بررسی تغییرات توپوگرافی معادن روباز با استفاده از تداخل‌سنجی راداری الگوریتم PS

مطالعه موردی: معدن سنگ آهن سنگان خواف

مهوش نداف[1]
سیدرضا حسین‌زاده[2]
خوزه‌فرانسیسکو مارتین‌داک[3]
ناصر حافظی مقدس[4]
مهناز جهادی طرقی[5]
کاپیل مالیک[6]

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۰۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰

****

چکیده

معادن منبع اصلی تولید مواد اولیه هستند و استخراج این منابع طبیعی از معادن برای تولید کالا باعث ایجاد اختلال در تعادل سطحی، تغییر شکل مداوم زمین، افزایش مسائل محیط‌زیست و ایجاد خسارت به زیر ساخت‌ها می‌شود. از این رو کنترل و مانیتورینگ جابه‌جایی‌های ناشی از معادن سطحی روباز مهم می‌باشد. در این مقاله میزان تغییرات سطح زمین و تأثیرات ژئومورفولوژیکی ناشی از فعالیت‌های معدنکاری در معدن سنگ آهن سنگان خواف واقع در خراسان رضوی بررسی شده است. سنگان یک منطقه گرمسیری / خشک با برجستگی بالا ۱۷۰۰ متر ارتفاع در مناطق معدنی است. حداکثر دمای ۳۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد در جولای/ آگوست تجربه می‌شود در حالی که حداقل دما از۵- تا ۱۵- درجه سانتی‌گراد در ژانویه / فوریه رخ می‌دهد. بلندترین قله، نول خروس، در معدن A، ۱۷۱۹ متر قرار دارد. بررسی‌های میدانی انجام گرفته نشان می‌دهد که معادن سنگ آهن سنگان به‌علت فعالیت‌های شدید معدنکاری به‌ویژه ژئومورفولوژی منطقه دچار تغییر شده است که این تغییرات می‌تواند در روند طبیعی فرآیندها و فرم، مثلاً فرآیند سیلاب تأثیر داشته باشد. تداخل‌سنجی راداری ابزار ارزشمندی در پایش جابه‌جایی‌های سطح زمین است. برای بررسی و اندازه‌گیری میزان این تغییرات در معدن سنگان از روش تداخل‌سنجی راداری الگوریتم PS با ۴۷ تصویر ماهواره‌ای سنتیتل۱ مربوط به سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰، پلاریزاسیون VV با استفاده از نرم‌افزارتجاری SARPROZ در محیط Matlab انجام شده است. تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی(PS) جابه‌جایی‌ها را بر روی پیکسل‌هایی که ویژگی‌های پراکنشی آن‌ها در طول زمان تقریباً ثابت است، بررسی می‌کند. نتایج اجرای سری زمانی در این پژوهش با الگوریتم PS میزان تغییرات را حدود ۳۰- سانتی‌متر در راستای دید ماهواره نشان داد. میانگین نرخ (سرعت) جابه‌جایی را ۴/۸- تا ۶- سانتی‌متر در سال تعیین کرد. برای ارزیابی نتایج از داده‌های دوربین ترازیابی استفاده شد و در مقایسه با آن می‌توان گفت تقریباً روند مشابهی را طی کرده است. به‌طور کلی فعالیت‌های معدنکاری در معدن سنگان تغییرات توپوگرافی فراوانی بر محیط گذاشته است و موجب تشدید فعالیت فرآیندهای ژئومورفیک مثل لغزش، ریزش، و... بر روی باطله‌ها شده است. شناسایی و تحلیل این عوارض و فرآیندهای مرتبط، بیانگر یک چالش برای درک تحول چشم‌اندازهای زمین است. به‌طور کلی، نظارت بر تغییر شکل معادن سطحی با استفاده از داده‌های راداری SAR امکان‌پذیر و همچنین نیازمند به اجرای پژوهش‌های بیشتر در معادن ایران است.

واژه‌های کلیدی: PS ، تداخل‌سنجی راداری، سنگ آهن، سنگان، خواف، معادن روباز

****

۱- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران mahvash.naddaf@yahoo.com
۲- دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران (نویسنده مسئول) srhosseinzadeh@um.ac.ir
۳- دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه کمپلوتنسه مادرید، مادرید، اسپانیا josefco@ucm.es
٤- استاد زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران nhafezii@um.ac.ir
۵- استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه پیام نور مشهد، مشهد، ایران m.jahadi@pnnu.ac.ir
٦- مؤسسه فناوری هند ، هند kapil@radarsystems.in

۱- مقدمه

استخراج معادن (به‌ویژه معادن سطحی) یکی از مهم‌ترین دلایل تخریب زمین و محیط‌زیست در سطح جهان است. تأثیراتی مانند تخریب چشم‌انداز، تغییر مورفولوژی آبراهه‌ها و رودخانه‌ها، آلودگی گسترده محیط‌زیست، از بین‌رفتن تنوع‌زیستی و غیره در این خصوص، ذکر شده است *(کاستلو وهمکاران[1]،۲۰۱۶)*. همچنین معادن سبب جابه‌جایی‌های عمودی و افقی در سطوح می‌شوند که این‌ها باعث خسارت به زیرساخت‌ها، محیط‌زیست و غیره خواهند شد. آنچه برای توسعه‌پایدار معادن بسیار مهم است مانیتورینگ و تجزیه و تحلیل، تعیین محدوده و کنترل وقوع خطرات می‌باشد، که مرجع کمک و تجربه‌ای مؤثر برای مدیریت‌جامع معادن است.

مهندسین نقشه‌بردار با بررسی میزان جابه‌جایی‌های معادن روباز با استفاده از ترازیابی به محاسبه مقدار جابه‌جایی و تعیین میزان حجم جابه‌جا شده در معادن روباز می‌پردازند. این روش‌ها گران‌قیمت و وقت‌گیر هستند. در دهه‌های گذشته که مانیتورینگ سطح زمین توجه جامعهٔ علمی را به‌خود جلب کرده است، فکر مانیتورینگ سطح زمین از فاصلهٔ ۸۰۰ کیلومتری، بدون دستگاه‌های نصب‌شده در روی زمین و لمس سازه‌ها و سطح زمین، بسیار عجیب می‌نماید. این مانیتورینگ ممکن است شامل هرگونه تغییر شکل در حدود میلی‌متر و سانتی‌متر در روی زمین و سازه‌های مهندسی‌ساز، مانیتورینگ گسل‌ها و مناطق شهری، تعیین کیفیت زمین و آب‌های سطحی و عمیق، مخاطرات زیست‌محیطی و... باشد.

