

بررسی عملکرد و دقت روش PSI در پردازش تصاویر راداری ماهواره Sentinel-1A به منظور پایش دیواره معادن روباز، مطالعه موردی، معدن روباز انگوران

افشین شیروانی^۱، غلامرضا شعاعی^{۲*}، ضیاالدین شعاعی^۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۲۳

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۶

چکیده

وقوع زمین لغزش در سراسر جهان، بنا بر علل طبیعی و انسانی، هر ساله خسارات جانی و مالی فراوانی را به بار می‌آورند. یکی از موارد ایجاد ناپایداری‌ها و احتمال وقوع لغزش، حفر معادن روباز درون زمین بوده که به واسطه ایجاد دیواره‌های پرشیب، خطر بروز لغزش در معادن روباز موردی جدا نشدنی از چرخه تولید و استخراج مواد معدنی شده است. بهترین راه برای جلوگیری و کنترل خسارات حاصل از ناپایداری دامنه‌ای و لغزش‌ها، مطالعه آن‌ها به منظور شناسایی و پایش لغزش‌ها می‌باشد. در بحث شناسایی و پایش لغزش‌ها، یکی از روش‌های موثر استفاده از روش‌های سنجش از دور می‌باشد. به دلیل توانایی روش سنجش از دور در شناسایی و پایش در وسعت زیاد و با هزینه پایین، این روش یکی از پرکاربردترین روش‌های شناسایی لغزش‌ها در جهان است. از جمله روش‌های سنجش از دور در شناسایی لغزش‌ها، استفاده از سنجنده‌های راداری، به ویژه رادار دریچه مصنوعی (SAR) بوده که عملکرد آن به صورت ارسال امواج الکترومغناطیس به سطح زمین و دریافت آن می‌باشد. از آنجایی که داده‌های سنجنده Sentinel-1A، که توسط سازمان فضایی اروپا (ESA) ارائه می‌شوند، به رایگان در دسترس بوده و سایر داده‌ها هزینه‌های بسیار بالایی دارند، با انتخاب معدن روباز سرب و روی انگوران، به بررسی چالش‌ها و امکان استفاده از این داده‌ها در پایش و شناسایی لغزش‌ها پرداخته شده است. نتایج بررسی این داده‌ها سپس با داده‌های زمینی مقایسه گردیدند. پردازش تصاویر با استفاده از روش تداخل سنجی پراکنده ساز پایدار (PSI) که بر اساس روش تداخل سنجی تفاضلی رادار دریچه مصنوعی (DInSAR)، توسط نرم افزار SNAP و پکیج StaMPS صورت گرفته است. بطور کلی به نظر می‌رسد که علیرغم آنکه استفاده از داده‌های سنجنده Sentinel-1A در دراز مدت قادر به تخمین مناسبی از مقدار جابجایی‌ها بر روی دیواره‌های معدن می‌باشد، اما به دلیل عدم توانایی در پایش تغییرات در مکان‌هایی که تغییرات

۱. دانش آموخته زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران. Shiravani_afshin@modares.ac.ir

۲. عضو هیات علمی بخش زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران. shoaei@modares.ac.ir

۳. عضو هیات علمی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران. zshoaei@gmail.com

* مسئول مکاتبات

توپوگرافی شدیدی حاکم است و یا جابجایی‌ها بسیار بزرگ هستند، استفاده از داده‌های این سنجنده کمک چندانی به بررسی و پیش لحظه‌ای ناپایداری دیواره‌های معادن روباز نخواهد کرد.

کلید واژه‌ها: لغزش در دیواره معدن، شناسایی زمین لغزش‌ها، رادار دریچه مصنوعی (SAR)، تداخل سنجی پراکنده ساز پایدار (PSI)،
sentinel-1A

۱. مقدمه

بر اساس مطالعات انجام شده توسط شبکه موضوعی ژئوتکنیک اروپا (European Geotechnical Thematic Network)، زمین لغزش به تنهایی ۱۷ درصد از بلایای طبیعی جهان را در بر گرفته است که بیشترین میزان خسارت آن در اروپا سالانه هفده میلیون دلار برآورد شده است (Koehorst et al., 2005). در ایران نیز در مورد خسارات ناشی از زمین لغزش، مطالعاتی صورت گرفته است که طبق گزارش، خسارت مربوط به ۴۹۰۰ زمین لغزش از بانک اطلاعاتی تا پایان شهریور ماه ۱۳۸۶، معادل ۱۲۶۸۹۳ میلیارد ریال برآورد شد است. همچنین در یک برآورد اولیه، سالیانه ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت‌های مالی از طریق زمین لغزش‌ها بر کشور تحمیل می‌شود و این در صورتی است که از بین رفتن منابع طبیعی، غیر قابل بازگشت به حساب آورده نشوند (پارسایی و علیمحمدی، ۱۳۹۱). کشور ایران با توجه به نوع زمین شناسی خود از لحاظ منابع معدنی یکی از غنی‌ترین کشورها بوده که استخراج، فرآوری، تولید و صادرات هزاران تن مواد معدنی همچون مس، سرب، روی، آهن، طلا و آلومینیوم نقش مهمی را در صنعت و اقتصاد کشور ایفا می‌کنند. از این رو با توجه به خسارات ایجاد شده توسط لغزش‌ها، و همچنین وجود معادن متعدد در کشور که ماده معدنی به صورت پیت‌های روباز استخراج می‌گردد، اهمیت پایش و شناسایی لغزش‌ها، می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های جانی و مالی در معادن روباز گردد.

