



Extracting the amount of subsidence of subway tunnels from InSAR Pouya

P. Eshghy , M. Kazerooni 

*Associate Professor, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 2022 /05/19, Revised: 2022/07/18, Accepted: 2022/08/09, Published: 2022/09/21)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.1.12.1>

ABSTRACT

The main purpose of this article is to design and simulate an algorithm for the buried target from InSAR, and the purpose of this study is to start with the construction and analysis of the subsidence rate of the subway tunnel in the construction of Isfahan city. The main connections of InSAR for the construction and monitoring of subsidence of such goals are in determining the measuring time and reducing the correlation due to the change of the reflective characteristics of the geographical objects over time, which leads to the reduction of the interference coherence. In the design of this algorithm, an attempt has been made to increase the degree of coherence between the interference views by using the interferometer radar time series processing and the selection of widespread stable scatterers, as well as the optimal and continuous graphic design between the images under processing, which causes the stability of the phase of the distributed targets. Also, in order to reduce the amount of noise in the interference of views, in the stage before phase unwrapping, by applying a filter and suitable parameters to increase the signal to noise, in which the average coherence in the interference of the created views is 9% compared to other filters. It is closer to the number 1, which is the highest level of coherence, and in the end, in order to increase the accuracy and not to remove the regions with relatively low coherence, we will implement the optimal fuzzy unwrapping algorithm, which measures the average absolute value of the relative error in phase unwrapping by 12%. Finally it is clear that the subsidence of the target under study is different from the subsidence caused by natural causes such as underground water or drought and has a recognizable subsidence pattern.

Keywords: Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), co-registration, filtering, noise, unwrapping .

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



*Corresponding Author Email: kazerooni@mut.ac.ir

علمی - پژوهشی

استخراج میزان فرونشست تونل‌های مترو از دید رادار InSAR

پویا عشقی^۱، مرتضی کازرونی^{۲*}

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران ۲-دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
(دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۹، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۸، انتشار: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲)

DOR:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.1.12.1>



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) Creative Commons Attribution توزیع شده است.

نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

هدف اصلی این مقاله طراحی و شبیه‌سازی الگوریتمی برای آشکارسازی و تحلیل میزان فرونشست تونل مترو در حال احداث شهر اصفهان از دید رادار InSAR می‌باشد. محدودیت‌های اصلی InSAR برای آشکارسازی و پایش فرونشست ناشی از این‌گونه اهداف در خط مبنای زمانی سنجنده و کاهش همبستگی به دلیل تغییر ویژگی‌های بازتابی اجسام جغرافیایی (پراکنده سازه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه) در طول زمان می‌باشد که منجر به کاهش هم‌دوسی و ایجاد نویز در تداخل نماهای ایجاد شده می‌گردد. در طرح این الگوریتم سعی بر آن بوده است که با استفاده از پردازش سری زمانی رادار تداخل‌سنج و انتخاب پراکنده سازه‌های پایدار گسترده و همچنین طرح گرافی بهینه و پیوسته مابین تصاویر تحت پردازش که باعث پایداری فاز اهداف توزیع شده می‌شود، میزان هم‌دوسی بین تداخل نماها را افزایش داد. همچنین در ادامه جهت کاهش میزان نویز موجود در تداخل نماها، در مرحله قبل از بازیابی فاز با اعمال فیلتر و پارامترهایی مناسب نسبت به افزایش سیگنال به نویز پرداخته شده است که در آن میانگین هم‌دوسی در تداخل نماهای ایجاد شده نسبت به سایر فیلترها به میزان ۹٪ به عدد ۱ که بیشترین میزان هم‌دوسی می‌باشد، نزدیک‌تر است و در انتها جهت افزایش دقت و عدم حذف مناطقی که دارای هم‌دوسی به نسبت پایینی می‌باشند به پیاده‌سازی الگوریتم بهینه بازیابی فاز می‌خواهیم پرداخت که معیار میانگین قدرمطلق خطای نسبی در بازیابی فاز به میزان ۱۲٪ نسبت به سایر الگوریتم‌های بازیابی فاز عملکرد بهتری خواهد داشت. در انتها پس از پردازش‌های ذکر شده مشخص می‌گردد که فرونشست هدف مورد مطالعه با فرونشست ناشی از عوارض طبیعی نظیر سفره‌های آب‌های زیرزمینی و یا خشک‌سالی متفاوت بوده و دارای الگوی فرونشست قابل تشخیصی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: رادار روزه مصنوعی تداخل‌سنج (InSAR)، هم مرجع‌سازی، فیلترگذاری، نویز، واپیچش.

۱- مقدمه

که در زمان دیگر توسط همان سنجنده رادار برداشت می‌شود، تلفیق شده و نتایج حاصله تفسیر می‌شود. با این فناوری می‌توان تغییرات و جابه‌جایی سطحی ناشی از پدیده‌هایی که در زیر سطح (طبیعی و مصنوعی) صورت گرفته است را شناسایی کرد. امروزه با پیشرفت فن آوری، سهولت نسبی در حفاری و ساخت سازه‌های زیرزمینی، محدودیت‌های فضاهای سطحی برای اجرای طرح‌های عمرانی، توجه بسیاری از کشورها به احداث سازه‌های زیرزمینی برای مغارهای زیرزمینی در دفن زباله‌های هسته‌ای و یا به‌عنوان مخازن نفتی، آزمایشگاه‌های هسته‌ای معطوف شده است و این‌گونه از اهداف دارای ساختارهای گوناگون و کاربردهای متفاوت در عمق‌های مختلفی از سطح زمین قرار گرفته‌اند.

در سال‌های اخیر روش تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان ابزاری کارآمد در مطالعه کلیه پدیده‌هایی که سبب تغییر سطح زمین می‌شوند، ارائه و مورد استفاده قرار گرفته است. کاربری ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی، تداخل‌سنجی رادار روبه‌رشد بوده و طی سال‌های اخیر به‌عنوان روشی نو و ارزشمند جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. اساس کار این روش در اندازه‌گیری حرکات سطح زمین با استفاده از تصاویر تکراری رادار است. تصویری که از یک منطقه در یک زمان مشخص برداشت می‌شود (زمان مرجع) با تصویری

پرسش اصلی پژوهش این مقاله به صورت زیر مطرح می‌شود:

آیا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک تداخل‌سنجی راداری می‌توان میزان جابه‌جایی زمین و در نتیجه فرونشست زمین را برآورد کرد؟ برای پاسخ به پرسش پژوهش دو فرضیه در نظر گرفته شده است به صورت زیر مطرح می‌شوند:

- آیا می‌توان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری با روزنه مصنوعی بر روی تصاویر ماهواره‌ای، میزان تغییرات جابه‌جایی سطح زمین و در نتیجه فرو نشست زمین را به دست آورد؟
- آیا بین میزان فرو نشست و هدف مدفون در منطقه مورد مطالعه رابطه معنی‌داری وجود دارد؟

پژوهش‌های گوناگونی در این زمینه تاکنون انجام پذیرفته است که در [۱] به بررسی فرونشست ناشی از حفاری‌های مترو و تأسیسات جانبی با بهره‌گیری از الگوریتم تداخل‌سنجی سری زمانی (PS^۱) یا همان پراکنده سازهای نقطه‌ای و استفاده از ماهواره‌های با وضوح بالا (مانند TerraSAR آلمانی و Cosmo Sky Med ایتالیایی) که در مدار قرار گرفته‌اند، پرداخته شده است که افق‌های جدیدی را در نظارت بر مناطق شهری با روش‌های InSAR^۲ گشوده‌اند و در [۲] برای اولین بار از تکنیک رادار روزنه مصنوعی (SBAS^۳-InSAR) برای پایش و تحلیل توزیع مکانی و زمانی فرونشست زمین در طول خطوط مترو استفاده نموده است. در این مقاله بیست و هفت تصویر SAR برای به دست آوردن اطلاعات فرونشست زمین در امتداد خط ۱۳ مترو چینگدائو (ایستگاه جاده جیالینگ‌جیانگ-ایستگاه جیمیا) از ژانویه ۲۰۱۸ تا دسامبر ۲۰۱۹ پردازش گردیده است.

اندازه‌گیری‌های مداوم در مقیاس مکانی و زمانی تغییر شکل سطح به دلیل فرونشست مترو، اساس مدیریت هوشمند حمل‌ونقل شهری و همچنین ضمانت هشدار اولیه در مورد بلایای زمین‌شناسی است. در [۳] از اندازه‌گیری‌های رادار روزنه مصنوعی تداخل‌سنجی برای مطالعه و توصیف فرآیند تغییر شکل ناشی از فرونشست ناشی از مترو سوژو با استفاده از داده‌های TerraSAR با وضوح بالا و خط مبنای^۴ مکانی - زمانی کوتاه استفاده شده است. در مقاله حاضر برتری الگوریتم طرح‌شده این می‌باشد که با بهره‌گرفتن از داده‌های ماهواره سنتینل ۱ و پردازش سری زمانی رادار تداخل‌سنجی، انتخاب پراکنده سازهای پایدار گسترده، طرح گرافی بهینه و پیوسته مابین تصاویر تحت پردازش و استفاده از خط مبنای مکانی - زمانی کوتاه باعث پایداری فاز اهداف توزیع‌شده می‌گردد. همچنین با مقایسه و بهره‌گرفتن از پارامترهای سیستمی مناسب با توجه به شرایط اقلیمی و جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (خشک و بیابانی) میزان همدوسی بین تداخل نماها افزایش داده

شده است که امکان بررسی میزان و الگوی فرونشست حاصل از حفر تونل مترو را در مقیاس زمانی سال را فراهم می‌نماید. در حالی که در مراجع گذشته به بررسی میزان فرونشست ناشی از اهداف زیرسطحی در مناطق شهری (دارای پراکنده ساز نقطه‌ای مناسب و کافی) و مقیاس زمانی کوتاه‌تری نسبت به این مقاله پرداخته شده است.

