

# بهبود الگوریتم تداخل سنجی PSInSAR با استفاده از بهینه‌سازی شاخص پراکندگی دامنه داده‌های پلاریمتریک دوگانه سنجنده Sentinel1-A

سعید آزادنژاد\*<sup>۱</sup>، یاسر مقصودی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
saeedazadnezhad@email.kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
ymaghsoudi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت دی ۱۳۹۶، تاریخ تصویب خرداد ۱۳۹۷)

## چکیده

روش‌های تداخل‌سنجی راداری پلاریمتریک مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی یک تکنیک موثر در افزایش تراکم و کیفیت فاز پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی می‌باشند. این روش‌ها با ترکیب خطی کانال‌های پلاریمتریک بر اساس بهینه‌سازی پلاریمتریک کانال بهینه ای را جستجو می‌کنند که در آن تراکم و کیفیت فاز پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی نسبت به کانال‌های خطی افزایش پیدا کند. در همین راستا، هدف اصلی این مقاله توسعه الگوریتم تداخل‌سنجی PSInSAR، که تاکنون تنها بر روی داده‌های تک قطبی بکار گرفته شده است، جهت بکارگیری داده‌های چندزمانه پلاریمتریک دوگانه با هدف بهبود این الگوریتم در شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی قابل اطمینان می‌باشد. این بهبود بر اساس بهینه‌سازی پلاریمتریک با تابع هدف شاخص پراکندگی دامنه (ADI) بر روی ۱۷ تصویر پلاریمتریک دوگانه (VV/VH) سنجنده Sentinel1-A انجام گرفت. روش بهینه‌سازی مورد استفاده در این تحقیق روش ESPO می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر کاندید و نهایی کانال بهینه در مقایسه با کانال VV به ترتیب حدود ۲/۶ و ۲ برابر افزایش پیدا کرد. همچنین در این مقاله مکانیزم‌های پراکنشی که در بهینه‌سازی پلاریمتریک با داده‌های پلاریمتریک دوگانه قابل استخراج هستند، مورد بررسی و تفسیر فیزیکی قرار گرفتند. در نهایت نقشه فرونشست جنوب غربی تهران با پردازش سری زمانی هر دو الگوریتم PSInSAR معمولی و الگوریتم PSInSAR بهبودیافته، بدست آمد.

**واژگان کلیدی:** تداخل‌سنجی راداری پلاریمتریک، پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی، شاخص پراکندگی دامنه، الگوریتم تداخل‌سنجی PSInSAR، نقشه فرونشست

## ۱- مقدمه

تداخل‌سنجی راداری به عنوان ابزاری کارآمد در پایش جابجایی‌های سطح زمین مطرح شد. فرکانس بالای مشاهدات مکانی و زمانی این روش در مقایسه با سایر روش‌های مطالعه جابجایی سطح زمین (ترازیابی<sup>۱</sup> و شبکه ایستگاه‌های سیستم موقعیت‌یابی جهانی<sup>۲</sup>) می‌تواند دید جامعی از مکانیزم تغییر شکل را در اختیار قرار دهد. علاوه بر فراوانی مکانی و زمانی مشاهدات، استفاده از این روش باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه نیز می‌گردد.

تکنیک تداخل‌سنجی راداری با استفاده از تصاویر رادار با روزه مجازی و تولید تداخل‌نما به برآورد جابجایی و ارتفاع زمین می‌پردازد. این تکنیک اولین بار در سال ۱۹۷۴ توسط Graham در [۱] مورد استفاده قرار گرفت و اولین نقشه رقومی ارتفاعی زمین با بهره‌گیری از این تکنیک، در سال ۱۹۸۸، توسط Goldstein در [۲] تولید گردید. به طور کلی روش‌های توسعه‌یافته در حوضه تداخل‌سنجی راداری شامل: تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، تداخل‌سنجی راداری تفاضلی (DInSAR) و تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی (PSInSAR) می‌باشند. تکنیک‌های سنتی (InSAR) و (DInSAR) از دو تصویر SAR به منظور تشکیل تداخل‌نما و تولید مدل رقومی یا برآورد جابجایی استفاده می‌نمایند که دارای محدودیت‌هایی همچون اثرات اتمسفریک، ناهمبستگی زمانی و مکانی می‌باشند. تکنیک تداخل-سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی، که برای اولین بار توسط Ferreti و همکاران در [۳] معرفی شد، با بهره‌گیری از نقاط پراکنش‌گر دائمی<sup>۳</sup> (PS) ضمن غلبه بر محدودیت‌های تکنیک‌های سنتی امکان پردازش سری زمانی بلند مدت را فراهم می‌نماید [۳]. نقاط پراکنش‌گر دائمی برخی از عوارض سطح زمین هستند که در طول چندین ماه و حتی سال ویژگی‌های بازپراکنشی نسبتاً پایداری دارند [۴]، ابعاد این عوارض از یک پیکسل کوچکتر بوده و از عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی تصاویر SAR کمتر تأثیر می‌پذیرند. در سال‌های اخیر نیز

الگوریتم‌های تداخل‌سنجی مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی مختلفی بهبود داده شده است [۵-۱۰].

از آنجاکه در تمامی الگوریتم‌های تداخل‌سنجی پراکنش‌گر دائمی<sup>۴</sup> پردازش‌های اساسی فقط بر روی پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی صورت می‌گیرد. لذا تراکم بالا و کیفیت فاز بالای این پیکسل‌ها عاملی موثر در افزایش کارایی الگوریتم‌های تداخل‌سنجی راداری محسوب می‌شود. از این رو اخیراً با پرتاب ماهواره‌های با قابلیت پلاریمتریک نظیر TerraSAR-X، ADARSAT-2، Sentinel-1A و Sentinel-1B، که قابلیت اخذ تصاویر با بیش از یک کانال پلاریمتریک را دارند، الگوریتم‌های زیادی به منظور بهبود مرحله انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی به جهت افزایش تراکم این پیکسل‌ها و افزایش کیفیت فاز آن‌ها ارائه شده‌اند. در این الگوریتم‌ها از مفهومی به نام بهینه‌سازی پلاریمتریک<sup>۵</sup> جهت بهبود مرحله انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی استفاده شده است. مفهوم بهینه‌سازی پلاریمتریک در تداخل‌سنجی راداری برای اولین بار در سال ۲۰۰۹ توسط Pipia و همکارانش در [۱۱] با استفاده از داده‌های SAR زمینی<sup>۶</sup> به منظور افزایش تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر کاندید قابل اطمینان مطرح شد. یک سال بعد Navarro-Sanchez و همکارانش در [۱۲] برای اولین بار از داده‌های فضایی پلاریمتریک دوگانه<sup>۷</sup> (HH/VV) سنجنده TerraSAR-X در الگوریتم تداخل‌سنجی پراکنش‌گرهای دائمی به منظور افزایش تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی استفاده نمودند. روش بهینه‌سازی پلاریمتریک که در [۱۲] این بکاربرده شد، شامل یک جستجو در فضای پلاریمتریک در دسترس است تا برای هر پیکسل بردار تصویری را پیدا کند که شاخص شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی حداکثر شود و این روش ESPO<sup>۸</sup> نامیده شد. آنها در ادامه تحقیقشان در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ روش پیشنهادی در [۱۲] را بر روی ۴۱ تصویر پلاریمتریک دوگانه (HH/VV) سنجنده TerraSAR-X از منطقه شهری ماریا اسپانیا اعمال کردند و ضمن آنالیز رفتار پلاریمتریک منطقه، مکانیزم‌های پراکنش غالب

<sup>۴</sup> PSI

<sup>۵</sup> Polarimetric Optimization

<sup>۶</sup> Ground Based-SAR

<sup>۷</sup> Dual-polarimetric

<sup>۸</sup> Exhaustive Search Polarimetric Optimization

<sup>۱</sup> Leveling

<sup>۲</sup> Global Positioning System (GPS)

<sup>۳</sup> Permanent Scatterers

زمانی انجام دادند. آن‌ها رویکرد پیشنهادی خود را بر روی الگوریتم StaMPS و به کمک داده‌های پلاریمتریک دوگانه (HH/VV) سنجنده TerraSAR-X پیاده سازی کردند. نتیجه این تحقیق افزایش کیفیت فاز و تراکم پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی قابل اعتماد بود.

