

بررسی زون‌های ناپایدار معدن سنگ آهن شماره ۳ گل‌گهر با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری

جعفر عبدالهی شریف^{۱*}؛ میرجواد غیبی^۱؛ امیرمحمد علی‌آبادی‌زاده^۲
۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه ایمپریال کالج لندن، لندن، انگلستان.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۹

(نویسنده مسئول: j.a.sharif@urmia.ac.ir)

احتمال رخداد زمین‌لغزش در سراسر جهان و احجام مختلف از چند هزار متر مکعب تا چند میلیون متر مکعب توسط عوامل انسانی و طبیعی وجود دارد. وقوع زمین‌لغزش‌ها هر ساله باعث ایجاد خسارات جانی و مالی زیادی می‌گردد. از جمله موارد انسانی که توانایی ایجاد زمین‌لغزش را داراست حفر معادن روباز در زمین است که باعث ایجاد دیواره‌هایی با شیب زیاد می‌شود. بهترین راه برای جلوگیری از ریزش و یا کنترل خسارات آن تجزیه و تحلیل دیواره‌ها از طریق پایش دیواره‌ها و شناسایی زون‌های لغزشی است. در این مطالعه برای پایش و شناسایی زون‌های لغزشی در دیواره معدن سنگ آهن شماره ۳ گل‌گهر از روش تداخل‌سنجی راداری درجه مصنوعی (*InSAR*) استفاده شد. برای استفاده از این روش تعداد ۱۲ تصویر در طی ۱۱ ماه از ماهواره *Sentinel-1A* دریافت و مورد پردازش قرار گرفت. نتایج نشان داد با استفاده از این روش دو زون دارای احتمال لغزش در داخل پیت معدن موجود است و همچنین میزان جابجایی در یکی از این زون‌ها در طی ۱۲ ماه برابر ۲۲ میلی‌متر به دست آمد.

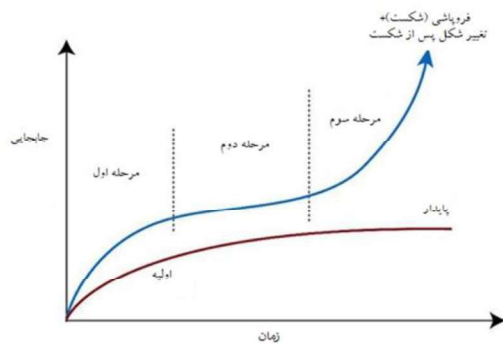
چکیده

زمین‌لغزش، پایش، تداخل‌سنجی راداری در بجه مصنوعی، گل‌گهر، سنتیل - ۱

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

زمان، به صورت شکل (۱) به دست می‌آید [۸] و [۹]. مدل‌های مرتبط برای خزش شتاب‌دهنده اساساً به صورت گرافیکی و با استفاده از روش معکوس سرعت مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند [۱۰] و [۱۱]. اما عملاً در صورت وجود چنین روندی برای داده‌های دارای معکوس سرعت از رگرسیون خطی استفاده می‌گردد [۱۲-۱۴].



شکل ۱- رفتار خزش برای شیب‌هایی که دچار جابجایی شده‌اند [۱۵]

پایش پایداری شیب با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و استفاده از ماهواره‌ها برای دریافت داده‌های جابجایی و اندازه‌گیری آن‌ها یک رویکرد موثر برای محاسبه مقدار جابجایی و شکست به حساب می‌آید [۱۶]. ماهواره‌ها برای اهداف مختلفی به فضا ارسال شده‌اند. یکی از اهداف آن مرتبط با حرکت توده‌های سنگی در مباحث نقشه‌برداری زمین‌لغزش‌ها، نظارت، مدل‌سازی و شناسایی تغییرات شکل زمین از طریق تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی است [۲۰-۱۷].

استفاده از روش‌های نوین برای نظارت و پایش، همانند روش تداخل‌سنجی راداری (*InSAR*)، امکان بررسی دقیق و پیوسته جابه‌جایی دیواره‌ها را فراهم می‌آورد. این روش یک ابزار تصمیم‌ساز بوده که در مدیریت پایداری شیب قابل استفاده است. این تکنیک با فراهم نمودن اطلاعات دقیق مکانی و زمانی برای تعیین نرخ تغییر شکل دیواره‌ها، به مهندسان ژئوتکنیک و مدیران پروژه کمک می‌کند تا تصمیماتی مبتنی بر داده در خصوص طراحی مجدد شیب، برنامه‌ریزی عملیات استخراج و اقدامات ایمن‌سازی اتخاذ

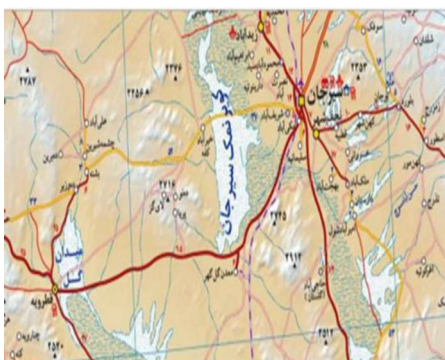
استخراج مواد معدنی به روش روباز با خطرات طبیعی متعددی همراه است. این خطرات نیازمند توجه ویژه هستند که یکی از این خطرات، جابه‌جایی توده‌های سنگی تحت تاثیر نیروی وزن و وجود شکستگی‌ها در دیواره‌های معدن است. جابجایی توده‌های سنگی سبب ایجاد تغییر شکل توده سنگ، لغزش و ریزش سنگ گردد. در طول بهره‌برداری از معادن روباز، امکان رخداد زمین‌لغزش‌های متعدد و با اندازه‌های مختلف در دامنه دیواره‌های موجود است. در برخی از موارد، حجم آن لغزش‌ها به ۶ الی ۸ میلیون مترمکعب می‌رسد، اما در اغلب اوقات این حجم در حدود چند ده تا چند صد هزار مترمکعب است [۱]. از بین رفتن پایداری دیواره‌ها در معادن روباز برای استخراج مواد تحت تاثیر شرایط زمین‌شناسی، می‌تواند باعث ایجاد تغییرات فراوانی در توده‌سنگ گردد. این مسئله توانایی ایجاد رانش زمین را دارا بوده و این امر توانایی تهدید سلامتی و زندگی کارکنان دارد [۲].

پایش ژئومکانیکی یکی از ابزارهای کلیدی برای پیش‌بینی و کاهش خطرات لغزش زمین در معادن روباز است. پایش یک عنصر مهم در مدیریت خطر است که با استفاده از پشتیبانی سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و پایگاه داده‌های مرتبط توانایی شناسایی و ارزیابی ویژگی‌های خطرات را دارد [۲]. عملیات پایش اغلب با دو روش اندازه‌گیری سطحی که خود شامل روش‌های اندازه‌گیری در نقاط مجزا و اندازه‌گیری در مساحت‌های بزرگ و روش اندازه‌گیری زیرسطحی صورت می‌گیرد [۳] و [۴].

