_{y_2}) است که از انحراف معیار از پیش تعیین شده متغیرهای مجهول (سرعت جابه جایی) پیروی می کند. پس از آنکه سرعت جابه جایی و ابهامات فاز صحیح به صورت نسبی (برای هر آرک) به کمک روش LAMBDA برآورد شد، در این مرحله هدف این است که سرعت جابه جایی و ابهامات فاز به صورت مطلق (برای همه پیکسل های پراکنش کننده دائمی نسبت به یک نقطه مرجع اختیاری) به دست آید. این مرحله را اصطلاحاً بازیابی فاز در فضای مکان می گویند. از آنجا که تقریباً نادرست

اتمسفری متفاوت در دو برداشت متفاوت، $\Delta\phi_{orbit,x,i}$ فاز باقیمانده ناشی از خطای مداری، $\Delta\phi_{\theta,x,i}$ فاز باقیمانده ناشی از خطای زاویه دید که شامل خطای توپوگرافی و خطای موقعیت کسری از پیکسل (Sub-pixel position) است. همچنین $\phi_{N,x,i}$ فاز نوفه به علت نبود همبستگی و اختلاف پراکنش از یک عارضه در دو تصویر، نوفه حرارتی، خطاهای ثبت هندسی و غیره است. فاز دیده شده از هر پیکسل به صورت بازیابی نشده است و چرخه های درست فاز ($2k\pi$) در فاصله زمین تا ماهواره را از دست داده و عددی در بازه $[-\pi, \pi]$ است. پس از انتخاب پیکسل های پراکنش کننده دائمی مطابق با الگوریتم StaMPS، مهم ترین سهم بخش ناهم بسته در مکان سیگنال (Spatially Uncorrelated Part of Signal) که مؤلفه غیرهم بسته در مکان مربوط به خطای زاویه دید ($\Delta\phi_{\theta,x,i}$) و سهم تصویر پایه در بخش غیرهم بسته در مکان سیگنال $\phi_x^{m,u}$ است، تقریب زده و پیش از بازیابی فاز، از فاز اولیه حذف می شود. همان گونه که پیش تر بیان شد، عملیات بازیابی فاز الگوریتم StaMPS نیاز به برقراری شرط نمونه برداری نایکویست دارد که این شرط در مناطق با نرخ بالای جابه جایی و به دلیل در دسترس نبودن تصاویر با پراکنندگی زمانی مناسب برقرار نیست (دهقانی، ۱۳۸۸). بنابراین الگوریتم پیشنهادی تلاش می کند که نرخ جابه جایی بالا را به طور مستقیم از فازهای بازیابی نشده در طول فرایند بازیابی فاز تقریب بزند. مرحله بازیابی فاز به منظور برآورد ابهام فاز (Phase ambiguity) (چرخه های کامل فاز) با استفاده از روش ارائه شده در DePSI انجام می شود. چهارچوب کلی الگوریتم پیشنهادی شامل مرحله انتخاب پیکسل های پراکنش کننده دائمی مطابق الگوریتم StaMPS و روش پیشنهادی برای برآورد جابه جایی در نمودار موجود در شکل ۱ نمایش داده می شود.

به طور کلی همان گونه که در پیش تر اشاره شد، چهار مرحله نخست (مطابق با نمودار شکل ۱) مطابق با الگوریتم StaMPS اجرا می شود، در ادامه به منظور برآورد جابه جایی، در ابتدا الگوریتم پیشنهادی تلاش می کند تا فاز را بازیابی کند و مؤلفه جابه جایی را در طی ۳ بخش (مرحله ۵ الگوریتم) به صورت اولیه تقریب بزند. به منظور تقریب مؤلفه جابه جایی توجه به این نکته مهم است که در بسیاری از مطالعات انجام شده مانند دشت های تهران، نیشابور، مشهد و هشتگرد رفتار فرونشست در زمان (سری زمانی فرونشست) به این صورت است که یک مؤلفه جابه جایی با نرخ ثابت در بلندمدت دارد (مؤلفه خطی فرونشست) و اثرات فصلی به صورت سیگنال های سینوسی روی سری زمانی قرار گرفته اند (Dehghani et al., 2008, 2009a, 2009b, & 2010). میزان جابه جایی های فصلی در بیشتر اوقات در محدوده تغییر شکل الاستیک قرار می گیرد و به دلیل برداشت همبستگی از سفره، مقدار مؤلفه خطی فرونشست در مقایسه با اثرات فصلی قابل ملاحظه است (دهقانی، ۱۳۸۸). بنابراین در الگوریتم پیشنهادی تلاش در برآورد مؤلفه خطی فرونشست می شود.

بنابراین در اولین بخش از این مرحله با اتصال پیکسل های پراکنش کننده دائمی به وسیله مثلث بندی دلونی (Deluanay) یک شبکه مکانی ساخته می شود که در آن دو پیکسل به وسیله یک آرک به هم متصل می شود. بنابراین در طول هر آرک تفاضل فاز دو پیکسل متصل کننده در هر اینترفروگرام دیده شده فاز تفاضلی دوگانه (Double-difference) (تفاضل در دو محیط مکان و زمان رخ داده است) را می سازد. در بخش بعدی این مرحله، هدف، تقریب متغیرها (سرعت جابه جایی و ابهام فاز) در طول هر آرک (بازیابی فاز در زمان (Temporal Unwrapping)) است. اندازه فاز تفاضلی دوگانه بازیابی نشده (مقدار فاز در $[-\pi, \pi]$ قرار گرفته است) میان پیکسل های پراکنش کننده دائمی نام و زام در اینترفروگرام k ام به صورت رابطه زیر بیان می شود:

$$\psi_{ij}^k = -2\pi a_{ij}^k - \frac{4\pi}{\lambda} V_{ij} T^k + \phi_{atmo,ij}^k + \phi_{orbit,ij}^k + \phi_{nonlinear,ij}^k + \phi_{N,ij}^k \quad (2)$$

که در آن a_{ij}^k ابهام فاز درست (Integer ambiguity)، V_{ij} مؤلفه خطی جابه جایی، $\phi_{nonlinear,ij}^k$ مؤلفه غیرخطی جابه جایی است که این متغیرها همگی میان پیکسل های

ترازیابی دقیق کشور در سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۲ بیشینه نرخ ۲۰ سانتی‌متر در سال و در سال ۲۰۰۵ بیشینه نرخ ۲۳ سانتی‌متر در سال را در آن گزارش کرده است (Amighpey, 2006). با توجه به محدودیت نرم افزار MATLAB و برای سرعت بخشیدن به عملیات پردازشی، منطقه مورد مطالعه به منطقه‌ای با ابعاد ۴/۵ در ۲/۷ کیلومتر در جنوب باختری دشت تهران محدود شد که این محدوده مطابق با نقشه جابه‌جایی تهیه شده در منطقه دشت تهران (دهقانی، ۱۳۸۸) بیشترین تأثیرپذیری را از پدیده فرونشست داشته و شامل بیشترین نرخ جابه‌جایی (۲۵ سانتی‌متر در سال) است. داده‌های راداری ENVISAT ASAR که منطقه دشت تهران را پوشش می‌دهد، شامل ۳ مسیر مختلف، دو گذر پایین و یک گذر بالا با شماره‌های مسیر به ترتیب ۳۷۸، ۱۴۹ و ۴۱۴ است. شمار 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 I2 است که در آن زاویه دید ماهواره برای مرکز تصویر در گذر پایین ۲۳ درجه است. شکل ۳ پراکنندگی زمانی و مکانی تصاویر مورد استفاده را نشان می‌دهد.

