



سنجش از دور

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران سال پانزدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۲
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.15, No. 3, Autumn 2023

۴۰-۲۷

مقاله پژوهشی



بررسی تغییرات توپوگرافی ناشی از معدن کاری سطحی با استفاده از تداخل سنجی راداری روش SBAS (مطالعه موردی: معدن سنگ آهن سنگان خواف)

مehوش نداف سنگانی^۱، سید رضا حسین زاده^{۲*}، خوزه فرانسیسکو مارتین داک^۳، مهناز جهادی طرفی^۴، ناصر حافظی مقدس^۵

۱. دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲. دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۳. دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه کمپلوتنسه مادرید، مادرید، اسپانیا

۴. استادیار گروه جغرافیا (گرایش ژئومورفولوژی)، دانشگاه پیام نور، تهران

۵. استاد زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۰۱

چکیده

معدن کاری سابقه‌ای طولانی دارد و در طیف گسترده‌ای از محیط‌های ژئومورفیک رخ می‌دهد. میزان تغییراتی که این فعالیت‌های معدن کاری در مورفولوژی و محیط معدنی به وجود می‌آورد گاه به اندازه‌ای است که محیط اطراف را دچار تغییرات اساسی و خسارات فراوانی می‌کند و از این رو این تغییرات نیازمند پایش دقیق است. از اوایل دهه ۱۹۹۰ تا تداخل سنجی راداری به صورت ابزاری مفید در مطالعه تمامی پدیده‌هایی که سبب تغییر سطح زمین می‌شوند، مطرح شده و به کار رفته است؛ بدین معنا که اگر سطح زمین بین دو تصویر راداری تغییر شکل بیابد، می‌توان نقشه جابه‌جایی سطحی را با وضوح و دقت میلی‌متری ایجاد کرد. این مقاله یافته‌های حاصل از اجرای روش SBAS روی سری زمانی مجموعه داده‌های سنتینل-۱ برای شناسایی تغییر شکل‌های سطحی، در معدن سنگ آهن سنگان-خواف به‌منزله یک معدن سطحی روباز را گزارش می‌دهد. معدن سنگ آهن سنگان از بزرگ‌ترین و غنی‌ترین ذخایر سنگ آهن در خاورمیانه و ایران است. این معدن، بر اثر برداشت و استخراج سنگ آهن، دچار تغییرات فراوان توپوگرافی و ژئومورفولوژی شده است که این تغییرات می‌تواند سبب تشدید فرایندها و مخاطرات ژئومورفولوژیکی شود. برای تخمین و به‌دست آوردن مقدار تغییر شکل سطح زمین، از ۴۸ تصویر SAR از معدن سنگ آهن سنگان استفاده شده است. این تصاویر با استفاده از ماهواره سنتینل-۱ از اژانس فضایی اروپا به‌دست آمد. سری زمانی (۲۰۱۴-۲۰۲۰) حاصل از تغییر شکل در محدوده معدن پلاسری تجزیه و تحلیل شد. نتایج به‌دست آمده میزان متوسط جابه‌جایی ۲۰- تا ۳۵- میلی‌متر در سال و حداکثر میزان تجمعی تغییرات ۱۲۰- میلی‌متر را نشان می‌دهد. بررسی نبرخ عرضی در نواحی ابتدایی مخروط افکنه در معدن پلاسری، طی بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۲۰، شدت تغییرات توپوگرافی را به خوبی نشان می‌دهد. برای ارزیابی قابلیت اطمینان نتایج، به دلیل نبود داده (ایستگاه GPS) در محدوده معدن پلاسری، نتایج مشتق از SBAS با مقادیر اندازه‌گیری شده از طریق توتال استیشن مربوط به واحد ژئومورفولوژی کوهستان منطقه معدنی در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۴ به کار رفته است. نتایج نشان داد که میزان تغییرات حاصل از داده‌های راداری با استفاده از روش SBAS، در مقایسه با داده‌های نقشه برداری زمینی، الگوی تقریباً مشابهی را طی کرده است اما تفاوت‌هایی نیز دارد که ممکن است ناشی از ماهیت متفاوت برداشت (در نقشه برداری زمینی، تغییرات ارتفاعی برای یک نقطه اندازه‌گیری می‌شود اما، در تداخل سنجی، مقدار میانگین از نقاط مجاور یکدیگر به‌دست می‌آید) و از همه مهم‌تر، وجود داشتن داده‌های متوالی ترازایی در سطح پلاسری‌ها به منظور ارزیابی دقیق تر نتایج است.

کلید واژه‌ها: سنگ آهن سنگان، خواف، تداخل سنجی راداری، SBAS، سنتینل-۱.

* نویسنده مکاتبه کننده: دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، گروه آموزشی جغرافیا.

Email: rshosseinzadeh@um.ac.ir
https://orcid.org/0000-0002-8653-5473
https://dx.doi.org/10.48308/gisj.2023.102345



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

۱- مقدمه

زیست‌محیطی می‌است. باطله‌ها شامل مواد و سنگ‌هایی است که پس از جداکردن کانی‌ها و مواد ارزشمند از سنگ‌معدن، باقی می‌ماند. طی سال‌های بهره‌برداری از معدن، میزان تولید مواد باطله افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، با استفاده از روش‌های میدانی مانند سیستم‌های موقعیت‌یابی جهانی (GPS) و توتال استیشن (TS)، می‌توان تغییرشکل‌های سطح زمین را نقشه‌برداری کرد (Ge et al., 2007) اما این روش‌ها محدودیت‌های زیادی دارند و با افزایش وسعت مناطق اندازه‌گیری، ممکن است وقت‌گیر باشند. علاوه بر این، این شیوه‌ها اندازه‌گیری را به‌صورت نقطه‌ای و محدود انجام می‌دهند؛ به این معنی که دستیابی به میزان تغییرشکل سطح قابل تفسیر منطقی، در منطقه‌ای وسیع، کاری بسیار دشوار است (Zhang et al., 2011). در حال حاضر روش‌های مورد استفاده برای تغییرات سطحی زمین، در معادن روباز، روش‌های سنجش از دور با وضوح بالا است و تداخل‌سنجی راداری (InSAR)^۱، به‌منزله‌رویکردی جدید، می‌تواند با پوشش مکانی گسترده و تصویر دارای وضوح بالا، تغییرات سطح زمین را بررسی کند. تکنیک‌های تداخل‌سنجی با استفاده از داده‌های مایکروویو SAR^۲ قابلیت تشخیص تغییرشکل دقیقه با دقت میلی‌متری روی زمین را دارند. در این فناوری، با تلفیق داده‌های حاصل از سیستم‌های تصویربرداری رادار که روی سکوه‌های ماهواره‌ای یا هواپیمایی نصب شده است، حرکت، ارتفاع و تغییرات سطح زمین نقشه‌برداری می‌شود. طی دو دهه گذشته، تداخل‌سنجی تفاضلی راداری^۳ به‌دلیل پوشش مکانی و دقت بالا، اثبات کرده که راهی مؤثر و بسیار موفقیت‌آمیز برای نظارت بر تغییرات گوناگون سطح زمین است (Hu et al., 2012). رویکرد جدید نظارت مکمل مهمی برای روش‌های قدیمی و رایج نقشه‌برداری ژئودتیکی به‌شمار می‌رود (Li et al., 2014)