پیشرفت ممتد علم فیزیک، از حدود ۱۰۰سال پیش و حتی زودتر، مانیتورینگ سطح زمین توسط ماهواره‌ها را ممکن ساخته است. داده‌های ماهواره‌ای (از نظر اقتصادی و منابع‌انسانی) در نظارت بر مناطق تخریب‌شده ناشی از معدن و فعالیت‌های دیگر در مقایسه با سایر روش‌ها، مناطق بزرگ را تحت پوشش قرار می‌دهند. چندین روش سنجش‌ازدور با استفاده از تصاویر اپتیکی می‌تواند برای نظارت و مانیتورینگ در طولانی مدت مورداستفاده قرار گیرد *(آلفیندو و همکاران[2]،۲۰۱۸)*. با این‌حال، با طول موج کوتاه‌تر، تصاویر نوری تحت‌تأثیر شرایط جوی مانند ابر، مه قرار می‌گیرند که نظارت منظم را ممنوع می‌کند و به‌عنوان یک سنسور منفعل، به نور طبیعی خورشید برای ثبت تصویر متکی است. بنابراین تصاویر در شب به‌طور کلی مفید نیستند. تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان ابزاری مفید در بررسی جابه‌جایی‌های سطح زمین مطرح می‌باشد. این تکنیک با استفاده از تصاویر راداری و تولید اینترفروگرام به برآورد میزان جابه‌جایی زمین می‌پردازد. این تکنیک اولین‌بار در سال ۱۹۷٤ توسط گراهام[3] مورد استفاده قرار گرفت و اولین نقشه رقومی ارتفاعی زمین با بهره‌گیری از این تکنیک، در سال ۱۹۸۸، توسط گلدشتاین[4] و زبکر(۱۹۸۹) تولید شد. با افزایش سنسورهای فضایی مختلف SAR *(جیانگ و همکاران[5]، ۲۰۱۱)*، که تصاویر با وضوح بالا را در یک منطقه وسیع با قابلیت تصویربرداری روز و شب در هر شرایط جوی ارائه می‌دهند، این فناوری بهبودیافته است *(تومیاسو[6] ۱۹۷۸، جیمن[7]۲۰۱٤، ان‌جی و همکاران[8] ۲۰۱۱)*.

SAR یک سنسور فعال است که به روشنایی طبیعی خورشید متکی نیست و با طول‌موج بلندتر در مقایسه با تصاویر نوری، سیگنال از ابرها عبور می‌دهد و تصویری واضح از منطقه موردنظر را فراهم می‌نماید. تکنیک تداخل‌سنجی *(آیدونر، مکتاو و آلپارسلان[9]،۲۰۰٤)* برای اندازه‌گیری مشخصات توپوگرافی و تغییر شکل سطح *(ایشوار و کومار[10]، ۲۰۱۷) (ساحو، پرادهون و جادی[11] ۲۰۱٦)* و برای نظارت بر فرونشست *(استروزی و همکاران[12]،۲۰۰۱)*، در نواحی بزرگ

1- Castello et al

2- Olfindo et al
3- Graham
4- Goldstein
5- Jiang et al
6- Tomiyasu
7- Geymen
8-.NG et al
9- Aydoner, Maktav, and Alparslan
10- Ishwar and Kumar
11- Sahu ، Pradhan Jade
12- Strozzi et al

(بونو و همکاران[1] ۲۰۱۷) با هزینه‌ای کمتر از تکنیک‌های سنتی *(ان‌جی و همکاران ۲۰۱۱؛ فرتی، پراتی و روکا[2]، ۲۰۰۱)* به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. روش‌های توسعه‌یافته در تداخل‌سنجی راداری شامل: تداخل‌سنجی راداری[3]، تداخل‌سنجی راداری تفاضلی[4] و تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی[5] می‌باشند.

تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی‌بر پراکنشگرهای دائمی(PS)، که برای اولین بار توسط فرتی و همکاران[6] معرفی شد، با بهره‌گیری از نقاط پراکنشگر دائمی ضمن غلبه بر محدودیت‌های تکنیک‌های سنتی امکان پردازش سری زمانی بلندمدت را فراهم می‌نماید. نقاط پراکنشگر دائمی برخی از عوارض سطح زمین هستند که در طول چندین ماه و حتی سال ویژگی‌های بازپراکنشی نسبتاً پایداری دارند. ابعاد این عوارض از یک پیکسل کوچک‌تر بوده و از عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی تصاویر SAR کمتر تأثیر می‌پذیرند. از آنجا که در تمامی الگوریتم‌های تداخل‌سنجی پراکنشگر دائمی پردازش‌های اساسی فقط بر روی پیکسل‌های پراکنشگر دائمی صورت می‌گیرد، لذا تراکم بالا و کیفیت فاز بالای این پیکسل‌ها عاملی مؤثر در افزایش کارایی الگوریتم‌های تداخل‌سنجی راداری محسوب می‌شود *(دوانتری و همکاران[7]، ۲۰۱۴)*.

الگوریتم PS[8]، برای شناسایی و آنالیز شبکه‌ای از پیکسل‌های کوهرنس که به پیکسل‌های پراکنشگر دائمی مشهورند و در فواصل زمانی طولانی از استحکام فاز بالایی برخوردار می‌باشند. فعالیت‌های معدنی با تغییر شکل‌های سطح زمین برهم زدن تعادل آن را افزایش می‌دهد. تشخیص تغییر شکل‌ها برای درک و پیش‌بینی فرآیندها و به حداقل رساندن فاجعه‌های زیست‌محیطی مهم است.

1- Bonì et al
2- Ferretti Prati Rocca
3- InSAR
4- DInSAR
5- PSInSAR
6- Ferreti et al
7- Devanthéry et al
8- Persistent Scatterers

تصاویر ماهواره‌ای نمای گسترده‌ای که در یک منطقه ایجاد می‌کند و همچنین به دلیل پوشش منظم تکراری آن، به‌عنوان ابزاری مهم برای مدیریت منابع زمینی در نظر گرفته می‌شود. چند نمونه از مطالعات تغییر شکل زمین ناشی از معادن با تداخل‌سنجی راداری در کشورهای مختلف جهان به شرح زیر می‌باشد:

براساس تحقیق نظارت بر تغییر شکل سطح ناشی از معدنکاری زیرزمینی با استفاده از تصاویر Sentinel-1A در معدن، Nanhu ژانگ و همکاران[9](۲۰۲۰) نشان دادند که InSAR یک روش مفید برای نظارت بر فرونشست زمین در یک منطقه معدن است و داده‌های بیشتری را برای احیای محیط معادن فراهم می‌کند .

هانگ و همکاران[10](۲۰۱۹) تغییر شکل سطحی معادن زغال‌سنگ ژی- تینگ[11] در شاندونگ چین را براساس الگوریتم PS با بیش از PS۷۸۰۰۰ مطالعه کردند. نتایج در مقیاس زیرمنطقه‌ای میزان تغییر شکل آهسته زمین را از ۰ تا ۵۸- سانتی‌متر در سال و در نتیجه عوامل و فرآیندهای مختلف (تورم / جمع شدن خاک‌های رس و پمپاژ آب) شناسایی کرد. نتایج فرآیند تکامل «پیت» را در فرونشست معدن نشان می‌دهد و این نتایج برای هشدار سریع فاجعه در معدن مفید است.

پارادلا و همکاران[12](۲۰۱۵) تغییرات سطحی معادن روباز در استان کراجس در ناحیه آمازون را با استفاده از SAR مطالعه کردند. نتایج با اطلاعات میدانی (دوربین ترازیابی، نقشه‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیک) مقایسه شد و این روش برای نظارت بر تغییر شکل زمین در منطقه مؤثر بود. با توجه به قابلیت‌های آن (دیدگاه سینوپتیک، دقت بالا، نمونه‌برداری از شبکه متراکم)، استفاده مکمل از SAR مبتنی بر فضا و سیستم‌های نظارت میدانی برای برنامه‌ریزی عملیاتی معدنی و ارزیابی ریسک در این محیط

9- Zhang,et.al
10- HUANG, et.al
11- Ge-Ting
12- Paradella,et.al

چالش‌برانگیز می‌تواند مفید باشد.