طبق تحقیقات انجام گرفته، استفاده از داده‌های پلاریمتریک در الگوریتم‌های تداخل‌سنجی راداری و توسعه این الگوریتم‌ها جهت بهره‌گیری از داده‌های چندزمانه پلاریمتریک سبب بهبود آن‌ها در فرایند شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی قابل اعتماد و همچنین افزایش میزان همدوسی پیکسل‌ها می‌شود [۱۶-۱۸، ۱۲ و ۲۰]. الگوریتم تداخل‌سنجی PSInSAR تا کنون فقط بر روی داده‌های تک قطبی بکار گرفته شده است. به عنوان نمونه فروغ‌نیا و همکاران در سال ۲۰۱۷ از داده‌های تک قطبی سنجنده های ENVISAT-ASAR و Sentinel-1A در الگوریتم PSInSAR به منظور محاسبه نرخ فرونشست جنوب غربی تهران استفاده کردند [۲۱]. بنابراین هدف اصلی در این تحقیق توسعه این الگوریتم جهت بهره‌مندی از داده‌های چندزمانه پلاریمتریک می‌باشد. با این کار این الگوریتم قادر به شناسایی بهترین پایه پلاریزاسیون (مکانیزم پراکنش) در هر پیکسل به کمک بهینه‌سازی پلاریمتریک خواهد بود. ذکر این نکته ضروری است که در سیستم SAR سیگنال بازگشتی از هدف به سمت سنجنده وابستگی شدیدی به پایه پلاریزاسیون مورد استفاده دارد و پایداری آن در پایه پلاریزاسیون‌های مختلف یکسان نخواهد بود. بنابراین حسن یافتن بهترین مکانیزم پراکنش این است که به دنبال آن میزان پایداری برای پیکسل حداکثر می‌شود [۲۱].

با توجه به پرتاب سنجنده Sentinel-1A ضرورت توسعه الگوریتم‌ها بر مبنای داده‌های VH و VV بیش از پیش احساس می‌شود. بنابراین در این تحقیق داده‌های پلاریمتریک دوگانه (VV/VH) را با الگوریتم تداخل‌سنجی PSInSAR ترکیب کردیم. کوه‌رنسی پیکسل‌ها در کانال VH نسبت به کانال‌های HH و VV بسیار کمتر است. همچنین کوه‌رنسی پایین پیکسل‌ها بشدت در نتایج روش‌های تداخل‌سنجی راداری تاثیرگذار است و سبب کاهش دقت خروجی این سیستم‌ها می‌شود. اما نکته‌ای که وجود دارد این است که، چگونه از ترکیب این کانال با دیگر کانال‌های خطی می‌توان به بهبود نتایج کمک کرد و بهترین بهره را از این کانال برد.

منطقه که به عنوان مکانیزم بهینه در فرایند بهینه‌سازی پلاریمتریک انتخاب شد را شناسایی کردند [۱۳ و ۱۴]. همچنین Navarro-Sanchez و همکارانش در سال ۲۰۱۴ بهینه‌سازی پلاریمتریک را با داده‌های پلاریمتریک چهار کاناله ماهواره RADARSAT-2 انجام دادند و دو روش بهینه‌سازی میانگین شدت و قطری کردن توام<sup>۱</sup> را ارائه دادند [۱۵]. آنها نقشه فرونشست منطقه مطالعاتی را برای حالت تک کاناله، دو کاناله و داده چهار کاناله محاسبه کردند و نشان دادند چنانچه که اطلاعات پلاریمتری بیشتری موجود باشد تراکم پیکسلی با نتایج جابجایی معتبر افزایش پیدا خواهد کرد. در سال ۲۰۱۶ Esmaili و همکارانش در [۱۶] مفهوم مشابه با Navarro-Sanchez و همکارانش را به کمک داده‌های پلاریمتریک دوگانه (HH/VV) سنجنده TerraSAR-X بر روی الگوریتم تداخل‌سنجی StaMPS با روش بهینه‌سازی شبه تبرید<sup>۲</sup> انجام دادند که نتیجه آن افزایش تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر کاندید و نهایی قابل اطمینان را به همراه داشت. Esmaili و همکارانش در مطالعه بعدی خود در سال ۲۰۱۷ یک شکل پلاریمتریک از معیار پراکنندگی اختلاف دامنه<sup>۳</sup> برای آنالیز سری زمانی پیکسل‌ها در الگوریتم خط مبنای کوتاه<sup>۴</sup> ارائه دادند که برای تولید تداخل‌نماهای جدید با کیفیت بهتر از تداخل‌نماهای SAR تک کاناله استفاده می‌شود [۱۷]. در سال ۲۰۱۳ Iglesias و همکارانش دو روش بهینه‌سازی پلاریمتریک Best و ESM را برای دو شاخص پراکنندگی دامنه و کوه‌رنسی مکانی با داده‌های پلاریمتریک چهار کاناله Ground-Based مورد ارزیابی قرار دادند [۱۸]. Iglesias و همکارانش در سال ۲۰۱۵ یک شاخص جدید برای ارزیابی کیفیت فاز پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی ارائه دادند و این شاخص را همدوسی زیرمنظر زمانی<sup>۵</sup> نامیدند. آن‌ها بهینه‌سازی پلاریمتریک را به کمک این شاخص برای داده‌های پلاریمتریک چهار کاناله Ground-Based به منظور افزایش کیفیت فاز پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی انجام دادند [۱۹]. در سال ۲۰۱۷ Sadeghi و همکارانش در [۲۰] بهینه‌سازی پلاریمتریک را با تابع هدف کوه‌رنسی

<sup>۱</sup> Joint diagonalization

<sup>۲</sup> Simulated annealing

<sup>۳</sup> Amplitude Difference Dispersion (ADD)

<sup>۴</sup> SBAS

<sup>۵</sup> temporal sublook coherence (TSC)

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تداخل سنجی راداری پلاریمتریک

اصول کلی تداخل سنجی راداری پلاریمتریک یا به عبارتی شکل برداری تداخل سنجی برای اولین بار توسط Cloude در [۲۲] مطرح شد. در تداخل سنجی راداری پلاریمتریک به ازای هر پیکسل تصویر می‌توان بردار پراکنش  $k$  که برداری شده ماتریس پراکنش  $[S]$  می‌باشد، را تعریف کرد. ماتریس پراکنش و بردار پراکنش برای داده‌های پلاریمتریک چهار کاناله بصورت زیر تعریف می‌شود [۲۲]:

$$S_{hv} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{hv} & S_{vv} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\underline{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh} + S_{vv}, S_{hh} - S_{vv}, 2S_{hv}]^T \quad (2)$$

در آن  $S_{hh}$  و  $S_{vv}$  کانال‌های co-polar،  $S_{hv}$  کانال cross-pol و  $T$  اپراتور ترانهاده می‌باشد. بردار پراکنش برای داده‌های پلاریمتریک دوگانه (VV/VH) بصورت زیر تعریف می‌شود [۱۵]:

$$\underline{k} = [S_{vv}, 2S_{vh}]^T \quad (3)$$

به منظور تولید بردار پایه پلاریزاسیون (ضریب پراکنش)  $\mu$ ، کافی است بردار پراکنش  $\underline{k}$  را بر روی بردار مکانیزم پراکنش  $\underline{u}$  تصویر کنیم [۲۲]:

$$\mu_i = (\underline{u}_i^* \underline{k}_i) , i = 1, 2 \quad (4)$$

که در آن  $\mu_i$  ترکیب خطی المان‌های ماتریس پراکنش  $[S]$ ،  $i$  متناظر دو تصویر و \* اپراتور مزدوج می‌باشد. همچنین بردار مکانیزم پراکنش  $\underline{u}$  برای داده‌های پلاریمتریک دوگانه بصورت زیر تعریف می‌شود [۱۲]:

$$\underline{u} = [\cos(\alpha), \sin(\alpha) e^{j\Psi}]^T, \begin{cases} 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \\ -\pi \leq \Psi \leq \pi \end{cases} \quad (5)$$

در آن  $\alpha$  و  $\Psi$  دو پارامتر حقیقی می‌باشند که بازه مقادیر آن‌ها مشخص و متناهی بوده و به ویژگی‌های هندسی و الکترومغناطیسی عوارض مربوط می‌شود. بنابراین مسئله بهینه‌سازی پلاریمتریک به پیدا کردن مقادیر دو پارامتر  $\alpha$  و  $\Psi$  محدود می‌شود.