در سال‌های گذشته، میزان اختلال و تغییرات ایجادشده از طریق معدن‌کاری، در پاسخ به تقاضاهای روزافزون اقتصادی و ظرفیت‌های در حال پیشرفت فناوری، بیشتر و مهم‌تر شده است. استخراج منابع طبیعی برای تولید کالا باعث افزایش فشار بر زمین و محیط زیست می‌شود. فعالیت‌های انسانی، با تغییر مورفولوژی، اثر شایان توجهی در زمین برجای می‌گذارد (Ellis, 2011; Brown et al., 2013; Tarolli, 2014;) (Foley et al., 2005). فعالیت‌های انسانی، با ایجاد اختلال در تعادل سطح، تغییرشکل مداوم را افزایش می‌دهد. تغییرشکل سطح زمین موضوع بسیار مهمی در زمینه صنعت معدن روباز شمرده می‌شود. استخراج معدن روباز فعالیت‌های انسانی با هدف برش سطح زمین است. این فعالیت ممکن است تغییرات ژئومورفیکی چشمگیر در معدن ایجاد کند و در تکامل سطح زمین تأثیر بگذارد (Tarolli & Sofia, 2016). در طول فرایند استخراج، سطح زمین به‌مدت طولانی در وضعیتی ناپایدار قرار می‌گیرد که این وضعیت سبب آسیب رسیدن به محیط طبیعی و در نتیجه، تشکیل محیطی با عمق منفی و شیب‌های تند در مقیاس بزرگ، ایجاد مجموعه‌ای از خطرهای ژئومورفولوژیکی، فرسایش خاک و دیگر موارد می‌شود. همچنین ممکن است برنامه‌ریزی معدن را مختل کند و هزینه تولید معدن را افزایش دهد. پیش‌بینی و مدیریت مؤثر تغییرشکل‌های ناشی از استخراج معدن در سطح زمین باید به‌دغدغه‌ای اساسی برای صنعت معدن تبدیل شود. حفاری‌های سطحی از مهم‌ترین فعالیت‌های معدنی است و میزان تغییراتی که این عملیات در ژئومورفولوژی محیط ایجاد می‌کند گاه به‌قدری است که محیط اطراف به‌طور کلی دچار تغییرات اساسی و مخاطرات فراوان می‌شود. بررسی این تغییرات و پیشنهاد راه‌حل مناسب چه‌بسا راهگشای بسیاری از مشکلات باشد. توسعه صنایع و در نتیجه، رشد اقتصادی به تولید میزان معتدله مواد باطله منجر می‌شود که متأسفانه منشأ پدید آمدن تغییرات ژئومورفولوژیکی و

1. Interferometric Synthetic Aperture Radar
2. Synthetic Aperture Radar
3. Differential InSAR

تغییرات ناشی از فرونشست را با دو روش PS و SBAS بررسی کردند. مطابق با جابه‌جایی فرونشست چندین سایت نماینده در منطقه معدن، مشخص شد نتیجه PSI مقدار جابه‌جایی نشست بالاتری را در مقایسه با نتیجه SBAS دربردارد و فعالیت‌های معدنی با فرونشست زمین در منطقه معدن همراه بود. پدیده فرونشست زمین با افزایش مقدار معدن کاری تشدید می‌شود. یوان^۸ و همکاران (۲۰۲۱) الگوی فرونشست در مناطق معدن کوهستانی ژانجیامائو^۹ را در شمال استان شانکسی^{۱۰}، شمال غرب چین، با استفاده از SBAS بررسی کردند. نتایج تحلیل نشان داد که معدن کاری، در دو وجه معدنی ۱۵۲۰۹ و ۱۵۲۱۰، باعث نشست آشکار کیفی شکل شده است. علاوه‌براین، محدوده واقعی فرونشست منطقه معدن با استفاده از فناوری SBAS-InSAR به‌دست می‌آید. یائو^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۱) در منطقه معدن زغال‌سنگ شرق اوردوس، مغولستان داخلی، چین، روشی را پیشنهاد کردند که هر دو D-InSAR متوالی چندزمانی و فناوری ردیابی را برای ایجاد یک میدان تغییرشکل کامل، ترکیب می‌کند. دو^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۱) از روش SBAS-InSAR برای به‌دست آوردن اطلاعات فرونشست سطحی سه‌ساله در منطقه‌ای معدنی (باطله و مناطق فعال) در کوه‌های تیانشان و اطراف آن (چین) استفاده کردند. طبق نتایج این پژوهش، منطقه مورد مطالعه فرونشست چشمگیری، با حداکثر میزان ۴۴/۸۰- میلی‌متر، داشته است.

اما، به‌علت وجود محدودیت‌هایی، عملکرد آن نیز تا حدود زیادی محدود می‌شود (Ferreti et al., 2001). مسائل ناشی از فقدان همبستگی زمانی و مکانی اغلب کیفیت تداخل سنجی را کاهش می‌دهد (Zebker & Villasenor, 1992). برای غلبه بر این مشکلات، سری زمانی (TS-InSAR)^۱ در اواخر دهه ۱۹۹۰ توسعه یافت؛ در این شیوه، تصاویر چند SAR به‌دست آمده در تاریخ‌های متفاوت مشترکاً تجزیه و تحلیل می‌شود. اساس کار، در اندازه‌گیری حرکات سطح زمین، استفاده از تصاویر تکراری رادار است. تصویری که از یک منطقه در زمانی مشخص برداشت می‌شود (زمان مرجع) با تصویر برداشت شده در زمان دیگر، از طریق همان سنجنده رادار، تلفیق می‌شود. نخستین تداخل‌سنجی راداری برای مطالعه حرکات سطح زمین را گابریل^۲ و همکاران (۱۹۸۹) انجام دادند. طی پانزده سال گذشته، بسیاری از روش‌های TS-InSAR برای به‌حداقل رساندن منابع خطای روش رایج DInSAR توسعه داده شده است. به‌طور کلی، می‌توان این شیوه‌ها را در دو دسته قرار داد:

۱) تکنیک‌هایی که فقط از یک تصویر اصلی برای تولید مجموع تداخل نما استفاده می‌کنند. این رویکرد تغییرشکل زمین را در پیکسل‌های پراکنش‌کننده پایدار (PS)^۳ تخمین می‌زند. این روش‌ها، به‌جای داشتن سلولی با وضوح چندمنظوره، این مزیت را دارند که تغییرشکل را با پراکنندگی خاصی مرتبط کنند؛

۲) استفاده از تداخل نماهای چندپایه^۴ که فقط پیکسل‌های به‌اصطلاح، پراکنش‌کننده‌های توزیع شده (DS)^۵ برای تجزیه و تحلیل بیشتر انتخاب می‌شوند. برخلاف پیکسل‌های PS که ویژگی‌های پراکنش آنها به خط مبنای مکانی و زمانی حساس نیست، پیکسل‌های DS فقط با خط مبنای محدود مکانی و زمانی می‌توانند ویژگی‌های پراکنش خود را حفظ کنند؛ مثلاً روش SBA^۶ (Berardino et al., 2002). لیو^۷ و همکاران (۲۰۲۲)، در معدن طلا در چین،

1. Time Series
2. Gabriel
3. Persistent Scatterer
4. Master
5. Distributed Scatterer
6. Small Baseline Subset
7. Liu
8. Yuan
9. Zhangjiamao
10. Shaanxi
11. Yao
12. Du

محدوده معدن نانهو در تانگشان^{۱۳}، برای نمونه، نتایج مداوم فرونشست زمین در این منطقه معدنی را حداکثر ۷۰ سانتی متر در سال محاسبه کردند که تغییر شکل زمین و روند آن را به وضوح مشخص می کند. براساس نتایج، InSAR شیوه ای مفید برای نظارت بر فرونشست زمین در مناطق معدنی است و داده های بیشتری را برای بازسازی محیط معدن فراهم می کند.

لیو و همکاران (۲۰۱۹) سری های زمانی تغییر شکل ناشی از معدن کاری براساس روش SBAS در معدن نمک چانگده^{۱۴} چین را تحلیل کردند. طبق نتایج، حداکثر فرونشست تجمعی تا ۱۹۹ میلی متر تشخیص داده شد. شامی^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۸) در معدن گل گهر سیرجان، با استفاده از تصاویر راداری ماهواره انویست^{۱۶}، مطالعه ای انجام دادند و برای پردازش تصاویر راداری، از نرم افزار StaMPS استفاده کردند. در این پژوهش مشخص شد، با تغییر مقدار چندمنظرسازی^{۱۷} تصاویر از مقدار ۲۲ به ۵ برای آزیموت^{۱۸} و ۴ به ۸ برای رنج^{۱۹} (کوچک کردن ابعاد پیکسل های تصویر)، تشخیص میزان جابه جایی افزایش می یابد. بیشترین فرونشست به دست آمده برای یک نقطه در این معدن، پس از تغییر چندمنظرسازی، از ۵۸- میلی متر به ۱۵- میلی متر و حجم محاسبه شده از هجده هزار مترمکعب به یازده هزار

آنها به این نتیجه رسیدند که اندازه گیری های SBAS-InSAR می توانند، در قیاس با روش اندازه گیری سیستم ماهواره ای ناپوری جهانی^۱، تغییر شکل هایی با دقت بالا در منطقه ای وسیع و هزینه و منابع انسانی و مالی کمتری در بر داشته باشند.

پاولوزک-فیلیپیاک و بورکووسکی^۲ (۲۰۲۰)، با تلفیق روش های DInSAR و SBAS، تغییر شکل زمین را در معدن ریدوتووی^۳ لهستان مطالعه کردند. نتایج مطالعه در این مناطق، بین SBAS و DInSAR، نشان می دهد که روش SBAS شیوه ای مطمئن برای نظارت بر فرونشست است. ژو^۴ و همکاران (۲۰۱۸) فرونشست سطحی را در معدنی در شهر فنگ چن، استان جیانگسوی چین، با استفاده از روش SBAS بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان داد این روش بر مشکل کوهرنسی^۵ شیوه رایج D-InSAR غلبه می یابد؛ همچنین تغییر شکل پیوسته زمین، ناشی از معدن کاری سطحی را می توان طی زمان به دست آورد و ویژگی های نشست سطح زمین ناشی از فرونشست معدن در دوره های گوناگون را نمایش داد. بنابراین دقت و قابلیت اطمینان نتایج پایش پیشرفت کرده است. تانگ^۶ و همکاران (۲۰۲۰) نقشه برداری از جابه جایی زمین و بی ثباتی شیب بیش از سه معدن روباز (هامباخ^۷، گارتسوایلر^۸ و ایندن^۹) را در معادن زغال سنگ رنیش^{۱۰} آلمان، با استفاده از الگوریتم SBAS مطالعه کردند. هدف آنها، از این پژوهش، طرح راه حل های نظارت طولانی مدت برای عملیات معدن کاری روباز و اطراف این مناطق بود. در مناطق احیاء شده، فرونشست زمین مشاهده شد که به ترتیب برای معادن هامباخ، گارتسوایلر و ایندن سالانه بیش از ۵۰۰ میلی متر، ۳۸۰ میلی متر و ۳۱۰ میلی متر بود. تانگ و همکاران متوجه شدند روند تراکم مواد زائد عامل اصلی فرونشست زمین است. در مناطق نزدیک به بخش های فعال معادن، بالا آمدگی زمین دیده شد که احتمالاً به دلیل فعالیت های حفاری بوده است. ژانگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۰) با ترکیب روش های SBAS و IPTA^{۱۲} در

1. Global Navigation Satellite System
2. Pawluszek-Filipiak & Borkowski
3. Rydułtowy
4. Zhu
5. Coherent
6. Tang
7. Hambach
8. Garzweiler
9. Inden
10. Rhenish
11. Zhang
12. Interferometric Point Target Analysis
13. Nanhu, Tangshan
14. Changde
15. Shami
16. Envisat
17. Multi-looking
18. Azimuth
19. Range

سیمد کیلومتری جنوب شرق مشهد و هجده کیلومتری شمال شرق شهر سنگان، با عرض جغرافیایی $34^{\circ} 24'$ تا $55^{\circ} 34'$ شمالی، طول جغرافیایی $60^{\circ} 16'$ تا $60^{\circ} 50'$ شرقی، در خراسان رضوی و سی کیلومتری غرب مرز افغانستان، شمال شرق ایران، قرار دارد (شکل ۱).