با توجه به پراکنندگی زمانی ضعیف تصاویر راداری مورد استفاده و تشکیل اینترنت‌گرام‌هایی با کوه‌رنسی زمانی پایین، روش تداخل‌سنجی راداری سنتی توان استخراج جابه‌جایی در این منطقه را نداشت. همچنین از آنجا که در مناطق برون‌شهری الگوریتم DePSI توانایی شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی را ندارد، از این رو، با اجرای این الگوریتم در منطقه مورد مطالعه، شمار بسیار محدودی پیکسل پراکنش‌کننده دایمی انتخاب شد. از سوی دیگر به علت بالا بودن نرخ فرونشست در دشت پوشیده از پوشش گیاهی تهران به دلیل برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی و در دسترس نبودن تصاویر راداری با پراکنندگی مناسب در زمان، با استفاده از الگوریتم StaMPS پس از انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی در مرحله بازیابی فاز شرط نمونه‌برداری نایکویست نقض و دچار خطا شده و نرخ جابه‌جایی بسیار کمتر از مقدار واقعی و بیشینه حدود ۳ سانتی‌متر در سال برآورد شد، بنابراین الگوریتم پیشنهادی در این منطقه اجرا شد. بخش اولیه تحلیل پراکنش‌کننده‌های دایمی به کمک نرم‌افزار DORIS انجام شد. در بخش دیگر که شامل انتخاب پراکنش‌کننده‌های دایمی بود از کدهای STAMPS استفاده و بقیه مراحل با کدهای تولیدشده در این پژوهش و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شد. نتایج هر یک از این مراحل در زیر توضیح داده شده است.

تصویر پایه با بیشینه کردن همبستگی خط منبای مکانی، زمانی و داپلر تصویر ۲۴ دسامبر ۲۰۰۴ تعیین شد. پس از انتخاب تصویر پایه و نمونه‌برداری همه تصاویر پیرو نسبت به هندسه تصویر پایه اینترنت‌گرام‌ها تشکیل شدند. همان‌گونه که پیش‌تر بدان گفته شد، برای جلوگیری از بار محاسباتی در مرحله انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده‌های دایمی با استفاده از تحلیل دامنه و اعمال حد آستانه ۰/۴ برای شاخص پراکنندگی دامنه، تنها پیکسل‌هایی که احتمال بیشتری می‌رود دارای رفتار ثابتی در زمان باشند وارد مرحله تحلیل فاز می‌شوند. در پایان، تعداد بازپراکنش‌کننده‌های دایمی در منطقه انتخابی در جنوب باختری دشت تهران ۶۸۰ پیکسل بود. پس از انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی، بخش فاز غیرهم‌بسته در مکان ناشی از خطای زاویه دید و فاز غیرهم‌بسته در مکان از تصویر پایه مطابق با الگوریتم StaMPS برآورد و از فاز اولیه پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی حذف شد. 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 باختری دشت تهران انجام داد (دهقانی، ۱۳۸۸)، مشخص شد که بیشتر سیگنال جابه‌جایی را سیگنال با رفتار خطی در طول زمان تشکیل می‌دهد و نوسانات فصلی سهم به‌نسبت ناچیزی در مقایسه با آن سیگنال از خود نشان می‌دهند. بنابراین مدل جابه‌جایی در این منطقه خطی؛ و هدف، برآورد مؤلفه خطی جابه‌جایی در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد.

مجهولات در مرحله پیش‌ناشی از نوفه در مشاهدات و کاستی مدل فرضی سبب ایجاد مقادیر غیر صفر باقیمانده‌های فاز (Residual phase) (تفاوت میان فازهای تفاضلی دو گانه بازیابی و مدل‌شده) در آرک‌های شبکه می‌شود (Samiei Esfahany, 2008; Humme, 2007)، بنابراین برای شناسایی خطای بازیابی فاز در مرحله پیش، آرک‌هایی که کوه‌رنسی زمانی خیلی کمی دارند و مقادیر باقیمانده فاز در آنها بزرگ است، حذف می‌شوند. بی‌گمان با حذف شماری از آرک‌ها، شماری از پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی از میان می‌رود. بنابراین شماری از پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی انتخاب‌شده حذف می‌شوند که از این مرحله به بعد removed-PS نامیده می‌شوند و به پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی باقیمانده remnant-PS گفته می‌شود. با داشتن مقادیر سرعت جابه‌جایی در آرک‌های باقیمانده می‌توان به مقادیر سرعت جابه‌جایی در remnant-PS نسبت به یک نقطه مرجع رسید که انتخاب نقطه مرجع کاملاً اختیاری است.

در صورت درست برآورد شدن مؤلفه خطی جابه‌جایی برای remnant-PS نسبت به یک نقطه مرجع و نیز بخش غیر هم‌بسته در مکان مربوط به خطای زاویه دید، باقیمانده فاز شامل تأخیر اتمسفری، جابه‌جایی مدل‌نشده و خطاهای مداری است. در ابتدا سهم APS تصویر پایه با میانگین‌گیری باقیمانده‌های فاز در فضای زمان برآورد و از باقیمانده‌های فاز اولیه کسر می‌شود. از آنجا که سیگنال اتمسفری در فضای مکان هم‌بسته و در فضای زمان ناهم‌بسته است در حالی که جابه‌جایی مدل‌نشده در هر دو فضا هم‌بسته است، یک فیلتر بالاگذر (High pass) زمانی برای جداسازی سهم فاز ناشی از مؤلفه غیر خطی جابه‌جایی از سهم فاز ناشی از APS مربوط به تصویر پیرو، روی فاز باقیمانده همه پیکسل‌های remnant-PS در همه اینترنت‌گرام‌ها اجرا می‌شود (Ferreti et al., 2000). در پایان برای تقریب سهم فاز ناشی از APS و مؤلفه غیر خطی جابه‌جایی در پیکسل‌های removed-PS از روش درون‌یابی kriging استفاده می‌شود. پس از تقریب و حذف سهم فاز ناشی از APS و مؤلفه غیر خطی جابه‌جایی از مشاهدات فاز اولیه، برآورد مؤلفه خطی جابه‌جایی باید دوباره تکرار شود. بنابراین در حالی که مشاهدات فاز دستخوش تغییر شدند، مرحله ۵ مطابق نمودار شکل ۱ دوباره تکرار می‌شود. در صورت درست برآورد شدن اثرات APS و جابه‌جایی غیر خطی و حذف آنها، مرحله بازیابی فاز در فضای زمان کمتر دچار خطا می‌شود.