هدف اصلی این روش بررسی توانایی جهت استفاده در کشف غیرمستقیم فضاهای زیرزمین مانند تونل با استفاده از شناسایی و برآورد میزان فرونشست و تغییر سطح زمین در محل حفاری و ساخت‌وسازهای زیرزمینی می‌باشد.

در این مقاله ابتدا پس از معرفی بلوک دیگرام پردازش InSAR و پارامترهای اثرگذار بر آن به ارائه روش‌های پیشرفته در پردازش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری خواهیم پرداخت سپس با توجه به هدف مطالعاتی و بلوک دیگرام پردازش به ایجاد یک فلوجارت تداخل‌سنجی InSAR و پیاده‌سازی آن بر روی تصاویر ماهواره‌ای از منطقه جغرافیایی هدف مطالعاتی می‌پردازیم. همچنین به بررسی میزان فرونشست ناشی از هدف زیرسطحی و در انتها به تحلیل درستی نتایج طبق معیار ارزیابی خواهیم پرداخت.

۲- مبانی نظری تحقیق

۱-۲- مبانی InSAR

InSAR ابزاری قدرتمند و کارآمد در سنجش‌ازدور است که به کمک آن می‌توان اندازه‌گیری‌های بسیار دقیقی از پارامترهای ژئوفیزیکی نظیر نقشه‌برداری سطحی، نشست‌ها و تغییرات زمین را به دست آورد.

به‌طور کلی، کاربردهای پردازش InSAR، در دودسته قابل تقسیم‌بندی است. در دسته اول، هدف از پردازش InSAR، تهیه نقشه ارتفاع صحنه است. مهم‌ترین کاربرد آن، ایجاد نقشه دیجیتال ارتفاع DEM^۵ از محیط، مکان‌نگاری^۶ صحنه و تحلیل جریان‌های آبی و اقیانوسی است [۴]. در دسته دوم، هدف از پردازش InSAR، آشکارسازی تغییرات صحنه^۷ است. از جمله مهم‌ترین کاربردهای این دسته، آشکارسازی و نمایش اجسام متحرک مانند کاربردهای ترافیکی، اثرات و تغییرات ناشی از زلزله، آتش‌فشان، رانش زمین، تغییرات محیطی شامل محیط‌های شهری، اقیانوسی و یا یخچال‌های طبیعی و ... است [۴].

ایده اصلی InSAR، استفاده از تغییرات فاز دو یا چند تصویر SAR از یک صحنه است. با توجه به اینکه فاز هر پیکسل تصویر، حاوی اطلاعاتی از برد محیط است، به کمک آن می‌توان تغییرات بسیار کوچک در ابعاد سانتی‌متر یا میلی‌متر را آشکارسازی کرد و

¹ Persistent Scatterer Interferometry

² Interferometric Synthetic Aperture Radar

³ Small Baseline Subset

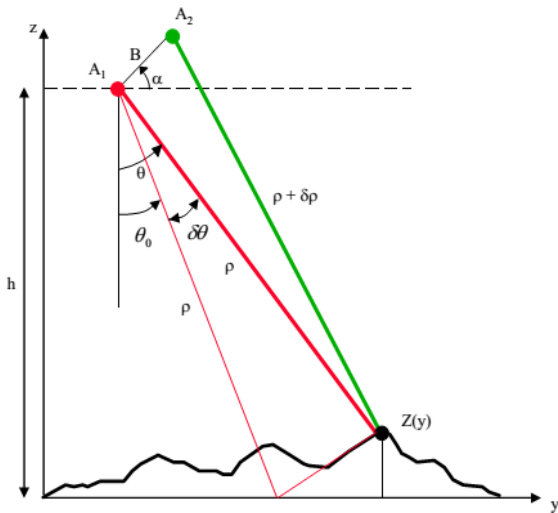
⁴ Baseline

⁵ Digital Elevation Model

⁶ Topography

⁷ Change Detection

$$\Delta\phi = \frac{2\pi B_{\perp}Z(y)}{\lambda \rho \sin(\theta_0)} \quad (1)$$



شکل (۲). یک هندسه متداول در InSAR [۵]

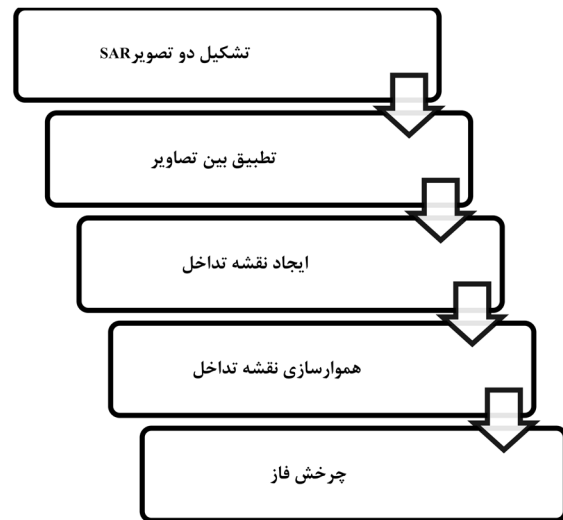
که در آن λ طول موج، $\Delta\phi$ اختلاف فاز ایجاد شده مابین دو نگاه، α زاویه سنجنده ها نسبت به محور y و B_{\perp} خط مبنای مکانی عمودی می‌باشد. از رابطه (۱) مشاهده می‌شود، با استفاده از نقشه اختلاف فاز بین دو تصویر، اطلاعاتی در مورد بعد سوم صحنه (ارتفاع پیکسل‌های صحنه) قابل‌دستیابی است. باید توجه داشت مقدار فاز تخمین زده شده، به علت چرخش فاز، برای هر 2π رادیان، موجب ایجاد ابهام در تعیین ارتفاع اهداف از نقشه فاز می‌شود. لذا ارتفاع به ازای هر $h_a = \frac{\lambda R \sin(\theta)}{2B}$ متر، دارای ابهام خواهد بود که در آن R برد رادار می‌باشد. همان‌طور که از این رابطه مشاهده می‌شود، کاهش مقدار B ، موجب افزایش مقدار ارتفاع بدون ابهام می‌شود. لذا برای سادگی در انجام مرحله واپیچش فاز بهتر است مقدار B کوچک باشد. اما کاهش مقدار B موجب افزایش نویز در فرایند پردازش InSAR می‌شود. به همین منظور در کاربردها، برای دستیابی به نتیجه مناسب، بازه محدودی برای اندازه B در نظر گرفته می‌شود [۵]. پس از تطبیق بین تصاویر، نقشه تداخل با اعمال ضرب مختلط دو تصویر تشکیل می‌شود. باتوجه به اینکه فاز این نقشه، حاوی اطلاعاتی از صحنه و همچنین جابه‌جایی هندسه است، فاز نقشه به دست‌آمده محاسبه می‌شود. در حالت کلی، فاز به دست‌آمده در نقشه تداخل، ناشی از عوامل مختلفی است که در رابطه (۲) نشان داده شده است [۶]:

$$\varphi_{int} = \varphi_f + \varphi_{topo} + \varphi_{disp} + \varphi_{atm} + \varphi_{err} + \varphi_{int} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، φ_f فاز ناشی از برد هدف، φ_{topo} فاز ناشی از ارتفاع هدف، φ_{disp} فاز ناشی از جابه‌جایی هدف، φ_{atm} فاز ناشی از تأثیر جو روی سیگنال دریافتی و φ_{err} نویز باقیمانده در فاز سیگنال دریافتی است. کاربردهای مختلف پردازش InSAR در دسته قابل تقسیم بندی هستند. در دسته اول، هدف از پردازش

آن را سنجید. باتوجه به اینکه دقت این اندازه‌گیری مستقل از فاصله حسگر با صحنه است، باعث شده تا از این تکنیک در سیستم‌های هوا پایه و فضاپایه استفاده شود [۵].

در حالت کلی، بلوک دیاگرام نحوه تشکیل نقشه ارتفاع صحنه با استفاده از پردازش InSAR، در شکل (۱) نشان داده شده است. اگرچه کاربردهای مختلفی از InSAR، ارائه شده است، اما این بلوک دیاگرام، در غالب کاربردها جزو اصلی بخش‌های پردازش است و غالباً تفاوت، در استخراج اطلاعات از نقشه ایجاد شده می‌باشد.



شکل (۱). بلوک دیاگرام پردازش InSAR

۲-۲- استخراج اطلاعات از فاز تصاویر SAR و

ایجاد تداخل نما

در فاز پیکسل‌های تصویر SAR، اطلاعاتی از فاصله اهداف وجود دارد که به کمک تلفیق فاز دو تصویر SAR، نقشه جدیدی ایجاد می‌شود و مقدار فاز آن، متناسب با بعد سوم اهداف موجود در صحنه است و به کمک آن، می‌توان نقشه ارتفاع اهداف موجود در صحنه را به وجود آورد. هندسه شکل (۲) را در نظر بگیرید که در آن، ρ فاصله بین سکوی اول تا هدف موردنظر با ارتفاع $Z(y)$ آن، $\Delta\rho$ اختلاف فاصله مابین دو سکو تا هدف عنوان شده، θ_0 زاویه نشیب رادار موجود در سکوی اول نسبت به نقطه مرجع، h ارتفاع سکوی اول تا سطح زمین، B خط واصل بین دو رادار و θ زاویه بین LOS^1 رادار تا هدف واقع در ارتفاع $Z(y)$ است.

فاز دریافتی در رادار اول و دوم به ترتیب برابر $\varphi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda}\rho$ و $\varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}(\rho + \Delta\rho)$ است.