۲-۲- داده‌های پژوهش

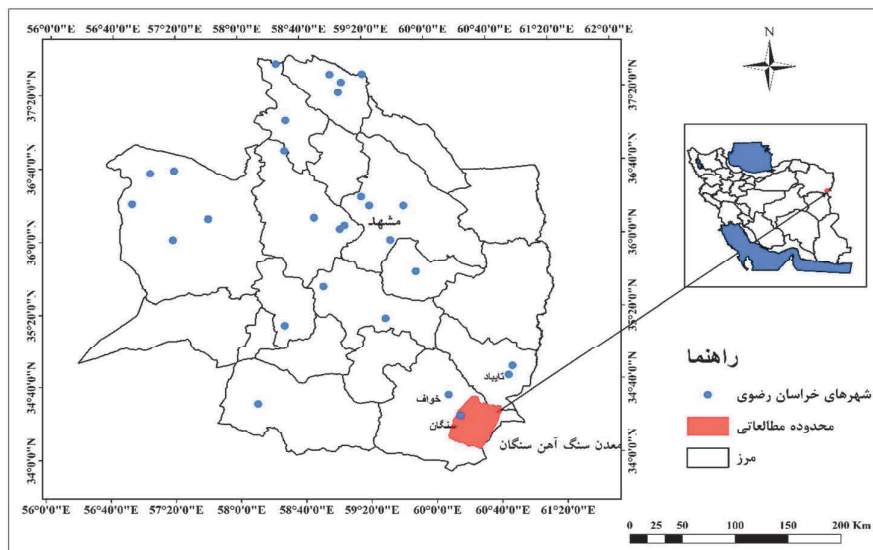
در این مطالعه، مجموعه‌ای از ۴۸ تصویر سنتینل-۱ A-۱ باند C در بازه زمانی اکتبر ۲۰۱۴ تا جولای ۲۰۲۰ استفاده شده است. این داده‌ها به‌طور رایگان از سایت آژانس فضایی اروپا (ESA) تهیه شد. سنتینل-۱ را ESA در چهارم آوریل ۲۰۱۴ راه اندازی کرد. تصاویر با پهنای ۲۵۰ کیلومتر، با زمان بازگشت دوازده روزه، با مدل IW^۲ تهیه می‌شود. اگر تصاویر به‌دست‌آمده از ماهواره سنتینل-۱ B-۱ در دسترس باشد، مدت این بازگشت به شش روز کاهش می‌یابد. تمامی تصاویر سنتینل-۱ A-۱ به کاررفته در این مطالعه پولاتیزاسیون VV با زاویه فرود^۳ تقریباً ۴۳ درجه دارد.

مترمکعب تغییر یافت. به‌طور کلی، در تحقیقات انجام‌شده، اغلب فرونشست در معادن زیرزمینی مطالعه شده و نتایج مطلوبی به‌دست آمده است. معدن سنگان یک معدن سطحی روباز است و فعالیت‌های معدن کاری شدید در معدن سنگ آهن آن تأثیر ژئومورفولوژی عمیقی در منطقه و محیط زیست آن می‌گذارد؛ بنابراین پایش تغییرات ناشی از معدن کاری و درک آن در محیط، با شدت زیاد، برای اصلاح و بازسازی ژئومورفولوژیکی منطقه مهم است. در این تحقیق، تغییرات سطحی و توپوگرافی ناشی از معدن کاری، در معدن سنگ آهن سنگان خواف، بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

معدن سنگ آهن سنگان^۱ از بزرگ‌ترین و غنی‌ترین معدن‌ها در ایران و خاورمیانه است که در ناحیه‌ای با وسعت ۲۲۰ کیلومترمربع قرار دارد. ذخایر سنگ آهن، حاوی کل منبع زمین‌شناسی ۱/۲ میلیارد تن، اغلب مگنتیت با درجه آهن از ۲۷ تا ۶۱٪ است. این معدن در



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

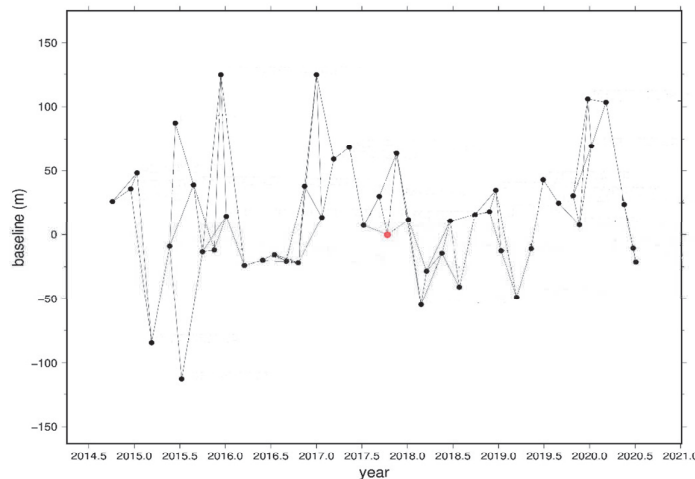
1. Sangan Iron Ore Mines
2. Interferometric Wide Swath
3. Incidence Angle

۲-۳- روش پژوهش

در این مقاله، از روش SBAS برای بررسی تغییر شکل زمین، ناشی از فعالیت‌های معدن‌کاری، استفاده شده است. الگوریتم SBAS شبکه‌ی اینترفروگرام مکانی-زمانی را نشان می‌دهد که در آن یک محور بیانگر مبنای مکانی (متر) و محور دیگر نشان‌دهنده‌ی زمان (روز) تصویر است. هر نقطه یک تصویر سنتینل-۱ را نشان می‌دهد. هندسه‌ی دریافت تصاویر در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل، محور افقی زمان به‌روز شده است؛ اولین تاریخ تصاویر صفر در نظر گرفته شده و بقیه‌ی تصاویر نسبت به آن محاسبه می‌شود و هر خط نشان‌دهنده‌ی یک اینترفروگرام نمودار بین یک جفت تصویر است. برای تشکیل هر اینترفروگرام، از جفت تصویری استفاده می‌شود که کمترین طول خط مبنای آن از نظر زمانی و مکانی دارند. در این روش، اینترفروگرام‌ها به‌جای آنکه فقط نسبت به یک مرجع تشکیل شوند، در میان آن دسته از تصاویری تشکیل می‌شوند که خط مبنای زمانی و مکانی کوتاه‌تری دارند. این کار برای جلوگیری از ایجاد خط مبنای مکانی بلند، که مسبب

بروز خطای توپوگرافی بیشتر در فازهاست، انجام می‌شود.