### ۲-۲- بهبود الگوریتم تداخل سنجی PSInSAR

همانطور که گفته شد، هدف توسعه الگوریتم تداخل سنجی PSInSAR جهت بکارگیری داده‌های چندزمانه پلاریمتریک در مراحل پردازشی، و بهبود این الگوریتم در شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی قابل اطمینان می‌باشد. در این الگوریتم ابتدا از بین تصاویر ورودی یک تصویر به عنوان تصویر پایه (اصلی) انتخاب می‌شود و بقیه تصاویر به عنوان تصویر پیرو خواهند بود. تصویر پایه طوری انتخاب می‌شود که تاثیر عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی مینیمم شود [۱۰]. پس از انتخاب تصویر پایه، تصاویر پیرو نسبت به تصویر پایه ثبت هندسی خواهند شد. ثبت هندسی تصاویر لازمه‌ی تشکیل تداخل‌نما در مرحله بعدی است که تضمین می‌کند هر تارگت زمینی مربوط به یک پیکسل مشابه با مختصات آزیموت و رنج یکسان در هر دو تصویر پایه و پیرو است [۸]. پس از ثبت هندسی تصاویر سری زمانی هر دو کانال VH و VV، طی یک پروسه تکراری به ازای هر پیکسل بهترین مکانیزم پراکنش با کمک ترکیب خطی دو کانال پلاریمتریک VV و VH پیدا می‌شود و تصاویر ورودی مجدداً بر اساس این ضرایب پراکنش بهینه تولید می‌شوند (این مرحله که در شکل ۱ درون کادر قرمز مشخص شده در واقع همان بهبود ایجاد شده در این الگوریتم می‌باشد).

پس از تولید مجدد تصاویر، تداخل‌نماها تولید می‌شوند. هر تداخل‌نما اطلاعات اختلاف فاز دو تصویر که مبین اختلاف فاصله‌ی عارضه تا سنجنده در دو زمان اخذ تصویر است را شامل می‌شود. به کمک مقادیر اختلاف فاز می‌توان پارامترهای مختلف، از جمله میزان جابجایی سطح زمین و یا توپوگرافی سطح زمین را استخراج نمود. مطابق رابطه (۶) فاز تداخل‌نما علاوه بر سیگنال مربوط به جابجایی شامل مؤلفه‌های دیگر مانند فاز ناشی از تأخیر اتمسفری، فاز مربوط به خطاهای مداری، فاز ناشی از توپوگرافی و نویز نیز [۹] می‌باشد؛ بنابراین اگر هدف برآورد میزان جابجایی سطح زمین ناشی از پدیده مطرح فرونشست است، بایستی مقادیر هر یک از این فازها را شناسایی نمود و از فاز اندازه‌گیری شده کسر کرد تا به مقدار فاز ناشی از فرونشست دست یافت.

$$d\varphi_{int} = d\varphi_{orbit} + d\varphi_{topo} + d\varphi_{def} + d\varphi_{atm} + d\varphi_{nois} \quad (6)$$

مرجع، مقادیر برآورد شده برای هر یال با هم جمع می گردند تا برآوردی از مقادیر پارامترهای مجهول در هر نقطه از شبکه حاصل شود.

در نهایت، به منظور تخمین اثرات اتمسفری، با توجه به اینکه اتمسفر در مکان همبسته و نویز یعنی هرگونه عوامل عدم همبستگی مکانی و زمانی در مکان ناهمبسته است، با به کارگیری فیلتر پایین گذر مکانی، اثرات نویز از سیگنال اتمسفر جدا می شود. پس از جداسازی سهم فاز اتمسفر در نقاط پراکنش گر دائمی کاندید و حذف تصویر اثر اتمسفر از مجموعه تداخل نماها، بر اساس حد آستانه مناسب بر روی کوه رنسی زمانی نقاط پراکنش گر دائمی نهایی انتخاب می شوند و پارامترهای مجهول سرعت جابجایی و تصحیح ارتفاعی برای این نقاط برآورد خواهند شد. در نهایت به عنوان انحراف معیار نرخ تغییرات برآورد شده با استفاده از رابطه (۸) قابل برآورد خواهد بود [۲۳].

$$\sigma_v^2 = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \frac{\sigma_\phi^2}{M\sigma_B^2} \quad (8)$$

به طوریکه  $\sigma_\phi^2$  و  $\sigma_B^2$  پراکنندگی فاز نویز و باز زمانی و  $M$  تعداد تداخل نما هستند.

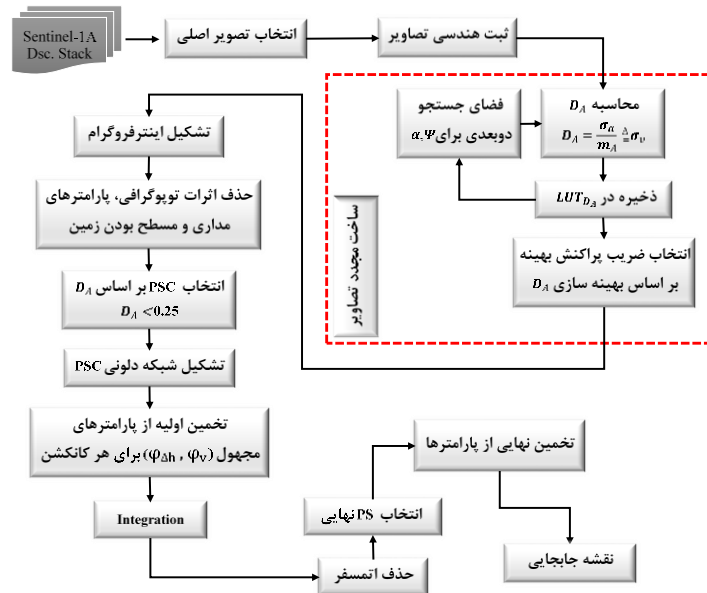
شکل ۱ بیانگر مراحل پردازشی در الگوریتم PSInSAR است که به آن اشاره شد. لازم به ذکر است که در این تحقیق، جهت آنالیز سری زمانی تداخلسنجی از نرم افزار SARPROZ استفاده شد [۲۴]. همچنین مرحله بهبود این الگوریتم که در واقع انجام بهینه سازی پلاریمتریک و ساخت مجدد تصاویر است در محیط متلب پیاده سازی شد.

در رابطه (۶)،  $d\varphi_{int}$  فاز تداخلسنجی در هر تداخلنما،  $d\varphi_{orbit}$  فاز ناشی از خطاهای مداری،  $d\varphi_{topo}$  فاز ناشی از توپوگرافی،  $d\varphi_{def}$  فاز ناشی از جابجایی،  $d\varphi_{atm}$  فاز ناشی از اتمسفر و  $d\varphi_{noise}$  فاز ناشی از نویز می باشند. پس از کسر اثرات مزاحم از فاز اندازه گیری شده، پیکسل های پراکنش گر کاندید با استفاده از شاخص پراکنندگی دامنه انتخاب می شود. پیکسل های انتخاب شده طی یک فرایند مثلث بندی دلونی به یکدیگر مرتبط می شوند. در این حالت برای هر دو پیکسل همسایه به دلیل مجاورت آنها ( حداکثر ۱ کیلومتر فاصله ) و همبسته بودن اتمسفر در مکان، اختلاف فاز بین پیکسل های همسایه شامل فاز اتمسفری نخواهد بود [۸].

با حذف خطای مداری و فاز توپوگرافی، اختلاف فاز تداخلسنجی برای دو پیکسل مجاور در شبکه نقاط به صورت زیر تعریف می شود:

$$\Delta\varphi_{p,p0}^{int} = d\varphi_{h,p,p0}^{int} + d\varphi_{v,p,p0}^{int} + d\varphi_{noise,p,p0}^{int} \quad (7)$$

به طوریکه،  $d\varphi_{h,p,p0}^{int}$  خطای باقیمانده توپوگرافی،  $d\varphi_{v,p,p0}^{int}$  فاز جابجایی و  $d\varphi_{noise,p,p0}^{int}$  فاز نویز روی یال بین دو پیکسل هستند. در صورتی که تراکم پیکسل های پراکنش گر دائمی بالا باشد و اختلاف فاز بین دو نقطه مجاور از نصف طول موج کمتر باشد (شرط نایکوئیست)، می توان از فاز بازیابی نشده در برآورد پارامترهای مجهول از طریق حل مسئله پریودوگرام در یک فضای جستجوی دو بعدی استفاده نمود [۳]. بدین ترتیب مقادیر پارامترهای مجهول سرعت جابجایی و تصحیح ارتفاعی برای هر یال ارتباطی محاسبه می شود. سپس با انتخاب یک نقطه