پژوهش‌های متعددی در رابطه با بررسی جابجایی‌های سطحی، به ویژه زمین لغزش و حرکات دامنه‌ای، توسط داده‌های ماهواره‌ای راداری صورت گرفته است، کولسانتی و وازوفسکی (Colesanti & Wasowski, 2006)، مبانی و کاربرد تداخل سنجی رادار دریاچه مصنوعی (Interferometric Synthetic Aperture Radar) (InSAR) را در بررسی و شناسایی زمین لغزش‌ها را ارائه کرده‌اند، بارا و همکاران (Barra et al., 2016)، پتانسیل ماهواره Sentinel-1A را در تهیه نقشه زمین لغزش و پایش فعالیت زمین لغزش‌ها مورد

بررسی قرار داده‌اند و فیاچی و همکاران (Fiaschi et al., 2017)، به منظور بررسی پتانسیل ماهواره Sentinel-1A در تشخیص لغزش‌ها و پایش آن‌ها، اقدام به پردازش تصاویر این ماهواره کرده و همچنین نتایج را با نتایج حاصل از ماهواره‌های ERS و EnviSAT مقایسه شده است. همچنین در رابطه با لغزش و ناپایداری دیواره‌های معادن روباز نیز تحقیقاتی صورت گرفته است که مورا و همکاران (Mora et al., 2013)، نقشه ناپایداری و جابجایی دیواره معدنی در کشور اسپانیا به کمک روش تداخل سنجی رادار دریاچه مصنوعی با استفاده از داده‌های غیر رایگان ماهواره TerraSAR-X، که X باند می-باشد، تهیه کرده و نتایج نشان دهنده مناسب بودن این روش در شناسایی و تهیه نقشه ناپایداری بوده است. هارتوینگ (Hartwig, 2016)، به کمک داده‌های ماهواره TerraSAR-X و استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی رادار دریاچه مصنوعی (DInSAR) معدن آهن روبازی در برزیل را مورد بررسی قرار داده است. همچنین استایلس و همکاران (Styles et al., 2016)، تمپوریم و همکاران (Temporim et al., 2017) و کارلا و همکاران (Carlà et al., 2018) هر کدام نیز طی پژوهشی دیواره‌های معادن روباز را با استفاده از تداخل سنجی راداری مورد بررسی قرار داده‌اند.

روش‌های سنجش از دور، قابلیت شناسایی و پایش در فواصل زمانی و مستمر و در مساحت‌های قابل توجهی از زمین را دارا می‌باشد. این روش‌ها با استفاده از ابزارهایی در مقیاس‌های کوچک و بزرگ، صورت می‌گیرد. یکی از این ابزارها ماهواره‌های سنجش از دور می‌باشد که به لطف پیشرفت بشر در هوا فضا، ماهواره‌های راداری مانند Sentinel-1، امکان پایش در محدوده‌های وسیع را فراهم کرده است (Wasowski & Singhy, 2003). همچنین در دسترس بودن داده‌های برخی از این ماهواره‌ها با هزینه‌ای معقول و در برخی موارد به صورت رایگان، استفاده از آن نسبت به رادار زمینی ارجحیت پیدا کرده است. البته استفاده از رادار ماهواره‌ای این امکان را به وجود می‌آورد که مناطق مستعد لغزش در ابعاد

تصاویر SLC (Single Look Complex) ماهواره راداری Sentinel-1A که یک ماهواره راداری دریاچه مصنوعی می-باشد، استفاده شده که به صورت رایگان توسط سازمان فضایی اروپا ESA در دسترس قرار گرفته شده‌اند. به منظور شناسایی جابجایی‌های سطحی در دیواره معدن انگوران، این تصاویر به روش PSI توسط پکیج StaMPS و SNAP مورد پردازش قرار گرفته‌اند.