پس از ثبت تصاویر SAR با خط مبنای مکانی کمتر از ۱۵۰ متر و خط زمانی کمتر از یکصد روز و نیز بررسی و انتخاب کوهرنسی مناسب، در مجموع، ۸۱ جفت تداخل‌سنج برای تولید تداخل نما استفاده شد. با استفاده از سیستم پردازش InSAR براساس نرم‌افزار GMTSAR و آستانه‌ی ۰/۰۵ و طول موج فیلتر ۱۰۰، اینترفروگرام‌های آن‌رپ شده برای جفت‌های تصویر انتخابی، ایجاد شد. برای حذف اثر توپوگرافی، از مدل رقومی ارتفاعی ماهواره‌ی SRTM^۲ با قدرت تفکیک مکانی سی متر استفاده شد. فاز نویز با استفاده از فیلتر تطبیقی حذف شد. مرحله‌ی بعد ایجاد سری زمانی جابه‌جایی با استفاده از تداخل نماهاست. هدف اصلی وارونه‌کردن تداخل نماها، برای دستیابی به میزان جابه‌جایی در زمان‌های دریافت تصاویر، با روش کمترین مربعات است که در نرم‌افزار GMTSAR انجام شد. سرانجام سری زمانی SBAS تغییرات جابه‌جایی، براساس مرحله‌ی فاز آن‌رپ و همبستگی، انجام شد.



شکل ۲. شبکه‌ی مکانی-زمانی تداخل نماهای الگوریتم SBAS

1. Filter Wave Length
2. Shuttle Radar Topography Mission

۳- نتایج

وضعیت معدن سنگ آهن سنگان بیان می‌کند فعالیت‌های انسانی مؤثرترین علل تغییرات ژئومورفولوژیکی و زیست‌محیطی است که موجب تخریب می‌شود. از جمله این فعالیت‌ها می‌توان به استخراج مواد معدنی اشاره کرد که نقشی مهم در ایجاد مشکلات زیست‌محیطی، همچون آلودگی شدید جوی و فرسایش خاک، دارد. در میان مواد معدنی، سنگ آهن یکی از فراوان‌ترین عناصر فلزی در زمین است. از جمله مشکلات زیست‌محیطی می‌توان به تغییرات در محیط به علت وسعت عملیات معدن کاری، حجم زیاد باطله‌های معدنی و دپوی آنها، و گردوغبار ناشی از معدنکار (شکل ۳) اشاره کرد.

نتایج به دست آمده از پردازش تصاویر راداری سنتینل بدین شرح است: نتایج پایش تغییر شکل زمین اغلب در

امتداد خط دید (LOS)^۱ ماهواره رادار اعمال می‌شود زیرا حساسیت رادار بیشتر به جابه جایی‌های عمودی است. نتایج به دست آمده در این مقاله نشان داد مقدار متوسط تغییرات ارتفاعی زمین ۲۰- تا ۳۰- میلی‌متر در سال است. طبق بررسی‌ها، بیشترین تغییرات و جابه جایی در سطح مخروط افکنه‌ها (دایره قرمز) و بیشترین میزان جابه جایی ۳۰- تا ۱۲۰- میلی‌متر است (شکل ۵). منطقه دارای آب و هوای خشک، با حداکثر دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد در جولای/ اوت و حداقل دما، از ۵- تا ۱۱- درجه سانتی‌گراد در ژانویه/ فوریه است. بارندگی اغلب به صورت رگبار باران در آوریل و مه و با میانگین سالیانه ۱۵۰ میلی‌متر رخ می‌دهد. تبخیر، در طول سال، بیش از میزان بارندگی است و طی تابستان، وزش باد مداوم هرات از ۳۰ تا ۱۲۰ کیلومتر در ساعت رخ می‌دهد. جدول ۱ شامل خلاصه داده‌های اقلیم‌شناسی معدن سنگان است.



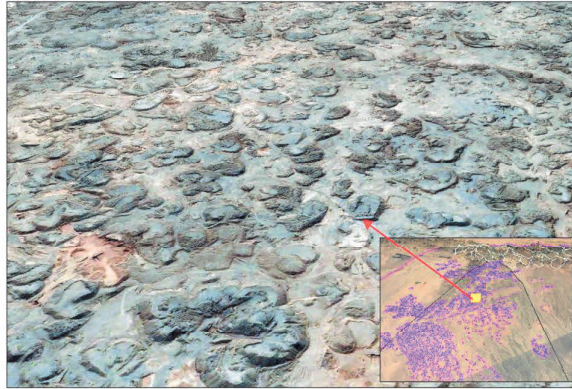
شکل ۳. تصویری از گردوغبار ایجاد شده ناشی از فعالیت‌های معدنی

جدول ۱. داده‌های اقلیم

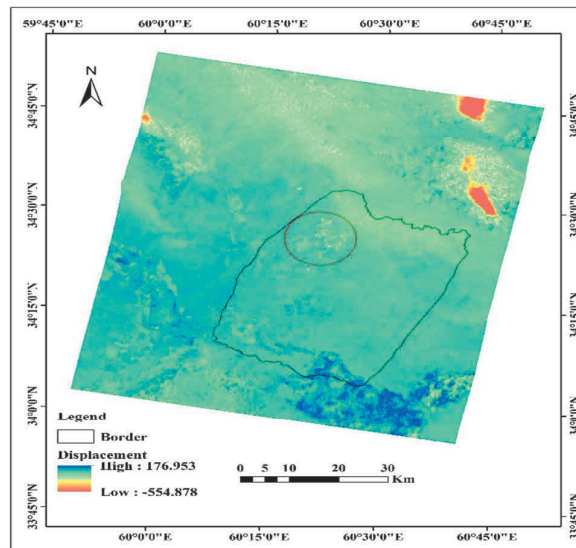
واحد	مقدار	پارامتر
متر	۱۲۴۰	ارتفاع متوسط
میلی‌متر	۱۵۰	متوسط بارندگی
میلی‌متر	۲۰	حداکثر بارش روزانه
روز	۷	میانگین روزهای یخبندان
میلی‌متر	۱۵	حداکثر برف روزانه ثبت شده
درجه سانتی‌گراد	۳۲	حداکثر دما در سایت معدن
درجه سانتی‌گراد	-۱۵	حداقل دما در سایت معدن
میلی‌متر	۳۹۰۰	حداکثر تبخیر سالیانه