باتوجه به [۵] ارتباط بین اختلاف فاز هموار شده، با ارتفاع هدف تعیین می‌شود. با معرفی $B_{\perp} = B \cos(\theta_0 - \alpha)$ اختلاف فاز را می‌توان به صورت رابطه ی (۱) بیان کرد [۵]:

¹ Line of Sight

در رابطه (۳)، γ همدوسی نقشه تداخل و δ ناهمبستگی بین دو تصویر است. ناهمبستگی بین دو تصویر بر اساس رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۸]:

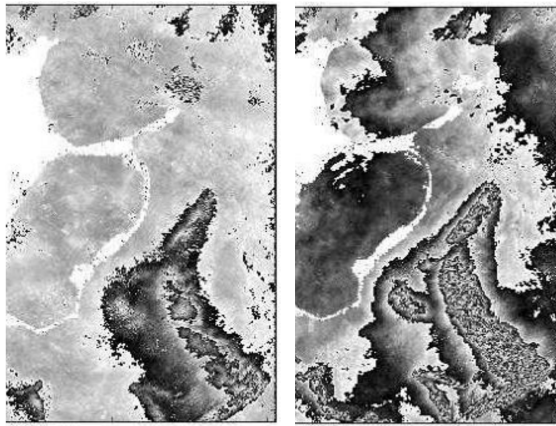
$$\delta = \delta_{Baseline} \delta_{SNR} \delta_{Process} \delta_{Vol} \delta_{temp} \quad (4)$$

که در رابطه (۴) $\delta_{Baseline}$ نشان‌دهنده تأثیر خط مبنای مکانی، δ_{SNR} نسبت سیگنال به نویز، $\delta_{Process}$ تأثیر نحوه پردازش سیگنال و عدم تطبیق مناسب دو تصویر در دقت پردازش، δ_{Vol} تأثیر تغییرات جوی و زمانی در دقت پردازش و δ_{temp} تأثیر در جه حرارت سنجنده‌ها در ناهمبستگی می‌باشد.

۴-۲- تأثیر پارامترهای فیزیکی و هندسی در

دقت پردازش

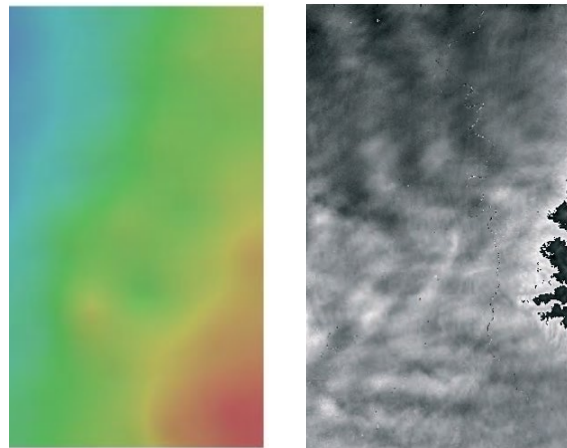
باتوجه به این که دو تصویر SAR از دو سکو در دو موقعیت متفاوت ایجاد می‌شود، زاویه دید دو تصویر، با یکدیگر متفاوت خواهد شد. تفاوت زاویه دید در دو تصویر، منجر به ایجاد نویز لکه در دو تصویر می‌شود و در نتیجه تأثیر مستقیمی در همدوسی نقشه تداخل دارد. به همین دلیل، برای کاهش تلفات همدوسی، محدودیتی در فاصله و پارامترهای هندسی دو سکو به وجود می‌آید به‌بیان‌دیگر، چنان چه فاصله خط واصل دو سکو از یک مقدار بحرانی^۱ بیشتر باشد، دو تصویر نسبت به یکدیگر ناهمبسته شده و در نتیجه همدوسی نقشه تداخل صفر شده و نقشه تداخل، به‌طور کامل، نویزی می‌شود [۹]. باتوجه به [۸، ۹] مشاهده می‌شود، ارتفاع و فاصله عمودی دو سکو با یکدیگر، رابطه عکس‌دارند. لذا با افزایش مقدار فاصله عمودی، دقت سنجش ارتفاع، افزایش می‌یابد. شکل (۴)، تصویر ارتفاع تشکیل‌شده از یک صحنه را با در نظر گرفتن دو مقدار مختلف برای خط واصل دو سکو نشان می‌دهد. در مجموع انتخاب خط واصل بهینه وابسته به شرایط صحنه و پردازش داده است. به‌طور معمول، خط پایه کوچک‌تر، منجر به ساده شدن فرایند واپیچش فاز می‌شود اما از سوی دیگر، به دلیل بالا رفتن حساسیت به نویز فاز و تأثیرات جوی، کمتر در کاربردهای عملی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



(ب)

(الف)

InSAR، استخراج φ_{topo} و تولید مدل دیجیتال ارتفاع صحنه است. در دسته دوم، هدف استفاده از φ_{disp} و آشکارسازی تغییرات صحنه است [۶]. بنابراین، مراحل بعدی در پردازش InSAR، استخراج φ_{topo} یا φ_{disp} از فاز نقشه تداخل و غلبه و اصلاح سایر فازهای ایجادشده در نقشه تداخل است. سایر عوامل تغییردهنده فاز در [۷، ۶] معرفی شده و تأثیر آن در نقشه ایجاد شده بیان می‌شود. شکل (۳) نقشه فاز ایجادشده از دو تصویر را در دو زمان مختلف را نشان می‌دهد.



(ب)

(الف)

شکل (۳). (الف) فاز به وجود آمده به دلیل تغییرات اتمسفری (ب) فاز تغییرات اتمسفری شبه‌سازی شده [۷]

به‌طور کلی، مهم‌ترین منابع نویز سیگنال دریافتی، ناشی از رفتار پراکنده سازه‌های موجود در صحنه است. آن چه تاکنون به دست آمد، بر فرض وجود یک پراکنده ساز پایدار و ثابت در هر سلول بود. در حالی که در عمل، این فرض صادق نیست و فاز هر پیکسل تصویر، رفتاری نویزی دارد. به‌طور کلی، تغییرات سیگنال بازگشتی از هر سلول را می‌توان در دودسته تقسیم‌بندی کرد [۷] که عبارت‌اند از:

۱- نویز ناشی از تغییرات زمانی پراکنده سازها

۲- نویز ناشی از تغییر زاویه دید

۳-۲- دقت پردازش در تصویرسازی InSAR

عوامل زیادی در دقت پردازش InSAR تأثیر دارد. به‌طور کلی، دقت پردازش InSAR، وابسته به مقدار همدوسی نقشه تداخل است و با افزایش آن، دقت نقشه DEM تولیدشده یا جابه‌جایی اندازه‌گیری شده افزایش می‌یابد [۸].

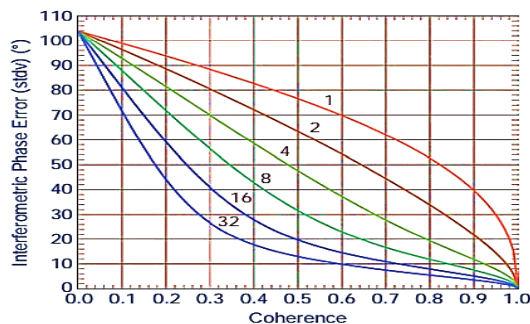
باتوجه به ارتباط بین همدوسی نقشه تداخل و همبستگی بین تصاویر، عوامل مؤثر بر همبستگی بین تصاویر موجب تأثیر در همدوسی نقشه تداخل و در نتیجه دقت پردازش InSAR می‌شود. براین اساس داریم [۸]:

$$\gamma = 1 - \delta \quad (3)$$

¹ Critical Baseline

تغییراتی که برای پراکنده سازهای موجود در یک سلول باگذشت زمان یا تغییرات جوی به وجود می‌آید، منجر به کاهش همدوسی نقشه تداخل می‌شود. این عدم همبستگی، برای نواحی خشک و بدون پوشش گیاهی (مانند محیط‌های صخره‌ای یا نواحی شهری) کاهش می‌یابد. برای کاهش اثر این ناهمبستگی، لازم است تا با شناخت این تغییرات، تصاویر در شرایط جوی مشابه یا فاصله زمانی مناسب از صحنه گرفته شود [۱۰]. تلفاتی که به دلیل عدم همبستگی بین تصاویر به وجود می‌آید، می‌تواند منجر به خطای فاز بزرگ در نقشه تداخل شود.

یکی از راه‌های مناسب برای افزایش دقت در پردازش InSAR، استفاده از تکنیک پردازش چند نگاهه^۱ است. در این روش، هر پیکسل به‌صورت میانگین یک پنجره از پیکسل‌های اطراف آن محاسبه می‌شود. این میانگین‌گیری موجب کاهش انحراف معیار فاز نقشه تداخل می‌شود. شکل (۵)، ارتباط همدوسی و انحراف معیار فاز نقشه تداخل را با تعداد نگاه‌ها نشان می‌دهد.



شکل (۵). تغییرات انحراف معیار فاز نقشه تداخل با همدوسی به ازای تغییرات تعداد نگاه‌ها [۱۰]

۸-۲- معرفی روش‌های پیشرفته در پردازش

تداخل سنجی تفاضلی راداری

پارامترهای گوناگونی در تغییر فاز نقشه تداخل نقش دارند. به همین دلیل برای محاسبه تغییر فاز ناشی از جابه‌جایی صحنه، لازم است تأثیر آن‌ها حذف شوند. تکنیک InSAR تفاضلی (D-InSAR^۲)، با استفاده از یک نقشه تداخل DEM تهیه‌شده از صحنه، تأثیر توپوگرافی صحنه را از فاز نقشه تداخل حذف می‌کند. با این وجود، به دلیل عواملی نظیر تغییر شرایط اتمسفری در زمان اخذ دو تصویر، وجود خطا در حذف اثر توپوگرافی صحنه و نویز، محاسبه جابه‌جایی صحنه از نقشه تداخل، با خطا همراه است. به همین دلیل، با بهره‌گیری از تعدادی نقشه تداخل در طول زمان، جابه‌جایی‌ها از صحنه محاسبه می‌شود. این تکنیک با نام تکنیک پردازش چند زمانی نامیده می‌شود [۹]. در این روش، یک مجموعه از تصاویر InSAR (حداقل ۵ تصویر)، از یک محیط، در زمان‌های مختلف، ایجاد می‌شود و نسبت به یکدیگر

شکل (۴). دو تصویر SAR با اندازه خط واصل (الف) ۵۳۱ متری (ب) ۱۷۳ متری [۹]

ارتباط بین همبستگی و خط مبنای بحرانی در رابطه (۵) بیان شده است [۹]:

$$\rho_{Baseline} = \begin{cases} \frac{B_{\perp Critical} - B_{\perp}}{B_{\perp Critical}} & |B_{\perp}| \leq B_{\perp Critical} \\ 0 & |B_{\perp}| > B_{\perp Critical} \end{cases} \quad (5)$$

که در آن $\rho_{Baseline}$ همبستگی ناشی از خط مبنای مکانی و $B_{\perp Critical}$ خط مبنای مکانی بحرانی می‌باشد.