شکل ۱- نمودار مراحل مختلف الگوریتم PSInSAR بهبودیافته

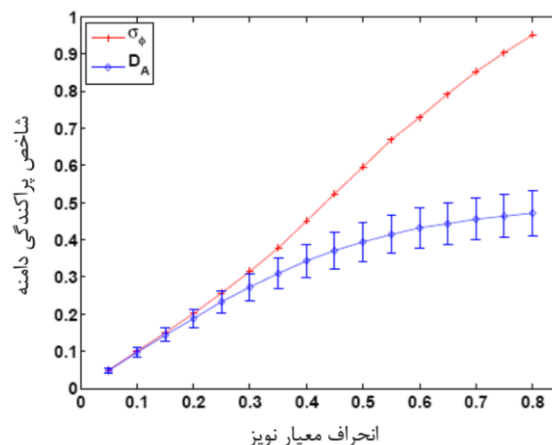
## ۲-۲-۱- بهینه‌سازی شاخص پراکندگی دامنه

یکی از کاربردی‌ترین شاخص‌های شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی، شاخص پراکندگی دامنه می‌باشد که برای اولین بار توسط Ferreti و همکارانش در [۳] معرفی شد. این شاخص پیکسل‌هایی که نشان‌دهنده‌ی مقادیر دامنه‌ی پایدار هستند را مطابق رابطه (۹) شناسایی می‌کند:

$$D_A = \frac{\sigma_a}{\bar{a}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (|s_i| - |\bar{s}|)^2}{N}}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |s_i|} \quad (9)$$

در آن  $\sigma_a$  انحراف معیار دامنه،  $\bar{a} = |s_i|$  میانگین دامنه،  $s$  مقدار مختلط پیکسل تصویر SLC،  $|s_i|$  دامنه پیکسل در تصویر  $i$ ام و  $N$  تعداد تصاویر می‌باشد.

پیکسل‌هایی از تصویر که مقدار  $D_A$  مربوط به آن‌ها از یک حد آستانه‌ی تعریف شده (معمولاً ۰/۲۵) کوچک‌تر باشد به عنوان پیکسل‌های پراکنش‌گر کاندید معرفی می‌شوند [۳]. مقدار حد آستانه با بررسی نمودار شکل ۲ قابل توجیه است. مطابق این نمودار، انحراف معیار فاز زیر حد آستانه‌ی ۰/۲۵ در قیاس با پراکندگی دامنه رفتار مشابهی دارد. لذا این شاخص معرف استحکام فاز با تعریف حد آستانه‌ی مذکور خواهد بود.



شکل ۲- نمودار انحراف معیار فاز و پراکندگی دامنه

به منظور تعمیم شاخص پراکندگی دامنه به حالت پلاریمتریک کافی است در رابطه (۹) بجای ضریب پراکنش  $s$ ، ضریب پراکنش پلاریمتریک  $\mu$  در رابطه (۴) را جایگزین کنیم [۱۲]:

$$D_{A \text{ Pol}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (|\underline{\omega}^* T \underline{k}_i| - |\underline{\omega}^* T \underline{k}|)^2}{N}}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\underline{\omega}^* T \underline{k}_i|} \quad (10)$$

در این حالت مسئله بهینه‌سازی پلاریمتریک شامل یافتن بردار مکانیزم پراکنش  $\underline{\omega}$  به ازای هر پیکسل است که مقدار شاخص پراکندگی دامنه برای آن پیکسل حداقل شود. رابطه (۱۰) همان تابع هدف در مسئله بهینه‌سازی پلاریمتریک مطرح شده در این تحقیق می‌باشد. بنابراین ضریب پراکنش بهینه ضریب پراکنشی است که به ازای آن مقدار شاخص پراکندگی دامنه ( $D_{A \text{ Pol}}$ ) کمینه شود. روش بهینه‌سازی که در این مسئله بهینه‌سازی استفاده شد روش ESPO بود. این روش که برای اولین بار توسط Navarro-Sanchez و همکارانش در [۱۲] ارائه شد، شامل یک جستجو در فضای پلاریمتریک موجود است تا برای هر پیکسل ضریب پراکنشی انتخاب شود که منجر به بهینه‌شدن شاخص پراکندگی دامنه و در نتیجه افزایش تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر دائم شود. در واقع این روش مقادیر شاخص پراکندگی دامنه را به ازای مقادیر مختلف دو پارامتر  $\alpha$  و  $\Psi$  محاسبه کرده و در نهایت مقدار بهینه این دو پارامتر را انتخاب می‌کند. برای داده‌های پلاریمتریک دوگانه فضای جستجو در این روش شامل یک جستجوی شبکه‌ای ۲ بعدی به ازای مقادیر مختلف دو پارامتر  $\alpha$  و  $\Psi$  می‌باشد. در این تحقیق فواصل گریدبندی برای پارامتر  $\Psi$ ، ۱۰ درجه و برای پارامتر  $\alpha$ ، ۵ درجه در نظر گرفته شد.

## ۲-۳- مکانیزم‌های پراکنش در بهینه‌سازی

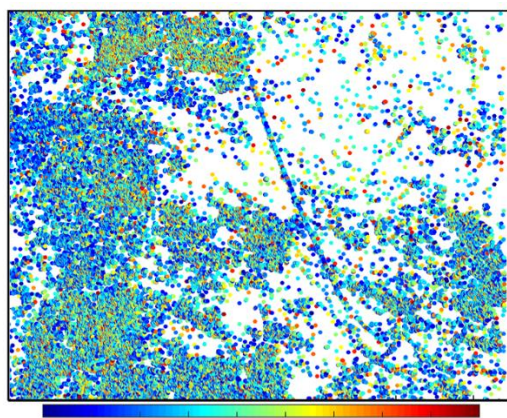
### پلاریمتریک

هدف اصلی در بهینه‌سازی پلاریمتریک یافتن بردار مکانیزم پراکنش  $\underline{\omega}$  یا به عبارتی تعیین دو پارامتر حقیقی  $\alpha$  و  $\Psi$  به ازای هر پیکسل به گونه‌ای است که منجر به بهینه‌شدن شاخص انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی شود. دو پارامتر  $\alpha$  و  $\Psi$  مکانیزم پراکنش را تعریف می‌کنند. بطوریکه پارامتر  $\alpha$  نشان‌دهنده گونه‌های مختلف مکانیزم‌های پراکنش و پارامتر  $\Psi$  نیز جهت پراکنش را نشان می‌دهد. بنابراین تغییر مقادیر این دو پارامتر در مسئله بهینه‌سازی حکم تغییر در مکانیزم پراکنش را دارد که در راستای هدف بهینه‌سازی یعنی یافتن بهترین مکانیزم پراکنش می‌باشد. جدول ۱ رابطه بین مقادیر  $\alpha$  و  $\Psi$  و مکانیزم‌های پراکنش مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، مکانیزم‌های

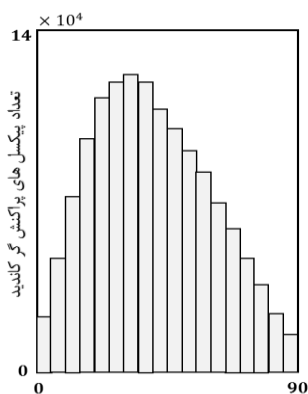
گونه‌ای که انتخاب هر یک از این مکانیزم‌ها به عنوان مکانیزم غالب برای یک پیکسل، شانس آن پیکسل را برای انتخاب شدن به عنوان پیکسل پراکنش‌گر دائمی افزایش می‌دهد. بنابراین انتظار می‌رود بهینه‌سازی پلاریمتریک با داده‌های پلاریمتریک دوگانه (HH/VV) نسبت به داده‌های (VV/VH) نتایج بهتری در افزایش تعداد پیکسل‌های پراکنش دائمی ارائه دهد.