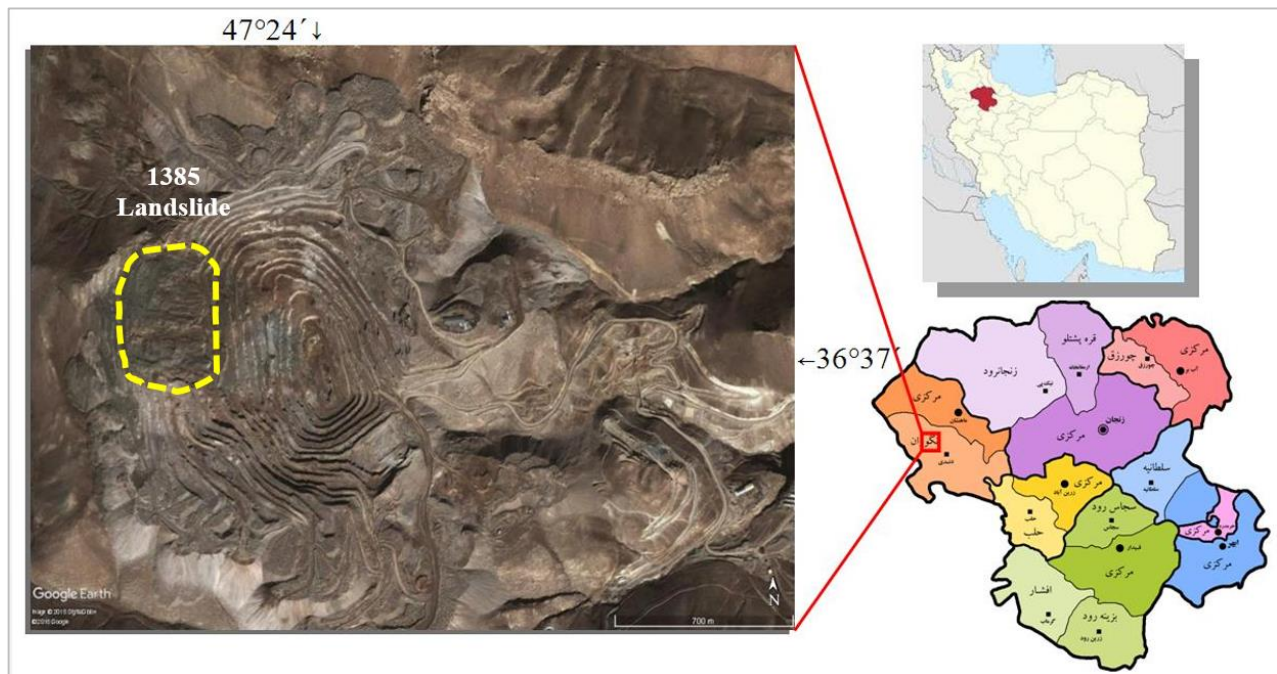
۲. منطقه مورد مطالعه

معدن سرب و روی انگوران با طول و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه شمالی و ۴۷ درجه و ۲۴ دقیقه شرقی (شکل ۱)، در ۱۳۰ کیلومتری غرب شهر زنجان در استان زنجان واقع شده است. نزدیک ترین شهر به آن دندی، در ۲۵ کیلومتری شرق معدن قرار دارد. استخراج از معدن انگوران در سال ۱۳۲۴ به صورت زیرزمینی آغاز گردید. در سال ۱۳۵۲ استخراج از پیت روباز شروع گردید که ذخیره این معدن در حدود ۱۷ میلیون تن ارزیابی شده است (جعفری و همکاران، ۱۳۸۵). در شهریور سال ۱۳۸۵ دیواره غربی این معدن دچار لغزش شده و به سمت پایین دست معدن حرکت کرده و موجب تعطیلی معدن برای یک دوره زمانی گردید. پس از رخداد این لغزش، هزینه مالی سنگینی به معدن وارد شده و همچنین در ادامه در سال‌های آتی لغزش به صورت مقطعی و دوره‌ای موجب وقفه در فرآیند استخراج و تحمیل هزینه اضافی شده است (شرکت همپا دانش شیدوش، ۱۳۹۴).

وسیع‌تری شناسایی گردیده (Colesanti & Wasowski, 2006) و در ادامه در صورت لزوم و امکان، از رادار زمینی برای پایش دقیق‌تر استفاده گردد.

با توجه به اهمیت لغزش در دیواره معادن روباز، شناسایی حرکات دامنه‌ای در این معادن بسیار ضروری می-باشد. این ضرورت زمانی کاربردی می‌شود که با شناسایی محل‌های مستعد لغزش و یا در حال لغزش، نقاط نیازمند به اجرای تمهیدات مهندسی به منظور جلوگیری از لغزش و یا پیشگیری از آن مشخص گردند و با به کارگیری این اقدامات می‌توان از بروز خسارت و یا افزایش آن جلوگیری کرد. برای شناسایی و پایش لغزش در دیواره معادن روباز روش-های متعددی به کار برده می‌شود. در میان روش‌های مختلف پایش و شناسایی حرکات دامنه در دیواره معادن روباز، روش-های سنجش از دور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند.

در این پژوهش به منظور بررسی قابلیت اطمینان و امکان پذیر بودن استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری C باند Sentinel-1 و پردازش آن‌ها به روش تداخل سنجی راداری پراکنده ساز پایدار (Persistent Scatterers Interferometry) (PSI) در شناسایی و پایش زمین لغزش در دیواره معادن روباز، نتایج حاصل از پردازش‌ها با داده‌های زمینی مقایسه گردیده است. بنابراین ابتدا نمودارهای جابجایی رسم شده از داده‌های قرائت شده رفلکتورهای قرارگرفته بر روی دیواره معدن انگوران توسط دوربین تئودولیت مورد بررسی قرار گرفته و سپس با نتایج پردازش تصاویر ماهواره‌ای مقایسه گردیده‌اند. همچنین نتایج حاصل با شواهد زمین شناسی مقایسه و مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق از

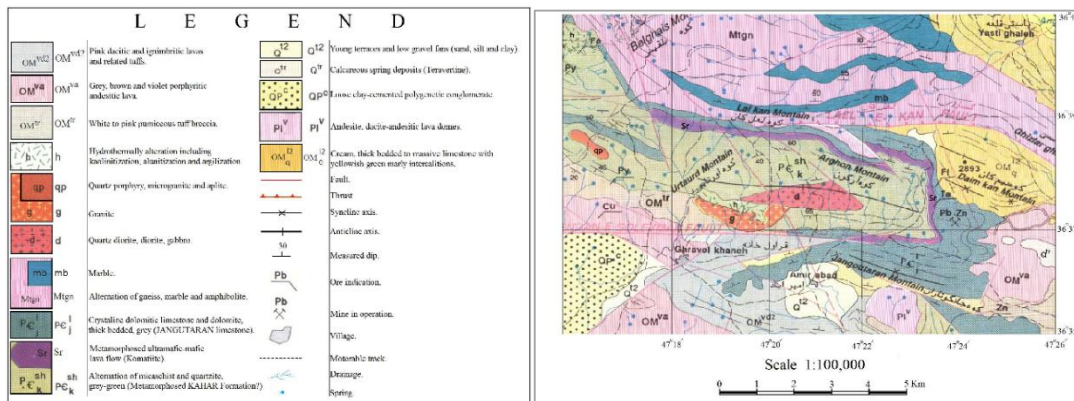


شکل ۱. موقعیت و تصویر هوایی منطقه مورد مطالعه (Google Earth, 2012).