۵-۲- تأثیر میزان سیگنال به نویز (SNR) تصویر در

دقت پردازش تصویر

همان‌طور که بیان شد، دقت تخمین نقشه ارتفاع، وابسته به مقدار همبستگی بین تصاویر است. یکی از عوامل مؤثر در همبستگی بین دو تصویر، مقدار SNR دو تصویر است. رابطه بین SNR تصویر و ناهمبستگی بین دو تصویر برابر است با [۱۴]:

$$\delta_{SNR} = \frac{1}{1+SNR^{-1}} \quad (6)$$

چنان چه دو تصویر با استفاده از دو سیستم متفاوت با دو سیگنال به نویز متفاوت ایجاد شده باشد داریم [۸]:

$$\delta_{SNR} = \frac{1}{\sqrt{(1+SNR_1^{-1})(1+SNR_2^{-1})}} \quad (7)$$

که در آن SNR_1^{-1} معکوس نسبت سیگنال به نویز تصویر اول و SNR_2^{-1} معکوس نسبت سیگنال به نویز تصویر دوم می‌باشد.

۶-۲- تأثیر نحوه پردازش سیگنال و عدم تطبیق

مناسب دو تصویر در دقت پردازش

تطبیق بین دو تصویر تأثیر زیادی در همدوسی نقشه تداخل دارد. چنان چه در فرایند تطبیق بین تصاویر، خطا وجود داشته باشد، این خطا موجب کاهش همدوسی می‌شود. برای مثال، چنان چه دو تصویر نسبت به یکدیگر، به اندازه یک سلول قدرت تفکیک و جابه‌جایی داشته باشند، همدوسی بین دو تصویر به صفر می‌رسد. در حالت کلی، رابطه بین مقدار همبستگی و جابه‌جایی بین پیکسل‌های دو تصویر در رابطه (۸) نمایش داده شده است [۹]:

$$\rho_{Coreg} = \begin{cases} \text{sinc}(\mu) & 0 \leq \mu \leq 1 \\ 0 & \mu > 1 \end{cases} \quad (8)$$

در رابطه فوق، μ نمایانگر میزان شیفت سلول پیکسل‌ها در هم مرجع‌سازی می‌باشد.

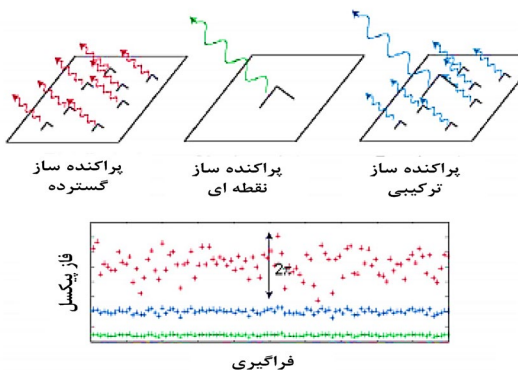
۷-۲- تأثیر تغییرات جوی و زمانی در دقت

پردازش

¹ Multitemporal

² Differential InSAR

زیرا در این روش، نقشه‌های تداخل، بدون در نظر گرفتن اثر ناهمبستگی ناشی از افزایش خط مبنا انجام می‌شود [۱۱].



شکل (۶). نقشه تغییرات فاز یک پیکسل برای اهداف پراکنده و ماندگار در طول تصاویر مختلف [۱۱]

۳- روش‌شناسی

۳-۱- فلوجارت تداخل‌سنجی SAR

جهت بررسی و تحلیل هدف مدفون در مقیاس بزرگ از دیدگاه رادار تداخل‌سنجی باتوجه به بررسی‌ها صورت گرفته می‌بایست با طی کردن مراحل منظم و با پیاده‌سازی پارامترهای پردازشی در نظر گرفته شده به بررسی و پایش هدف مدفون پرداخت، لذا در این قسمت مطابق شکل (۷) جهت درک بهتر نحوه پیاده‌سازی این الگوریتم طی یک فلوجارت به معرفی مراحل آن و نحوه اعمال پارامترهای مربوطه خواهیم پرداخت.

۳-۲- ایجاد الگوریتم تداخل‌سنجی

در این مقاله تونل مترو اصفهان به صورت تونل‌های دوقلو با دو خط رفت و برگشت مجزا در نظر گرفته شده است که فاصله مرکز به مرکز دو تونل در حدود ۶۰ متر متغیر است. مقطع تونل مترو اصفهان به شکل دو قوسی بوده و قطر تونل در قسمت میانی حدود ۱۰ متر فرض شده است. همچنین تونل‌ها در عمق ۵۰ تا ۱۰۰ متری زمین بوده و سطح آب زیرزمینی تقریباً در عمق ۱۵ متری از سطح زمین فرض می‌شود که می‌توان عنوان نمود یک هدف توزیع شده می‌باشد.

مقایسه و بررسی می‌شود [۹]. در حالت کلی، تعیین نرخ تغییرات و جابه‌جایی‌های صحنه، با استفاده از پردازش پیکسل‌های مناسب در نقشه‌های تداخل انجام می‌شود. پیکسل مناسب، شامل اهدافی است که هم‌دوسی آن‌ها، در طول زمان و در تصاویر SAR حفظ می‌شود. این اهداف به دو صورت توزیع شده^۱ و نقطه‌ای^۲ هستند.

۲-۸-۱- تداخل‌سنجی به وسیله پراکنده سازهای ماندگار (PSI)

این روش، باهدف آشکارسازی تغییرات صحنه، به خصوص برای اهداف پایدار و ماندگار موجود در صحنه پیشنهاد و ارائه شده است. این اهداف شامل پراکنده سازهای غالب در یک پیکسل بوده و به همین دلیل، طبیعتی ثابت و ماندگار دارند و باگذشت زمان، رفتار بازتاب‌پذیری آن‌ها تغییر نمی‌کند. به همین دلیل، برای این اهداف ناهمبستگی فاز (وابسته به تغییرات زمانی و تغییرات خط واصل سکوها) مقدار کوچکی است. به طور معمول این اهداف در محیط‌های شهری، شامل دائمی^۳ (مانند ساختمان‌ها) و در نواحی طبیعی، شامل اهدافی (مانند سنگ‌ها و صخره‌ها) می‌شوند. چنان چه تصویربرداری از نواحی جنگلی یا نواحی حاوی آب باشد به دلیل عدم حضور اهداف ماندگار، به طور معمول اهدافی از پیش تعیین شده که معمولاً شامل بازتاب‌کننده‌ها^۴ هستند در محیط قرار داده می‌شود. از جمله قابلیت‌های این روش، عدم وابستگی به طول خط واصل بین سکوها، حذف قابل توجه اثر تغییرات اتمسفری و افزایش دقت در محاسبه عوارض صحنه است [۱۰].

۲-۸-۲- تداخل‌سنجی به وسیله پراکنده سازهای

گسترده (SBAS)

چنان چه در صحنه، اهداف غالب وجود نداشته باشد، امکان استفاده از آن، کاهش می‌یابد. در نواحی که در آن‌ها هدف غالبی وجود ندارد، پیکسل‌های تصویر، تحت تأثیر ناهمبستگی ناشی از افزایش خط پایه قرار می‌گیرند اگرچه اطلاعات هم‌دوسی از این پیکسل‌ها قابل استخراج خواهد بود. شکل (۶) رفتار فاز اهداف پراکنده و ماندگار را نشان می‌دهد. باتوجه به این شکل، مشاهده می‌شود، به دلیل عدم پایداری فاز برای این اهداف، امکان استفاده از روش PSI برای تخمین جابه‌جایی‌های صحنه وجود ندارد

¹ Distributed

² Persistent

³ Permanent

⁴ Reflectors

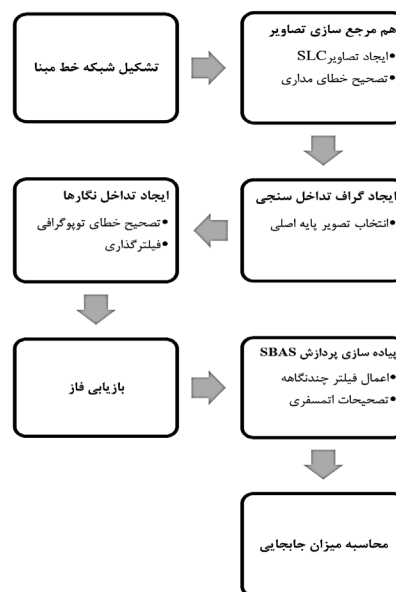
۱۲ روز و از سنجنده راداری CSAR بهره می‌برد. فرکانس کاری این سنجنده ۵/۴۵ GHz است که در باند C قرار دارد. این سنجنده در مدهای مختلفی در حال تصویربرداری می‌باشد که مود IW^2 مناسب‌ترین مود جهت پردازش تداخل‌سنجی است. مود IW روش اخذ داده با استفاده از تکنیک Top SAR که نوعی برداشت داده به صورت Scan SAR است، می‌باشد. در این نوع اخذ داده سنجنده عرض‌های پوشش بزرگ ایجاد می‌کند که از لحاظ رادئومتریکی نمایش را بهبود ببخشد. تفکیک پیکسل در این مود 20×5 متر و محدوده زاویه فرود سیگنال‌ها $29/1$ تا 46 درجه می‌باشد. مود کاربری در سطح زمین جهت بررسی تداخل‌سنجی SLC^3 می‌باشد که در این مود دارای تفکیک متفاوت پیکسل در جهت برد^۴ و سمت^۵ است.