جدول ۱- رابطه بین مقادیر  $\alpha$  و  $\Psi$  و مکانیزم‌های پراکنش مختلف برای داده‌های پلاریمتریک دوگانه

نوع داده	مقدار $\Psi$	مقدار $\alpha$	نوع مکانیزم پراکنش
(HH/VV)	$[-\pi \dots \pi]$	$\pi/2$	دوجشه (Double-Bounce)
(HH/VV)	$\pm\pi$	$\pi/4$	دوقطبی قائم (Vertical Dipole)
(HH/VV)	0	$\pi/4$	دوقطبی افقی (Horizontal Dipole)
(VV/VH) و (HH/VV)	$[-\pi \dots \pi]$	0	تک‌جشه (Odd-Bounces)
(VV/VH)	0	$\pi/2$	حجمی (Volume)



الف



ب

شکل ۳- الف نقشه رفتار پارامتر  $\alpha$  در ایجاد پلاریزاسیون بهینه به ازای پیکسل‌های پراکنش‌گر کاندید با مقادیر ADI کمتر از ۰/۱۵ (ب) هیستوگرام مقادیر  $\alpha$  به ازای پیکسل‌های پراکنش‌گر کاندید با مقادیر ADI کمتر از ۰/۱۵

دوجشه، دوقطبی قائم و افقی تنها به کمک ترکیب دو کانال VV و HH ایجاد می‌شوند و در داده‌های پلاریمتریک دوگانه (VV/VH) این مکانیزم‌ها وجود ندارند. همچنین مکانیزم پراکنش حجمی فقط به کمک داده‌های پلاریمتریک دوگانه (VV/VH) قابل تعریف خواهد بود. از بین مکانیزم معرفی شده در جدول ۱، مکانیزم‌های دوجشه و دوقطبی دارای پراکنش بسیار قوی می‌باشد، به

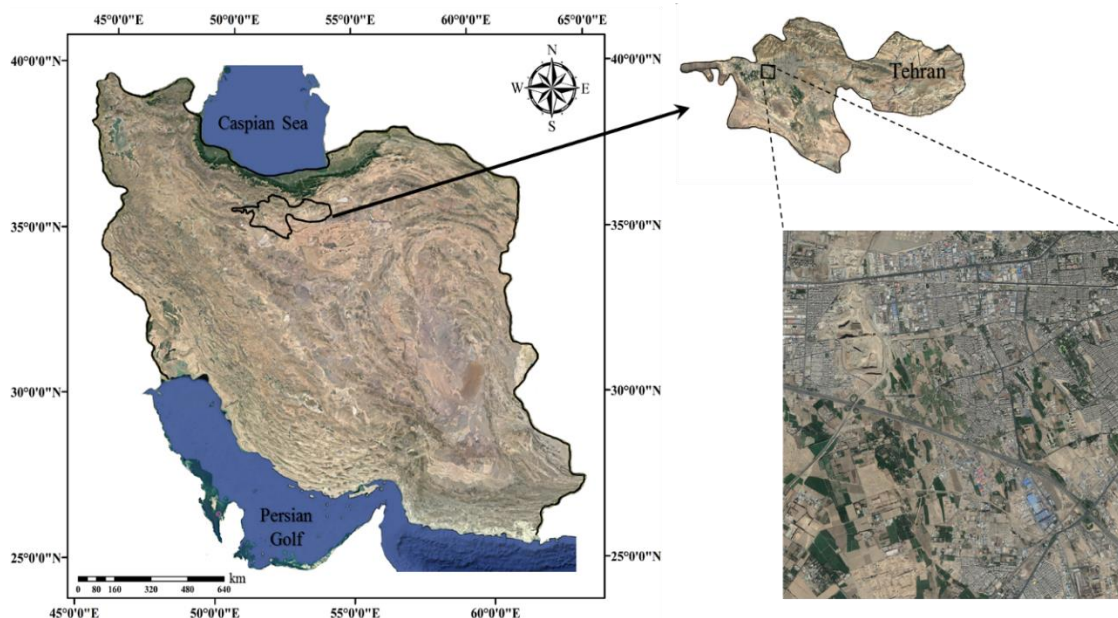
پارامتر  $\alpha$ ، پارامتری بسیار موثر در تعریف پلاریزاسیون بهینه است، به گونه‌ای که در مورد داده‌های پلاریمتریک دو گانه (VV/VH)، مقادیر پایین  $\alpha$  نشان‌دهنده سهم بیشتر پلاریزاسیون VV، و مقادیر بالای آن نشان‌دهنده سهم بیشتر پلاریزاسیون VH در ایجاد پلاریزاسیون بهینه می‌باشد. به منظور بررسی رفتار پارامتر  $\alpha$  در مسئله بهینه‌سازی پلاریمتریک با استفاده از دو کانال VV و VH، هیستوگرام مقادیر این پارامتر و نقشه رفتار آن به ازای پیکسل‌های پراکنش‌گر کاندید با حد آستانه مقادیر شاخص پراکنش‌گر کمتر از ۰/۱۵ ترسیم شد. شکل ۳ هیستوگرام مقادیر  $\alpha$  و نقشه رفتار این پارامتر در ایجاد پلاریزاسیون بهینه به ازای پیکسل‌های پراکنش‌گر کاندید را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳، بیشترین تعداد پیکسل پراکنش‌گر کاندید شناسایی شده، در بازه مقادیر  $\alpha$  بین ۳۰ تا ۴۰ درجه قرار دارد که نشان می‌دهد پلاریزاسیون VV سهم بیشتری نسبت به پلاریزاسیون VH در پیدا کردن پایه پلاریزاسیون بهینه دارد. نتیجه مهمی که از تحلیل هیستوگرام مقادیر  $\alpha$  و نقشه رفتار آن می‌توان گرفت این است که در پلاریزاسیون VH اطلاعات زیادی در مورد پراکنش پیکسل‌ها و اهداف وجود ندارد، به همین دلیل مقادیر  $\alpha$  در بهینه‌سازی پلاریمتریک به گونه‌ای حاصل شده است که سهم این پلاریزاسیون نسبت به پلاریزاسیون VV در ایجاد پلاریزاسیون بهینه کمتر باشد.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

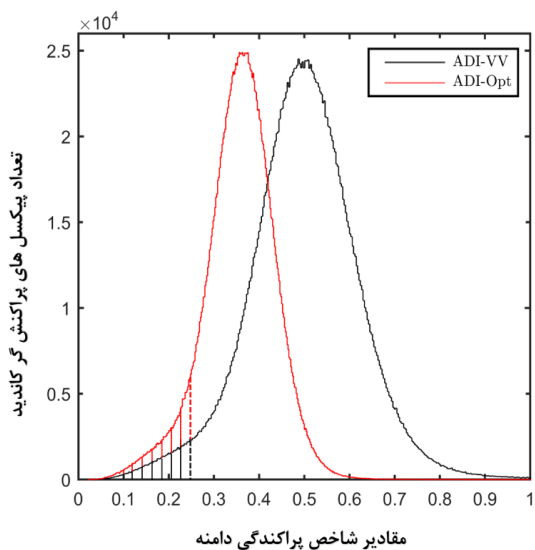
به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در منطقه‌ای شامل منطقه شهری و غیرشهری و نرخ بالای

جابجایی، جنوب غربی تهران مطابق شکل ۴ انتخاب شد. ناحیه مطالعاتی جنوب غرب تهران در بین طول‌های جغرافیایی "۵۱°۱۴'۴۷" و "۵۱°۲۱'۶۱" شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۳۵°۳۶'۱۴" و "۳۵°۴۱'۴۰" شمالی قرار دارد.



شکل ۴- موقعیت ناحیه مطالعاتی واقع در جنوب غربی تهران

شد. شکل ۵ هیستوگرام مقادیر ADI برای دو کانال بهینه و VV را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت هیستوگرام مقادیر ADI در کانال بهینه به سمت مقادیر پایین میل کرد. بنابراین بایستی تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر کاندید در این کانال افزایش پیدا کند.



شکل ۵- هیستوگرام مقادیر ADI برای دو کانال بهینه و VV

در سال‌های اخیر برداشت بی‌رویه‌ی آب در فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و خشک‌سالی‌های پیاپی باعث افت سطح آب زیرزمینی و کاهش فشار سیال در این منطقه شده است که تبعات آن بروز فرونشست در این ناحیه است. از آنجا که الگوریتم تداخل‌سنجی PSInSAR در مناطق وسیع با تراکم بالای پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی عملیات پردازشی زمانبری خواهد داشت. به منظور سرعت بخشیدن به عملیات، منطقه مورد مطالعه به منطقه‌ای با شعاع ۵ کیلومتر محدود شد. داده‌های راداری Sentinel1-A مربوط به مسیر ۳۵ که این منطقه را پوشش می‌دهد از بازه زمانی مارچ ۲۰۱۷ تا اکتبر ۲۰۱۷ تهیه شد. تصاویر از نوع گذر پایین و با زاویه دید ۲۲-۴۶ درجه و به تعداد ۱۷ تصویر پلاریمتریک دو گانه می‌باشد.