کومار و همکاران[1](۲۰۲۰) سوبسیدانس زمین را در معادن زغال‌سنگ جهاریا[2] در هند بررسی کردند. این مطالعه تلاش کرد تا امکان استفاده از روش PS-InSAR با داده‌های SAR باند C را برای بررسی تغییر شکل آهسته سطوح ناشی از معدن زغال‌سنگ و فعالیت‌های معدنی زیرزمینی در JCF[3] نشان دهد. براساس نتایج این تحقیق حداکثر میزان تغییر شکل آهسته در بین همه سایت‌ها ۲۹ میلی‌متر در سال با ارزش تجمعی ۹۰ میلی‌متر نشان داده شد.

پاولوزک–فیلیپیاک[4] و همکاران(۲۰۲۰) با تلفیق تکنیک‌های DInSAR و SBAS تغییر شکل زمین را در معدن رایدولت[5] در لهستان مطالعه کردند. نتایج مطالعه در این مناطق، ارتباط خوبی بین SBAS و DInSAR نشان می‌دهد و مبنی بر این است که روش SBAS می‌تواند برای نظارت بر فرونشست قابل اعتماد باشد. با استفاده از این روش پیشنهادی میزان فرونشست تا ۱ متر و جابجایی‌های جانبی تا ۰/۲٤ متر تشخیص داده شد.

ژو و همکاران[6](۲۰۱۸) سوبسیدانس سطحی را در یک معدن در شهر فنگ چن استان جیانگستو در چین با استفاده از روش (SBAS) بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان داده است که فناوری SBAS بر مشکلات روش سنتی D-InSAR فائق آمده است چون تغییر شکل مداوم معدنکاری سطحی در طول زمان از زمان و ویژگی‌های نشست سطح زمین در معادن سطحی در دوره‌های مختلف قابل نمایش است .

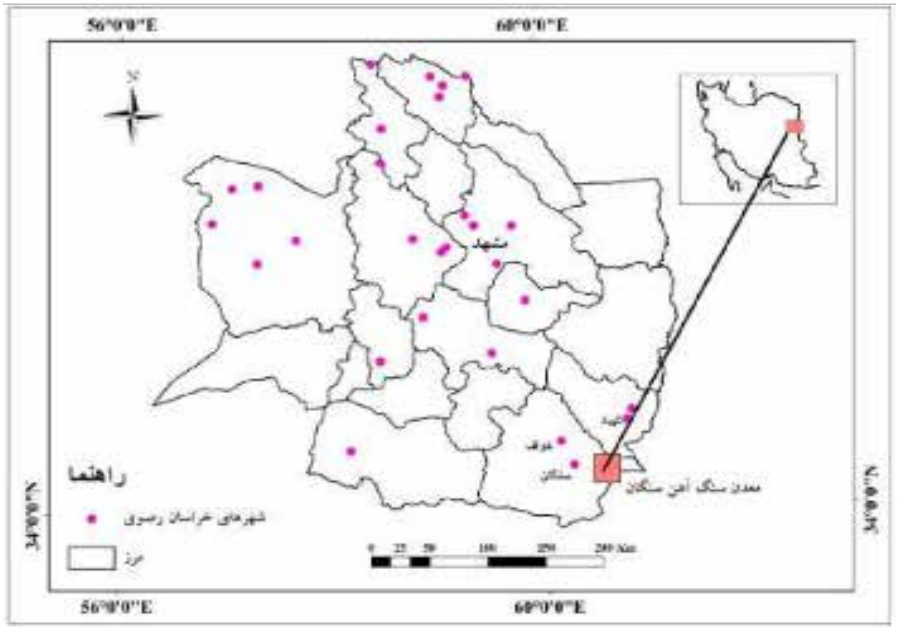
گویل و همکاران[7](۲۰۱۸) از روش PSInSAR برای تشخیص تغییر شکل زمین با استفاده از ۱۷ تصویر در معدن زغال‌سنگ کوربا در هند استفاده کردند. نتایج پیش‌بینی کرد که محدوده معادن زغال‌سنگ و مناطق اطراف آن با سرعت حدود ۳۰ میلی‌متر در سال تغییر شکل داده است. روش PSInSAR با داده‌های Sentinel-1 ابزاری کارآمد برای نظارت بر تغییر شکل معادن ذغال‌سنگ کوربا را فراهم می‌کند. شامی و همکاران(۱۳۹۸) در معدن روباز‌گل گهر سیرجان با استفاده از تصاویر راداری ماهواره انویست مطالعه‌ای انجام دادند. در این پژوهش آن‌ها نتیجه گرفتند که با تغییر مقدار چندمنظرسازی تصاویر از مقدار ۲۲ برای آزیموت و ٤ برای رنج به مقدار ۵ برای آزیموت و ۸ برای رنج (کوچک کردن ابعاد پیکسل‌های تصویر)، میزان جابه‌جایی قابل تشخیص بیشتر می‌شود. بیشترین نشست به‌دست آمده برای یک نقطه در معدن بعد از تغییر چندمنظرسازی از منفی ۵۸میلی‌متر به منفی ۱۵ میلی‌متر تغییر پیدا کرد و حجم محاسبه شده از ۱۸ هزارمترمکعب به ۱۱ هزار مترمکعب بعد از تغییر چندمنظرسازی تصویر، تغییر پیدا کرد.

عابد و رحیم زادگان(۱۳۹۷) در بررسی میزان فرونشست در جنوب تهران از این روش با استفاده از تصاویر راداری استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده مقدار قابل‌توجهی فرونشست سالیانه در حدود ۱۸سانتی‌متر بود. هدف اصلی این تحقیق برآورد میزان جابه‌جایی‌های معادن روباز معدن سنگ آهن سنگان از طریق فناوری تداخل‌سنجی راداری الگوریتم PS می‌باشد.

۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه

معادن سنگ آهن سنگان یکی از بزرگ‌ترین مناطق معدنی در ایران و یکی از غنی‌ترین کانسارهای خاورمیانه محسوب می‌شود که در ناحیه‌ای مستطیل شکل با طول ۲۲ کیلومتر و عرض ۱۰ کیلومتر واقع شده است. این ذخایر سنگ آهن حاوی ۱/۲ میلیارد تن مگنتیت با درجه خلوص از ۲۷ تا ٦۱٪ آهن است. این معدن در ۱۸ کیلومتری شمال‌شرقی شهر سنگان با عرض جغرافیایی ′۲٤ °۳٤ تا ′۵۵ °۳٤ شمالی، طول جغرافیایی′۱٦ °٦۰ تا ′۵۰ °٦۰ شرقی دراستان خراسان رضوی (۳۰ کیلومتری غرب مرز افغانستان) شمال شرقی ایران قرار دارد.