پس بررسی داده‌های مورداستفاده نوبت به تشکیل شبکه خط مبنا می‌باشد که تصویر خط مبنا حاصل از داده‌های راداری بدون رسم گراف ایجاد می‌گردد. در این مرحله با بررسی میزان همدوسی تصاویر و خط مبنا زمانی و مکانی تصاویر انتخاب تصاویر پایه اصلی انتخاب می‌گردد. باتوجه به جدول (۲) نحوه انتخاب تصاویر پایه به گونه‌ای می‌باشد که جهت داشتن بالاترین میزان همبستگی، کم‌ترین میزان خط مبنا مکانی ممکن در کمترین خط مبنا زمانی با دیگر تصاویر دارا باشد؛ لذا تصویر در تاریخ $20/2/2018$ به عنوان تصویر پایه و تصاویر دیگر به عنوان تصویر پیرو^۶ انتخاب می‌شوند. سپس با استفاده از پارامترهای هندسی سکو و صحنه جابه‌جایی و اختلاف بین دو تصویر محاسبه شده و به کمک آن، تطبیق بین دو تصویر صورت می‌پذیرد.

جدول (۱). داده‌های مورداستفاده

طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	تعداد	فرمت	مود	گذر	سنجنده
۴۸۴	۱۳۷	۳۲	SLC	IW	شمالی به جنوبی	سنتینل A

جدول (۲). بررسی میزان همدوسی و خط مبنا تصاویر



شکل (۷). فلوچارت الگوریتم تداخل‌سنجی

محدودیت‌های اصلی InSAR برای بررسی تغییرات هدف مدفون مورد بررسی در خط مبنا زمانی سنجنده و همبستگی ایجاد می‌شود که در آن ویژگی‌های بازتابی اجسام جغرافیایی باید در طول زمان نسبتاً بدون تغییر باقی بمانند، علاوه بر این، باتوجه به طول موج ثابت رادار، تغییرات ناگهانی در میزان جابه‌جایی مکانی بیشتر از آستانه (که به عنوان یک چهارم طول موج فیزیکی رادار در خط دید رادار تعریف می‌شود) ممکن است منجر به افزایش یا کاهش سطح بررسی تغییر شکل شود و به این وسیله پایداری فاز اهداف توزیع شده در صحنه را افزایش می‌دهد.

تکنیک PSI، با تمرکز بر اهداف پایدار و ماندگار موجود در مجموعه تصاویر، تغییرات صحنه را تخمین می‌زند. بزرگ‌ترین چالش این روش، موجود بودن حداقل ۳۰ تصویر InSAR از صحنه و همچنین وجود پراکنده سازهای ماندگار مناسب در صحنه می‌باشد که ممکن است برای همه نواحی موجود نباشد [۱۲]. در پردازش SBAS با پذیرش کاهش قدرت تفکیک، از پردازش با استفاده از چندین تصاویر پایه^۱ استفاده می‌شود و به این وسیله پایداری فاز اهداف توزیع شده در صحنه را افزایش می‌دهد [۱۳].

لذا باتوجه به موارد عنوان شده تکنیک پردازش سری زمانی مناسب جهت بررسی هدف مدفون در مقیاس بزرگ و در بازه زمانی طولانی‌مدت، پردازش SBAS می‌باشد. مطابق با جدول (۱) داده‌های مورد پردازش با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل A می‌باشد. دوره تکرار مداری آن

¹ Master

² Interferometric wide

³ Single look complex

⁴ Range

⁵ Azimuth

⁶ Slave

نتیجه اعمال فیلتر گلدشتاین تولید تداخل نگار فیلتر شده است که این تداخل نگار از لحاظ بصری حاشیه‌های مرتب‌تری نسبت به تداخل نگار فیلتر نشده دارد و میزان نویز در آن‌ها کاهش چشمگیری خواهد داشت.

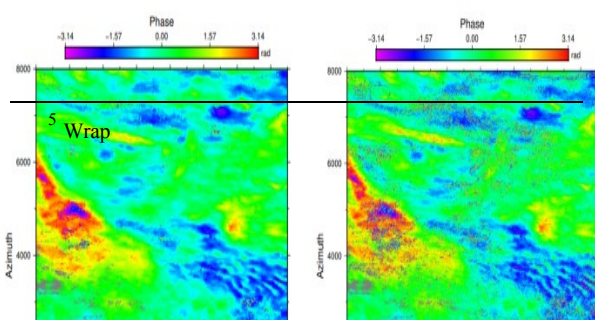
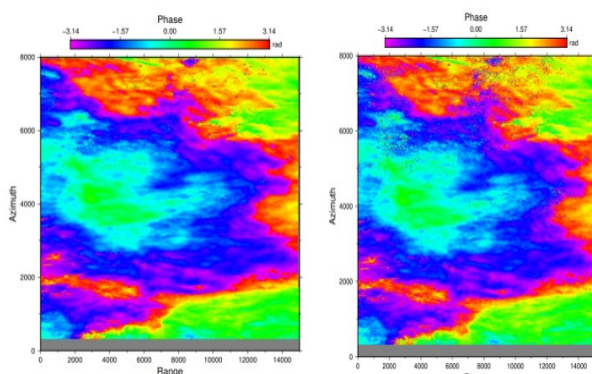
ویژگی این فیلتر این است که به صورت انتخابی عمل می‌کند و عمل فیلترگذاری به صورت محلی انجام می‌شود. نوع عملکرد فیلتر گلدشتاین تحت تأثیر همبستگی تداخل نگار است. در مواردی که میزان همبستگی پایین است، مقدار پیکسل‌های بیشتری را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در مواردی که شاهد همبستگی بالا می‌باشد، تعداد پیکسل‌های محدودی را تحت تأثیر قرار خواهد داد. هم‌زمان با انجام عمل فیلترینگ تصویر همدوسی ساخته می‌شود. حد آستانه همدوسی از صفر تا یک متغیر می‌باشد، لذا با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه و همچنین جهت حذف کمترین مناطقی که همدوسی پایینی را دارا می‌باشند، حد آستانه را بر روی ۰/۱۵ قرار می‌دهیم.

همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود خروجی این مرحله علاوه بر خروجی فاز فیلتر شده شامل شاخص پراکندگی دامنه و همبستگی تصاویر هم می‌باشد.

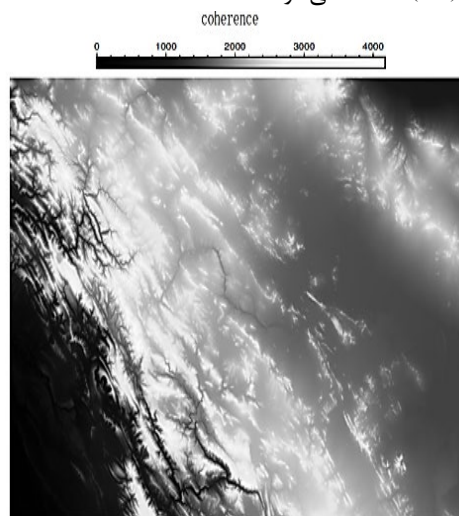
۳-۵- باز یابی فاز

با توجه به متناوب بودن فاز اندازه‌گیری شده، نقشه تداخل فاز ایجاد شده، دارای پیچش‌های^۵ متعدد است؛ لذا برای ایجاد نقشه توپوگرافی صحنه از نقشه تداخل، لازم است تا واپیچش فاز انجام شود. در این فرایند با خطی کردن تغییرات فاز، نقشه فاز متناسب با عوارض صحنه به وجود می‌آید. مسئله واپیچش فاز، محاسبه مقدار صحیح n در رابطه (۹) به منظور محاسبه ϕ از ψ است [۱۴]:

$$\psi = \phi + 2\pi n \quad (9)$$



مختلفی مانند نزدیک‌ترین همسایگی (NN¹)، (DT²) و حداقل مربعات (LS³) استفاده می‌شود [۱۲].



شکل (۹). مدل ارتفاعی دیجیتال شهر اصفهان

۲-۴-۳- فیلترگذاری

تداخل نگار تفاضلی حاصل دربرگیرنده مقداری نویز است. عامل به وجود آورنده این نویز می‌تواند مختلف باشد، دو عامل اصلی در به وجود آمدن آن تأثیرگذار است. عامل اول مربوط به تفاوت زمانی بین دو تصویر اصلی و وابسته است. گاهی اوقات برخی از تغییرات منطقه که در بین فاصله زمانی دو تصویر اتفاق می‌افتد جزء عوامل به وجود آورنده نویز می‌باشد. عامل اصلی دوم خط مبنای مکانی می‌باشد که میزان نویز در تصاویر، ارتباط مستقیمی با خط مبنای مکانی دارد. هرچه میزان خط مبنا بیشتر باشد ما شاهد وجود نویز بیشتری در تداخل نگار هستیم. جهت بهبود SNR تداخل نماها باید از لحاظ مکانی فیلتر گردیده و تنها پیکسل‌هایی که دارای مقادیر همدوسی بالا هستند در تحلیل در نظر گرفته شوند. برای حذف اثر نویز، باید یک فیلتر بر روی اینترفروگرام اعمال شود. اندازه پنجره مربوط به این فیلتر باید به گونه‌ای باشد که حین نرم نمودن اینترفروگرام به منظور کاهش اثر نویز، اطلاعات موجود در آن‌ها نیز حفظ شود؛ بنابراین با اعمال فیلتر بررسی میزان همدوسی و خط مبنا تصاویر همبستگی اینترفروگرام‌ها تا حد زیادی افزایش می‌یابد که موجب کاهش خطا در مرحله باز یابی فاز می‌شود.