الگوریتم پیشنهادی از نرم افزار MATLAB برای کدنویسی استفاده می‌کند و با توجه به این که این نرم‌افزار با زیاد شدن حجم داده، کارایی و سرعت عملیات پردازش کمتری دارد تا جایی که توانایی خود را برای پردازش از دست می‌دهد، بنابراین در انتخاب محدوده مورد مطالعه با توجه به تراکم پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی برای به کارگیری الگوریتم پیشنهادی محدودیت وجود دارد. هرچه تراکم در یک منطقه بالاتر باشد انتخاب ابعاد کوچک‌تری از منطقه، سرعت عملیات بالاتری را به همراه خواهد داشت. همچنین در استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای برآورد نرخ جابه‌جایی در یک منطقه، داشتن دانشی از رفتار جابه‌جایی ضروری است و شرط موفقیت الگوریتم در برآورد جابه‌جایی، خطی بودن رفتار مؤلفه اصلی جابه‌جایی نسبت به زمان است.

۳ - مطالعه موردی: پایش فرونشست دشت تهران

منطقه جنوب باختری تهران که تحت تأثیر پدیده فرونشست است، از شمال به رشته‌کوه البرز، از جنوب به کوه‌های آزاد و فشاویه، از خاور به بلندی‌های سه‌پایه، قوچک، بی‌بی‌شهربانو و در ادامه به رودخانه شور تا محمودآباد خرابه و از باختر به محدوده خاوری دشت کرج، یعنی از وردآورد تا به شهربار و در امتداد جاده شهربار به رباط کریم محدود می‌شود (شکل ۲). این منطقه بر پایه گزارش سازمان نقشه‌برداری کشور فرونشست با نرخ بالا دارد به‌گونه‌ای که شبکه

۲۵ سانتی‌متر در سال در منطقه (دهقانی، ۱۳۸۸) و این مسئله که الگوریتم استاندارد StaMPS، نرخ فرونشست در منطقه را تنها ۳ سانتی‌متر در سال برآورد می‌کند، الگوریتم پیشنهادی بهبود قابل توجهی به روش‌های پراکنش‌کننده دایمی موجود برای استفاده در این منطقه می‌دهد و از آنجا که دو نیم‌رخ جابه‌جایی الگوی به‌نسبت یکسانی دارند، مقایسه نتایج برآمده از روش تداخل‌سنجی راداری با مشاهدات ترازیبی دقیق نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده قابلیت اطمینان بالایی دارند.

ولی به دلیل در دسترس بودن تنها شمار ناچیزی از ایستگاه‌های ترازیبی در منطقه مورد مطالعه و نیز به منظور ارزیابی دقیق‌تر عملکرد الگوریتم پیشنهادی در یک فرایند کاملاً کنترل‌شده از داده‌های شبیه‌سازی استفاده شد. با توجه به اینکه مرحله انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی مطابق با الگوریتم StaMPS انجام می‌شود و بخش اصلی تفاوت الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم StaMPS پس از این مرحله است بنابراین در شبیه‌سازی داده فرض می‌شود که پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی انتخاب شدند و بخش غیرهم‌بسته در مکان فاز (مطابق StaMPS) حذف شده است. به منظور شبیه‌سازی فاز پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی از رابطه ۱ استفاده می‌شود. از آنجا که در مرحله شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی، پیکسلی به‌عنوان پراکنش‌کننده دایمی انتخاب شد که نوبه آن در مقایسه با سیگنال ناچیز باشد، بنابراین با فرض آن که فاز پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی انتخابی شامل نوبه ناچیزی باشد، از شبیه‌سازی فاز ناشی از نوبه چشم‌پوشی شد. همچنین خطای مداری به شدت در مکان هم‌بسته است بنابراین تغییرات آن در یک منطقه کوچک زیاد نیست و تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد، بنابراین از شبیه‌سازی آن چشم‌پوشی شد. از سوی دیگر الگوریتم پیشنهادی در این مطالعه تنها زمانی که مؤلفه اصلی جابه‌جایی در منطقه رفتار خطی نسبت به زمان داشته باشد و جابه‌جایی با رفتار غیر خطی مقدار کوچکی در مقایسه با جابه‌جایی خطی داشته باشد می‌تواند نرخ درست جابه‌جایی را برآورد کند. بنابراین سهم فاز ناشی از آن برای پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی به صورت کوچک در مقایسه با مؤلفه خطی جابه‌جایی و فاز ناشی از جابه‌جایی با رفتار خطی و غیر خطی و فاز ناشی از اثر تأخیرات اتمسفری در این بخش شبیه‌سازی شد. منطقه مورد مطالعه با ابعاد ۴ در ۴ کیلومتر مربع، شامل ۲۰۰,۰۰۰ پیکسل با ابعاد ۲۰ متر در سوی رنج (Range) و ۴ متر در سوی آزیموت (Azimuth) شبیه‌سازی شد. برای شبیه‌سازی تراکم پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی، نمونه‌برداری زمانی تصاویر مورد استفاده، مؤلفه خطی و غیرخطی جابه‌جایی در منطقه و میزان اثر اتمسفر تلاش شد تا شرایط واقعی بازسازی شود. تصاویر مورد استفاده، تصویر پایه و خط مبنای زمانی میان اینترفروگرام‌ها دقیقاً همانند داده‌های واقعی مورد استفاده در جنوب باختری دشت تهران در نظر گرفته شد. از آنجا که در منطقه جنوب باختری دشت تهران، پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی با تراکم $25\text{PS}/\text{km}^2$ بیشترین فراوانی را داشتند، در منطقه شبیه‌سازی شده فرض شد که پس از تحلیل دامنه و فاز ۲۰۰,۰۰۰ پیکسل، پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی با تراکم $25\text{PS}/\text{km}^2$ انتخاب شدند. بی‌گمان بخش اصلی سیگنال جابه‌جایی با رفتار خطی در طول زمان است که برای شبیه‌سازی، تابعی از فاصله تا نقطه‌ای در مرکز منطقه فرض می‌شود. پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی که فاصله یکسانی تا مرکز منطقه داشتند، دارای سرعت جابه‌جایی برابر بودند. برای شبیه‌سازی فاز ناشی از مؤلفه خطی جابه‌جایی به ازای پراکنش‌کننده‌های دایمی i ام در اینترفروگرام k ام از رابطه ۵ استفاده شد:

$$\phi_{i,linear}^k = \frac{-4\pi}{\lambda} V_i T^k \quad (5)$$

که در آن V_i سرعت جابه‌جایی شبیه‌سازی شده برای پیکسل پراکنش‌کننده دایمی i ام و T^k طول خط مبنای زمانی در اینترفروگرام k ام است و مقدار λ یا طول موج راداری ۰/۰۵۶۲ متر در نظر گرفته شد.