#### ۳-۲- بررسی تراکم پیکسل‌های پراکنش‌گر کاندید و نهایی

به منظور بررسی مقادیر ADI کانال بهینه و کانال VV، هیستوگرام مقادیر ADI برای این دو کانال محاسبه



با توجه به جدول ۲ تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی کاندید شناسایی‌شده در کانال بهینه نسبت به کانال ۷۷ حدود ۲/۵۸ برابر بیشتر می‌باشد. همچنین تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی نهایی در کانال بهینه حدود ۲ برابر نسبت به کانال ۷۷ افزایش داشته است. افزایش تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی کاندید و نهایی چشمگیر بود اما نکته‌ی قابل توجه این است که کانال بهینه در افزایش تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی کاندید نسبت به پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی نهایی موفق‌تر عمل کرده است زیرا بهینه‌سازی انجام شده بر اساس شاخص پراکندگی دامنه، که شاخصی برای انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌گر کاندید می‌باشد، صورت گرفته است. به منظور مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی در افزایش تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی نهایی برای مناطق شهری و غیرشهری دو منطقه شهری و غیر شهری مطابق شکل ۶ در منطقه مطالعاتی انتخاب شد و تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی نهایی برای این مناطق طبق جدول ۳ محاسبه شد.

جدول ۳- تعداد پیکسل‌های PS شناسایی‌شده در مناطق شهری و غیرشهری برای دو کانال بهینه و ۷۷ با مقادیر  $T_C$  بیشتر از ۰/۹

کانال	تعداد PS منطقه شهری	تعداد PS منطقه غیرشهری
۷۷	۹۵۵	۱۴۸
بهینه	۱۸۲۴	۲۹۷

با توجه به جدول ۳، تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی نهایی برای منطقه شهری کانال بهینه نسبت به کانال ۷۷ حدود ۱/۹۱ برابر افزایش داشته است. همچنین این افزایش برای مناطق غیر شهری ۲ برابر می‌باشد. اما نکته‌ای که وجود دارد این است که افزایش تعداد PS در منطقه شهری نسبت به منطقه غیرشهری کمتر می‌باشد. دلیل این موضوع این است که در مناطق شهری تراکم عوارض ساختمانی، که تارگت‌های بسیار خوبی برای انتخاب شدن به عنوان پیکسل پراکنش‌گر دائمی هستند، بسیار زیاد می‌باشد و به این ترتیب کانال ۷۷ برای شناسایی PS در این مناطق دغدغه‌ای ندارد. اما در مورد مناطق غیرشهری که تراکم ساختمان‌ها کم بوده و و بیشتر شامل پوشش گیاهی می‌باشد، کانال ۷۷ نتوانسته به خوبی PSها را شناسایی کند. از طرفی، کانال بهینه به دلیل پیدا کردن ضرائب پراکنش بهینه برای این مناطق، پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی را با موفقیت بیشتری شناسایی می‌کند.

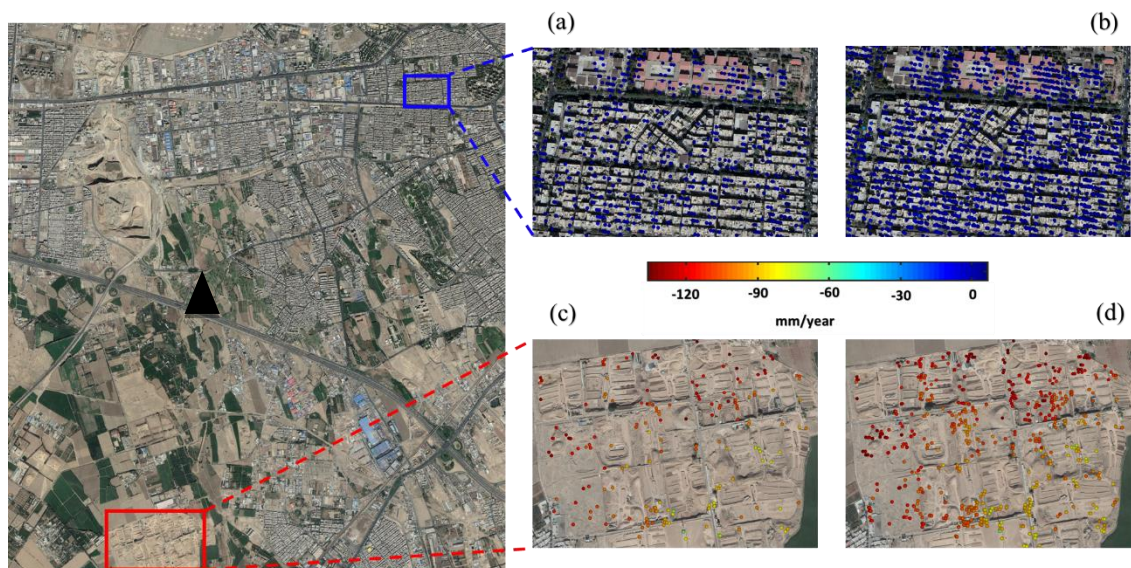
شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی در الگوریتم تداخل‌سنجی PSInSAR طی دو مرحله‌ی آنالیز دامنه و آنالیز فاز انجام می‌گیرد. ابتدا به منظور آنالیز دامنه، پیکسل‌هایی از تصویر که مقدار ADI مربوط به آن‌ها از یک حد آستانه‌ی تعریف شده (معمولاً ۰/۲۵) کمتر باشد به عنوان پیکسل‌های پراکنش‌گر کاندید معرفی می‌شوند. سپس از بین این پیکسل‌ها، پیکسل‌هایی که مقدار کوهرنسی زمانی ( $T_C$ ) برای آن‌ها از یک حد آستانه (معمولاً ۰/۹) بیشتر باشد، به عنوان پیکسل‌های پراکنش‌گر نهایی انتخاب می‌شوند. در الگوریتم PSInSAR، شاخص کوهرنسی زمانی که بیان‌کننده استحکام فاز پیکسل‌ها می‌باشد، برای پیکسل  $x$  بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$T_{Cx} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\exp\{\sqrt{-1}(\varphi_{x,i} - \varphi_{\Delta h_{x,i}} - \varphi_{v_{x,i}} - \varphi_{\varepsilon_{x,i}})\}) \quad (11)$$

$T_{Cx}$  به عنوان فاکتوری برای پذیرش پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی است، در واقع این شاخص برای جلوگیری از انتخاب پیکسل‌های نویزی به عنوان پیکسل پراکنش‌گر دائمی بوده که اعمال حد آستانه مناسب برای آن صحت پیکسل‌های انتخابی را از نظر پایداری و استحکام فاز تأمین خواهد کرد. در رابطه (۱۱)  $N$  تعداد کل تداخل‌نماها،  $\varphi_{x,i}$  فاز پیکسل  $x$  در تداخل‌نما  $i$ ام،  $\varphi_{\Delta h_{x,i}}$ ،  $\varphi_{v_{x,i}}$  و  $\varphi_{\varepsilon_{x,i}}$  پارامترهای مجهول که به ترتیب فاز ناشی از توپوگرافی، فاز ناشی از سرعت جابجایی و فاز ناشی از اتمسفر پیکسل  $x$  در تداخل‌نما  $i$ ام می‌باشد. بر این اساس پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی کاندید و نهایی برای دو کانال بهینه و ۷۷ شناسایی شدند. جدول ۲ تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی کاندید و نهایی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی کاندید و نهایی حاصل از کانال بهینه بطور چشمگیری از تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر کاندید و نهایی کانال ۷۷ بیشتر است.