1- Kumar, et.al
2- Jharia
3- Jharia Coal Field
4- Pawluszek-Filipiak,et.al
5- Rydułtowy
6- Zhu, et.al
7- Govil, et.al



نگاره۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

ارتفاع این محدوده بین ۱۲۰۰ تا ۱۶۵۰ متر از سطح دریا قرار دارد. SIOM[1] به‌عنوان بزرگ‌ترین منابع سنگ‌آهن در زون سنگ‌آهن مشهد زنجان–سمنان در ایران شناخته می‌شود و متعلق به ایمیدرو است و در مجموع ۵۰ درصد از ذخایر سنگ آهن کشور را دربر می‌گیرند (نگاره۱).

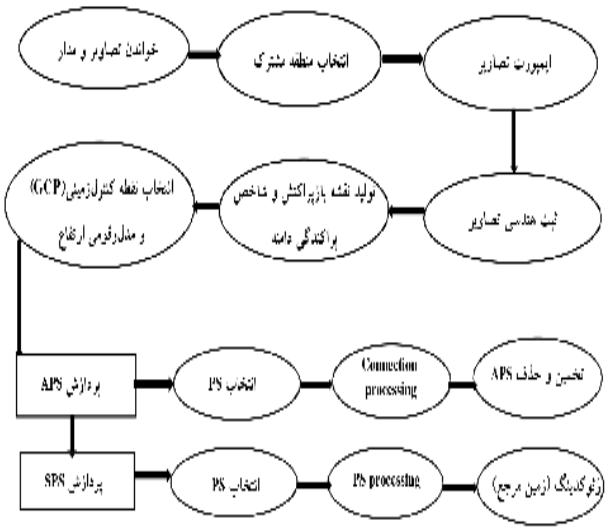
۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- مواد

مواد مورد استفاده در این مقاله مجموعه‌ای از ٤٧ تصویر Sentinel-1A (IW) است که از اکتبر۲۰۱٤ تا جولای ۲۰۲۰ از داده‌های رایگان آژانس فضایی اروپا به‌دست آمده است (جدول۱). Sentinel-1 A در ٤ آوریل ۲۰۱٤ توسط آژانس فضایی اروپا راه‌اندازی شده است. Sentinel-1A تصاویر با پهنای ۲۵۰ در ۱۸۰ کیلومتر با دوره برگشت ۱۲ روز است که اگر تصاویر به‌دست آمده توسط ماهواره Sentinel-1B در دسترس باشد، به ٦ روز کاهش می‌یابد.

۳-۲- روش تحقیق

در این مقاله از آنالیز سری‌های زمانی تکنیک PS یا پراکنده سازهای دائمی[2] استفاده شده است. PS تکنیکی است که می‌تواند پراکنده سازهای یکسان را شناسایی نموده، اثرات اتمسفری را برآورد و حذف کرده و همچنین سری‌های زمانی میدان جابه‌جایی را بازیابی کند. همه مراحل با نرم‌افزار تجاری SARPROZ در محیط Matlab انجام شده است. فلوچارت کار در نگاره۲ نشان داده شده است.



نگاره۲: فلوچارت مراحل کار

1- Sangan Iron Ore Mine

2- Persistent Scatterers

جدول(۱): مشخصات تصاویرسنتینل A1

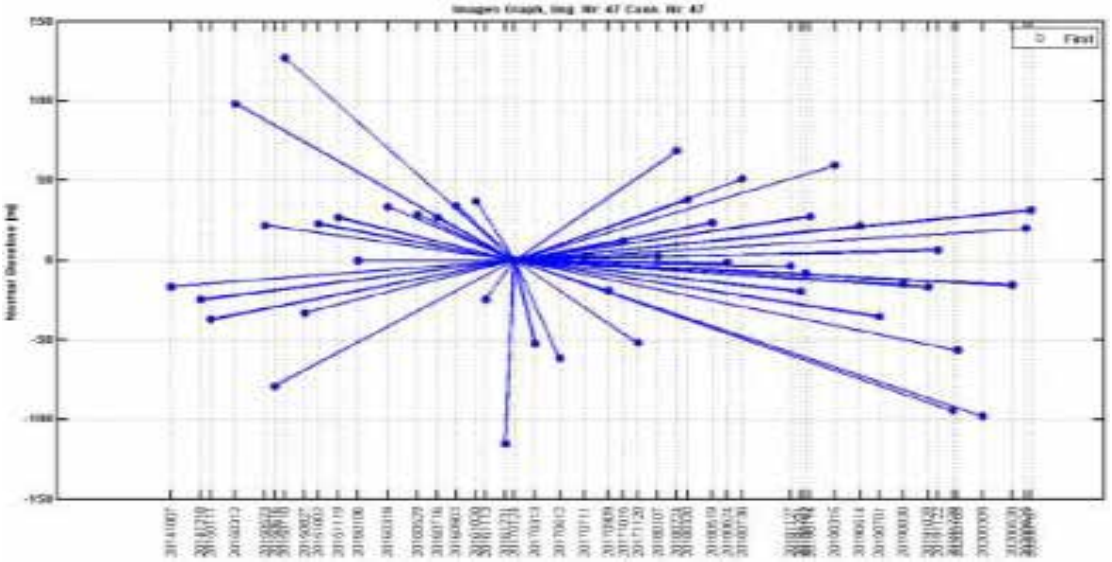
شماره	تصاویر	بیس لاین مکانی(متر)	بیس لاین زمانی(روز)
۱	۲۰۱٤۱۰۰۷	-۱۷	-۸٤۰
۲	۲۰۱٤۱۲۱۸	-۲۵	-۷٦۸
۳	۲۰۱۵۰۱۱۱	-۳۷	-۷٤٤
٤	۲۰۱۵۰۳۱۲	۹۸	-٦۸٤
۵	۲۰۱۵۰۵۲۳	۲۲	-٦۱۲
٦	۲۰۱۵۰٦۱٦	-۷۹	-۵۸۸
۷	۲۰۱۵۰۷۱۰	۱۲۷	-۵٦٤
۸	۲۰۱۵۰۸۲۷	-۳۳	-۵۱٦
۹	۲۰۱۵۱۰۰۲	۲۳	-٤۸۰
۱۰	۲۰۱۵۱۱۱۹	۲۷	-٤۳۲
۱۱	۲۰۱٦۰۱۰٦	-۰	-۳۸٤
۱۲	۲۰۱٦۰۳۱۸	۳٤	-۳۱۲
۱۳	۲۰۱٦۰۵۲۹	۲۹	-۲٤۰
۱٤	۲۰۱٦۰۷۱٦	۲۷	-۱۹۲
۱۵	۲۰۱٦۰۹۰۲	۳٤	-۱٤٤
۱٦	۲۰۱٦۱۰۲۰	۳۷	-۹٦
۱۷	۲۰۱٦۱۱۱۳	-۲۵	-۷۲
۱۸	۲۰۱٦۱۲۳۱	-۱۱۵	-۲٤
۱۹	۲۰۱۷۰۱۲٤	۰۰	۰۰
۲۰	۲۰۱۷۰۳۱۳	-۵۲	٤۸
۲۱	۲۰۱۷۰۵۱۲	-٦۲	۱۰۸
۲۲	۲۰۱۷۰۷۱۱	۱	۱٦۸
۲۳	۲۰۱۷۰۹۰۹	-۱۹	۲۲۸
۲٤	۲۰۱۷۱۰۱۵	۱۲	۲٦٤
۲۵	۲۰۱۷۱۱۲۰	-۵۲	۳۰۰
۲٦	۲۰۱۸۰۱۰۷	۳	۳٤۸
۲۷	۲۰۱۸۰۲۲٤	٦۹	۳۹٦
۲۸	۲۰۱۸۰۳۲۰	۳۸	٤۲۰
۲۹	۲۰۱۸۰۵۱۹	۲٤	٤۸۰
۳۰	۲۰۱۸۰٦۲٤	-۲	۵۱٦
۳۱	۲۰۱۸۰۷۳۰	۵۱	۵۵۲
۳۲	۲۰۱۸۱۱۲۷	-٤	٦۷۲
۳۳	۲۰۱۸۱۲۲۱	-۱۹	٦۹٦
۳٤	۲۰۱۹۰۱۰۲	-۸	۷۰۸
۳۵	۲۰۱۹۰۱۱٤	۲۸	۷۲۰
۳٦	۲۰۱۹۰۳۱۵	-٦۰	۷۸۰
۳۷	۲۰۱۹۰۵۱٤	۲۲	۸٤۰
۳۸	۲۰۱۹۰۷۰۱	-۳۵	۸۸۸
۳۹	۲۰۱۹۰۸۳۰	-۱۵	۹٤۸
٤۰	۲۰۱۹۱۰۲۹	-۱٦	۱۰۰۸
٤۱	۲۰۱۹۱۱۲۲	۷	۱۰۳۲
٤۲	۲۰۱۹۱۲۲۸	-۹٤	۱۰٦۸
٤۳	۲۰۲۰۰۱۰۹	-۵۷	۱۰۸۰
٤٤	۲۰۲۰۰۳۰۹	-۹۸	۱۱٤۰
٤۵	۲۰۲۰۰۵۲۰	-۱۵	۱۲۱۲
٤٦	۲۰۲۰۰٦۲۵	۲۰	۱۲٤۸
٤۷	۲۰۲۰۰۷۰۷	۳۲	۱۲٦۰