می‌باشد. شیست‌ها که اصولاً جزو سنگ‌های ضعیف می‌باشند، در این منطقه تحت تاثیر دو عامل تکتونیکی و متعاقب آن دگرسانی و هوازدگی قرار گرفته و در محدوده تماس لایه‌ها و گسل‌های اصلی و فرعی و کلیه جداشدگی‌هایی که تحت نفوذ آب و مایعات هیدروترمال بوده‌اند به شدت سست و با سیمان ضعیف تظاهر دارند. پیشرفت هوازدگی ثانویه در آن‌ها به دلیل شرایط ساختمانی مناسب، نفوذ آب‌های سطحی موجب تشکیل کانی‌های رسی و افت شدید مقاومت برشی در نقاط تجمع رس‌ها بخصوص سطوح لایه بندی و امتداد گسل‌ها گردیده است (شرکت معدن زمین، ۱۳۸۵).

۱-۲ زمین شناسی

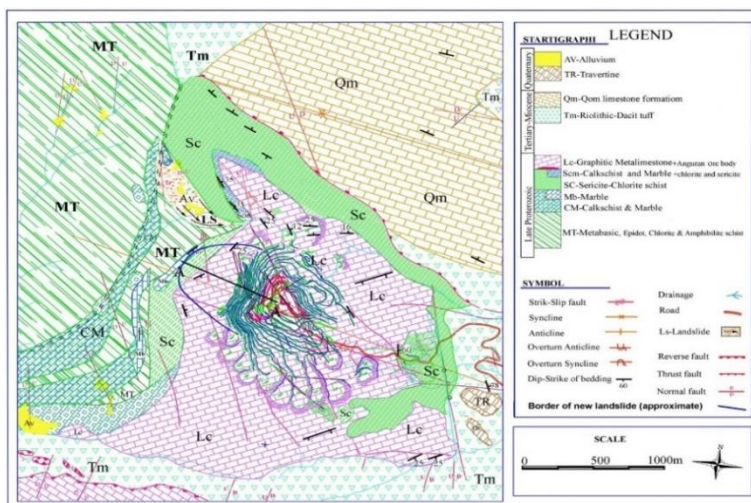
محدوده‌ای که منطقه مورد مطالعه را تحت تاثیر قرار می‌دهد در نقشه زمین شناسی چهار گوش تخت سلیمان قرار گرفته است (شکل ۲). مجموعه کمپلکس‌های زمین شناسی در منطقه شامل سری کامل سنگ‌های ولکانیکی درونی و بیرونی سنگ‌های رسوبی و مجموعه سنگ‌های دگرگونی می‌باشد (شکل ۳). محدوده دیواره غربی معدن انگوران که در سال ۱۳۸۵ دچار ناپایداری شده است، شامل مجموعه‌ای از آهک-های هوازده و دارای درزه‌های انحلالی بر روی لایه‌های شیست کریستاله، شیست‌های کربناته و شیست‌های مینیرالیزه



شکل ۲. موقعیت زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ تحت سلیمان، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۱).

بندی اصلی می باشد (برهانی تخته جان و همکاران، ۱۳۹۴). از سویی دیگر شیست ها به دلیل سهولت نفوذ آب که در امتداد سطوح جدا شده آن ها، دارای استعداد شدید هوازدهی بوده و بدلیل ترکیب کانی های اولیه، تشکیل کانی های رسی در آن ها بسیار معمول می باشد (شرکت معدن زمین، ۱۳۸۵).

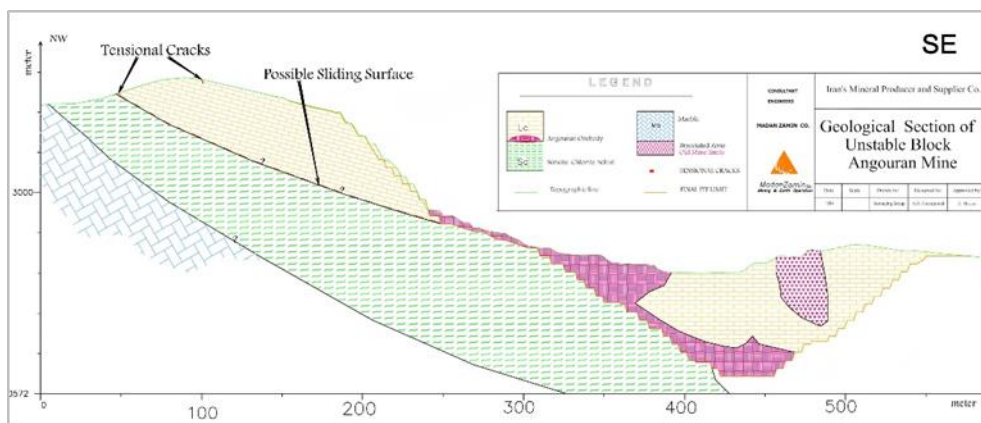
بطور کلی دیواره های معدن از آهک و شیست تشکیل شده است. این آهک ها، هم به صورت تازه و هم غیر هوازده دارای پایداری خوبی می باشند. ولی متناسب با پیشرفت هوازدهی پایداری آن ها کاهش می یابد. پایداری آن ها به شدت تحت تاثیر میزان و جهت شیستوزیته، فولیشن و لایه



شکل ۳. موقعیت زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ تحت سلیمان، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۱).