درواقع به زبان ساده‌تر فیلتر کردن اینترفروگرام‌ها تطبیق داده شده را قادر می‌سازد برای تولید یک محصول خروجی با نویز فاز کاهش یابد. همدوسی اینترفرومتریک (که نشان‌دهنده کیفیت فاز است)، تصویر فیلتر شده اصلی را تولید می‌کند.

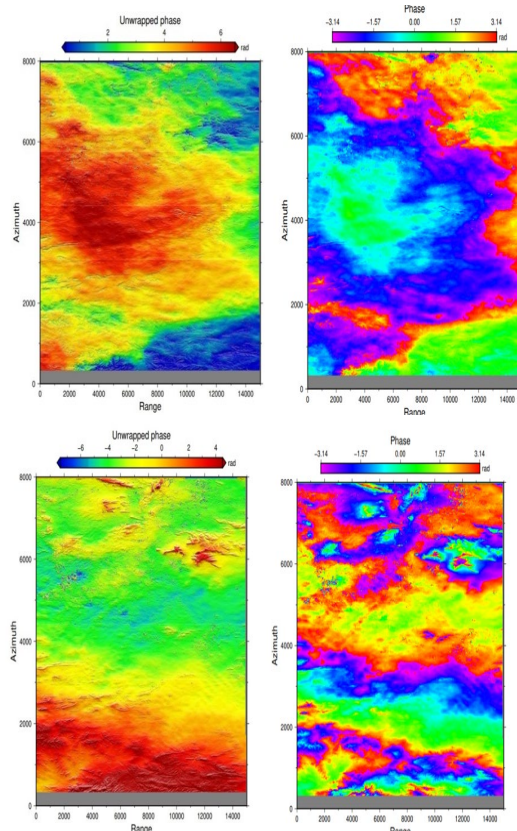
به دلیل کارایی بالای فیلتر گلدشتاین^۴ در انجام این تحقیق از آن استفاده شده است [۱۳] که در شکل (۱۰) مشاهده می‌گردد.

- 1 Nearest-neighbor
- 2 Delaunay Triangulation
- 3 Least Square
- 4 Goldstein

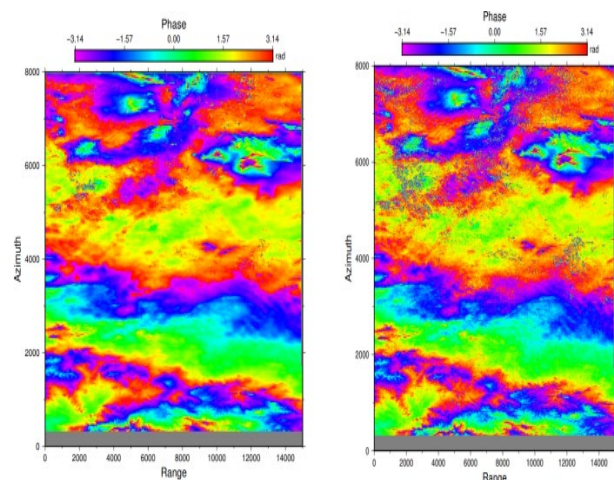
سراسری الگوریتم SNAPHU [۱۵] می‌باشد. جواب‌های الگوریتم SNAPHU بسیار یکنواخت و عاری از جهش‌های فاز می‌باشد، اما به گاهی اوقات ممکن است در برخی مناطق نویزی مقدار فازهای بازبایی شده را کمتر از میزان واقعی آن‌ها تخمین بزند. در شکل (۱۲) بازبایی فاز بر روی تداخل نماهای سری زمانی مشاهده می‌شود.

۴- تجزیه و تحلیل

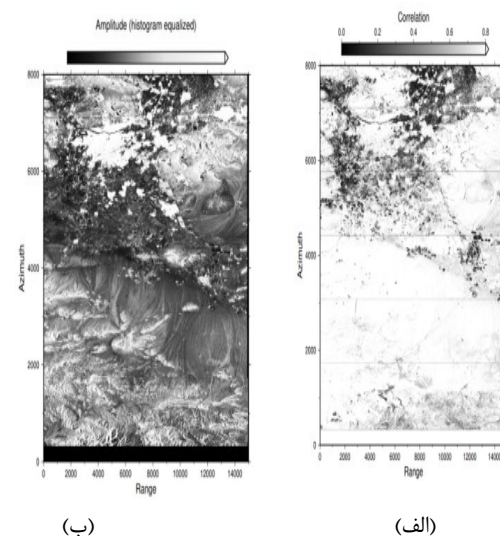
با توجه به بررسی منطقه‌ای و با دانستن مختصات جغرافیایی محدوده مورد مطالعه و بهره‌گرفتن از الگوی فرونشست به دست آمده از نقشه جابه‌جایی ایجاد شده توسط الگوریتم SBAS در شکل (۱۳) و (۱۴)، مشاهده می‌شود که در آن ناحیه تونل زیرزمینی جهت بهره‌برداری خط مترو حفر گردیده است. از این رو می‌توان با دیدن الگوی فرونشست منطقه حفر تونل و با بررسی گراف فرونشست در پیکسل‌های مجاور در چند نقطه به میزان فرونشست در محدوده تونل و نرخ فرونشست بر حسب دست‌یافت (mm/year).



شکل (۱۲). نتایج بازبایی فاز بر روی تداخل نماهای سری زمانی

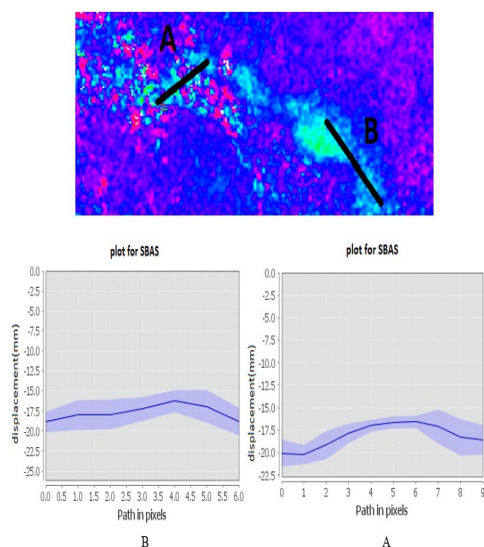


شکل (۱۰). اعمال فیلتر گلدستاین بر روی تداخل نماهای سری زمانی

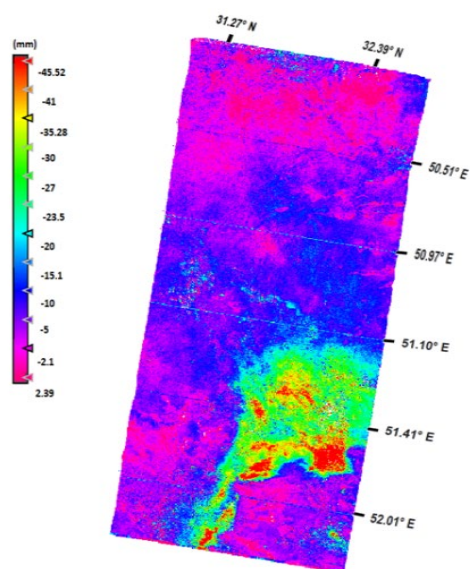


شکل (۱۱). تصویر الف- همبستگی ب- شاخص پراکنندگی دامنه

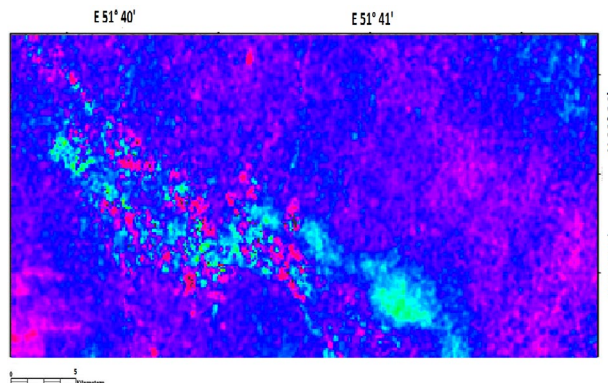
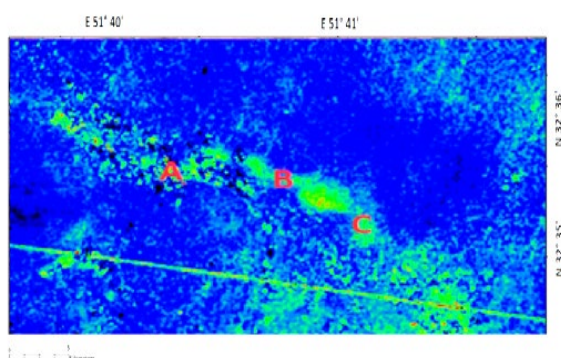
به صورت کلی روش‌های بازبایی فاز به دودسته محلی و عمومی تقسیم‌بندی می‌شوند، الگوریتم‌های بازبایی فاز به صورت سراسری یک حل کلی از جواب‌ها ارائه می‌دهند که موجب نرم‌شدن جواب‌ها می‌شود؛ اما به سبب ارائه یک حل کلی، امکان دارد که در مناطق نویزی مقدار فازهای بازبایی شده را اشتباه تخمین بزنند. یکی از جامع‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های بازبایی فاز به صورت عمومی و



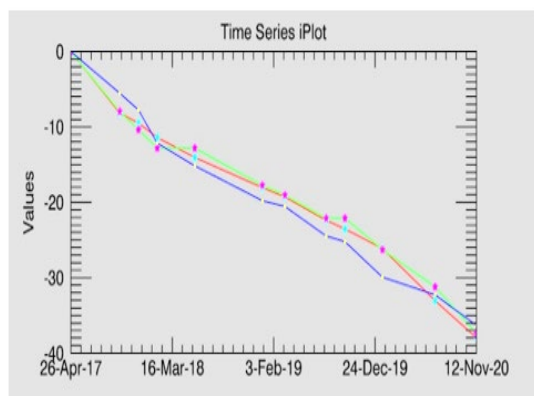
شکل (۱۵). میزان فرونشست در گذر پیکسل‌های مجاور حفر تونل



شکل (۱۳). نقشه کلی از جابه‌جایی منطقه پس از اعمال الگوریتم



شکل (۱۴). جابه‌جایی ناشی از هدف مدفون



شکل (۱۶): میزان فرونشست پیکسل‌های فوقانی هدف برحسب (mm/year)

۱-۴- ارزیابی روش پیشنهادی

همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، در این پردازش فیلترگلدشتاین با کمترین مقدار انحراف معیار همچنین با مقدار میانگین ۰/۵۴۹۵۵۷ با بیشترین نزدیکی به ۱ نسبت به بقیه

با توجه شکل (۱۵) در مسیر مشخص‌شده در پیکسل‌های اطراف حفر تونل در دو مسیر مشخص‌شده A و B میزان فرونشست از ۱۷ تا ۲۱ میلی‌متر متغیر به‌دست‌آمده و از گراف فرونشست مشخصی پیروی می‌کند. باتوجه به بررسی فرونشست طی دو سال نرخ فرونشست سالانه به‌صورت میانگین ۸ میلی‌متر در سال می‌باشد.