به جدانشدگی فیزیکی و به دنبال آن فروپاشی مواد سنگی شکست شیب گفته می‌شود که در مقیاس‌های محلی یا جهانی می‌تواند رخ دهد. استراتژی‌های موثر بر جلوگیری از خطرات ریزش با اجرای برنامه‌های پایش رابطه مستقیم دارد. تحلیل روند جابجایی شیب، سرعت و شتاب آن در طول زمان بسیار مهم است، چرا که این پارامتر بهترین شاخص در شکست شیب‌ها تلقی می‌گردد. شناسایی مراحل تغییر شکل پیش‌رونده، که در طی آن شیب با نرخ شتاب‌دار حرکت می‌کند تا به نقطه شکست برسد، برای همه سیستم‌های پایشی اولیه اهمیت دارد [۵-۷].

تخمین زمان شکست ریزش در شیب‌ها معمولاً با رسم توابع تجربی و منحنی‌های جابه‌جایی‌های شتاب‌دهنده با

شرقی و ۲۹ درجه و ۷ دقیقه شمالی تعیین شده است. نزدیک‌ترین منطقه شهری به این ذخیره شهرستان سیرجان است که در ۵۵ کیلومتری آن قرار گرفته است (شکل ۲). ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا برابر ۱۷۳۰ متر است. فعالیت اکتشافی در این ناحیه از سال ۱۳۴۸ آغاز گردیده‌اند که توده شماره ۳ این ذخیره در سال ۱۳۵۴ با استفاده از روش ژئوفیزیک هوایی و با روش مگنتومتری اکتشاف شده است. این ناحیه از نظر زمین‌شناسی ساختاری در لبه شمال شرقی زون سندج سیرجان واقع شده است. همچنین این ناحیه در کنار گسل زاگراس قرار گرفته است که گسل نابین - بافت در ۸۰ کیلومتر شمال شرقی و گسل تراست زاگرس در ۶۰ کیلومتری جنوب غربی آن واقع شده است [۲۷].



شکل ۲- موقعیت محدوده مورد مطالعه

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- سنجش از دور

یک تکنیک موثر برای به دست آوردن اطلاعات در مورد زمین و جو زمین استفاده از حسگرهایی نصب شده زمینی، هوایی (هواپیما، بالن) یا فضایی (ماهواره‌ها و شاتل‌های فضایی) است [۲۸] و [۲۹]. سنجش از دور یک ابزار مهم مطالعه در زمینه تشخیص تغییرات و ارزیابی تغییرات انواع پدیده‌های سطحی در طول یک بازه زمانی است [۳۰] و [۳۱]. انواع مختلفی از روش‌های سنجش از دور موجود است که از طیف‌های مختلف امواج الکترومغناطیسی استفاده می‌کنند (به عنوان مثال روش‌های اپتیک، *LiDAR* و رادار)، که روش رادار با امواج میکروویو دارای مزیت نظارت به صورت تمام وقت در طول شبانه روز بر سطح زمین است [۳۲]. روش رادار دریاچه

نمایند. به همین دلیل، تلفق کردن تداخل‌سنجی راداری با سامانه‌های مدیریت خطر، می‌تواند یک رویکرد مهم و کارآمد برای کاهش ریسک ریزش و افزایش ایمنی عملیات معدنکاری محسوب شود [۲۱-۲۳].

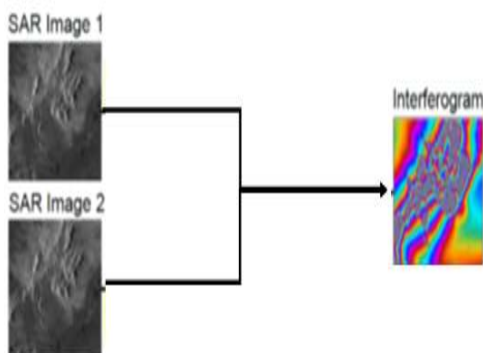
مطالعات بسیاری در حوزه بررسی جابجایی‌های سطح زمین، به ویژه زمین‌لغزش و حرکات دامنه‌ای با استفاده از داده‌های راداری صورت گرفته است. در سال ۲۰۰۶ کولسانتی و واروفسکی کاربردهای روش تداخل‌سنجی دریاچه مصنوعی و مبانی آن را در مورد شناسایی زمین‌لغزش‌ها بررسی نمودند [۲۴]. بارا و همکاران در سال ۲۰۱۶ طی انجام یک مطالعه به بررسی پتانسیل‌های ماهواره Sentinel-1A در تهیه نقشه‌های زمین‌لغزش و پایش آن‌ها پرداختند [۲۵]. مورا و همکاران در سال ۲۰۱۳ با استفاده از روش تداخل‌سنجی رادار با دهانه ترکیبی و داده‌های ماهواره TeraSAR-X که به صورت غیررایگان بوده و از باند X استفاده می‌کند، اقدام به تهیه نقشه ناپایداری و جابجایی دیواره معدنی در کشور اسپانیا نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد این روش برای شناسایی و تهیه نقشه‌ی ناپایداری بسیار مناسب است [۲۶].

هدف این مقاله استفاده از تداخل‌سنجی راداری برای شناسایی پتانسیل‌های ریزش دیواره در معدن سنگ آهن شماره ۳ گل‌گهر با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel است. به دنبال پیشرفت‌های اخیر در مبحث نظارت با ماهواره به وسیله تداخل‌سنجی راداری دریاچه مصنوعی (InSAR)، خزش شتاب‌دار شیب‌ها قبل از وقوع شکست و ریزش قابل مشاهده است.

۲- منطقه مورد مطالعه

ناحیه معدنی سنگ آهن گل‌گهر به دلیل داشتن ۱۱۰۰ میلیون تن کانسنگ در تعداد شش توده معدنی مختلف به عنوان بزرگترین ذخیره سنگ آهن کشور به حساب می‌آید. توده معدنی شماره ۳ با داشتن ۶۰۰ میلیون تن سنگ آهن بزرگترین توده معدنی بین شش توده معدنی این ذخیره است. مختصات جغرافیایی این ذخیره در ۵۵ درجه و ۱۷ دقیقه

به شکل خط‌هایی با اختلاف فاز یکسان و شبیه به خطوط تراز در نقشه‌های توپوگرافی هستند [۳۴].