همان‌گونه که شکل ۶ نشان می‌دهد، با فرض کردن سرعت جابه‌جایی در نقطه مرکز منطقه برابر ۱۲- سانتی‌متر در سال، بیشینه نرخ ثابت جابه‌جایی در منطقه به

در این مرحله در ابتدا به کمک مثلث‌بندی دلونی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی به هم پیوسته و برای چشم‌پوشی کردن از سهم فاز ناشی از APS در طول هر آرک، آرک‌هایی با طول بیشینه ۲ کیلومتر انتخاب شد. پس از تشکیل فاز نسبی در طول هر آرک، برای کاهش اثر نوبه یک فیلتر پایین‌گذر زمانی روی کل آرک‌ها اجرا شد. برای حل معادله ۳ به روش کمترین مربعات نیاز به واریانس سرعت جابه‌جایی در منطقه است که اولاً با استفاده از روش VCE ماتریس واریانس کواریانس مشاهدات فاز، Q_{y_1} تشکیل شود و دوم واریانس شبه‌مشاهده سرعت جابه‌جایی در ماتریس Q_{y_2} مشخص شود. بنابراین از آنجا که تشکیل ماتریس واریانس کواریانس مشاهدات شامل Q_{y_1} و Q_{y_2} به کمیت یادشده وابسته است، انتخاب این مقدار نقش مهمی در درست برآورد شدن مجهولات نقش دارند. مقدار انحراف معیار سرعت جابه‌جایی در منطقه برای هر آرک ۵ سانتی‌متر در سال در نظر گرفته شد. با استفاده از روش LAMBDA ابهام فاز درست برای کل آرک‌ها در همه اینترفروگرام‌ها تقریب زده شد و پس از به دست آمدن فاز بازیابی شده، مقدار سرعت جابه‌جایی نسبی در طول هر آرک برآورد شد.

همان‌گونه که در بخش ۲ اشاره شد، برای شناسایی آرک‌هایی که در طول آنها تقریبات نادرستی انجام شده، آرک‌های دارای کوه‌رنسی زمانی ضعیف حذف شدند. بنابراین ۵۳۹ پیکسل پراکنش‌کننده دایمی، حدود ۷۹ درصد پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی اولیه به عنوان remnant-PS و ۱۴۱ پیکسل پیکسل پراکنش‌کننده دایمی به عنوان removed-PS حذف شدند. در پایان فاز بازیابی شده و نرخ جابه‌جایی remnant-PS نسبت به یک نقطه مرجع با استفاده از روش کمترین مربعات برآورد شد. برای تقریب و حذف فاز ناشی از المان غیر خطی جابه‌جایی و APS از فاز پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی، از فیلتر بالاگذر زمانی و روش درون‌یابی kriging استفاده شد. در این مرحله پس از حذف سهم فاز ناشی از جابه‌جایی غیر خطی و APS از فاز همه پیکسل‌ها، مرحله تقریب مؤلفه خطی جابه‌جایی دوباره تکرار می‌شود. به علت حذف اثر جابه‌جایی غیر خطی و APS، مرحله تقریب متغیر در طول آرک‌ها کمتر دچار خطا شد. شکل ۴ نقشه نرخ متوسط فرونشست را که از الگوریتم پیشنهادی استخراج شده است، در پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی نمایش می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۴ مشخص است، مقدار بیشینه نرخ میانگین فرونشست برابر با ۲۴/۹۵ سانتی‌متر در سال است. رفتار سامانه‌مند نرخ برآوردی، نشان از سهم ناچیز خطای بازیابی فاز در جابه‌جایی استخراج شده دارد.

۴- بحث و اعتبارسنجی نتایج

استفاده از روش ترازیبی دقیق برای کیفیت‌سنجی نتایج برآمده از روش تداخل‌سنجی راداری روشی استاندارد است که برای نمونه می‌توان به (Ketaaler, 2008), Hooper et al. (2004) مراجعه کرد. اندازه‌گیری‌های ترازیبی دقیق مورد استفاده برای اعتبارسنجی نتایج الگوریتم پیشنهادی در منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی (۲۰۰۵) ۸۳-۸۴ توسط سازمان نقشه‌برداری کشور انجام گرفته است (عربی و همکاران، ۱۳۸۴). ایستگاه‌های ترازیبی در شکل ۴ مشخص شده است و نرخ جابه‌جایی ایستگاه‌های ترازیبی دقیق از روش پیشنهادی با استفاده از نزدیک‌ترین پیکسل پراکنش‌کننده دایمی به آن ایستگاه‌ها تعیین شده است. از آنجا که بازه زمانی داده‌های راداری مورد استفاده در این مطالعه (۲۰۰۸-۲۰۰۳) و عملیات ترازیبی دقیق (۲۰۰۵) با یکدیگر متفاوت هستند، نرخ برآوردشده فرونشست هم متفاوت است.

همان‌گونه که شکل ۵ نشان می‌دهد، در سال ۲۰۰۵ که نرخ فرونشست از روش ترازیبی دقیق برآورد شده است، کاهش نرخ جابه‌جایی نسبت به میانگین نرخ از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۰۸ حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری وجود دارد. بیشترین اختلاف ۵ سانتی‌متر در سال است که بخشی از این اختلاف مربوط به تفاوت بازه زمانی و بقیه آن خطای الگوریتم پیشنهادی است و با توجه به بیشینه نرخ جابه‌جایی

باشد که برای مقایسه نرخ برآوردی از الگوریتم پیشنهادی با واقعیت از داده‌های ترازبایی دقیق موجود استفاده شد که که بازه زمانی آنها با بازه زمانی مورد استفاده در الگوریتم پیشنهادی متفاوت بود. بنابراین بخشی از اختلاف نرخ برآوردی از نرخ واقعی مربوط به تغییر نرخ جابه‌جایی در زمان است. از سوی دیگر در داده‌های شبیه‌سازی شده عامل‌های مؤثری مانند نوفه، خطای مداری، خطای توپوگرافی و ... شبیه‌سازی نشد که این نتایج، روش پیشنهادی را روی داده‌های شبیه‌سازی شده بهتر اجرا می‌کند. همچنین مؤلفه اصلی جابه‌جایی در داده‌های شبیه‌سازی شده با رفتار خطی در نظر گرفته شد و مؤلفه غیر خطی آن با مقدار کوچک و با رفتار سینوسی شبیه‌سازی شد که در منطقه واقعی ممکن است مقدار مؤلفه غیر خطی آن در مقایسه با مؤلفه خطی کوچک نباشد و یا رفتار سینوسی نداشته باشد که همه موارد یاد شده به درستی کمتر نتایج داده‌های واقعی نسبت به داده‌های شبیه‌سازی شده می‌انجامد. از سوی دیگر الگوریتم پیشنهادی در صورت ناپایدار شدن شرایط اتمسفر با درستی کمتری اثر آن را از روی مشاهدات حذف می‌کند که در داده شبیه‌سازی شده اتمسفر با شرایط معمولی که محتمل‌ترین حالت اتمسفر در آن منطقه بود، در نظر گرفته شد که ممکن است در واقعیت شرایط اتمسفر در برخی از زمان‌های گرفتن تصویر ناپایدارتر بوده باشد.