شیست در هوازده شدن و ترکیب کانی های اولیه آن، نفوذ آب علاوه بر افزایش میزان فشار آب منفذی در سطح دولایه آهکی و شیستی، دگرسانی شیست به کانی های رسی در سطح لایه آهکی موجب تشکیل لایه های هوازده از کانی های رسی در زیر لایه آهکی شده است. تشکیل این لایه در رخداد لغزش سال ۸۵ یکی از عوامل اصلی بوده است و موجب گردیده است که دیواره آهکی بر روی شیست حرکت کرده و به سمت داخل معدن پیشروی کند (شرکت معدن زمین، ۱۳۸۵).

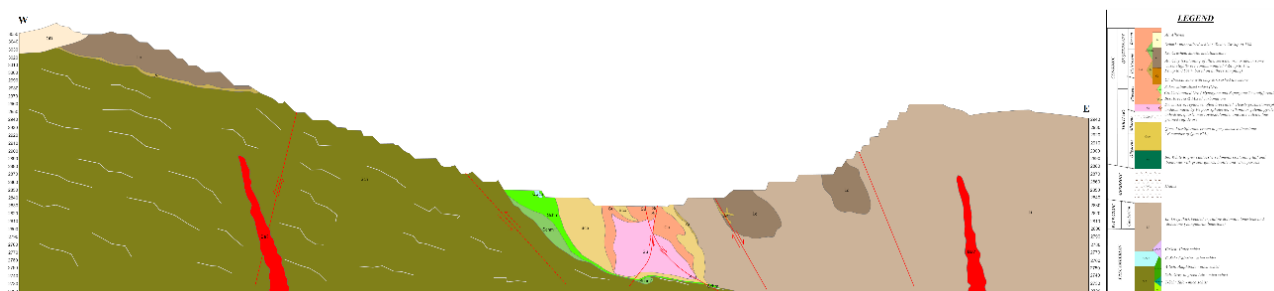
۲-۲ لغزش در دیواره غربی معدن
شروع لغزش ها در دیواره غربی معدن از سال ۱۳۸۵ آغاز شده است. با توجه به نقشه و مقطع زمین شناسی سال ۸۵ معدن (شکل ۳ و ۴)، دیواره غربی متشکل از لایه های آهکی که بر روی لایه های شیستی قرار گرفته اند، بوده است. با توجه به این نکته که شیب لایه به سمت درون معدن می باشد و همچنین خصوصیت شیستی ها در نفوذ پذیری نسبت به آب، بارش های جوی از حوضه بالا دست دیواره غربی به زیر لایه آهکی جریان پیدا می کند. با توجه به استعداد بالای



شکل ۴. مقطع زمین شناسی معدن انگوران در محدوده لغزش (معدن زمین، ۱۳۸۵).

لغزش قدیمی و متعاقباً برداشت توده‌های جابجا شده، به تدریج شیست در پله‌های دیواره غربی رخنمون پیدا کرده و شکل کنونی دیواره غربی را ایجاد کرده است.

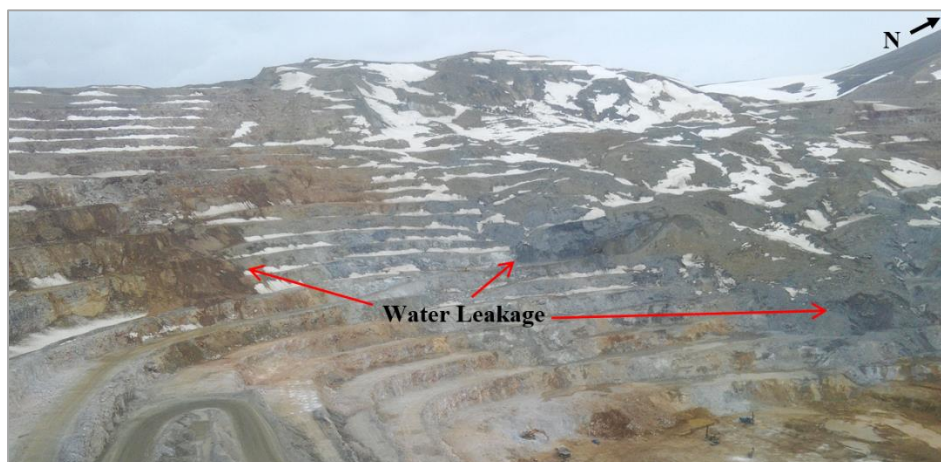
پس از رویداد این لغزش و پس از عملیات برداشت و سبک سازی توده لغزشی، به تدریج لایه‌های آهکی لغزیده، برداشته شده‌اند. با مقایسه نقشه و مقطع زمین شناسی سال ۸۵ (شکل ۴ و ۳) و حال (شکل ۵) و ناپایداری دیواره در محدوده



شکل ۵. مقطع زمین شناسی شرقی غربی معدن انگوران (اقتباس از نقشه ۱:۲۰۰۰ زمین شناسی معدن انگوران، شرکت معدن زمین، ۱۳۹۶).

موجب تشدید هوازدگی در کنتاکت میان شیست و روباره آهکی شده که موجب بروز جابجایی‌هایی شده است. همچنین وجود چشمه‌هایی در پله‌های پایینی و میانی این دیواره شیستی، نشان دهنده نفوذ آب از بالا دست دیواره در محدوده حوضه آبریز به لایه شیستی و انتقال آن به معدن می‌باشد (شکل ۶).