شکل ۳- فرآیند تولید اینترفروگرام در تداخل سنجی [۳۴]

برای تداخل‌سنجی راداری دو روش تک مسیری و تکرار مسیر موجود است. در روش تک مسیری، با استفاده از دو آنتن که بر روی یک سکو نصب شده‌اند اطلاعات به صورت همزمان برداشت می‌شوند. این روش دارای دو حالت تداخل‌سنجی در راستای پرواز و عمود بر راستای پرواز است. برای روش تداخل‌سنجی با تکرار مسیر سکو تنها دارای یک آنتن بوده و این آنتن یک منطقه را با دو بار عبور مختلف مورد پوشش قرار می‌دهد. معمولاً هر سنجنده در این روش می‌تواند مسیرهای جداگانه‌ای را داشته باشد که فاصله بین این دو مسیر پرواز را خط مبنا می‌نامند که برای هر سیستم تصویربرداری یک خط مبنا بحرانی موجود است و مقدار آن از رابطه (۱) به دست می‌آید [۳۵].

$$B_c = \frac{\lambda R}{2\delta R_g \cos\theta} \quad (1)$$

در رابطه (۱) λ طول موج رادار، θ زاویه میل ماهواره، R فاصله بین سنجنده و نقطه مورد نظر روی زمین و R_g توان تفکیک زمینی در جهت رنج است. اختلاف فاز حاصل از تداخل‌سنجی راداری تحت تاثیر مولفه‌هایی مانند مسیرهای مداری، توپوگرافی، جابجایی و اتمسفری قرار می‌گیرد. رابطه (۲) نشان‌دهنده تاثیر پارامترهای ذکر شده بر اختلاف فاز حاصل شده را نشان می‌دهد [۳۶].

مصنوعی (SAR) به عنوان یک تکنیک تصویربرداری از میان سایر تکنیک‌های استفاده از سنجنش از راه دور راداری برای تولید تصاویر با وضوح خوب مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۹] و [۳۳].

۳-۲- تصاویر و داده‌های مورد استفاده

برای انجام مطالعات با استفاده از این روش از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 استفاده می‌گردد. از این تصاویر برای تولید مدل ارتفاعی رقومی زمین استفاده شده است. در ادامه یکسری توضیحات کلی در مورد تصاویر حاصل از ماهواره Sentinel-1 ارائه می‌گردد.

پروژه Sentinel-1 با همکاری اتحادیه اروپا و آژانس فضایی اروپا برای انجام مجموعه مشاهدات راداری ماهواره‌ای ایجاد شده است. این پروژه دارای دو سکوی A و B بوده که این دو سکو در یک صفحه مداری و با اختلاف فاز ۱۸۰ درجه قرار گرفته‌اند. Sentinel-1 دارای تجهیزات سنجنده SAR بوده و مرکز فرکانس آن برابر ۵/۴۰۵ گیگاهرتز است و این مقدار در باند C امواج میکروویو قرار دارد. تصاویر راداری دریافتی توسط این سنجنده‌ها به صورت پلاریزاسیون دوگانه HH, HV و VH, VV است. تصویربرداری توسط این ماهواره هر ۱۲ روز یکبار از کل کره زمین توسط یکی از سکوها انجام می‌شود و زمانی که از دو سکوی این ماهواره استفاده گردد توان تفکیک زمانی این ماهواره به ۶ روز کاهش می‌یابد. زاویه برخورد این سنجنده ۲۹/۱ الی ۴۶ درجه است و پهنای نوار تصویربرداری آن ۲۵۰ کیلومتر و توان تفکیک مکانی در این روش تصویربرداری ۵ متر در امتداد آزیموت و ۲۰ متر در امتداد رنج است [۳۴].

۳-۳- تداخل‌سنجی رادار

تداخل‌سنجی راداری یک تکنیک برای محاسبه اختلاف فاز بین تصاویر راداری است. این تصاویر می‌توانند از نظر موقعیت و زمان تصویربرداری متفاوت باشند. تداخل‌سنجی با مفهوم اینترفروگرام ارتباط دارد که به معنای ایجاد تصویر جدید از طریق تفاضل فازهای بین دو تصویر است. به بیانی دیگر فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت‌ها و زمان‌های مختلف پیکسل به پیکسل با هم مقایسه و از تفاضل بین مقادیر آن‌ها تصویر جدید حاصل می‌گردد که آن تصویر را اینترفروگرام می‌نامند. فرایند ایجاد اینترفروگرام در شکل (۳) نشان داده شده است. این اینترفروگرام از فرینج‌هایی تشکیل شده‌اند. این فرینج‌ها

پیش‌پردازش با دقت بالا تعیین یا استخراج شده‌اند. همچنین پارامترهای پردازشی مانند تعداد لایه‌های *Multilook*، شعاع همبستگی برای انتخاب *PS* و آستانه‌های فاز پایدار نیز در نرم‌افزار *Stamps* به صورت دقیق تنظیم شده است [۳۸].

تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این مطالعه کوپرنیکوس (*Copernicus*)، بزرگترین و بلندپروازانه‌ترین برنامه ماهواره‌ای زیست‌محیطی جهان تا به امروز است. این برنامه براساس سرمایه‌گذاری‌های چند دهه اخیر برای تحقیق و توسعه مشاهده زمین و ایجاد یک سیستم عملیاتی طراحی شده است. این سیستم توانایی جمع‌آوری مجموعه جامعی از داده‌ها را دارد. این پروژه بلندمدت در ماه می ۱۹۹۸ آغاز شده است. در این تاریخ جمعی از کارشناسان و نمایندگان آژانس‌های فضایی در باونو، ایتالیا، گرد هم آمدند و به ایجاد برنامه‌ای عملیاتی برای پایش زیست‌محیطی زمین پرداختند، تا اروپا نقش عمده‌ای در مدیریت مسائل زیست‌محیطی و اقلیمی جهانی ایفا کند.

برنامه کلی توسط اتحادیه اروپا (*EU*) به نمایندگی کمیسیون اروپا (*EC*) رهبری می‌شود. آژانس فضایی اروپا (*ESA*) به عنوان شریک اصلی و هماهنگ‌کننده بخش فضایی عمل می‌کند. همچنین سازمان اروپایی بهره‌برداری از ماهواره‌های هواشناسی (*EUMETSAT*)، آژانس محیط‌زیست اروپا (*EEA*)، مرکز پیش‌بینی هوای میان‌برد اروپا (*ECMWF*) و سایر نهادهای اروپایی به عنوان مجریان خدمات اصلی همکاری دارند.