مراحل کار شامل سه بخش پردازش، تخمین و تفسیر است. از مجموعه٤۷ تصویر، تصویر به‌دست آمده در ۲۰۱۷/۰۱/۲٤ به عنوان مرجع یا تصویر اصلی[1] و ٤٦ تصویر دیگر تصاویر اسلیو[2] انتخاب شد. با استفاده از تصویر مرجع، کلیه تصاویر برای بیس لاین زمانی، بیس لاین مکانی، کوهرنسی، برآورد PS و غیره ثبت هندسی شدند (نگاره۳). حداکثر بیس لاین مکانی ۱۲۷ متر است. در بخش تخمین، نقاط PS نقاط پایداری هستند و از داده‌های زمانی یا پیکسل منسجم واحد به نام پراکنشگر دائمی مشتق شده‌اند. نقاط PS با ارزیابی شاخص پراکندگی دامنه و شاخص پراکندگی اتمسفر که از بازپراکنش هر پیکسل مشتق می‌شوند، محاسبه می‌شوند.

در مرحله بعدی نقشه بازپراکنش تهیه شد. در مرحله بعد انتخاب اولیه پیکسل‌های PS می‌تواند به روش‌های مختلفی تعیین شود که مرسوم‌ترین آن‌ها استفاده از شاخص پراکندگی دامنه[3] می‌باشد. مقدار شاخص پراکندگی دامنه و شاخص پراکندگی اتمسفر[4] از بازپراکنش هر پیکسل حاصل می‌شود. تعداد ۲۱۵۳۷۷ نقطه PS شناسایی شد. پس از انتخاب PSهای اولیه، نقطه کنترل زمینی[5] مشخص شد. با تحمیل آستانه استاندارد ۰/۷ بر مقدار انسجام گروه، این مقدار به طرز چشمگیری کاهش یافت و به ۵۲٤٤۹ PS نهایی رسید. در صورتی که منطقه مورد پردازش از ۱ کیلومتر مربع بزرگ‌تر باشد نمی‌توان از فاز اتمسفر صرف‌نظر کرد لذا از یک شبکه مکانی بین نقاط پراکنشگرهای دائم و محاسبه اختلاف فازهای مجاور PS استفاده می‌شود.

در مرحله بعد فاز اتمسفر (APS) که مسئول نوسان فاز سیگنال‌های دریافتی در فاز خطی و یا در جهت عقربه‌های ساعت است، به‌منظور اخذ نتایج بهتر برای تعیین میزان تغییر شکل، تخمین و حذف شد. در نهایت سری زمانی و میزان جابه‌جایی تخمین زده شد.

1-.Master
2- slave
3- Amplitude Stability Index
4- Atmospheric Phase Screen
5- Ground Control Point