به‌طور کلی عوامل متفاوتی سبب کاهش درستی نتایج برآمده از الگوریتم پیشنهادی می‌شود. بیشتر از خطاهای ایجاد شده در نرخ برآوردی از الگوریتم، به خطا در مرحله بازیابی فاز در فضای زمان مربوط است. از میان دلایل آن می‌توان به مدل جابه‌جایی از پیش تعیین شده نامناسب، وجود سهم APS و نوفه در طول آرک‌ها و نادرست بودن مقدار اولیه انحراف از معیار نرخ جابه‌جایی اشاره کرد. در صورت غیر خطی بودن جابه‌جایی و یا ناچیز نبودن مؤلفه غیر خطی از جابه‌جایی، بی‌گمان مدل خطی جابه‌جایی نامناسب است و مرحله بازیابی فاز در طول آرک‌هایی با چنین شرایط با خطا انجام می‌شود. از سوی دیگر در صورت تراکم ضعیف و فواصل زیاد پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی در طول آرک‌ها از سهم APS نمی‌توان چشم‌پوشی کرد در حالی که از آن در عملیات بازیابی فاز در فضای زمان چشم‌پوشی می‌شود که این عامل دیگری برای خطادار شدن متغیرهای برآوردی در این عملیات است. همچنین وجود نوفه در سری زمانی حتی پس از اجرای فیلتر کاهش‌دهنده نوفه هم می‌تواند سبب نادرستی نتایج بازیابی فاز شود. همان‌گونه که در بخش ۲ اشاره شد، بخش اول ماتریس واریانس کواریانس مشاهدات با استفاده از مقدار از پیش تعیین شده انحراف از معیار نرخ جابه‌جایی در منطقه از روش VCE برآورد می‌شود و بخش دوم آن هم که ماتریس واریانس کواریانس شبه‌مشاهدات است به‌طور مستقیم از انحراف از معیار نرخ جابه‌جایی ساخته می‌شود. بنابراین این کمیت تأثیر چشمگیری در میزان درستی نتایج الگوریتم بهبود یافته برپایه پراکنش‌کننده دایمی دارد. زیرا تعیین مقدار نادرستی برای انحراف از معیار مشاهدات به تشکیل ماتریس واریانس کواریانس نادرست می‌انجامد و در نتیجه عملیات بازیابی فاز در فضای زمان با خطا انجام می‌شود و متغیر نرخ جابه‌جایی در طول آرک‌ها نادرست به دست می‌آید. از سوی دیگر نمونه‌برداری زمانی نامناسب تصاویر مورد استفاده و وجود اتمسفر از دیگر عوامل مؤثر بر عملکرد الگوریتم پیشنهادی است.

همان‌گونه که از نتایج برآورد می‌شود، با وجود عامل‌های محدودکننده بسیار در عملکرد الگوریتم‌های برپایه پراکنش‌کننده‌های دایمی، الگوریتم پیشنهادی در شرایطی که دیگر الگوریتم‌های موجود نمی‌توانند سیگنال جابه‌جایی را اندازه‌گیری کنند، برآورد به نسبت درستی از نرخ جابه‌جایی ارائه داد. بنابراین الگوریتم پیشنهادی گامی مؤثر در افزایش کارایی روش‌های برپایه پراکنش‌کننده‌های دایمی است. بررسی و پرداختن به محدودیت‌های این الگوریتم که در بالا بدان اشاره شد به عنوان پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار می‌گیرد.

۲۸- سانتی‌متر در سال رسید. از آنجا که اثرات فصلی دارای رفتار سینوسی بر سری زمانی هستند (دهقانی، ۱۳۸۸؛ Kamps & Hanssen, 2004) برای شبیه‌سازی مؤلفه غیر خطی جابه‌جایی از رابطه ۶ استفاده می‌شود:

$$\varphi_{\text{nonlinear},i}^k = \frac{-4\pi}{\lambda} \alpha_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} t^k\right) \quad (6)$$

T پرورد جابه‌جایی فصلی است که معمولاً ۱ در نظر گرفته می‌شود. t^k خط مبنای زمانی اینترفروگرام k ام است. ضریب α_i به ازای هر پیکسل پراکنش‌کننده دایمی متفاوت و گونه‌ای انتخاب شد که مؤلفه غیر خطی جابه‌جایی بیشینه مقدار ۵/۵- سانتی‌متر داشته باشد. در پایان فاز ناشی از جابه‌جایی در هر پیکسل پراکنش‌کننده دایمی مطابق رابطه ۷ از حاصل جمع فاز مؤلفه خطی و مؤلفه غیر خطی جابه‌جایی به دست می‌آید.

$$\varphi_{D,i}^k = \varphi_{i,\text{linear}}^k + \varphi_{i,\text{nonlinear}}^k \quad (7)$$

برای شبیه‌سازی شرایط اتمسفری از مطالعه‌ای که روی تغییرات روزانه تأخیر فاز ناشی از لایه تروپوسفر در جو ZTD (Zenith Tropospheric Delay) انجام گرفته است، استفاده شد که مشاهدات ساعتی در ۱۱۴ ایستگاه EUREF در طول ۳۰۰ روز را در برداشت (دهقانی، ۱۳۸۸). بر پایه این مطالعه هر چه اتمسفر شرایط آرام‌تری داشته باشد، انحراف از معیار ZTD کوچک‌تر خواهد بود. بنابراین برای منطقه شبیه‌سازی شده انحراف از معیار مربوط به شرایط اتمسفر معمولی (نه شرایط آرام و نه شرایط ناپایدار) که شرایط معمول حاکم بر دشت تهران است استخراج شد. به‌طور کلی با وجود متفاوت بودن حالات اتمسفر در اینترفروگرام‌های مختلف، در همه حالات اندازه تبدیل فوریه سیگنال اتمسفر (Power Spectrum)، دارای تنها ۳ رژیم با مقیاس‌های غیر یکسان مطابق با رابطه ۸ خواهد بود (Hanssen, 2001). بر پایه این رژیم‌ها که در سطح گسترده‌ای از اینترفروگرام‌ها دیده شده‌اند مدلی برای آشفتگی‌های جوی در لایه تروپوسفر توسط (Hanssen 2001) ارائه شده است.

$$P_\varphi(f) = \begin{cases} P_1 (f/f_0)^{-5/3} & 1.5 \leq (f_0/f) \leq 50 \text{ km} \\ P_0 (f/f_0)^{-8/3} & 0.25 \leq (f_0/f) \leq 1.5 \text{ km} \\ P_m (f/f_0)^{-2/3} & 0.02 \leq (f_0/f) \leq 0.25 \text{ km} \end{cases} \quad (8)$$