بخش فضایی کوپرنیکوس شامل ماهواره‌های اختصاصی به نام *Sentinel* است که به طور خاص برای پاسخگویی به نیازهای مشاهده زمین کاربران کوپرنیکوس توسعه یافته است. ماهواره‌های *Sentinel* شامل دوربین‌های چند طیفی با وضوح بالا، سیستم‌های تصویربرداری راداری و حسگرهای ویژه برای اندازه‌گیری توپوگرافی دریا، زمین، ترکیبات جوی و دمای سطح هستند. اولین مأموریت این بخش فضایی مربوط به مأموریت *Sentinel-1* است. همانطور که گفته شد این ماهواره شامل حسگر راداری بانده *C (SAR)* است که تصاویر راداری را در هر شرایط آب‌وهوایی، به صورت شبانه‌روزی و با زمان بازدید مجدد بالا ارائه می‌دهد. اولین ماهواره در سال ۲۰۱۴ و دومین در سال ۲۰۱۶ پرتاب شد که با ترکیب دو ماهواره، زمان بازدید مجدد به‌طور متوسط به ۶ روز در سطح جهانی

$$\Delta\varphi_{int} = \frac{4\pi}{\lambda} B_1 \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_2 \varepsilon}{R_0 + \sin\theta} + \frac{4\pi}{\lambda} d_{los} + \Delta\varphi_{atmo} + \Delta\varphi_{nois} + 2\pi K \quad (۲)$$

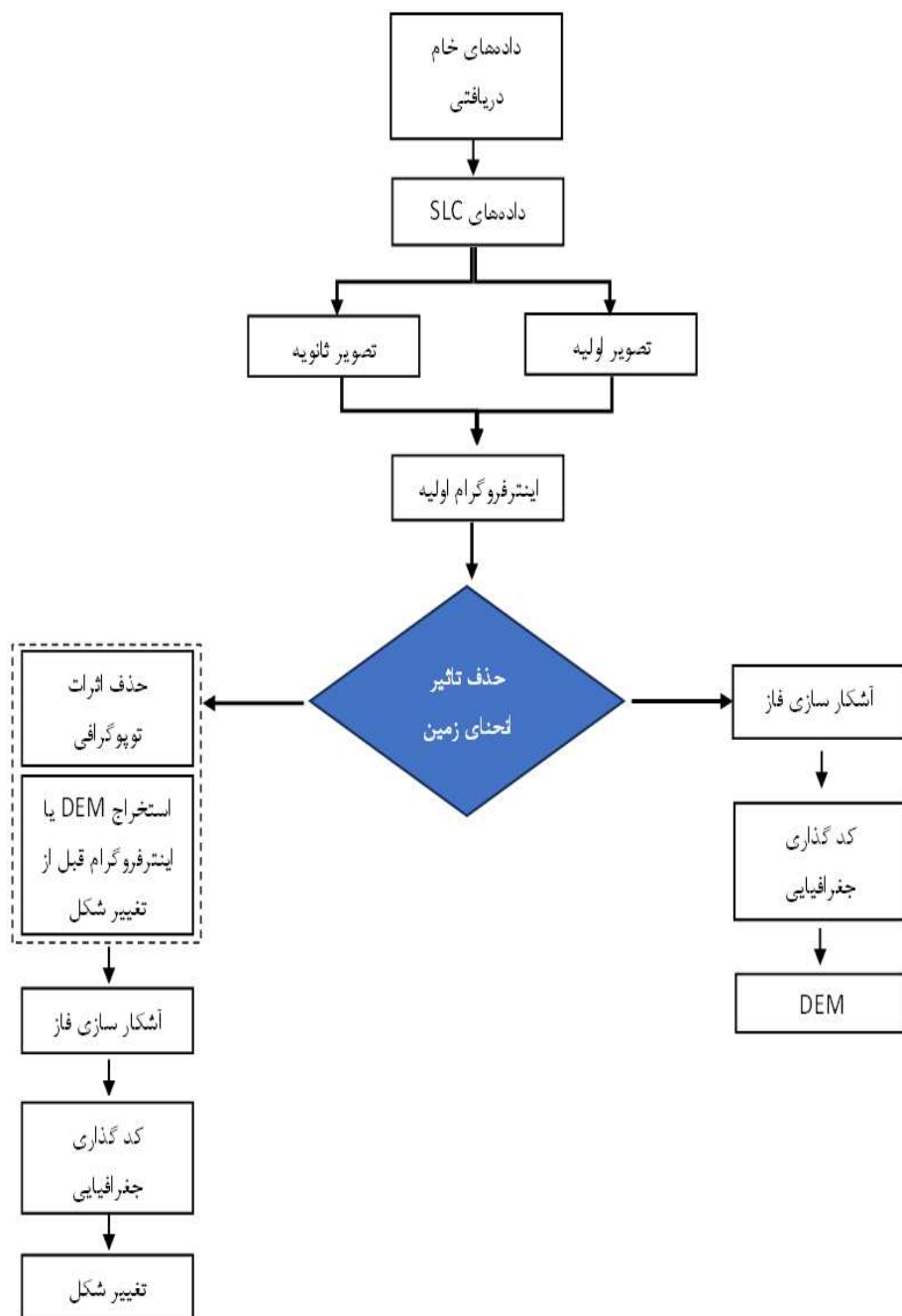
در رابطه (۲) $\Delta\varphi_{int}$ رابطه فاز تداخل‌سنجی راداری، λ طول موج رادار، θ زاویه میل، R_0 فاصله مایل از هدف زمینی تا سنجنده، B_1 و B_2 مولفه‌های موازی و عمودی اختلاف مداری زوج تصویر، ε ارتفاع توپوگرافیک پیکسل مدنظر، d_{los} تغییرات سطح زمین در دو تصویر، $\Delta\varphi_{atmo}$ اختلاف فاز اتمسفری و $\Delta\varphi_{nois}$ اختلاف فاز ناشی از نویز است.

عوامل مختلفی شامل اثرات جوی، همبستگی زمانی بین پیکسل‌ها، خط مبنا بین تصویر برداری، دقت مدل ارتفاعی دیجیتال و پارامترهای انتخاب نقاط پایدار می‌توانند بر روی دقت نتایج حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری موثر باشند. اما در حالت کلی، با رعایت دقیق تنظیمات پردازشی، استفاده از تصاویر مناسب و اعمال فیلترهای مناسب، خطاهای موجود کاهش یافته و دقت تحلیل افزایش می‌یابد [۳۷] و [۳۸].

اثر اتمسفر یکی از عوامل جوی بوده که در کاهش دقت روش تداخل‌سنجی راداری موثر است. این اثر ناشی از مسیر عبور موج از تروپوسفر و یونسفر و تغییرات موجود در آن‌ها است. این امر می‌تواند باعث ایجاد تغییرات مصنوعی در فاز سیگنال و در نتیجه، خطا در محاسبه جابه‌جایی گردد. علاوه بر این شرایط رطوبتی، دمایی و فشار جو به‌ویژه در مناطق کوهستانی یا نیمه‌خشک، ممکن است باعث بزرگ‌نمایی یا کوچک‌نمایی نرخ تغییر مکان گردد [۳۹].