دیواره غربی به صورت فصلی جابجایی از خود نشان می‌دهد، به شکلی که در فصل زمستان، بارش برف در پاشنه‌ها و یخبندان مانع از جابجایی شده و با شروع فصل بهار و افزایش دما و در پی آن ذوب برف و یخ، پله‌ها در معرض هوازدگی قرار گرفته و از حالت سنگی خارج شده و به صورت روان به حرکت در می‌آیند. در قسمت شمالی تر نیز آب از حوضه شمالی معدن در سطح فوقانی لایه شیستی جریان پیدا کرده و



شکل ۶. خروج آب از دیواره غربی معدن انگوران.

۳. مواد و روش

۳-۱. نحوه محاسبه جابجایی با استفاده از داده‌های قرائت شده توسط دوربین تئودولیت داده‌های حاصل از قرائت توسط دوربین تئودولیت به صورت برداشت های مختصات x, y, z (طول، عرض و ارتفاع) از ایستگاه‌های اندازه‌گیری مشخصی در سیستم مختصات محلی تهیه می‌گردند. این قرائت‌ها به صورت دوره-ای و در بازه‌های زمانی معینی (برای مثال ماهانه) تکرار می‌شوند. محاسبه جابجایی با استفاده از این داده‌ها به چند صورت جابجایی افقی، جابجایی در جهت شیب و جابجایی

عمودی می‌باشد. طبق رابطه‌های (۱) و (۲) و (۳) اختلاف مقدار طول، عرض و ارتفاع هر ایستگاه در دو قرائت متوالی محاسبه می‌گردد. سپس با استفاده از این مقادیر بر اساس معادله (۴) میزان جابجایی افقی محاسبه می‌شود. در این معادله D برابر با میزان جابجایی در سطح افق و ΔE اختلاف طول و ΔN اختلاف عرض حاصل از برداشت‌های متوالی می‌باشد. مطابق با شکل (۷) جابجایی محاسبه شده نمایش داده شده است. در ادامه طبق معادله (۵) جابجایی شیبی هر ایستگاه در بازه دو قرائت متوالی نیز محاسبه می‌گردد. که DS میزان جابجایی شیبی و D جابجایی در سطح افق و ΔH اختلاف ارتفاع حاصل از قرائت متوالی می‌باشد.

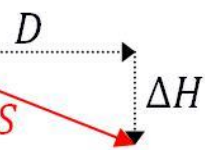
$$\Delta E = E_i - E_{i-1} \quad (1)$$

$$\Delta N = N_i - N_{i-1} \quad (2)$$

$$\Delta H = H_i - H_{i-1} \quad (3)$$

$$D = \Delta E^2 + \Delta N^2 \quad (4)$$

$$DS = D^2 + \Delta H^2 \quad (5)$$



شکل

۷.

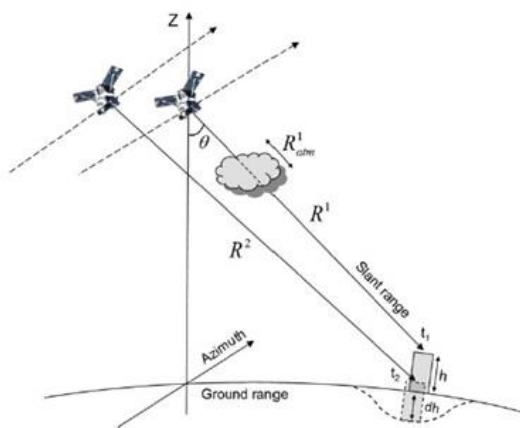
نمودار نحوه اندازه‌گیری جابجایی افقی و شیبی.

۳-۲. رادار دریاچه مصنوعی

رادار دریاچه مصنوعی (Synthetic Aperture Radar) یک سیستم فعال بر پایه امواج الکترومغناطیس می‌باشد که به

منظور پایش حرکات دینامک سطح زمین به صورت پیوسته و قابل اطمینان در مقیاس جهانی ایجاد گردیده است. این سیستم عکس برداری به صورت دید از کنار بوده و بر اساس ارسال پالس توسط رادار نصب شده بر روی پلتفرم اقدام به جمع آوری اطلاعات می‌کند. رادار پالس‌های الکترومغناطیس با قدرت بالا را به سمت زمین ارسال کرده و انعکاس سیگنال‌های بازتاب شده را به صورت مداوم دریافت می‌کند. ثبت منسجم و ادغام شده‌ی سیگنال‌های دریافت شده، شرایط را فراهم می‌سازد که یک دریچه‌ی مجازی بسیار بزرگتر از طول فیزیکی آنتن ایجاد گردد. این خصوصیت SAR که موجب نام گذاری این رادار به "دریچه مصنوعی" گردیده است، این امکان را به آن می‌دهد تا یک رادار با قابلیت عکس برداری باشد (et al., 2013 Moreira). رادار دریچه مصنوعی امواج منعکس شده از سطح زمین را دریافت کرده و آن‌ها را به صورت ماتریس‌های دو بعدی از اعداد مختلط (فاز و دامنه)، به شکل نقشه‌های تصویری، تولید می‌کند و ابعاد این تصویر، مسیر پرواز ماهواره (Azimuth Direction) و عمود بر مسیر پرواز ماهواره (Ground Range) می‌باشند و همچنین خط دید سنجنده ماهواره را تا هر نقطه روی زمین، خط دید ماهواره (LOS) (Line of sight) می‌نامند. تصاویر دیجیتال SAR به شکل موزائیک‌هایی از المان‌های کوچک تصویری (پیکسل) می‌باشند که هر پیکسل شامل محدوده کوچکی از سطح زمین است. هر پیکسل از اعداد مختلطی از دامنه و فاز تشکیل شده است که مربوط به امواج ماکروویو بازگشتی از سطح تمام پراکنده سازها مانند سنگ، گیاهان و ساختمان‌ها می‌باشد که با موقعیت قرار گیری پیکسل‌ها روی سطح زمین در ارتباط است