1. Line of Sight

مهوش نداف سنگانی و همکاران



شکل ۴. نمایی از وضعیت باطله‌های انباشته‌شده در سطح پلاسری ها

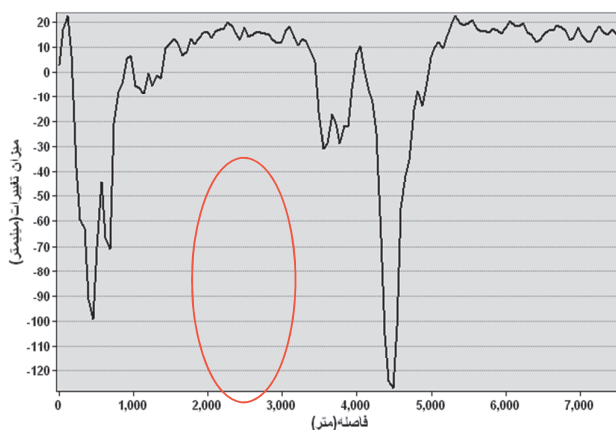


شکل ۵. میانگین میزان جابه‌جایی در راستای دید ماهواره (LOS)

در مترمکعب)، فقط در ایستگاه اداری و نگهداری و نگهبانی مقدار گردوغبار کل کمتر از حد استاندارد ایران است و در بقیه ایستگاه‌های نمونه‌گیری، به‌ویژه ایستگاه سنگ‌شکن، گردوغبار کل هشتاد برابر استاندارد ایران است.

به‌منظور نمایش بهتر تغییرات سطحی نیم‌رخ عرضی از جابه‌جایی تجمعی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰، در ابتدا مخروط‌افکنه اصلی ترسیم شد (شکل‌های ۶ و ۷). این نیم‌رخ تغییرات متناوب را که به‌صورت برآمدگی و فرورفتگی (برداشت ماده معدنی و انباشت مواد باطله) اتفاق افتاده است، به‌خوبی نشان می‌دهد. در شکل ۷، نمایی از این تغییرات معدن کاری بر سطح مخروط‌افکنه نشان داده شده است.

با توجه به ویژگی‌ها و شرایط مورد اشاره، فعالیت‌های معدن کاری سبب تغییرات ژئومورفولوژیکی و به‌تبع آن، تشدید مشکلات زیست‌محیطی، همچون پدیده گردوغبار و پیامدهای آن، مانند بیماری‌های تنفسی شده است. درباره پدیده گردوغبار، نتایج آزمایش‌های پیشین (Naghizadeh et al., 2007) نشان می‌دهد با تغییرات سطح زمین و به‌دنبال آن تسریع فرایندهایی ژئومورفیکی مانند فرسایش بادی، فرایندهای دامنه‌ای، افزایش بار بستر آبراهه‌ها، پدیده گردوغبار نیز در منطقه سرعت بیشتری یافته است. نقی‌زاده^۱ و همکاران (۲۰۰۷) با بررسی میزان گردوغبار معدن سنگ‌آهن سنگان به این نتیجه رسیدند که با توجه به استاندارد کل گردوغبار ایران (۱۰ میلی‌گرم



شکل ۶. نیم‌رخ ترسیم‌شده از میزان جابه‌جایی تجمعی طی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰

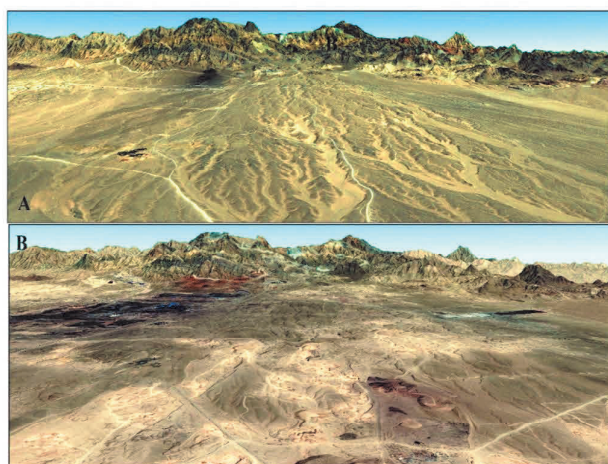


شکل ۷. نمایی از محل دایره قرمز ترسیم‌شده در نیم‌رخ

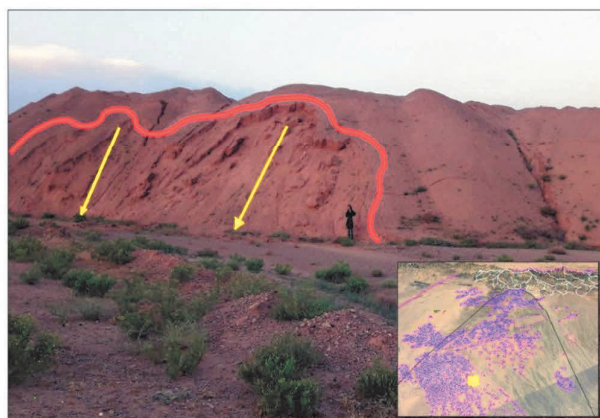
1. Naghizadeh

سیلاب های منطقه و به دنبال آن خطرات و عدم ذخیره آب ناشی از سیلاب در مناطق پایین دست می باشد که قبلا برای آبیاری مزارع مورد استفاده قرار می گرفت. از طرفی دیگر انباشت باطله ها، فرایندهای دامنه ای نظیر پدیده های لغزش بر روی آنها، تغییر مسیر آبراهه ها و همچنین افزایش و تغییر بار رسوبی آبراهه ها، تغییر در نیمرخ و مورفولوژی سطح زمین گردیده است (شکل ۹). در تصاویر مورد اشاره، وضعیت منطقه قبل و بعد از تغییرات نشان داده شده است که تا حدود زیادی می تواند گویای مسائل بیان شده باشد. در معدن سنگان، ریزش های ناشی از فعالیت های انسان زیاد رخ داده است.

تغییر ژئومورفولوژی مهم منطقه به هم ریختن الگوی شبکه زهکشی است. شکل ۸ وضعیت شبکه آبراهه ها و حوضه آبریز را قبل و بعد از معدن کاری، نمایش می دهد. در شکل ۸، وضعیت شبکه های آبراهه ها را قبل از معدن کاری و در سال ۲۰۱۱ (A) و بعد از استخراج و معدن کاری و انباشت باطله ها در سال ۲۰۲۲ (B) را نشان می دهد. به هم ریختن الگوی شبکه زهکشی موجب تغییر مسیر سیلاب های منطقه می شود و به دنبال آن، برخی خطر ها و ذخیره نشدن آب ناشی از سیلاب در مناطق پایین دست که پیش تر برای آبیاری مزارع به کار می رفت، رخ می دهد. از سوی دیگر انباشت باطله ها، بهم ریختن الگوی شبکه زهکشی موجب تغییر مسیر



شکل ۸. وضعیت شبکه زهکشی سطح پلاسری قبل از برداشت (A) سال ۲۰۱۱ و وضعیت شبکه زهکشی بعد برداشت (B) سال ۲۰۲۲



شکل ۹. فعالیت های معدن کاری و انباشت باطله ها با فعال شدن فرایندهای ژئومورفیک دامنه ای نظیر لغزش

تخریب ناشی از سیلاب‌های بزرگ (شکل ۱۰) در منطقه، فرسایش شیاری و ترک‌های کششی که در سطح باطله‌ها اتفاق می‌افتد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲) می‌تواند یکی پیامدهای ناشی از تغییرات ژئومورفولوژیکی، به‌ویژه شبکه آبراهه‌ها باشد.