جدول ۲- تعداد پیکسل‌های پراکنش‌گر کاندید و نهایی شناسایی‌شده در کل منطقه برای دو کانال بهینه و ۷۷ با مقادیر ADI کمتر از ۰/۲۵ و  $T_C$  بیشتر از ۰/۹

کانال	تعداد PSC	تعداد PS
۷۷	۶۲۱۳۶	۵۸۲۸۴
بهینه	۱۶۰۷۰۷	۱۱۸۵۹۷

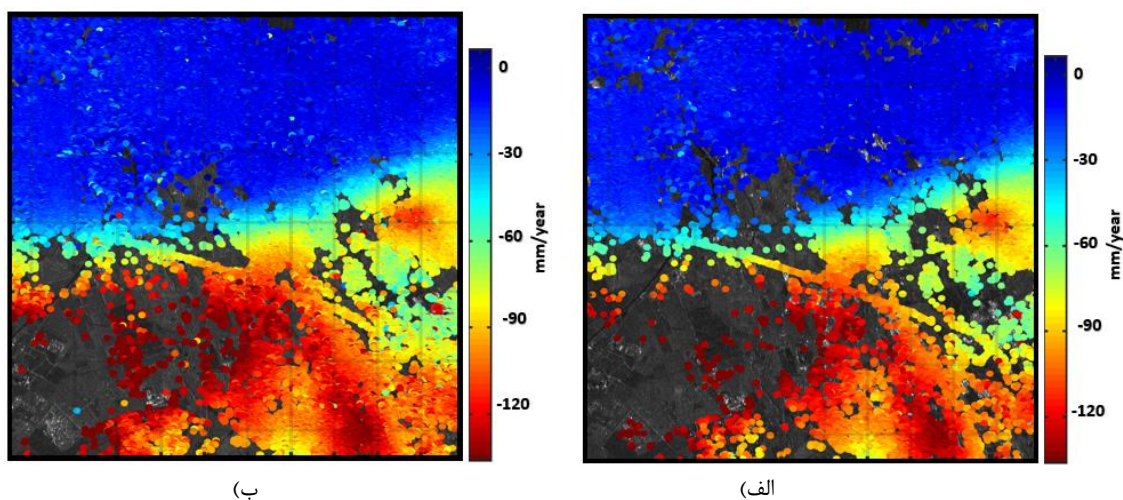


شکل ۶- موقعیت‌های مناطق شهری و غیرشهری در ناحیه مطالعاتی. (a) نمای نزدیک از منطقه شهری در کانال VV، (b) نمای نزدیک از منطقه شهری در کانال VV، (c) نمای نزدیک از منطقه غیرشهری در کانال VV، (d) نمای نزدیک از منطقه غیرشهری در کانال VV. همچنین مثلث مشکی موقعیت ایستگاه GPS را نشان می‌دهد.

داشته اند. حداکثر نرخ فرونشست بدست آمده در هر دو الگوریتم حدود ۱۲۰ میلی‌متر در سال است. این رقم برای نواحی غیرشهری که شامل زمین‌های کشاورزی بوده و برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی سبب افزایش نرخ فرونشست این منطقه شده است، معقول به نظر می‌رسد. همچنین واضح است که الگوریتم بهبود یافته در شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی در مقایسه با الگوریتم معمولی بسیار موفق‌تر عمل می‌کند و نقشه جابجایی متراکم‌تری را ارائه می‌دهد. دلیل این نتیجه مسلماً بهبود ایجادشده در انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌گر به کمک بهینه‌سازی پلاریمتریک می‌باشد.

### ۳-۳- نقشه جابجایی

سرانجام، پس از انجام پردازش‌های سری زمانی در نرم افزار SARPROZ و انجام بهینه‌سازی پلاریمتریک در محیط متلب، نقشه سرعت جابجایی با آنالیز سری زمانی را برای الگوریتم PSInSAR معمولی (کانال VV) و الگوریتم PSInSAR بهبودیافته (کانال بهینه) مطابق شکل ۷ بدست آوردیم. پس‌زمینه این نقشه‌ها، نقشه Reflective منطقه مورد مطالعه می‌باشد. همانطور که از مقایسه نقشه‌های برآوردشده بر می‌آید، الگوی جابجایی برآوردشده برای هر دو الگوریتم یکسان است که نشان می‌دهد هر دو الگوریتم نتایج یکسانی در محاسبه نرخ فرونشست برای این منطقه



شکل ۷- نقشه سرعت جابجایی دشت شهریار (الف) کانال VV (ب) کانال بهینه

جدول ۴- مقادیر پارامترهای هندسی در سنجنده‌های مختلف [23]

Sensor	Azimuth angle	Incidence angle
Envisat (des)	195°	23°
Envisat (asc)	344°	41°
ALOS (asc)	347°	39°
S1 (asc)	350°	37°
S1 (des)	190°	43°

پس از تبدیل مشاهدات سری زمانی GPS به جابجایی در راستای دید ماهواره، مقادیر سری زمانی نزدیکترین PS به ایستگاه GPS را با مشاهدات سری زمانی GPS مورد مقایسه و ارزیابی قرار دادیم و فاکتور RMSE را مطابق جدول ۵ محاسبه کردیم. این مقدار برای کانال VV برابر ۴/۵۵ میلی‌متر و برای کانال بهینه برابر ۳/۶۸ میلی‌متر بدست آمد. همچنین برای درک بهتر از مقایسه نتایج، سری زمانی نرخ فرونشست کانال بهینه، کانال VV و GPS را مطابق شکل ۸ ترسیم کردیم.

جدول ۵- مقایسه انحراف نرخ فرونشست برآورد شده به کمک کانال

بهینه، کانال VV با سری زمانی GPS	
Channel	RMSE (mm)
VV	۴/۵۵
Optimum	۳/۶۸

همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌کنیم، مقادیر RMSE کانال بهینه نسبت به کانال VV کمتر است. این نشان می‌دهد کانال بهینه نرخ فرونشست را با صحت بیشتری محاسبه کرده است.

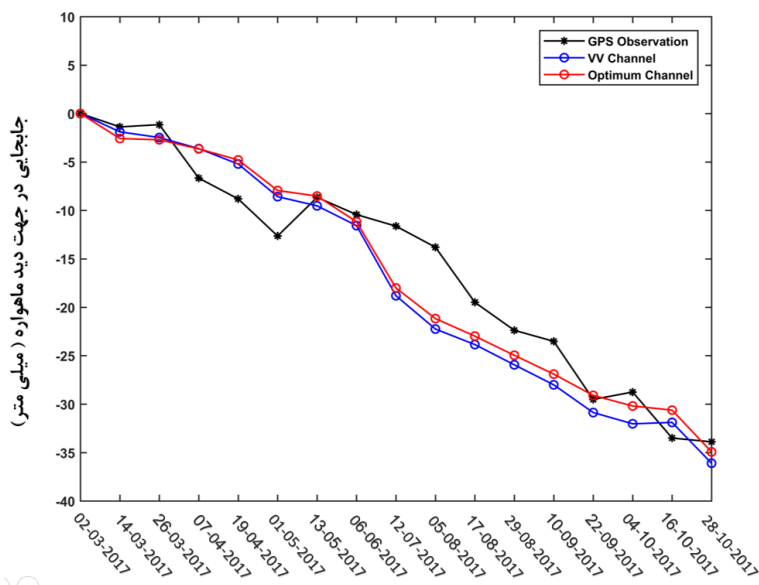
نتیجه مهمی که می‌توان گرفت این است که کانال VV و VH به تنهایی قادر به شناسایی پیکسل‌های پراکنش گر دائمی متعددی در منطقه و ارائه نقشه متراکم نمی‌باشند، اما ترکیب این دو کانال با یکدیگر در مسئله بهینه سازی پلاریمتریک منجر به نتایج بهتری می‌شود.

### ۳-۴- ارزیابی نتایج جابجایی

به منظور مقایسه عددی، مقادیر جابجایی حاصل از پردازش‌های انجام شده با استفاده از دو الگوریتم، با سری زمانی یک ایستگاه GPS، که در شکل ۶ مشخص می‌باشد، مقایسه شد. تکنیک تداخل‌سنجی راداری جابجایی را در راستای خط دید سنجنده اندازه‌گیری می‌کند، لذا به منظور تفسیر صحیح جابجایی و یا مقایسه جابجایی برآورد شده با اندازه‌گیری‌های مربوط به GPS، بایستی مشاهدات GPS را به جابجایی در راستای خط دید سنجنده تبدیل کنیم. بدین منظور از رابطه (۱۲) استفاده می‌شود [۲۳].

$$V_{LOS} = V_v \cos \theta - (V_e \cos \alpha - V_n \sin \alpha) \sin \theta \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)،  $V_{LOS}$  جابجایی در راستای خط دید سنجنده،  $V_v$  مولفه جابجایی در راستای قائم،  $V_e$  مولفه جابجایی در راستای شرقی-غربی،  $V_n$  مولفه جابجایی در راستای شمال-جنوب،  $\theta$  زاویه فرودی و  $\alpha$  زاویه آزیموت مدار ماهواره می‌باشد. با توجه به جدول ۴ که مقادیر پارامترهای هندسی سنجنده‌های مختلف را نشان می‌دهد، مقادیر مناسب به ازای دو پارامتر  $\theta$  و  $\alpha$  انتخاب شد [۲۳].