رادار دریچه مصنوعی بر روی پلتفرم‌های فضاپرد، هواپرد و زمینی قرار می‌گیرند. مهم‌ترین روش (تکنیک) برای به کارگیری داده‌های SAR در زمین شناسی، تداخل سنجی رادار دریچه مصنوعی (InSAR) که بر اساس محاسبه اختلاف فاز بین دو تصویر راداری از دو زمان متفاوت انجام می‌گیرد، می‌باشد (Yonezawa et al., 2012). زمانی که دو و یا چند تصویر SAR از یک ناحیه از سطح زمین برداشت شوند، می‌توان تداخل سنجی را اعمال کرد، به عنوان مثال تداخل سنجی مربوط به فاز که حاصل از اختلاف فاز می‌باشد. تداخل سنجی فاز با طول موج ارسالی (λ) و اختلاف مسافت بین سنجنده و هدف زمینی در دو زمان متفاوت از عبور ماهواره ($dR=R1-R2$) متناسب است (شکل ۸). این اختلاف مسافت خود نیز به ارتفاع هدف زمینی (h) نسبت به سطح مرجع (dR_{topo})، میزان جابجایی هدف زمینی (dh) که در بازه زمانی بین دو عبور ماهواره (dR_{disp}) رخ داده است، تغییرات شاخص بازتاب پذیری (Refractivity Index Changes) (dR_{atm}) که به دلیل وجود جو می‌باشد و همچنین منابع ایجاد عدم همبستگی (Decorrelation Sources) (dR_{noise}) وابسته می‌باشد. با استفاده از داده‌های تداخل سنجی فاز، امکان تولید تصاویر ۳ بعدی از سطح زمین نیز وجود دارد. برای این منظور باید با استفاده از یک تصویر DEM توپوگرافی را از تداخل نگار (Interferogram) فازی جداسازی کرده و سپس این امکان فراهم می‌گردد تا جابه‌جایی سطحی زمین بین زمان تصویر برداری راداری در راستای دید (LOS) سنجنده، (dR_{disp})، قابل اندازه‌گیری و تشخیص باشد. توضیحات ذکر شده مبانی پایه تداخل سنجی تفاضلی (DInSAR) می‌باشد (Hanssen, 2001).



شکل ۸. طرحی از نحوه برداشت دو تصویر از یک مدار متوالی از یک هدف زمینی، R فاصله سنجنده تا هدف زمینی، h ارتفاع هدف زمینی و dh جابجایی هدف زمینی (Wasowski & Bovenga, 2014).

$$\phi = 2\pi \frac{dR}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} (dR + dR_{topo} + dR_{disp} + dR_{atm} + dR_{noise}) \quad (6)$$

در

اکثر

پیکسل‌های یک تصویر ایجاد می‌گردد. زمانی که یک تصویر راداری شکل می‌گیرد مقدار نشان داده شده در یک پیکسل حاصل جمع بازتابش از تعدادی پراکنده ساز (Persistent Scatterers) از سطح زمین بوده و زمانی که این پراکنده سازها در بین عبورهای ماهواره حرکت کرده و یا جابجا شده، مانند پوشش گیاهی که در اثر رشد جابجا می‌شوند، فاز موج بازگشتی از پراکنده سازها به صورت تصادفی بوده که منجر به ایجاد عدم همبستگی خواهند شد (Hooper et al., 2007). اما اگر زمانی که یک پراکنده ساز که نسبتاً پایدار بوده و حرکت کمتری نسبت به دیگر پراکنده سازها داشته باشد، از دیگر پراکنده سازهای اطراف خود روشن تر به نظر رسیده و باز تاب امواج به صورت قوی تری صورت می‌گیرد. از این رو، تفاوت ایجاد شده در فاز امواج بازتابی حاصل از جابجایی رخ داده در بین عبورهای ماهواره، کاهش یافته و عدم همبستگی اندک خواهد بود. این پراکنده سازهای پایدار می‌توانند به شکل یک تنه درخت و یا یک تخته سنگ بزرگ باشند. با توسعه روش PSI مشکلات ناشی از وجود پوشش گیاهی و یا دیگر عوامل تا حد بسیار زیادی کاهش یافته است. طبق نظر Hooper به منظور تولید تداخل نگار با استفاده از

با توجه به معادله (۶) حساسیت فاز به جابه‌جایی برابر با $\lambda/2$ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در صورتی که طول موج باندهای سنجنده بین ۳ تا ۲۰ سانتی متر متغییر باشند، اندازه گیری‌های جابجایی DInSAR دقتی در حدود میلی متر را دارا می‌باشند (Colesanti & Wasowski, 2006). با این وجود فاکتورهای متعددی در ایجاد محدودیت در به کارگیری DInSAR در اندازه‌گیری و شناسایی حرکات و پایش زمین لغزش ایجاد می‌کنند (Bovenga et al., 2006). اکثر محدودیت‌های به وجود آمده ناشی از عدم همبستگی تغییرات در هدف‌های پراکنده ساز (کاهش همبستگی) و آشفتگی جوی می‌باشد (Hanssen, 2001).