شکل ۱۰. تخریب ناشی از سیلاب‌های بزرگ



شکل ۱۱. فرسایش شیاری سطح باطله‌ها



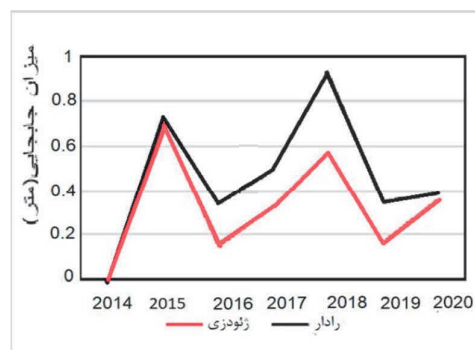
شکل ۱۲. ترک‌های کششی سطح باطله‌ها

استفاده از این شیوه باعث کاهش هزینه‌ها خواهد شد. نتایج این مقاله نشان می‌دهد، در مناطقی که موقعیت مناسبی برای معدن کاری دارند، تخریب بیشتری نیز اتفاق می‌افتد. به‌دیگرسخن، در جایی که معدن کاری انجام می‌شود باید انتظار تخریب چشم‌اندازهای طبیعی و ژئومورفولوژی را داشت. همان‌گونه که یافته‌های این مقاله نشان می‌دهد، میزان تغییرات ناشی از فعالیت‌های معدنی در مورفولوژی منطقه به‌قدری است که منطقه به‌طور کلی دست‌خوش تغییرات و مخاطرات فراوان شده است. مقاله حاضر مؤید آن است که وقتی در معادن پلاستی برداشت انجام می‌شود، الگوهای ژئومورفولوژی پیرامون دشت تغییر می‌کند؛ به‌طوری که طبق نتایج آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری با استفاده از الگوریتم SBAS، بیشترین میزان تغییرات تجمعی در معادن پلاستی، طی بازه مورد بررسی، ۱۲۰- میلی‌متر است و در مقایسه با داده‌های حاصل از توتال استیشن به‌طور خیلی تقریبی، الگوی مشابهی را طی می‌کند. الگوریتم SBAS با داده‌های سنتینل-۱، تاحدودی و به‌شرط در دسترس بودن داده‌های ترازیبی به‌منظور مقایسه نتایج، می‌تواند ابزاری برای نظارت بر تغییرشکل در معادن سنگ آهن سنگان خواف فراهم کند. نتیجه آن که با توجه به افزایش تصاعدی روند برداشت در منطقه مورد مطالعه، تغییر الگوهای زهکشی و فرایندهای ژئومورفولوژیکی مهم‌ترین خطر برای محیط‌زیست و زیرساخت‌های انسانی خواهد بود و پیشنهاد می‌شود طی مطالعات آینده، در صورت سیستم پردازش سنگین، پایش با تصاویر بیشتری انجام شود.

۵- تشکر و قدردانی

از همکاری آژانس فضایی اروپا (ESA)، به‌دلیل دریافت تصاویر راداری، سپاسگزاریم و از مجتمع معدن سنگ آهن سنگان نیز، بابت ارائه داده، قدردانی می‌کنیم.

برای مقایسه و ارزیابی نتایج تغییرات سطحی با استفاده از رادار، داده‌های ترازیبی حاصل از نقشه‌برداری با توتال استیشن (دو بار در هر سال)، مربوط به واحد ژئومورفولوژی کوهستان در سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۲۰ استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود، میزان تغییرات حاصل از داده‌های راداری با استفاده از الگوریتم SBAS، در مقایسه با داده‌های نقشه‌برداری زمینی، به‌طور کلی و تقریبی الگوی مشابهی را طی کرده است. باین‌حال، به‌دلیل فقدان داده‌های متوالی و کافی نقشه‌برداری زمینی از سطح پلاستی‌ها خطاهایی وجود دارد و افزون‌براین، در نقشه‌برداری زمینی، تغییرات ارتفاعی برای یک نقطه اندازه‌گیری می‌شود اما در تداخل‌سنجی، مقدار میانگین از نقاط مجاور یکدیگر به‌دست می‌آید.



شکل ۱۳. مقایسه داده‌های راداری و توتال استیشن سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۲۰

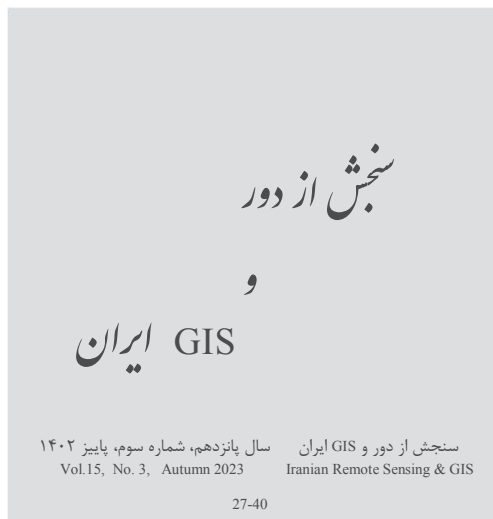
۴- بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ابتدا با مطالعات میدانی و بازدیدهای محلی، تغییرات روی زمین ملاحظه شد. برای اندازه‌گیری میزان این تغییرات، از روش آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری تحت الگوریتم SBAS استفاده شد. در مطالعه معادن روباز وسعت منطقه‌ای که تصاویر SAR پوشش می‌دهند به‌مراتب بیشتر است و