تداخل‌سنجی راداری دارای محدودیت‌هایی نیز هست که شامل توان تفکیک زمانی پایین، اختلال میان تصاویر در صورت عدم وجود همبستگی زمانی و مکانی، نیاز به مدل‌سازی و تصحیح اثر یونسفری و تروپوسفری و در نهایت یک بعدی بودن اندازه‌گیری است. مراحل انجام تداخل‌سنجی راداری در شکل (۴) قابل مشاهده است.

در این مطالعه با توجه به مطالعات صورت گرفته، پارامترهای کلیدی روش تداخل‌سنجی راداری شامل طول موج رادار، زاویه میل، فاصله مایل از سنجنده تا هدف زمینی، مولفه‌های اختلاف مداری، تغییر مکان خط دید و مولفه‌های نویز فاز اتمسفری و سیستماتیک لحاظ شده‌اند. این پارامترها در روابط فیزیکی مدل اختلاف فاز دخیل بوده و در مرحله



شکل ۴- مراحل انجام تداخل‌سنجی راداری [۳۴]

جدول ۲- خصوصیات ژئومکانیکی باطله و کانسنگ توده

شماره ۳ گل‌گهر				
نوع سنگ	شرایط	زاویه اصطکاک	چسبندگی	مدول تغییر شکل‌پذیری
شیبست	خشک	۲۷	۰/۴۵	۲/۶
	اشباع	۲۶	۰/۴۳	۲/۵
ماده	خشک	۳۸	۱/۱	۶/۴
معدنی	اشباع	۳۳	۰/۸۵	۴/۶

معدن سنگ آهن شماره ۳ گل‌گهر در حال حاضر دارای ۱۵ پله بوده شکل (۵) و عملیات پایش در این معدن با استفاده از روش‌های بازدید چشمی و پایش ترک‌های کششی با کمک ترک‌سنج‌ها صورت می‌گیرد. این روش‌ها از نظر دقت و اندازه‌گیری دقیق جایجایی برای پایش دیواره معدن مناسب نیستند. علاوه بر آن‌ها از چند منشور ثابت برای پایش دیوارهای معدن نیز استفاده شده است. نوع دیگری از تجهیزاتی مورد استفاده برای پایش دیواره استفاده از دوربین‌های نقشه‌برداری است که در معدن مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی به دلیل استفاده از نقاط ثابت که در نزدیکی دیواره این معدن قرار دارند و جایجایی این نقاط در هنگام انجام عملیات انفجار این روش نیز برای پایش مناسب نیست. لذا برای پایش دیواره‌های معدن سنگ آهن شماره ۳ گل‌گهر استفاده از ابزارهای جدید و مناسب احساس می‌گردد. یکی از بروزترین روش‌ها استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری دریاچه مصنوعی (*InSAR*) است که در این مطالعه از آن استفاده شده است.



شکل ۵- پله‌های معدن سنگ آهن شماره ۳ گل‌گهر

کاهش یافته است. تصاویر مورد استفاده در این تحقیق مربوط به سنجنده راداری دریاچه مصنوعی (*SAR*) مربوط به ماهواره *Sentinel-1A* است. با توجه به منطقه مورد مطالعه، تصاویر مورد نیاز به صورت بالاگذر (*Ascending Path*) اخذ شده است. تصاویر اخذ شده به فرمت *SLC* بوده و از پلاریزاسیون عمودی آن‌ها استفاده شده است. تاریخ دریافت تصاویر در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- تاریخ برداشت تصاویر ماهواره‌ای

ردیف	تاریخ برداشت	
	شمسی	میلادی
۱	۱۴۰۱/۱۲/۲۹	2023/03/20
۲	۱۴۰۲/۰۱/۳۱	2023/04/20
۳	۱۴۰۲/۰۲/۳۰	2023/05/20
۴	۱۴۰۲/۰۳/۳۰	2023/06/20
۵	۱۴۰۲/۰۴/۲۹	2023/07/20
۶	۱۴۰۲/۰۴/۲۹	2023/08/20
۷	۱۴۰۲/۰۶/۲۹	2023/09/20
۸	۱۴۰۲/۰۷/۲۸	2023/10/20
۹	۱۴۰۲/۰۸/۲۹	2023/11/20
۱۰	۱۴۰۲/۰۹/۲۹	2023/12/20
۱۱	۱۴۰۲/۱۱/۰۱	2024/01/21
۱۲	۱۴۰۲/۱۲/۰۲	2024/02/21

۴- بحث و نتایج

عمق نهایی معدن سنگ آهن شماره ۳ گل‌گهر پس از برداشت روباره ۲۸۰ متر پایین‌تر از قسمت روباره در نظر گرفته شده است. ارتفاع هر پله کاری معدن در زمان طراحی برابر ۱۵ متر و عرض پله‌های ایمنی متناسب با ارتفاع پله ۸ متر در نظر گرفته شده است. این معدن دارای جاده‌هایی با عرض نهایی ۳۰ متر و شیب ۱۰ درصد است. شیب نهایی پایدار برای بخش‌های مختلف کانسار براساس مطالعات در قسمت روباره برابر ۳۲ درجه و بخش‌های زیرین آن ۴۰ درجه در نظر گرفته شده است. همچنین شیب پله‌ها در قسمت روباره برابر ۴۵ درجه و در قسمت سنگ باطله و کانسنگ برابر ۶۵ درجه در نظر گرفته شده است. خصوصیات ژئومکانیکی باطله و توده سنگ در جدول (۲) آمده است.

تفاوت‌های زمانی یا هندسی در تصاویر ورودی رخ دهد. این مشکل می‌تواند باعث تولید *Interferogram* نادرست شود که نتیجه آن تداخل‌سنج‌هایی با نویز زیاد یا اثرات غیرواقعی است. برای رفع این مشکل، باید اطمینان حاصل شود که تصاویر به‌طور دقیق هم‌راستا شده‌اند. استفاده از ابزارهای *Coregistration* به درستی و تنظیم دقیق پارامترهای آن می‌تواند این مشکل را حل نماید. در صورتی که هم‌راستایی تصاویر به درستی انجام نشود، خروجی‌های نادرست یا غیرقابل استفاده تولید می‌شود. همچنین، مشکلات مربوط به کالیبراسیون یا مدل‌های ارتفاعی دیجیتال (*DEM*) نادرست می‌تواند باعث تحلیل اشتباه جابجایی‌ها شود. رفع این خطاها مستلزم استفاده از داده‌های *DEM* دقیق‌تر و به‌روزتر و تنظیم صحیح پارامترهای راداری است.

در *Stamps*، یکی از مشکلات متداول، شناسایی نادرست نقاط پایدار (*PS*) است که می‌تواند ناشی از انتخاب نادرست آستانه‌های پراکندگی فاز یا دامنه باشد. اگر انتخاب پارامترهای مناسب برای شناسایی نقاط *PS* انجام نشود، ممکن است تعداد زیادی نقطه نادرست شناسایی شود که به نتایج اشتباه منتهی می‌شود. برای رفع این مشکل، باید پارامترهای انتخاب نقاط *PS* به‌طور دقیق تنظیم و به دقت بررسی شوند تا نقاط شناسایی شده واقعاً پایدار و نمایانگر تغییرات زمین باشند.