نقاط A و B و C در شکل (۱۶) سه‌نقطه مجزا در طول خط تونل مترو می‌باشند که بیشترین میزان فرونشست را در زمان تهیه این مقاله به خود اختصاص داده‌اند. گراف این فرونشست از یک الگو و میانگین تقریبی یکسانی پیروی می‌کند. در جدول (۳) میزان فرونشست به‌دست‌آمده در این نقاط آورده شده است. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص گردید که فرونشست هدف مورد مطالعه با فرونشست ناشی از اهداف طبیعی نظیر سفره‌های آب‌های زیرزمینی و یا خشک‌سالی متفاوت می‌باشد.

فیلترها کارایی بیشتر در کاهش نویز را ایجاد کرده است.

جدول (۳). میزان فرونشست به دست آمده از تونل حفر شده در نقاط مشخص شده (mm)

تاریخ	نقاط مورد بررسی	A	B	C
۲۶-Apr-۱۷	میزان فرونشست بر حسب میلی متر	۰	۰	۰
۱۶-Mar-۱۸		-۱۳	-۱۲	-۱۳
۳-Feb-۱۹		-۲۰	-۱۸	-۱۸
۲۴-Dec-۱۹		-۳۱	-۲۶	-۲۶
۱۲-Nov-۲۰		-۳۶	-۳۷	-۳۸

جدول (۴). مقادیر میانگین و انحراف معیار برای فیلترهای اعمال شده

ردیف	فیلتر	میانگین	انحراف معیار
۱	پنجره وقتی ^۱	۰/۴۴۲۰۷۴	۰/۱۸۵۴۷۸
۲	متوسط متحرک ^۲	۰/۴۷۱۵۵۷	۰/۱۹۶۳۹۵
۳	گلدشتاین ^۳	۰/۵۴۹۵۵۷	۰/۱۸۵۴۷۸

جهت مقایسه بهتر نتایج روش بازیابی فاز، تعداد پیکسل‌هایی که اشتباه بازیابی شده‌اند و میانگین قدرمطلق خطای نسبی^۱ به عنوان معیاری عددی از دقت عملکرد روش‌های بیان شده در جدول (۵) بیان گردیده است.

جدول (۵): مقایسه عملکرد روش‌های بازیابی فاز

روش‌های بازیابی فاز	روش حذف شاخه‌ها	روش MCF	روش SNAPHU
میانگین قدر مطلق خطای نسبی	۰/۰۵۷۱	۰/۰۶۰۱	۰/۰۵۰۱
تعداد خطا	۸۹	۹۲	۸۸

باتوجه به جدول (۵) و مقایسه نتایج می‌توان دید که در تداخل‌نگاشت مورد بررسی، الگوریتم SNAPHU به سبب کمتر بودن تعداد خطا در بازیابی فازها و همچنین کمتر بودن معیار میانگین قدر مطلق خطای نسبی عملکرد به مراتب بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر دارد. هم‌چنین مدت‌زمان اجرای الگوریتم‌های پیشنهادی در سطح منطقه مطالعاتی را می‌توان در جدول (۶) مشاهده کرد.

جدول (۶). مقایسه مدت‌زمان اجرای الگوریتم‌ها

روش بازیابی فاز	روش حذف شاخه‌ها	روش MCF	روش SNAPHU
زمان اجرا (دقیقه)	۴۸	۱۸	۱۶

۲-۴- تحلیل درستی نتایج طبق معیار ارزیابی

جهت ارزیابی و تأیید نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته به بررسی و مقایسه با داده‌ها و نتایج موجود با [۱۷، ۱۶] می‌پردازیم.

در [۱۷] با استفاده از تکنیک پردازش چند نگاهه و خط مبنای کوتاه مکانی اقدام به ایجاد شبکه خطوط مبنا و در ادامه گراف تداخل سنجی و در [۱۶] به پایش میزان فرونشست خط ۱۳ تونل مترو چینگدائو واقع در کشور چین پرداخته شده است. لذا با بررسی داده‌ها و نتایج آن به تحلیل و مقایسه آن‌ها با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در این مقاله خواهیم پرداخت.

۲-۴-۱- بررسی داده‌های مورد پردازش و تشکیل

شبکه خطوط مبنا

جهت پایش اهداف زیرسطحی در مقیاس بزرگ به مانند تونل مترو یکی از مناسب‌ترین سنجنده‌های راداری ماهواره سنتینل ۱ می‌باشد که به دلیل موجود بودن تصاویر راداری در اکثر طول و عرض‌های جغرافیایی^۲ در سطح زمین و همچنین دسترسی به تصاویری با خطوط مبنای زمانی و مکانی کوتاه امکان ایجاد افزایش همدوسی بین تداخل نگارها را دارا می‌باشد. جدول (۷) نشان‌دهنده مشخصاتی از قبیل باند فرکانسی، پلاریزاسیون، گذر و مود تصویر جهت انتخاب تصاویر SAR می‌باشد.

جدول (۷). مشخصات تصاویر راداری سنتینل ۱ مورد استفاده [۱۷]

Sentinel-1A	Sentinel-1B
C	C
69	76
IW*	IW
38.9	39.2
VV	VV
Ascending	Descending
2.3x13.9	2.3x13.9

باتوجه به این که در تکنیک پردازش خط مبنای مکانی-زمانی کوتاه نیاز به چندین تداخل نما با تصاویر پایه متفاوت می‌باشد در جدول (۸) نحوه انتخاب تصاویر پایه و پیرو باتوجه به خطوط پایه زمانی و مکانی عنوان شده است. مشاهده می‌شود که بازه خط مبنای زمانی از ۲۴ تا ۳۶ روز و بازه خط مبنای مکانی از ۲۸/۷۲

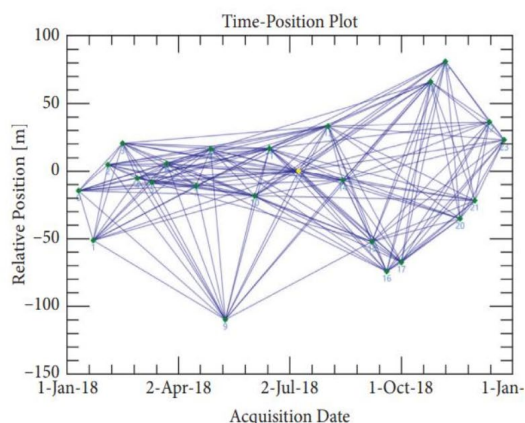
² Lat & long

¹ Mean Absolute Relative Error (MARE)

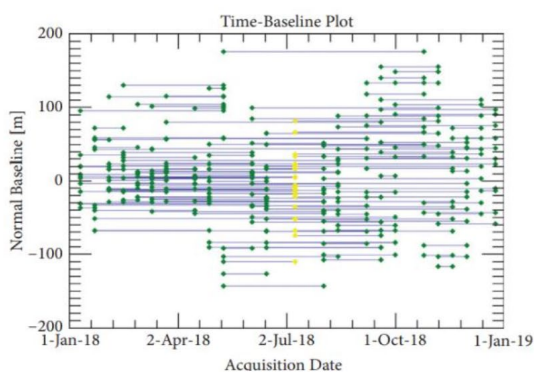
تا ۱۰۵/۳۳ متر متغیر می‌باشد.

جدول (۸). بررسی میزان خط مبنای زمانی - مکانی جهت ایجاد تداخل نما [۱۷]

Master image	Slave image	Path	Spatial baseline (m)	Temporal baseline (d)
22/12/2017*	27/01/2018	142	-80.56	36
15/01/2018	08/02/2018	142	-101.25	24
27/01/2018	04/03/2018	142	-32.34	36
08/02/2018	04/03/2018	142	28.72	24
11/11/2018	17/12/2018	142	38.83	36
17/12/2018	22/01/2019	142	-50.79	36
17/12/2018	27/02/2019	142	-84.14	36
03/02/2019	27/02/2020	142	-105.33	24
06/11/2019	30/11/2019	142	39.52	24
30/11/2019	24/12/2019	142	72.78	24
05/01/2020	24/12/2019	142	-41.11	24
29/01/2020	22/02/2020	142	42.48	24



(الف)



(ب)

شکل (۱۷). (الف) شبکه خطوط مبنا و نحوه ایجاد تداخل نماها بر پایه تصویر مرجع (ب) طرح گراف پیوسته تداخل سنجی [۱۷]

در انتها قابل مشاهده است که با استفاده از پردازش سری زمانی رادار تداخل سنج و بهره‌گیری از تکنیک چند نگاهه می‌توان به الگوی فرونشست ناشی از حفر تونل مترو پی برد که میزان این فرونشست برحسب (mm/y) و فرونشست حاصله در برخی از سطوح مورد مطالعه دارای الگو و گراف قابل تشخیصی می‌باشد. از مقایسه نتایج به دست آمده در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) با نتایج حاصله در مقاله [۱۶، ۱۷] مشخص می‌گردد که می‌توان با بهره گرفتن از داده‌های رادار تداخل سنج سری زمانی گراف ناشی از فرونشست حاصل از حفر تونل مترو را در مقیاس زمانی سال به دست آورد. هم چنین با توجه به شکل‌های (۱۵) و (۱۶) و جدول (۳) و بررسی و مقایسه آن با شکل (۱۹) و (۲۰) در مراجع ذکر شده ملاحظه می‌گردد که پس از پردازش‌های سری زمانی رادار تداخل سنج و اعمال پارامترهای سیستمی مناسب امکان اندازه‌گیری میزان فرونشست در مقیاس میلی‌متر در بازه زمانی بلند مدت امکان پذیر می‌باشد.