دهقانی و همکاران مطابق با شبیه‌سازی حالات مختلف جو، مقیاس (P0) را به گونه‌ای انتخاب کردند که انحراف از معیار ZTD برابر با انحراف از معیار مربوط به آن حالت از اتمسفر باشد (دهقانی، ۱۳۸۸). بنابراین برای شبیه‌سازی اتمسفر در منطقه شبیه‌سازی شده مقیاس به گونه‌ای انتخاب شد که انحراف از معیار فاز اتمسفر ایجاد شده مطابق رابطه ۸ مربوط به اتمسفر شرایط معمولی باشد. پس از به دست آمدن فاز ناشی از جابه‌جایی و فاز ناشی از اتمسفر در هر پیکسل پراکنش‌کننده دایمی برای همه اینترفروگرام‌ها، فاز پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی در همه اینترفروگرام‌ها به کمک رابطه ۹ به دست می‌آید:

$$\varphi_i^k = \varphi_{D,i}^k + \varphi_{\text{atmo},i}^k \quad (9)$$

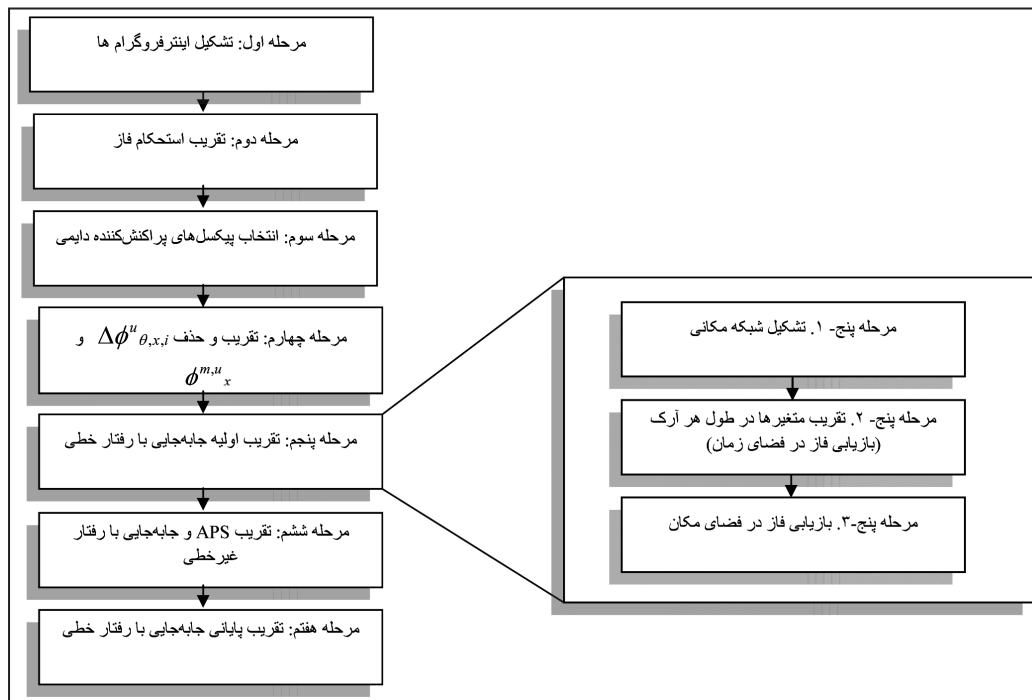
پس از به دست آمدن فاز هر پیکسل پراکنش‌کننده دایمی، الگوریتم پیشنهادی روی منطقه شبیه‌سازی شده اجرا شد و نرخ برآوردی از الگوریتم پیشنهادی با نرخ واقعی جابه‌جایی در همه پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی مقایسه شد. کمینه، بیشینه و میانگین مقادیر اختلاف و میزان RMSE در جدول ۱ نشان داده شده است.

به کمک نتایج جدول ۱ و مقایسه مقادیر آنها با نرخ جابه‌جایی در منطقه مورد مطالعه (از ۱۲ تا ۲۸ سانتی‌متر در سال) کارایی بالای الگوریتم پیشنهادی در برآورد جابه‌جایی با نرخ بالا و با دسترسی به تصاویر راداری با نمونه‌برداری زمانی نامناسب به اثبات می‌رسد. نتایج اجرای روش پیشنهادی روی داده شبه‌واقعی شبیه‌سازی شده در مقایسه با واقعیت از نتایج اجرای روش پیشنهادی روی داده واقعی (جنوب باختری تهران) در مقایسه با واقعیت بهتر بود. یک دلیل اصلی برای این رویداد می‌تواند این

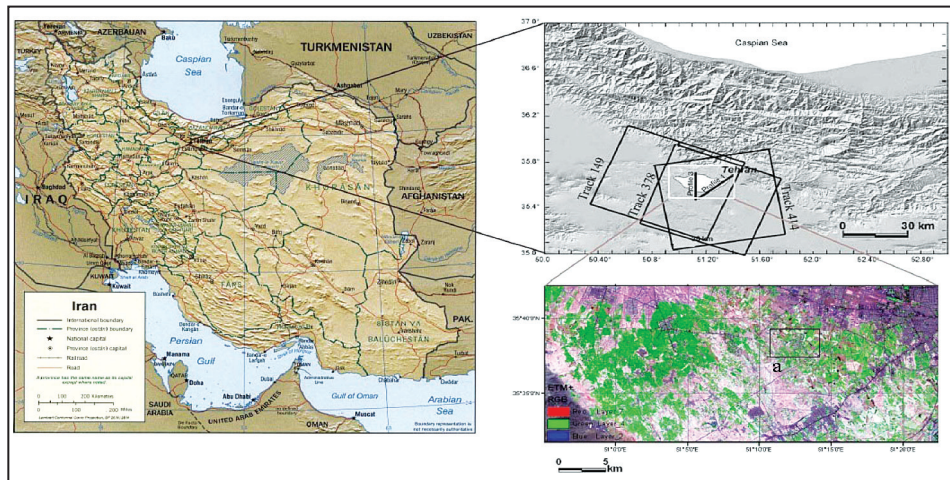
۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش الگوریتمی بر پایه پراکنش‌کننده‌های دایمی برای برآورد نرخ فرونشست ارائه شد. نرخ بالای جابه‌جایی (بیش از ۱۵ سانتی‌متر در سال) و نیز تغییر سریع سیمای ظاهری سطح زمین که به کاهش همبستگی میان تصاویر راداری می‌انجامد، از ویژگی‌های آشکار پدیده فرونشست در بیشتر مناطق ایران است. در بسیاری از موارد، مجموعه داده راداری مناسب با طول خطوط مبنای زمانی و مکانی کوتاه که از شرط‌های لازم در پردازش‌های تداخل‌سنجی راداری سنتی به‌شمار می‌آید، در اختیار نیست. از سوی دیگر روش تداخل‌سنجی راداری بر پایه پراکنش‌کننده‌های دایمی DePSI نمی‌تواند پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی را در مناطق برون‌شهری (دشت‌ها) شناسایی کند. همچنین روش تداخل‌سنجی راداری بر پایه پراکنش‌کننده‌های دایمی StaMPS در برآورد نرخ جابه‌جایی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی در مناطق با نرخ جابه‌جایی بالا، دچار خطای بازایی فاز شده و نرخ جابه‌جایی بسیار کمتر از واقعیت برآورد می‌شود. در این مقاله الگوریتم تداخل‌سنجی راداری بر پایه پراکنش‌کننده‌های دایمی به گونه‌ای بهبود داده شد که بتواند نرخ فرونشست در مناطق برون‌شهری را با نرخ جابه‌جایی بالا برآورد کند. الگوریتم ارائه‌شده در ابتدا مطابق با الگوریتم StaMPS از تحلیل دامنه و فاز برای شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی استفاده می‌کند. سپس مطابق با الگوریتم