۶- منابع

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. & Sansosti, E., 2002, **A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11), PP. 2375-2383.
- Brown, A.G., Tooth, S., Chiverrell, R.C., Rose, J., Thomas, D.S., Wainwright, J., ... & Downs, P., 2013, **The Anthropocene: Is There A Geomorphological Case?**, Earth Surface Processes and Landforms, 38(4), PP. 431-434.
- Du, Q., Li, G., Zhou, Y., Chai, M., Chen, D., Qi, S. & Wu, G., 2021, **Deformation Monitoring in an Alpine Mining Area in the Tianshan Mountains Based on SBAS-InSAR Technology**, Advances in Materials Science and Engineering.
- Ellis, E.C., 2011, **Anthropogenic Transformation of the Terrestrial Biosphere**, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 369(1938), PP. 1010-1035.
- Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., ... & Snyder, P.K., 2005, **Global Consequences of Land Use**, Science, 309(5734), PP. 570-574.
- Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F., 2001, **Permanent Scatterers in SAR Interferometry**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1), PP. 8-20.
- Gabriel, A.K., Goldstein, R.M. & Zebker, H.A., 1989, **Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry**, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B7), PP. 9183-9191.
- Ge, L., Chang, H.C. & Rizos, C., 2007, **Mine Subsidence Monitoring Using Multi-Source Satellite SAR Images**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 73(3), PP. 259-266.
- Hu, Z., Ge, L., Li, X., Zhang, K. & Zhang, L., 2012, **An Underground-Mining Detection System Based on DInSAR**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 51(1), PP. 615-625.
- Naghizadeh, A., Mahvi, A.H., Alidadi, H. & Dadpour, A.R., 2007, **Investigating the Level of Dust and Free Silica Present in the Air of Khavaf Iron Ore Mines and Providing Solutions to Reduce Silicosis**, The 11th National Conference on Environmental Health of Iran, Zahedan.
- Li, Z.W., Yang, Z.F., Zhu, J.J., Hu, J., Wang, Y.J., Li, P.X. & Chen, G.L., 2014, **Retrieving Three-Dimensional Displacement Fields of Mining Areas from a Single InSAR Pair**, J. Geod., 89, PP. 17-32.
- Liu, X., Xing, X., Wen, D., Chen, L., Yuan, Z., Liu, B. & Tan, J., 2019, **Mining-Induced Time-Series Deformation Investigation Based on SBAS-InSAR Technique: A Case Study of Drilling Water Solution Rock Salt Mine**, Sensors, 19(24), P. 5511.
- Liu, J., Ma, F., Li, G., Guo, J., Wan, Y. & Song, Y., 2022, **Evolution Assessment of Mining Subsidence Characteristics Using SBAS and PS Interferometry in Sanshandao Gold Mine, China**, Remote Sensing, 14(2), P. 290.
- 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), P. 242.
- Shami, S., Mashhadhi, H.A. & Babaei, S., 2018, **Analysis of Large-Scale Displacements Using Radar Interferometry Technology in Open Pit Mines (Case Study: Sirjan Golgohar Mine)**, Scientific Journal of Mapping and Spatial Information Engineering, 10(3), PP. 41-51.
- Tang, W., Motagh, M. & Zhan, W., 2020, **Monitoring Active Open-Pit Mine Stability in the Rhenish Coalfields of Germany Using a Coherence-Based SBAS Method**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 93, P. 102217.
- Tarolli, P., 2014, **High-Resolution Topography for Understanding Earth Surface Processes: Opportunities and Challenges**, Geomorphology, 216, PP. 295-312.

- Tarolli, P. & Sofia, G., 2016, **Human Topographic Signatures and Derived Geomorphic Processes Across Landscapes**, *Geomorphology*, 255(3), PP. 140-161.
- Zebker, H.A. & Villasenor, J., 1992, **Decorrelation in Interferometric Radar Echoes**, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5), PP. 950-959.
- 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.
- Zhu, Y., Zhou, S., Zang, D. & Lu, T., 2018, **Monitoring of Surface Subsidence of the Mining Area Based on Sbas**, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, P. 3.
- Yao, J., Yao, X., Wu, Z. & Liu, X., 2021, **Research on Surface Deformation of Ordos Coal Mining Area by Integrating Multitemporal D-InSAR and Offset Tracking Technology**, *Journal of Sensors*.
- Yuan, M., Li, M., Liu, H., Lv, P., Li, B. & Zheng, W., 2021, **Subsidence Monitoring Base on SBAS-InSAR and Slope Stability Analysis Method for Damage Analysis in Mountainous Mining Subsidence Regions**, *Remote Sensing*, 13(16), P. 3107.



Investigation of Topographic Changes in Open Pit Mines by Radar Interferometry (Case Study: Sangan- Khaf iron Ore Mines)

Naddaf Sangani M.¹, Hosseinzadeh S.R.^{2*}, Martín Duque J.F.³, Jahadi Toroghi M.⁵, Hafezi Moghaddas N.⁴

1. Ph.D. Student of Geomorphology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad
2. Associate Prof., Dep. of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad,
3. Associate Prof. of Geomorphology, Faculty of Geological Sciences, Complutense University of Madrid, Madrid, Spain
4. Assistant Prof., Dep. of Geography, Payame Noor University, Tehran
5. Prof. of Dep. of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

Abstract

In the early 1990s, radar interferometry was introduced and used as a useful tool in the study of all phenomena that cause land surface deformations. If the land surface deforms between two radar images, a surface displacement map can be created with millimeter resolution and accuracy. This paper reports the findings of the Sentinel1 –A data time series results using the SBAS algorithm to detect surface deformation in the Sangan iron ore mine. Sangan Iron Ore Mine is the largest open pit iron ore deposit in the Middle East. Due to mining activities, this mine has undergone many changes in terms of topography and geomorphology, which can intensify geomorphological processes. To detect and obtain the amount of land deformation, 48 SAR images of Sangan iron ore mine obtained by the European Space Agency's Sentinel 1-A satellite were used. The time series (2014-2020) obtained from the deformation in the range of placer mines were analyzed. The results show the average displacement rate of -20 to -35 mm per year and the maximum cumulative rate of deformations of -120 mm. Investigation of the cross-section in the two parts of the apex and the center of the alluvial fan in the placer mines during the period 2014-2017 shows the topographic changes well. To evaluating the reliability of the results, the results derived from SBAS have been compared due to the lack of data in the range of placer mines with the values measured by the total station related to the mountain unit in the years 2020-2014. The results showed that the rate of deformations from radar data using the SBAS algorithm compared to the leveling data has followed a similar pattern. However, there may be some error due to the different nature, ie in the leveling of elevation deformations measured for a point, but in interferometry the average rate is obtained from adjacent points.

Keywords: Sangan-Khaf, Iron ore, Radar interferometry, SBAS, Sentinel 1-A.

* Correspondence Address: Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad
Email: srhosseinzadeh@um.ac.ir
<https://orcid.org/0000-0002-8653-5473>
<https://dx.doi.org/10.48308/gisj.2023.102345>



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).