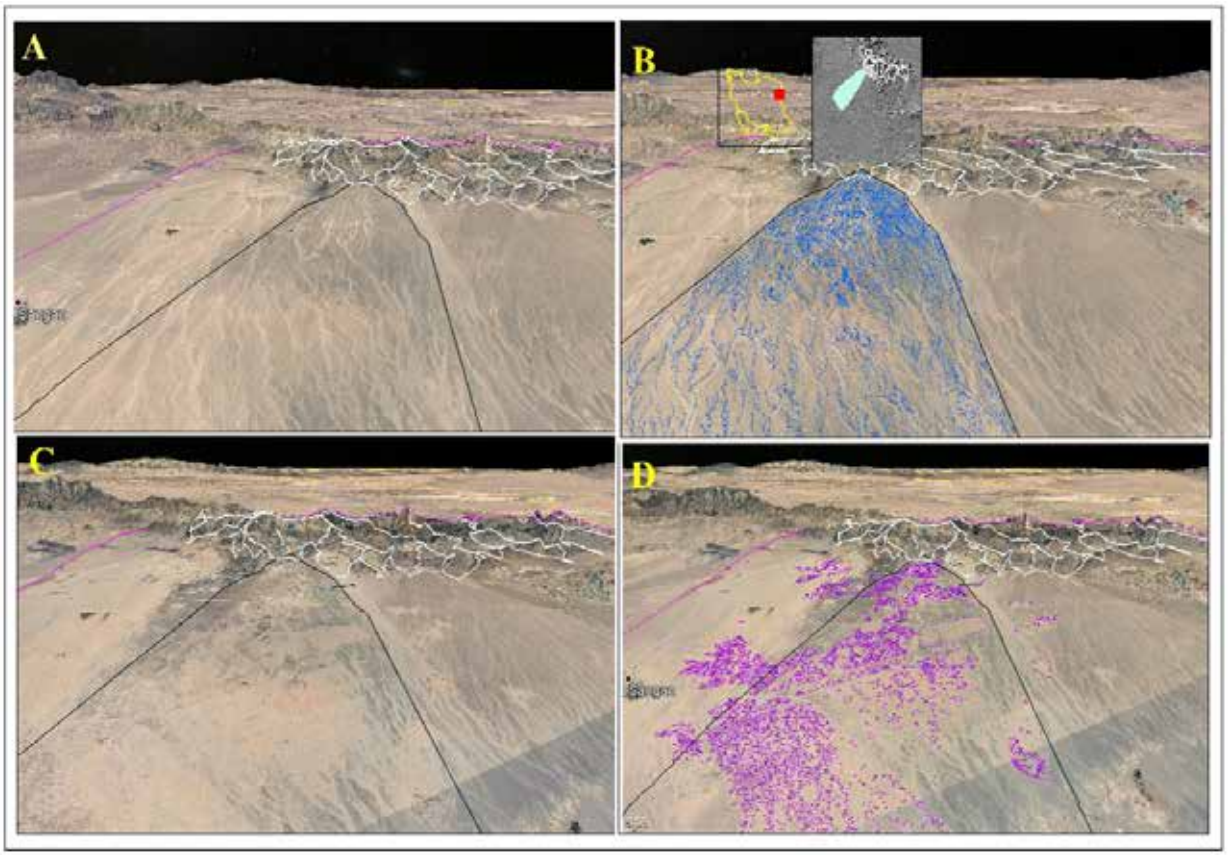
نگاره۳: گراف هندسه اخذ تصاویر راداری

٤- بحث

صنعت معدن برای حمایت از زندگی مدرن یک فعالیت ضروری است. با این حال، به دلیل تأثیر قابل توجهی که می‌تواند بر روی زمین داشته باشد، اغلب مورد سؤال قرار می‌گیرد. استخراج این منابع طبیعی در معادن برای تولید کالاها باعث افزایش فشار در زمین و محیط زیست می‌شود. بررسی‌ها و بازدید میدانی از معدن سنگ‌آهن سنگان مشخص کرد تغییرات چشم‌انداز گسترده‌ای درسطح زمین به‌ویژه شبکه زهکشی ایجاد شده است(نگاره٤).

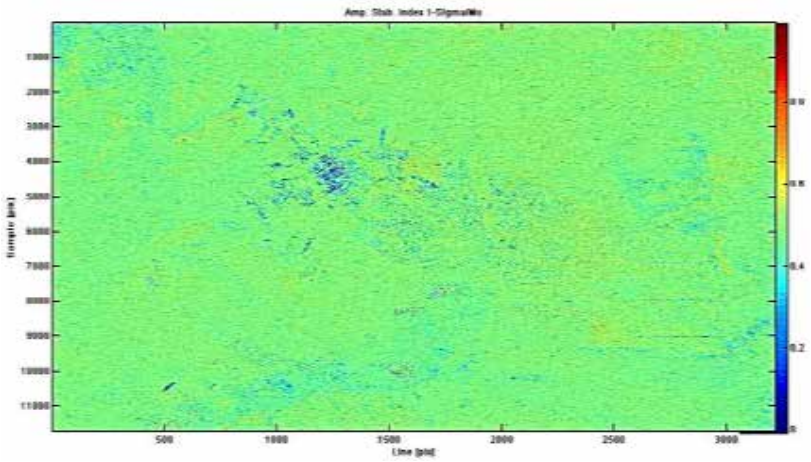
فعالیت‌های معدنکاری در این منطقه با برهم زدن تعادل، تخریب و تغییر شکل مداوم در سطح زمین را افزایش داده است. در این چشم‌اندازها، فعالیت‌های انسانی، پدیده‌های ژئومورفولوژیکی مشخصی را از جمله ریزش و لغزش و.. در سطح باطله‌ها ایجاد کرده است(نگاره۵). این عوارض می‌توانند آثار قابل توجهی مانند فرسایش، رواناب، انتقال و به جاگذاری رسوب بر فرآیندهای سطح زمین داشته باشند. به‌طور گسترده‌ای این نتیجه حاصل شده است که شیب‌های تند و بدون پوشش گیاهی مستعد فرآیندهای مانند لغزش و ریزش سنگ است. شناسایی و تحلیل این عوارض و فرآیندهای مرتبط، بیانگر یک چالش برای درک تحول چشم‌اندازهای زمین است. سیل در معادن یک خطر بالقوه هستند، زیرا آب می‌تواند از بالا وارد چاله‌ها و تونل‌ها شود. این تغییرات می‌تواند در کیفیت و میزان منابع آب زیرزمینی، شکل‌گیری رواناب و عملیات کنترل سیلاب و همچنین شدت گرد و غبار و فرسایش بادی در منطقه تأثیر داشته باشد. به منظور بررسی و مانیتورینگ مقدار این تغییرات، در مقاله حاضر از تکنیک PS به عنوان یکی از روش‌های تداخل‌سنجی راداری استفاده شده است. به این منظور نتایج اولیه پردازش داده‌ها با درنظر گرفتن احتمال حضور سایر خطاها (فاز باقیمانده توپوگرافی، خطای اتمسفری) محاسبه شد. با تشکیل شبکه گراف تداخل‌نگارها و تولید آن‌ها، برای پردازش سری زمانی تداخل‌سنجی اقدام به شناسایی نقاط پراکنش‌کننده دائمی شد. شناسایی پیکسل‌های پراکنشگر دائمی در الگوریتم PS طی دو مرحله‌ی آنالیز دامنه و آنالیز فاز انجام شد. ابتدا به منظور آنالیز دامنه، پیکسل‌هایی از تصویر که مقدار ADI مربوط به آن‌ها از حد آستانه‌ی۰/۷ کمتر بود به‌عنوان پیکسل‌های پراکنشگر کاندید معرفی و سپس پیکسل‌هایی که مقدار کوهرنسی زمانی (TC)[1] برای آن‌ها حد آستانه ۰/۹ بود، به‌عنوان پیکسل‌های پراکنشگر نهایی انتخاب شدند(نگاره‌های٦و۷).