در مرحله بعد نوبت به ایجاد شبکه خط مبنا و گراف تداخل سنجی می‌باشد. در شکل (۱۷) در قسمت (الف) شبکه خط مبنا بدون ایجاد گراف جهت مشخص نمودن تصویر پایه مرجع و در قسمت (ب) نحوه ایجاد گراف پیوسته جهت پردازش خط مبنای زمانی مکانی کوتاه نمایش داده می‌شود.

۲-۲-۴- بررسی تداخل نماهای ایجاد شده پردازش

چند نگاهه

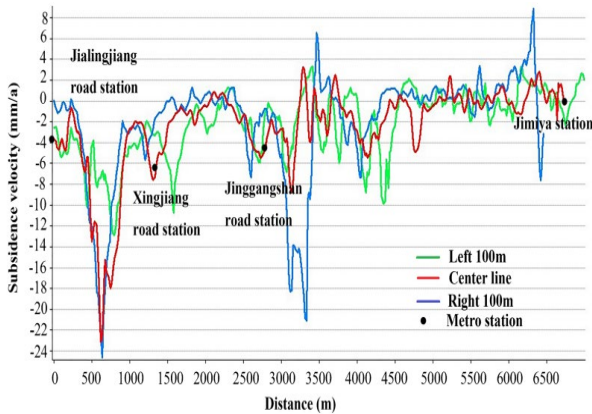
در شکل (۱۸) میزان فرونشست سری زمانی پردازش باتوجه به گراف تداخل سنجی طرح شده و بر اساس تکنیک پردازش چند نگاهه آورده شده است. در این جا میزان جابه‌جایی کلی بر مبنای تصویر پایه مرجع نسبت به جابه‌جایی تداخل نماهای ایجاد شده محاسبه می‌گردد.

۲-۲-۴- بررسی الگوی فرونشست تداخل نگار و

آشکارسازی تغییرات

در شکل (۱۹) پس از پردازش چندنگاهه و هم‌چنین اعمال پارامترهای فیلترگذاری جهت افزایش همدوسی تصاویر و بازبایی فاز میزان و الگوی ناشی از فرونشست حاصل از تونل مترو حاصل می‌شود و ملاحظه می‌گردد که در بازه‌ی زمانی دو سال فرونشست محاسبه شده در منطقه مورد مطالعه دارای گراف قابل شناسایی و حداکثر میزان فرونشست به دست آمده در این مدت ۲۹ (mm/a) می‌باشد.

نمودار شکل (۲۰) نمایش دهنده‌ی میزان فرونشست پیکسل‌های مجاور در مسیر حفر تونل می‌باشند.



شکل (۲۰). نمودار میزان فرونشست در مسیر حفر تونل [۱۶]

۵- جمع بندی

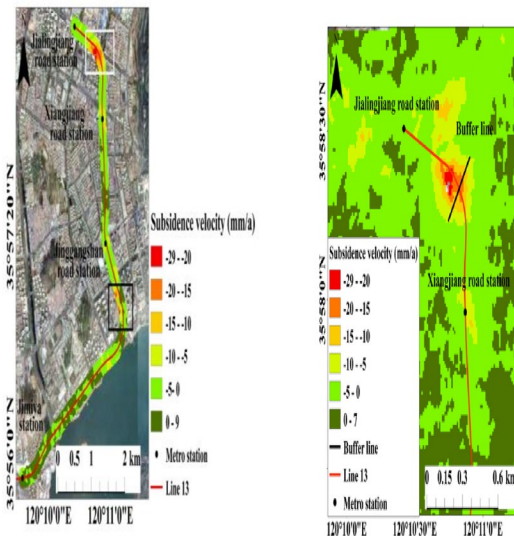
در این مقاله یک الگوریتم آشکارسازی هدف مدفون در مقیاس بزرگ و با بهره‌گرفتن رادار تداخل سنج سری زمانی مطرح شد. در ادامه با مقایسه پردازش‌های سری زمانی تداخل‌سنجی رادار و طراحی الگوریتم مناسب و پارامترهای وابسته جهت آشکارسازی تغییرات صحنه ناشی از هدف زیرسطحی پرداخته گردید و در انتها به پردازش تداخل‌سنجی تحت الگوریتم SBAS جهت آشکارسازی تغییرات و اندازه‌گیری میزان فرونشست ناشی از تونل مترو در حال احداث اصفهان پرداخته شد. نکاتی که در این روش به دنبال تصویربرداری از تونل مترو نیستیم، بلکه با استناد به تأییراتی که تونل روی سطح زمین می‌گذارند، سعی در آشکارسازی و موقعیت‌یابی آن داریم. مبنای این فناوری آن است که هیچ فعالیتی در داخل زمین به‌صورت طبیعی و عمدی انجام نمی‌گیرد مگر آن که اثری را در سطح زمین از خود بجای می‌گذارد و نکته قابل‌ذکر دیگر این است که جهت شناسایی اهداف زیرسطحی مانند تونل نمی‌توان فقط باتکیه بر داده‌های سنسورهای SAR و با استفاده از تکنیک‌های مختلف InSAR ارتباط با وجود یا عدم وجود این سازه‌ها اظهار نظر نمود.

۱۴- مراجع

- [1] Damoah-Afari, X. L. Ding, Z. Lu and Z. W. Li. "DETECTING GROUND SETTLEMENT OF SHANGHAI USING INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR (INSAR) TECHNIQUES.", Vol. 05, pp.73.019, 2008.
- [2] Z. Xiang, K. Wang, and X. Liu, "A model-spectrum-based flattening algorithm for airborne single-pass SAR interferometry," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 06, pp. 311-307, 2009.
- [3] X. Xu, D. Zhao, C. Ma and D. Lian, "Monitoring Subsidence Deformation of Suzhou Subway Using InSAR Timeseries Analysis," in IEEE Access, Vol. 09, pp. 24-116, 2021.



شکل (۱۸). سری زمانی فرونشست گراف تداخل سنجی [۱۶]



شکل (۱۹). الگو و میزان فرونشست حاصل از حفر تونل مترو برحسب (mm/y) [۱۶]

- [16] Qiuxiang Tao¹,Zaijie Guo¹,Fengyun Wang¹,Qingguo An²,Yu Han¹"SBAS-InSAR time series ground subsidence monitoring along Metro Line 13 in Qingdao, China" *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 21, pp. 125-017, 2021.
- [17] Li henjin, Wang Zhiyong, Liu Wei, Li, Xing Zhou, Maotong, Zhang Baojing. "Detecting, Monitoring, and Analyzing the Surface Subsidence in the Yellow River Delta (China) Combined with Center Net Network and SBAS-InSAR." *Journal of Spectroscopy*, Vol. 14, pp. 174-321, 2022.
- [4] S. Wei, L. Pu, X. Tang, X. Zhang, and J. Shi, "Efficient Registration for InSAR Large-Scale Image Using Quadtree Segmentation," in *IGARSS 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vol. 11, pp. 38-135, 2018.
- [5] Eppler, J. and Rabus. "Monitoring Urban Infrastructure with An Adaptive Multilooking INSAR Technique", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 06, pp. 194-68, 2012.
- [6] K. Biswas, D. Chakravarty, P. Mitra, and A. Misra, "Spatial-Correlation Based Persistent Scatterer Interferometric Study for Ground Deformation," *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, Vol. 04, pp. 26-113,2017.
- [7] C. W. Chen and H. A. Zebker, "Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms: Statistical Segmentation and Generalized Network Models," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 03, No. 8, pp. 1709-1719, 2002.
- [8] Kristina J. Reinders a, Ramon F. Hanssen a, Freek J. van Leijen a, Mandy Korff, "Augmented satellite InSAR for assessing short-term and long-term surface deformation due to shield tunnelling," *Journal of the Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, Vol. 36, pp.10.1016,2020.
- [9] Reinders, K. J, Hanssen, R. F, van Leijen, F. J, & Korff, M. Augmented satellite InSAR for assessing short-term and long-term surface deformation due to shield tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 12, pp.10.1016, 2021.
- [10] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 40, pp. 2383-2375, 2002.
- [11] R. Lanari, O. Mora, M. Manunta, J. J. Mallorquí, P. Berardino, and E. Sansosti" ,A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 42, pp. 1377-1386, 2004.
- [12] A. Hooper, P. Segall, and H. Zebker, "Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, pp. 19-13, 2007.
- [13] Bo Hu, " Time-Series Displacement of Land Subsidence in Fuzhou Downtown, Monitored by SBAS-InSAR Technique" *Journal of Sensors*, Vol. 35, pp. 316-2652, 2019.
- [14] Q. Huang, H. Zhou, S. Dong, and S. Xu, "Parallel branch-cut algorithm based on simulated annealing for large-scale phase unwrapping," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 53, pp. 3846-3833, 2015.
- [15] Roccheggiani, M. Piacentini, D.Tirincanti, E.Perissin, D.Menichetti, M, "Detection and Monitoring of Tunneling Induced Ground Movements Using Sentinel-1 SAR Interferometry," *Remote Sens*, Vol. 73, pp. 1121-4517, 2019.