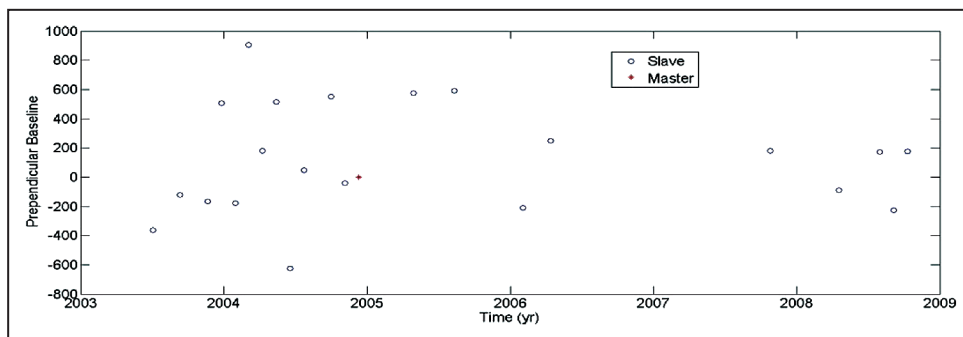
DePSI مرحله بازایی فاز را انجام می‌دهد، بنابراین به کمک مثلث‌بندی دلونی از پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی شبکه مکانی تشکیل می‌دهد و در طول هر آرک متصل‌کننده دو پیکسل پراکنش‌کننده دایمی را با روش LAMBDA با فرض خطی بودن رفتار جابه‌جایی در زمان، ابهام فاز و سرعت جابه‌جایی برآورد می‌کند. پس از به دست آمدن مجهول ابهام فاز و سرعت جابه‌جایی برای هر پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی از ابهام فاز و سرعت جابه‌جایی نسبی در طول هر آرک، با اجرای فیلتر زمانی سهم اتمسفر و جابه‌جایی غیرخطی پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی تقریب زده، از فاز اولیه پیکسل‌ها کم شده و دوباره مرحله برآورد ابهام فاز و جابه‌جایی خطی تکرار می‌شود. الگوریتم پیشنهادی برای پایش فرونشست در منطقه‌ای با بیشینه نرخ فرونشست در جنوب باختری دشت تهران با تصاویر ENVISAT-ASAR با گسترش زمانی نامناسب در بازه ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ به کار گرفته شد. بیشینه نرخ برآوردی در این منطقه ۲۴/۹۵- سانتی‌متر در سال به‌دست آمد. به منظور ارزیابی نتایج از داده‌های ترازایی دقیق و داده‌های شبیه‌سازی‌شده استفاده شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی در برآورد جابه‌جایی با نرخ بالا در مناطق برون‌شهری با توجه به ناتوانی هیچ یک از روش‌ها بر پایه پراکنش‌کننده‌های دایمی موجود در پایش جابه‌جایی، بهبود قابل توجهی به روش‌های تداخل‌سنجی راداری بر پایه پراکنش‌کننده‌های دایمی داد.



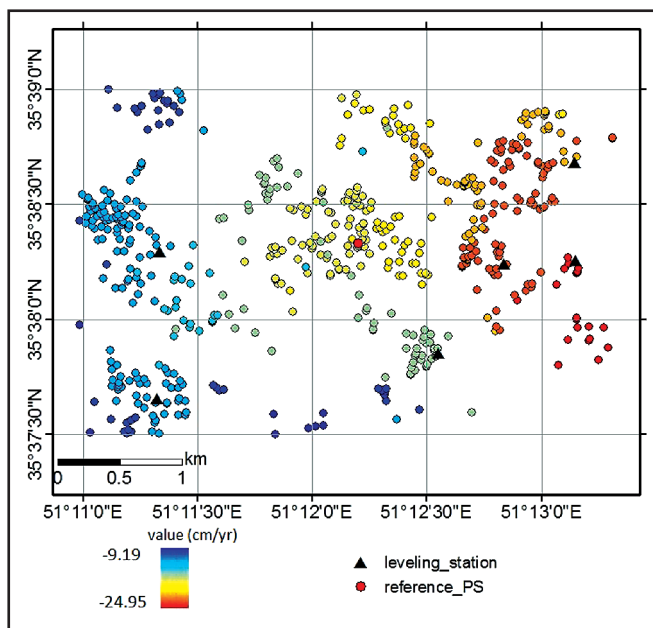
شکل ۱- مراحل مختلف الگوریتم پیشنهادی در برآورد نرخ درست فرونشست



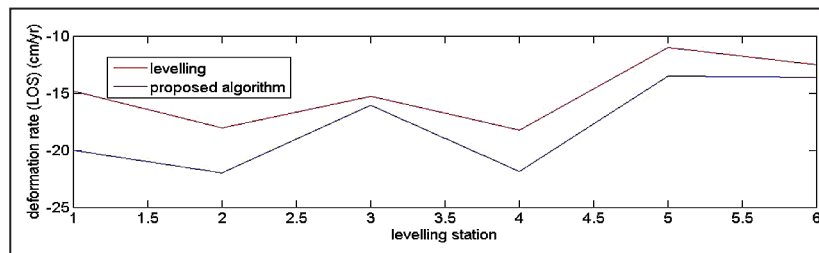
شکل ۲- موقعیت دشت تهران که تحت تأثیر پدیده فرونشست است. مسیرهای مختلف داده‌های راداری که منطقه فرونشست را می‌پوشاند (مربع‌های سیاه‌رنگ) به همراه موقعیت منطقه فرونشست (چندگوشه سفید رنگ) که در بالا شکل سمت راست نشان داده شده است. در شکل پایین سمت راست تصویر ETM^+ منطقه مورد نظر با ترکیب رنگی ۷،۴ و ۲ در کانال‌های سرخ، سبز و آبی به تصویر کشیده شده است. کادر سیاه‌رنگ (a) منطقه مورد مطالعه توسط الگوریتم بهبود یافته بر پایه پراکنش‌کننده دایمی را نشان می‌دهد.



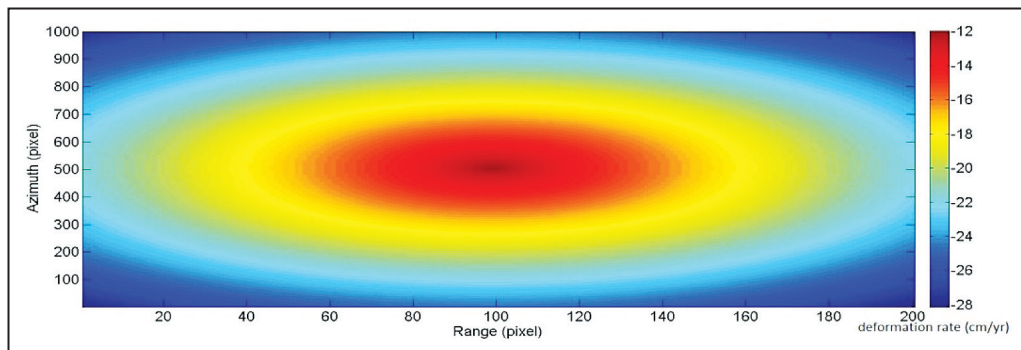
شکل ۳- خط مبنای زمانی نسبت به خط مبنای مکانی



شکل ۴- منطقه مورد مطالعه در جنوب باختری دشت تهران، نرخ میانگین جابه‌جایی در سوی خط دید ماهواره به‌ازای پیکسل‌های پراکنش‌کننده دایمی در بازه زمانی ۱۸ جولای ۲۰۰۳ تا ۲۴ اکتبر ۲۰۰۸ با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و داده‌های مسیر ۱۴۹، دایره قرمز در مرکز منطقه نشان‌دهنده موقعیت نقطه مرجع و نقاط مثلثی تعیین‌کننده موقعیت ایستگاه‌های ترازبایی دقیق هستند.