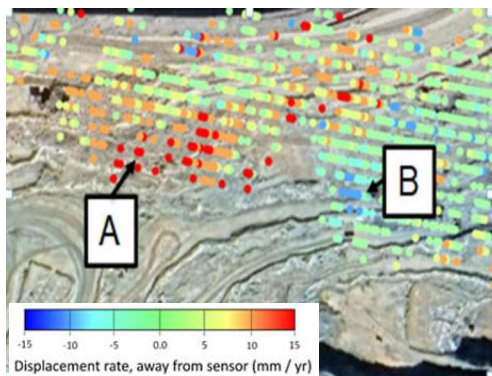
برای کاهش خطاهای حاصل از نویزهای اتمسفری، از سه روش استفاده از سری زمانی بلندمدت، استفاده از تصاویر با فاصله زمانی کوتاه‌تر و استفاده از روش‌های فیلترگذاری فضایی - زمانی توسعه می‌گردد. در این مقاله از فیلتر گوسین نرم‌افزار *SNAP* و الگوریتم‌های تصحیح اتمسفری در نرم‌افزار *Stamps* استفاده شده است. علاوه بر آن تلاش شده است با استفاده از تصاویر متوالی ۱۲ ماهه فاصله زمانی تصاویر هم کاهش یابد تا تأثیرات اتمسفری به حداقل مقدار برسد.

طبق مراحل بالا برای انجام تداخل‌سنجی در این مطالعه از روش تکرار مسیر استفاده شده است. تصاویر *SLC* به دست آمده از ماهواره *Sentinel-1A* پس از پیش‌پردازش، میزان پراکندگی سازه‌های پایدار (*PS*) را مشخص و میزان جابجایی آن‌ها را محاسبه نموده است. موقعیت نقاط *PS* و نرخ جابجایی آن‌ها در شکل (۶) برای محدود معدن سنگ آهن شماره ۳ گل‌گهر قابل مشاهده است. با توجه به شکل تعداد کمی از

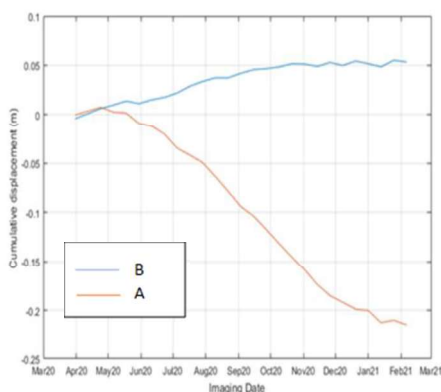
برای انجام تداخل‌سنجی راداری از نرم‌افزارهای *Stamps* و *SNAP (Sentinel Application Platform)* استفاده شده است. *SNAP* یک نرم‌افزار متن‌باز است که توسط آژانس فضایی اروپا (*ESA*) برای پردازش و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای طراحی شده است. این نرم‌افزار به‌طور خاص برای پردازش داده‌های ماهواره‌های *Sentinel*، به ویژه *Sentinel-1* و *Sentinel-2* استفاده می‌شود. *SNAP* امکان پردازش داده‌های راداری *SAR* و داده‌های اپتیکال را فراهم می‌کند و ابزارهایی برای تحلیل، نمایش و اشتراک‌گذاری داده‌های ماهواره‌ای ارائه می‌دهد. *Stamps* هم یک نرم‌افزار متن‌باز است که برای تحلیل تداخل‌سنجی راداری درجه مصنوعی (*InSAR*) به‌ویژه بر پایه نقاط پایدار (*PS-InSAR*) و نقاط پراکنده (*DS-InSAR*) طراحی شده است. این نرم‌افزار توسط دانشگاه استنفورد توسعه یافته و به کاربران این امکان را می‌دهد که جابجایی‌های سطح زمین را با دقت بالا و در طول زمان تحلیل کنند. *Stamps* به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و توانایی کار با داده‌های مختلف *SAR*، یکی از ابزارهای محبوب در زمینه تحلیل تغییرات زمین است.

برای تحلیل با استفاده از نرم‌افزارها، ابتدا داده‌های راداری شامل تصاویر *SLC* به دست آمده از ماهواره *Sentinel-1A* دانلود و در نرم‌افزار *SNAP* مورد پیش‌پردازش قرار می‌گیرد. عملیات پیش‌پردازش شامل مراحل *Subset* کردن، کالیبراسیون، کاهش نویز (*Multilooking*)، هم‌راستایی تصاویر (*Co-Registration*) و ایجاد تداخل‌سنج (*Interferogram*) همراه با حذف فاز توپولوژیکی با *DEM* است. سپس نقاط پایدار (*PS*) با معیارهای پراکندگی فاز یا دامنه بازتاب شناسایی می‌شود که این مرحله معمولاً با نرم‌افزار *Stamps* انجام می‌شود. سپس، تحلیل سری زمانی تغییرات فاز نقاط *PS* انجام شده و جابجایی تجمعی در طول زمان محاسبه می‌شود. خروجی نهایی به مختصات جغرافیایی (*Geocoding*) تبدیل شده و به صورت نقشه‌های جابجایی زمین در واحدهای متریک ارائه می‌گردد.

هنگام انجام پردازش، ممکن است چندین خطا و چالش پیش بیاید. یکی از خطاهای رایج در *SNAP*، *Co-registration* نادرست تصاویر است که می‌تواند به دلیل



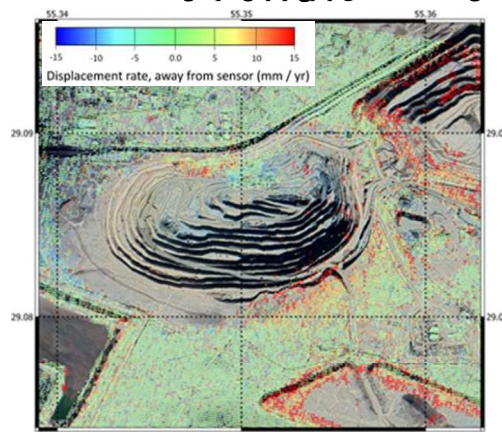
شکل ۷- نقاط PS و A و B موجود در دیواره شمال غرب معدن سنگ آهن شماره ۳ گل‌گهر



شکل ۸- نمودار میزان جابجایی نقاط A و B در دیواره شمال غرب معدن سنگ آهن شماره ۳ گل‌گهر

یکی از محدودیت‌های این مطالعه، عدم دسترسی به داده‌های میدانی برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری است. با توجه به اینکه داده‌های ابزار دقیق مانند منشورها، ترک‌سنج‌ها یا برداشت‌های زمینی به صورت منظم ثبت نشده‌اند، امکان مقایسه مستقیم بین جابجایی‌های اندازه‌گیری شده با مشاهدات زمینی فراهم نبود. با این حال، به منظور افزایش دقت و صحت تحلیل، از تکنیک‌های پردازشی مانند فیلترسازی نویز، تحلیل همبستگی فازی و انتخاب دقیق نقاط پایدار بهره گرفته شده است. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، برای ایجاد امکان اعتبارسنجی دقیق از روش‌های مدلسازی یا استفاده از ترکیب داده‌های زمینی و ماهواره‌ای استفاده گردد.