1- Temporal Coherence

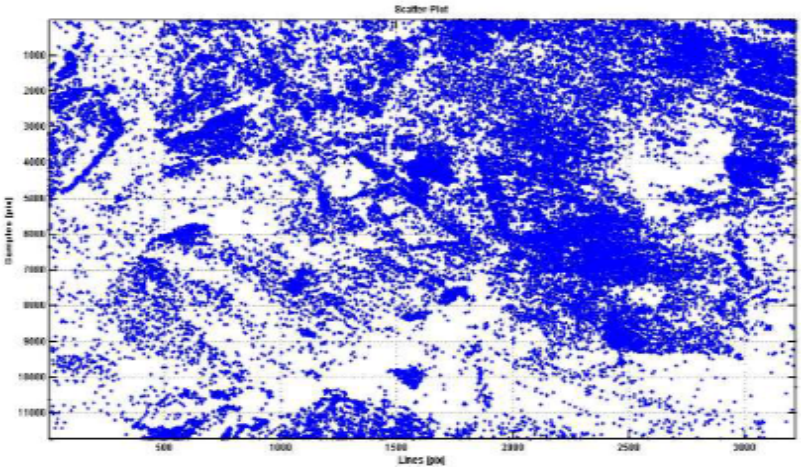


نگاره٤: شبکه زهکشی قبل (A,B) و بعد (C,D) معدنکاری

نگاره٥: تصویری از بازدید میدانی در منطقه



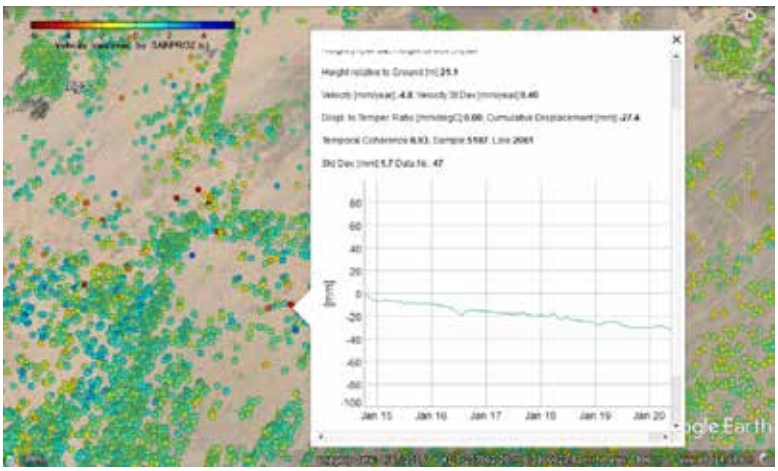
نگاره٦: نقشه شاخص پراکندگی دامنه



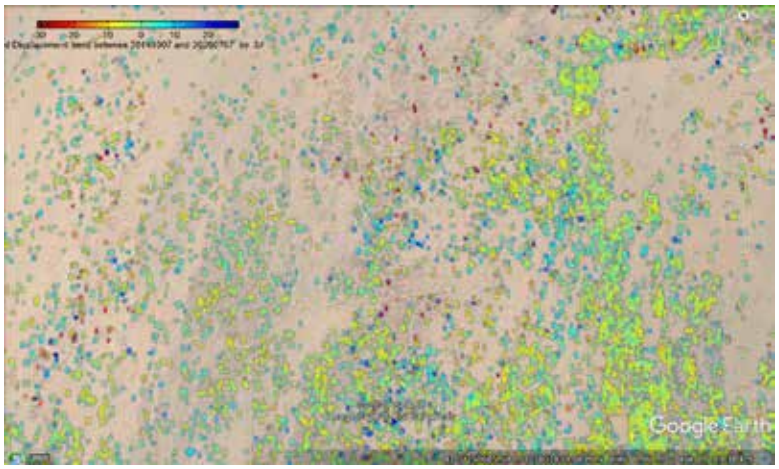
نگاره۷: نقشه نقاط بازپراکنش

درواقع این تحقیق ۲۱۵۳۷۷ نقطه PS را شناسایی نموده که با تحمیل آستانه استاندارد به ۵۲٤٤۹ PS نهایی رسید. DEM ۳۰ متری SRTM به منظور حذف فاز توپوگرافی مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، سری زمانی در نرم‌افزار SARPROZ در محیط Matlab انجام شد و نرخ جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره برای الگوریتم PS به‌دست آمد، که در نگاره۸ نمایش داده شده است.

حداکثر جابه‌جایی که از طریق فناوری تداخل‌سنجی راداری قابل استخراج است، تحت‌تأثیر دو عامل طول موج تصاویر راداری و ابعاد پیسکل‌های تصاویر راداری است که با افزایش طول موج تصاویر و یا کاهش ابعاد پیکسل‌های تصاویر می‌توان به حداکثر جابه‌جایی حاصل از فناوری تداخل‌سنجی راداری دست پیدا کرد. از طرفی برداشت سریع از معادن، باعث ایجاد ناهمدوسی در بین تصاویر می‌شود که باعث کاهش دستیابی به حداکثر جابه‌جایی می‌شود. برای رفع ناهمدوسی تصاویر، انتخاب تصاویر با خط مبنای زمانی و مکانی کم می‌تواند این مشکل را حل نماید. همانگونه که از مشاهدات میدانی و اطلاعات موجود از معدن سنگ آهن سنگان انتظار می‌رفت پس از پردازش تصاویر راداری سنتینل با استفاده از الگوریتم سری زمانی PS در دوره زمانی ۲۰۱٤-۲۰۲۰ دارای تغییرات ناشی از برداشت و تغییر ژئومورفولوژیکی الگوی آبراهه‌ها و مخروطه‌افکنه‌ها بود. میزان نرخ(سرعت) جابه‌جایی به‌دست آمده حدود ٤/۸- تا ٦/۸- میلی‌متر در سال است و حداکثر میزان جابه‌جایی حاصل از سری زمانی ۳۰- میلی‌متر بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده برای تصاویر پردازش شده این رقم برای نواحی مخروطه‌افکنه اصلی و آبراهه‌های سطح آن که مورد بهره‌برداری قرار گرفته است برقرار شد (نگاره۹).



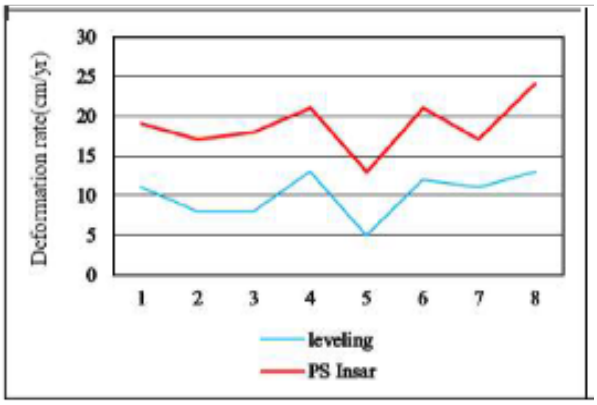
نگاره۸: نقشه سرعت جابه‌جایی



نگاره۹: نقشه میزان جابه‌جایی

همه این تغییرات می‌تواند در تشدید سیلاب‌های بزرگ در منطقه و فرآیندهای ژئومورفولوژیکی نظیر فرسایش آبی، لغزش، ریزش نقش مهمی داشته باشد. به‌دلیل عدم وجود فراوانی داده، داده‌های ترازیابی حاصل از نقشه‌برداری با دوربین ترازیابی مربوط به نواحی پایکوه و سال ۲۰۱۲-۲۰۲۰ می‌باشد. همانطور که در نگاره۱۰ ملاحظه می‌شود میزان تغییرات حاصل از داده‌های راداری با استفاده از الگوریتم PS در مقایسه با داده‌های دوربین ترازیابی الگوی مشابهی را طی کرده است.

با این حال ممکن است مقداری خطا وجود داشته باشد. (به‌دلیل اینکه داده‌ها همزمان نیستند و ماهیت برداشت‌ها متفاوت است). یعنی در ترازیابی تغییرات ارتفاعی برای یک نقطه اندازه‌گیری می‌شود اما در تداخل‌سنجی نرخ میانگین از نقاط مجاور یکدیگر است.



نگاره۱۰: مقایسه داده‌های دوربین ترازیابی و PS

۵- نتیجه‌گیری

تقریباً در همه موارد حرکت زمین توسط انسان در هنگام معدنکاری منجر به تخریب زمین می‌شود. این چشم‌اندازهای ایجاد شده توسط معدنکاری مستعد

انواع خطرات ژئومورفیک هستند. در این چشم‌اندازها، فعالیت‌های انسانی، پدیده‌های ژئومورفولوژیکی مشخصی را ایجاد می‌کنند. این عوارض می‌توانند آثار قابل توجهی مانند فرسایش، رواناب، انتقال و به جاگذاری رسوب بر فرآیندهای سطح زمین داشته باشند. حذف پوشش گیاهی و رسوبات سطحی و فعالیت‌هایی مانند انفجار، ریختن مواد باطله و افزایش شیب‌ها، چشم‌اندازهای معدنی را در برابر فرسایش، سیل، فرونشست و دیگر خطرات ژئومورفیک آسیب‌پذیر می‌کند. اکتشافات تأثیرات ژئومورفولوژیکی فراوانی بر محیط می‌گذارند و موجبات تشدید فعالیت فرآیندهای ژئومورفیک مثل لغزش، ریزش، تغییرات توپوگرافی، مسدود شدن مسیر رودخانه و... را فراهم می‌کنند. مانیتورینگ تغییر شکل در مناطق معدنی برای پیش‌بینی تغییر و نظارت بر شاخص‌های خطر پیش رو بسیار ضروری است.