شکل ۸- مقایسه نرخ فرونشست برآورد شده به کمک کانال بهینه، کانال VV و سری زمانی GPS

بنابراین، کانال بهینه به دلیل اینکه تعداد PS بیشتری شناسایی کرده توانسته شبکه دلونی با تراکم و دقت بالاتری تشکیل داده و پارامترهای مجهول و به دنبال آن نرخ فرونشست را نسبت به کانال VV با صحت بالاتری محاسبه کند. در واقع افزایش تعداد پیکسل‌های پراکنش گر سبب می‌شود تا فواصل پیکسل‌های مجاور برای تشکیل شبکه دلونی کوتاه‌تر شود. بنابراین تغییرات اثر APS در طول آرک‌های کوتاه‌تر کمتر بوده و از سهم فازهای ناشی از اثر اتمسفر و خطای مداری با اطمینان بیشتری می‌توان صرف‌نظر کرد. در نتیجه فاز بدست آمده برای هر پیکسل فاز دقیق‌تری خواهد بود و نتایج بدست آمده نیز از دقت و صحت بالاتری برخوردار خواهند بود.

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

به طور کلی، روش‌های تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی برای اینکه بتوانند در مراحل پردازشی بصورت صحیح عمل کنند ( به ویژه در مراحل رفع ابهام فاز، اعمال فیلترهای مکانی و درونیایی )، نیازمند تعداد پیکسل‌های بسیار زیاد با کیفیت فاز بالا می‌باشند [۹]. و هر چه تراکم پیکسل‌ها بالاتر باشد کارایی این روش‌ها بیشتر است. در صورتی‌که بخواهیم با انتخاب حد آستانه نامناسب در معیار کیفیت فاز تعداد پیکسل‌های کاندید را افزایش دهیم مشکلاتی در مراحل پردازشی بوجود خواهد آمد، زیرا با این کار منابع نویز جدیدی وارد

مراحل پردازشی شده و نتایج را مخدوش می‌کند. بنابراین این راه حل مناسبی برای افزایش تراکم پیکسل‌های پراکنشگر دائمی قابل اعتماد نیست. اخیرا با پرتاب ماهواره های با قابلیت پلاریمتری محققین به کمک ترکیب اطلاعات پلاریمتری با تکنیک‌های PSI سعی بر بهبود و افزایش کارایی این تکنیک‌ها داشته اند. در همین راستا، در این تحقیق یکی از تکنیک‌های PSI (الگوریتم PSInSAR) جهت بهره‌مندی از اطلاعات پلاریمتری دوگانه (VV/VH) توسعه داده شد. همانطور که در نتایج این تحقیق دیده می‌شود ترکیب اطلاعات پلاریمتری دوگانه (VV/VH) با الگوریتم PSInSAR سبب بهبود این الگوریتم در شناسایی پیکسل‌های پراکنشگر قابل اعتماد شد. با این کار نتایج بدست آمده این الگوریتم دارای دقت بالاتری خواهند بود چرا که در مرحله بهینه‌سازی پلاریمتریک برای هر پیکسل پایه پلاریزاسیونی پیدا شد که در آن پایداری فاز بیشترین مقدار باشد. همچنین تراکم نقشه جابجایی بدست آمده از کانال بهینه نیز نسبت به کانال VV بیشتر بود. این تراکم با اعمال حدآستانه یکسان و مناسب روی معیار پایداری فاز ( برای جلوگیری از ورود نویز) برای هر دو کانال حاصل شده بود. بنابراین روش پیشنهادی با ارائه نقشه جابجایی متراکم‌تر می‌تواند اطلاعات بیشتر و با جزئیات بالاتری از جابجایی، بخصوص در مناطقی غیر شهری را در اختیار کاربران قرار دهد.

#### مراجع

- [1] L. Graham, "Synthetic interferometer radar for topographic mapping," Proceedings of the IEEE, vol. 62(6), pp. 763-768, 1974.
- [2] R. Goldstein, H. Zebker and C. Werner, "Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping," Radio science, vol. 23(4), pp. 713-720, 1988.
- [3] A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca, Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 39(1), pp. 8-20, 2001.
- [4] Y. Maghsoudi and S. Mahdavi, The Principles of Radar Remote Sensing, K. N. Toosi University of Technology, 2015.
- [5] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari and E. Sansoti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40(11), pp. 2375-2383, 2002.
- [6] M. Costantini, S. Falco, F. Malvarosa and F. Minati, "A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images," In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International, vol. 2, pp. II-449, 2008.
- [7] N. Devanthery, M. Crosetto, O. Monserrat, M. Cuevas-González and B. Crippa, "An approach to persistent scatterer interferometry," Remote Sensing, vol. 6(7), pp. 6662-6679, 2014.
- [8] R. F. Hanssen, "Radar interferometry: data interpretation and error analysis," Springer Science & Business Media, vol. 2, 2001.

- [9] A. Hooper, P. Segall and H. Zebker, "Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis," *Journal of Geophysical Research*, vol. 112(B7), 2007.
- [10] B. Kampes and N. Adam, "The STUN algorithm for persistent scatterer interferometry," *Proceedings of FRINGE 2005*, pp. 1-14, 2006.
- [11] L. Pipia, X. Fabregas, A. Aguasca, C. Lopez-Martinez, S. Duque, J. Mallorqui and J. Marturia, "Polarimetric differential SAR interferometry: First results with ground-based measurements," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 6(1), pp. 67-171, 2009.
- [12] V. Navarro-Sanchez, J. Lopez-Sanchez and F. Vicente-Guijalba, "A contribution of polarimetry to satellite differential SAR interferometry: Increasing the number of pixel candidates," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 7(2), pp. 276-280, 2010.
- [13] V. Navarro-Sanchez and J. Lopez-Sanchez, "Subsidence monitoring using polarimetric persistent scatterers interferometry," In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 1083-1086, 2011.
- [14] V. Navarro-Sanchez and J. Lopez-Sanchez, "Improvement of persistent-scatterer interferometry performance by means of a polarimetric optimization," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9(4), pp. 609-613, 2012.
- [15] V. Navarro-Sanchez, J. Lopez-Sanchez and L. Ferro-Famil, "Polarimetric approaches for persistent scatterers interferometry.," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52(3), pp. 1667-1676, 2014.
- [16] M. Esmaeili and M. Motagh, "Improved Persistent Scatterer analysis using Amplitude Dispersion Index optimization of dual polarimetry data," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 117, pp. 108-114, 2016.
- [17] M. Esmaeili, M. Motagh and A. Hooper, "Application of Dual-Polarimetry SAR Images in Multitemporal InSAR Processing," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 14(9), pp. 1489-1493, 2017.
- [18] R. Iglesias, D. Monells, X. Fabregas, J. Mallorqui, A. Aguasca and C. Lopez-Martínez, "Phase Quality Optimization Techniques and Limitations in Polarimetric Differential SAR Interferometry," *transformation*, vol. 17, p. 18, 2013.
- [19] R. Iglesias, D. Monells, C. López-Martínez, J. Mallorqui, X. Fabregas and . A. Aguasca, "Polarimetric optimization of temporal sublook coherence for DInSAR applications," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12(1), pp. 87-91, 2015.
- [20] Z. Sadegi "Polarimetric SAR interferometry for improving phase quality in rural areas," Phd Thesis. Tehran, Iran, 85 p. (In Persian).
- [21] F. Foroughnia, S. Nemati, Y. Maghsoudi, "PS-InSAR time series analysis using ENVISAT-ASAR and Sentinel-1 data stacks for subsidence estimation in Tehran urban area," *RS&GIS, University of Shahid Beheshti*, 2017
- [22] M. Neumann, L. Ferro-Famil and A. Reigber, "Multibaseline polarimetric SAR interferometry coherence optimization," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 5(1), pp. 93-97, 2008.
- [23] S. Cloude and K. Papathanassiou, "Polarimetric radar interferometry," In *Optical Science, Engineering and Instrumentation'97*, pp. 224-235, 1997.
- [24] D. Perissin and T. Wang, "Repeat-Pass SAR Interferometry With Partially Coherent Targets," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, pp. 1-10, 2012.
- [25] D. Perissin, Z. Wang and T. Wang, "The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence/manmade structure stability monitoring in China," *ISRSE Sydney Australia*, 2010.
- [26] M. Motagh, R. Shamshiri, M. Haghghi, H. Wetzel, B. Akbari, H. Nahavandchi, S. Roessner, Arabi and S., "Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements," *Engineering Geology*, vol. 218, pp. 134-151, 2017.