نقاط PS در داخل محدوده پیت معدن و بخش زیادی از این نقاط در اطراف پیت قرار گرفته‌اند. نقاط موجود در داخل پیت در دو قسمت شمال تا شمال غربی و جنوب شرقی دارای بیشترین تمرکز هستند. با توجه به شکل و تمرکز نقاط سبز محدوده اطراف پیت فاقد جابجایی عمده بوده ولی در داخل محدوده پیت معدن سنگ آهن شماره ۳ گل‌گهر دو قسمت در شمال غرب و جنوب شرق دارای تمرکز نقاط قرمز هستند که نشان دهنده احتمال وقوع ریزش در این قسمت‌ها است.



شکل ۹- نقاط PS موجود در اطراف و داخل پیت معدن سنگ آهن شماره ۳ گل‌گهر

برای بررسی میزان جابجایی در این معدن از تعداد ۱۲ تصویر برای پردازش استفاده شد. این تصاویر در یک بازه ۱۲ ماهه از ماهواره Sentinel-1A دریافت شدند. جهت تحلیل میزان جابجایی در دیواره شمال غربی معدن دو نقطه با نام‌های A و B در شکل (۷) انتخاب شدند که نقطه A در ناحیه دارای ریزش و نقطه B در منطقه مجاور آن انتخاب گردیدند و نمودار جابجایی - زمان این نقاط به صورت شکل (۸) رسم شد. این نمودار نشان‌دهنده میزان جابجایی دیواره در نقاط قرمز A رو به پایین و افزایش امکان ریزش بوده و همچنین نشان‌دهنده حرکت رو به بالا سطح زمین (نقطه B) بخاطر نیروهای القایی ناشی از حرکت رو به پایین نقاط A است.

۵- نتیجه گیری

با توجه به آنالیزها و پردازش‌های حاصل از تصاویر *SLC* ماهواره *Sentinel-1A* برای معدن سنگ آهن شماره ۳ گل‌گهر مشاهده گردید دو زون عمده ریزش در دیواره‌های شمال غرب و جنوب شرق موجود است. در این معدن دیواره جنوب غرب به مرز نهایی خود رسیده و به دلیل وجود جابجایی در پشت دیواره امکان ریزش در این ناحیه زیاد است. همچنین در دیواره شمال غربی نیز با توجه به پیشروی امکان ریزش وجود دارد که با توجه به نمودار میزان جابجایی دیواره شمال غربی معدن سنگ آهن شماره ۳ گل‌گهر در بازه ۱۲ ماهه، حدود ۲۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد که در صورت ادامه

این روند امکان ریزش در این محدوده نیز موجود است. در نتیجه، روش تداخل سنجی راداری در پیچه مصنوعی (*InSAR*) می‌تواند به عنوان ابزاری موثر برای شناسایی زون‌های دارای پتانسیل ریزش به کار گرفته شود. با توجه به توانمندی روش تداخل‌سنجی راداری (*InSAR*) در پیش جابجایی و شناسایی زون‌های ناپایدار، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، از ترکیب این روش با داده‌های زمینی مانند برداشت‌های *GPS*، داده‌های شیب‌سنجی و یا لیدار استفاده شود تا اعتبار نتایج افزایش یابد. همچنین، استفاده از روش یادگیری ماشین نیز برای تحلیل سری‌های زمانی جابه‌جایی، می‌تواند دقت پیش‌بینی نقاط شکست را بهبود بخشد.

۶- منابع

- [1]
- [2] Woźniak, H., & Nieć, M. (Eds.). (2009). *Zasady dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich dla celów likwidacji kopalń*. Fall, Fallowie, Grażyna i Jarosław.
- [3] Bazarnik, M. (2018). Slope stability monitoring in open pit mines using 3D terrestrial laser scanning. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 66, p. 01020). EDP Sciences.
- [4] Lang AM, Swindells CF, Higham GJ; (1994); "the realities of survey based open pit wall monitoring", *Aust Mining* 86:24-25
- [5] Corominas J, Moya J, Lloret A, Gili JA, Angeli MG, Pasuto A, Silvano S; (2000); "Measurement of landslide displacements using a wire extensometer", *Eng Geol* 55:149-166
- [6] Michoud, C., Bazin, S., Blikra, L. H., Derron, M. H., & Jaboyedoff, M. (2013). Experiences from site-specific landslide early warning systems. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(10), 2659-2673.
- [7] Eberhardt, E. (2008). Twenty-ninth Canadian Geotechnical Colloquium: The role of advanced numerical methods and geotechnical field measurements in understanding complex deep-seated rock slope failure mechanisms. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(4), 484-510.
- [8] Zavodni, Z. M., & Broadbent, C. D. (1978, May). Slope failure kinematics. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-78). ARMA.
- [9] ntrieri, E., & Gigli, G. (2016). Landslide forecasting and factors influencing predictability. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(12), 2501-2510.
- [10] Federico, A., Popescu, M., Elia, G., Fidelibus, C., Internò, G., & Murianni, A. (2012). Prediction of time to slope failure: a general framework. *Environmental Earth Sciences*, 66, 245-256.
- [11] FUKUZONO, T. (1985). A new method for predicting the failure time of slope. In *Proceedings, 4th Int'l. Conference and Field Workshop on Landslides* (pp. 145-150).