در مطالعه حاضر، از الگوریتم PS و داده C-band Sentinel-1A برای نظارت بر تغییر شکل در معادن روباز سنگ آهن سنگان واقع در خراسان رضوی استفاده شده است. برآورد نقطه PS برای نظارت بر تغییر شکل با استفاده از ٤٧ تصویر IW SLC انجام شده است. نتایج تجزیه و تحلیل تصویر سری زمانی به‌دست آمده حاکی از این است که نرخ تغییر شکل ٤/٨- تا٦/٨- میلی‌متر در سال در قسمت‌های مختلف معدن سنگان رخ می‌دهد. مقدار حداکثر تجمعی ۳۰- است. سری زمانی تغییر شکل زمین به‌طور ایده‌آل به مطالعه تغییر شکل در دیگر معادن ایران و جهان کمک می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت نظارت بر تغییر شکل سطوح مورد استخراج معادن با استفاده از تکنیک‌های سنتی نظارتی مانند بررسی‌های میدانی و با استفاده از دوربین‌های ترازیابی، مخصوصاً در مناطق بزرگ مورد مطالعه، وقت‌گیر است. از آنجایی که در استفاده از روش‌های تداخل‌سنجی در مطالعه معادن روباز وسعت مناطق تحت پوشش تصاویر SAR به مراتب بیشتر است درنتیجه استفاده از این روش باعث کاهش هزینه‌ها خواهد شد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از بخش مدیریت توسعه و پژوهش مجتمع سنگ آهن سنگان برای ارائه مجموعه داده ها تشکر می‌کنند.

٦- منابع و مآخذ

۱-شامی، مشهدی، بابایی؛ سیاوش، حسینعلی، ساسان. (۱۳۹۸). آنالیز جابه‌جایی‌های بزرگ مقیاس با استفاده از فناوری تداخل‌سنجی راداری در معادن روباز (مطالعه‌موردی: معدن گل‌گهر سیرجان). نشریه علمی ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، ۱۰(۳)، صص٤١-٥١.

۲-عابد، رحیم‌زادگان؛ فاطمه، مجید.(۱۳۹۷)، بررسی فرونشست زمین با استفاده از تصاویر ماهواره Sentinel به روش‌های جدید (PS-InSAR) نرم‌افزار (SARPIROZ)، هفتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، یزد. https:// civilica.com/doc/845741

3- Aydöner, C., Maktav, D., & Alparslana, E. (2004). Ground deformation mapping using InSAR. In Proceedings, ISPRS congress, Istanbul, Turkey.pp.161-168.

4- Bonì, R., Meisina, C., Cigna, F., Herrera, G., Notti, D., Bricker, S., ... & Ezquerro, P. (2017). Exploitation of satellite A-DInSAR time series for detection, characterization and modelling of land subsidence. Geosciences, 7(2), 25.pp.1-23.

5- Castello, L., & Macedo, M. N. (2016). Large□scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. Global change biology, 22(3), pp.990-1007.

6- Devanthéry, N., Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., & Crippa, B. (2014). An approach to persistent scatterer interferometry. Remote Sensing, 6(7), pp.6662-6679.

7- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F., (2001). Permanent scatters in SAR interferometry. -IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1), pp. 8-20.

8-Geymen, Abdurrahman. (2014). "Digital Elevation Model (DEM) Generation Using the SAR Interferometry Technique." Arabian Journal of Geosciences 7(2):pp.827–37

9- Goldstein, R. M., & Werner, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications.

Geophysical research letters, 25(21), pp4035-4038.

10- Govil, H., Chatterjee, R. S., Malik, K., Diwan, P., Tripathi, M. K., & Guha, S. (2018). IDENTIFICATION AND MEASUREMENT OF DEFORMATION USING SENTINEL DATA AND PSINSAR TECHNIQUE IN COALMINES OF KORBA. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, pp. 427-431.

11- Huang, C., Xia, H., & Hu, J. (2019). Surface deformation monitoring in coal mine area based on PSI. IEEE Access, 7, pp.29672-29678.

12- Ishwar, S. G., & Kumar, D. (2017). Application of DInSAR in mine surface subsidence monitoring and prediction. Current Science,pp. 46-51.

13- Jiang, L., Lin, H., Ma, J., Kong, B., & Wang, Y. (2011). Potential of small-baseline SAR interferometry for monitoring land subsidence related to underground coal fires: Wuda (Northern China) case study. Remote Sensing of Environment, 115(2), pp.257-268.

14- Kumar, S., Kumar, D., Chaudhary, S. K., Singh, N., & Malik, K. K. (2020). Land subsidence mapping and monitoring using modified persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar in Jharia Coalfield, India. Journal of Earth System Science, 129(1), pp.1-10.

15- Ng, A. H. M., Ge, L., Zhang, K., & Li, X. (2011). Application of persistent scatterer interferometry for land subsidence monitoring in Sydney, Australia using ENVISAT ASAR data. In 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment.pp1-4

16- Olfindo Jr, N., Manalili, M. A., Quides, R. R., Aranda, J. O., & Corpuz, G(2018).OPEN-PIT MINING MONITORING USING C-BAND INTERFEROMETRIC SAR.pp1-7

17- Paradella, W. R., Ferretti, A., Mura, J. C., Colombo, D., Gama, F. F., Tamburini, A., & Silva, A. Q. (2015). Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis. Engineering Geology, pp.193, 61-78

18- Pawluszek-Filipiak, K., & Borkowski, A. (2020). Integration of DInSAR and SBAS Techniques to determine mining-related deformations using sentinel-1 data: The case study of Rydułtowy mine in Poland. Remote Sensing, 12(2), pp.242-265

19- Prati, C. L. A. U. D. I. O., Ferretti, A., & Perissin, D. (2010). Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations. Journal of Geodynamics, 49(3-4), pp.161-170.

20- Sahu, P., Pradhan, M., Jade, R. K., & Lokhande, R. D. (2016). Study the variations of sinkhole depth with respect to working height in underground coal mines. Recent Adv. Rock Eng, 91, 547-551.

21- Strozzi, T., Wegmuller, U., Tosi, L., Bitelli, G., & Spreckels, V. (2001). Land subsidence monitoring with differential SAR interferometry. Photogrammetric engineering and remote sensing, 67(11), pp.1261-1270.

22- Tomiyasu, K. (1978). Tutorial review of synthetic-aperture radar (SAR) with applications to imaging of the ocean surface. Proceedings of the IEEE, 66(5), pp.563-583.

23- Zhang, L., Ge, D., Guo, X., Liu, B., Li, M., & Wang, Y. (2020). InSAR monitoring surface deformation induced by underground mining using Sentinel-1 images. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 382, pp.237-240.

24-Zhu, Y., Ding, X., Li, Z., & Luo, Y. (2014). Monitoring of Surface Subsidence of the Mining Area Based on SBAS. JCP, 9(5), pp.1177-1184.