شکل ۵- مقایسه نرخ فرونشست برآورد شده به کمک روش ترازایی دقیق (خط سرخ) و الگوریتم بهبودیافته بر پایه پراکنش کننده دایمی (خط آبی)



شکل ۶- سرعت جابه‌جایی شبیه‌سازی شده به‌ازای کل پیکسل‌های شبیه‌سازی شده

جدول ۱- نتایج اجرای نمونه شبیه‌واقعی

❖	کمترین اختلاف (m/yr)	بیشترین اختلاف (m/yr)	میانگین اختلاف (m/yr)	RMSE (m/yr)
نمونه شبیه‌واقعی	- ۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۲۵	۰/۰۰۳

کتابنگاری

دهقانی، م.، ۱۳۸۸- تعیین نرخ و مدل‌سازی فرونشست زمین تحت تأثیر استخراج آب‌های زیرزمینی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، پایان‌نامه دکتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ایران.
 عربی، س.، منتظریان، ا. ر.، ملکی، ا. و طالبی، ا.، ۱۳۸۴- بررسی نشست منطقه جنوب غرب دشت تهران (۱۳۸۲-۱۳۷۴)، نشریه نقشه‌برداری سازمان نقشه‌برداری ایران، شماره ۶۹، صفحه ۲۸-۱۴.

References

- Amighpey, M., Arabi, S., Talebi, A. & 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.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F., 2003- "Monitoring landslides and tectonic motions with the permanent scatterers technique", Eng. Geology, vol. 68, pp. 3-14.
- Dehghani, M., ValadanZoej, M. J., Entezam, I. & Saatchi, S., 2009b- "InSAR Monitoring of Progressive Land Subsidence in Neyshabour; Northeast Iran.", Geophysical Journal International (GJI), vol. 178, pp. 47-56.
- Dehghani, M., Hooper, A., Hanssen, R., ValadanZoej, M. J., Saatchi, S. & 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., Valadan Zouj, M. J., Biggs, J., Mansourian, A., Parsons, B. & 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.
- Dehghani, M., ValadanZoej, M. J., Enteza, I., Saatchi, S. & 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.
- Dehghani, M., ValadanZoej, M. J., Bolourchi, M. J., Shemshaki, A. & Saatchi, S., 2008- ”MONITORING OF HASHTGERD LAND SUBSIDENCE INDUCED BY OVEREXPLOITATION OF GROUND WATER USING SAR INTERFEROMETRY”, journal of geosciences, vol. 17, no.1(ISC).
- Ferreti, A., Prati, C. & Rocca, F., 2001- Permanent scatterers in SAR interferometry.,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.39, no. 1 pp. 8-20.
- Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F., 2000- “Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry.,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.38, no. 5, pp. 2202-2212.
- Hanssen, R. F., 2001- Radar Interferometry: Data Interpretation and error analysis. Dordrecht, Kluwer academic publishers.
- Hooper, A., Segall, P. & Zebker, H., 2007a- “ Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis with application to Vacan Alcedo Galapagos., ” J. Geophysical Research,vol. 112, B07407, doi:10.1029/2006JB004763.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. & Kampes, B., 2004- “A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers.,”Geophysical Research Letter, vol.31, pp. 611-615.
- Humme, A. J. M., 2007- “ Point density optimization for SAR Interferometry-A study tested on salt mine areas., ” M.S. Dissertation, Department of Earth Observation and Space Systems, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Kampes, B. M. & Hanssen, R. F., 2004- “Ambiguity Resolution for Permanent Scatterer Interferometry.,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.42.
- 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, Delf University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Lyons, S. & Sandwell, D., 2003- “Fault creep along the southern San Andreas from interferometric synthetic aperture radar, permanent scatterers, and steeking.,” Journal of Geophysical Research, vol.108, pp. 2047-2070.
- Rocca, F., 2007- Modeling Interferogram Stacks, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing., vol. 45, pp.3289-3299.
- Samiei Esfahany, S., 2008- Improving persistent scatterer interferometry results for deformation monitoring, M.S. Dissertation, Delf University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Wegmuller, U., Senior Member, IEEE., Walter, D. & Spreckels, V., 2010- Nonuniform ground motion monitoring with TerraSAR-X persistent scatterer interferometry., IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,vol. 48, pp. 895-904.

Hybrid of Two Persistent Scatterer Interferometry Methods in Order to Subsidence Monitoring

Z. Sadeghi ^{1*}, M. J. Valadzouj ² & M. Dehghani ³

¹ M.Sc., Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N.Toosi University of Tehnology, Tehran, Iran

² Associate Professor, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N.Toosi University of Tehnology, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, School of Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

Received: 2011 October 05

Accepted: 27 February 2012

Abstract

Temporal and geometrical decorrelation often prevents SAR conventional interferometry from being an operational tool for surface deformation monitoring. Persistent Scatterer Interferometry (PSI) techniques presented to overcome the limitation of SAR conventional interferometry and use amplitude analysis and considering temporal deformation model for PS pixel selection fail to identify PS pixels in rural areas lacking man-made structures. On the other hand, the high subsidence rates lead to not be fulfilled the required condition for unwrapping (Nyquist sampling criterion) and significant phase unwrapping errors in novel PSI algorithm (StaMPS) that applies amplitude analysis as well as phase stability in order to select the PS pixels without using a pre-define deformation model. Therefore, in this paper we present an enhanced algorithm based on PSI in order to estimate deformation rate in rural area undergoing high and nearly constant deformation rate using the available SAR images. The proposed approach integrates the merits of all existing PSI algorithms in PS pixel selection and phase unwrapping. PS pixels are selected based on the amplitude information and phase stability and their phase are compensated for APS and nonlinear deformation contribution by applying temporal filter. Deformation rate is then estimated using LAMBDA method that is a fast and optimal without considering Niquist sampling criterion. The approach was applied to the ENVISAT ASAR images of Southwestern Tehran basin and the results were evaluated with leveling data and the maximum difference rate across the leveling stations was 5 cm/yr demonstrating the high performance of the proposed algorithm in comparison with the obtained results from other interferometry methods. Moreover, the presented algorithm was applied to the simulated data and the value of RMSE was obtained 0.003 m/yr confirming this success.

Keywords: Persistent Scatterer, High deformation rate, LAMBDA.

For Persian Version see pages 45 to 54

*Corresponding author: Z. Sadeghi; E-mail: atena_sadeghi_ak@yahoo.com