- [12] Petley, D. N., Bulmer, M. H., & Murphy, W. (2002). Patterns of movement in rotational and translational landslides. *Geology*, 30(8), 719-722.
- [13] Petley, D. N., Mantovani, F., Bulmer, M. H., & Zannoni, A. (2005). The use of surface monitoring data for the interpretation of landslide movement patterns. *Geomorphology*, 66(1-4), 133-147.
- [14] Rose, N. D., & Hungr, O. (2007). Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(2), 308-320.
- [15] Carlà, T., Intrieri, E., Di Traglia, F., Nolesini, T., Gigli, G., & Casagli, N. (2017). Guidelines on the use of inverse velocity method as a tool for setting alarm thresholds and forecasting landslides and structure collapses. *Landslides*, 14, 517-534.
- [16] Fell R, Hunger O, Leroueil S, Reimer W; (2000); "Geotechnical engineering of the stability of natural slopes, and cuts and fills in soil", In: Proceedings of conference geological engineering, Melbourne, Australia.
- [17] Casagli, N., Frodella, W., Morelli, S., Tofani, V., Ciampalini, A., Intrieri, E., ... & Lu, P. (2017). Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning. *Geoenvironmental Disasters*, 4, 1-23.
- [18] Hilley, G. E., Burgmann, R., Ferretti, A., Novali, F., & Rocca, F. (2004). Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. *Science*, 304(5679), 1952-1955.
- [19] Berardino, P., Costantini, M., Franceschetti, G., Iodice, A., Pietranera, L., & Rizzo, V. (2003). Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy). *Engineering geology*, 68(1-2), 31-51.
- [20] Strozzi, T., Farina, P., Corsini, A., Ambrosi, C., Thüring, M., Zilger, J., ... & Werner, C. (2005). Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. *Landslides*, 2, 193-201.
- [21] Tofani, V., Raspini, F., Catani, F., & Casagli, N. (2013). Persistent Scatterer Interferometry (PSI) technique for landslide characterization and monitoring. *Remote Sensing*, 5(3), 1045-1065.
- [22] Crosta, G. B., Hermanns, R. L., Frattini, P., & Valbuzzi, E. (2013). Landslide risk assessment and management: Introduction to the Special Issue. *Landslides*, 10(3), 333-336.
- [23] Wasowski, J., Bovenga, F., & Nitti, D. O. (2014). Satellite interferometry for monitoring unstable slopes and land subsidence in Europe. *Environmental Earth Sciences*, 73(3), 775-791.
- [24] Casagli, N., Frodella, W., Morelli, S., Tofani, V., Ciampalini, A., Intrieri, E., Raspini, F., Rossi, G., & Lu, P. (2017). Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning. *Geoenvironmental Disasters*, 4(1), 9.
- [25] Colesanti, C., & Wasowski, J. (2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering geology*, 88(3-4), 173-199.
- [26] Barra, A., Monserrat, O., Mazzanti, P., Esposito, C., Crosetto, M., & Scarascia Mugnozza, G. (2016). First insights on the potential of Sentinel-1 for landslides detection. *Geomatics, Natural Hazards and*

- Risk, 7(6), 1874-1883.
- [27] Mora, O., Álvarez, I. & Herrera, E.A. (2013). Slope Stability monitoring in Open Pit and Underground mine by means of Radar Interferometry. Proceeding of Slope Stability Conference, Brisbane, Australia
- [28] Zare Rashekouyeh H. Stability analysis and final slope design of the No. 3 Golgohar iron ore mine [Master's thesis]. Shahid Bahonar University of Kerman; 2006. (Persian).
- [29] Navalgund, R. R., Jayaraman, V., & Roy, P. S. (2007). Remote sensing applications: An overview. *current science*, 1747-1766.
- [30] Bouali, El Hachemi, Thomas Oommen, and Rüdiger Escobar-Wolf. "Mapping of slow landslides on the Palos Verdes Peninsula using the California landslide inventory and persistent scatterer interferometry." *Landslides* 15 (2018): 439-452.
- [31] Mouat, D. A., Mahin, G. G., & Lancaster, J. (1993). Remote sensing techniques in the analysis of change detection. *Geocarto International*, 8(2), 39-50.
- [32] Mishra, S., Shrivastava, P., & Dhurvey, P. (2017). Change detection techniques in remote sensing: A review. *International Journal of Wireless and Mobile communication for Industrial systems*, 4(1), 1-8.
- [33] Khorram, S., Van der Wiele, C. F., Koch, F. H., Nelson, S. A., & Potts, M. D. (2016). Principles of applied remote sensing (pp. 21-31). New York: Springer.
- [34] Chan, Y. K., & Koo, V. (2008). An introduction to synthetic aperture radar (SAR). *Progress In Electromagnetics Research B*, 2, 27-60.
- [35] Ghanadi H, Enayati B, Khesali E. Generation of digital elevation model using Sentinel-1 images and radar interferometry technique. *Sepehr: Scientific-Research Quarterly of Geographical Information*. 2019;27(108):109–21. (Persian)
- [36] Moretto, S., Bozzano, F., & Mazzanti, P. (2021). The role of satellite InSAR for landslide forecasting: Limitations and openings. *Remote sensing*, 13(18), 3735.
- [37] Hanssen, R. F. (2001). **Radar interferometry: Data interpretation and error analysis**. Dordrecht: Springer Science & Business Media.
- [38] Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20. [doi:10.1109/36.898661](https://doi.org/10.1109/36.898661)
- [39] Bamler, R., & Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. **Inverse Problems**, 14(4), R1–R54.



Investigating the unstable zones of Golgohar No. 3 iron ore mine using radar interferometric method

Jafar Abdollahisharif^{1*}; Mir Javad Gheybi¹; Amir Mohammad Aliabadizadeh²
1- Mining Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
2- Master of Science, Imperial College London, London, United Kingdom (UK).

Received: 10. April. 2025 Accepted: 19. June. 2025
(*Corresponding author: j.a.sharif@urmia.ac.ir)

Keywords

Landslide
Monitoring
InSAR
GolGohar
Sentinel-1A

Final English Extended Abstract

Summary

This study was conducted to monitor and identify landslide-prone zones in the walls of Golgohar Iron Ore Mine No. 3 employing the Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) method. Twelve Sentinel-1A satellite images were processed. The results indicate that this method can predict wall displacements in different zones.

Introduction

Open-pit mining involves various natural hazards that require special attention. One such hazard is the displacement of rock masses due to gravitational forces and the presence of joint and fracture systems in the mine walls. Landslides can occur worldwide in varying volumes, ranging from a few thousand to several million cubic meters, triggered by both natural and human-induced factors. Landslide events cause significant human and financial losses annually. Among human activities that can induce landslides is open-pit mining, which creates steeply inclined walls.

Methodology and Approaches

The best way to prevent collapses or mitigate their damage is to analyze mine walls through monitoring and identifying potential landslide zones. Geomechanical monitoring is crucial for predicting and preventing landslide hazards and rock wall failures. Monitoring operations are typically conducted utilizing two approaches: surface measurements and subsurface measurements. One surface monitoring method involves radar interferometry techniques, utilizing satellites to acquire and measure displacement data.

Results and Conclusions

The results revealed two major collapse zones in the northwest and southeast walls of the mine. The southwest wall has reached its final boundary, and due to detected displacements behind it, the risk of collapse in this area is high. Additionally, the northwest wall exhibits potential for collapse as mining progresses. Based on displacement graphs, the measured displacement for the northwest wall of Golgohar No. 3 iron ore mine was approximately 22 millimeters over 12 months. Therefore, the InSAR method demonstrates sufficient capability to identify zones at risk of collapse through displacement analysis and can be effectively utilized for this purpose.