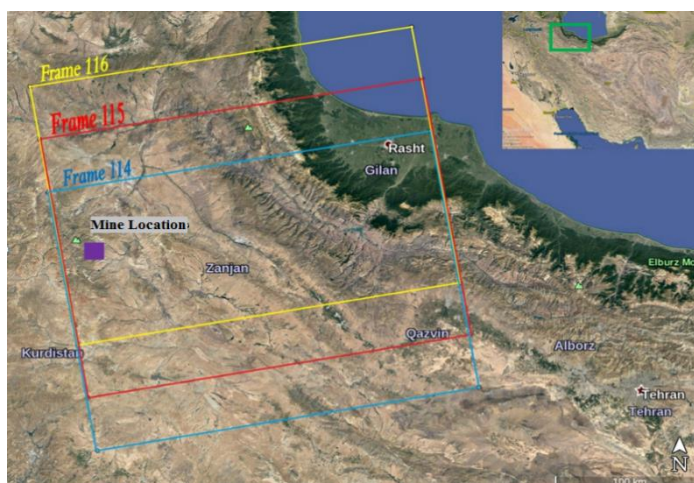
۳-۳. روش پراکنده ساز پایدار PSI

روش PSI یکی از روش‌های تداخل سنجی چند زمانی می‌باشد. با توجه به این که روش‌های قدیمی تداخل سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) در ایجاد نتایج با همبستگی مناسب در اکثر تحقیقات گذشته با شکست مواجه شده است، این روش توانسته تا حدود زیادی نقایص روش‌های قدیمی را بر طرف کند. به دلیل وجود پوشش گیاهی روش‌های قدیمی تداخل سنجی تفاضلی راداری، عدم همبستگی زمانی

۳-۴. تصاویر ماهواره‌ای SAR

در راستای پروژه کوپرنیک (Copernicus Programme) سازمان فضایی اروپا (ESA) اولین ماموریت از پنج سری ماموریت‌های Sentinel، ماموریت Sentinel-1 می‌باشد که از دو ماهواره Sentinel-1A و Sentinel-1B تشکیل شده است. سنجنده این ماهواره از نوع بانند C با فاصله زمانی تصویر برداری ۱۲ روزه می‌باشد که بعد از پرتاب ماهواره Sentinel-1B به ۶ روز کاهش یافته است. تصاویر استفاده شده در این پروژه تماماً از ماهواره Sentinel-1A بوده که به صورت رایگان از سازمان فضایی اروپا دریافت گردیده است. تصاویر استفاده شده در این تحقیق، تصاویر سنجنده راداری دریچه مصنوعی (SAR) مربوط به ماهواره Sentinel-1A می‌باشند و با توجه به منطقه مورد مطالعه، تصاویر مورد نیاز در گذر بالارو (Ascending Path) اخذ گردیده است. با توجه به این نکته که برداشت تصاویر در محدوده ایران توسط ماهواره Sentinel-1 از تاریخ اکتبر سال ۲۰۱۴ میلادی شروع شده است، تصاویر اخذ شده از این تاریخ تا اکتبر ۲۰۱۶ از گذر بالارو می‌باشند. تصاویر اخذ شده به فرمت SLC بوده و از پلاریزاسیون عمودی آن‌ها استفاده شده است. تصاویر بالا گذر از گذر شماره ۱۰۱ و فریم‌های ۱۱۴، ۱۱۵ و ۱۱۶ از تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۱۲ تا ۲۰۱۶/۱۰/۲۵ به تعداد ۳۱ تصویر، اخذ و دانلود شده است. موقعیت فریم تصاویر دریافت شده و همچنین محدوده پردازش شده در شکل (۹) قابل مشاهده می‌باشد.

این روش و توسط پکیج StaMPS، حداقل ۱۲ الی ۱۳ تصویر SAR مورد نیاز خواهد بود (Hooper et al., 2007). بنا به نظر وازوفسکی و بوونگا (Wasowski & Bovenga, 2014) تمرکز تحقیقاتی که نتایج با کیفیت و قابل قبولی داشته‌اند، بیشتر در مناطق هموار و مناطق دارای فرونشست بوده است و تحقیقات کمتری که نتایج آن‌ها در مورد تغییرات زمینی ناپایداری‌ها و زمین لغزش‌ها بوده است. عوامل و ویژگی‌های متعددی می‌توانند نتایج حاصل از پردازش تصاویر به روش PSI را تحت تاثیر قرار دهند (Hanssen, 2005; Mahapatra et al., 2012). از این عوامل می‌توان به داده‌ها و تصاویر راداری و خصوصیات آن‌ها مانند، حساسیت و کیفیت تصاویر، تعداد پراکنده سازهای پایدار (PS)، اشاره کرد. عامل حساسیت ارتباط مستقیمی با طول موج رادار تولید کننده تصاویر داشته که در شناسایی مقادیر جابجایی و افزایش تعداد PS‌ها تاثیر گذار می‌باشد (Bovenga et al., 2012). همچنین یکی از مشکلات کاربرد روش PSI در پایش ناپایداری‌ها و زمین لغزش‌ها، اندازه و شدت و مقدار جابجایی آن‌ها بوده که در لغزش‌های با وسعت زیاد و با جابجایی و شدت کم، این مشکل تاثیر کمتری ایجاد می‌کند (Bovenga et al., 2006). علاوه بر آن، وجود پستی و بلندی‌های متعدد و منطقه ای می‌تواند موجب ایجاد فازهای اتمسفری اضافی شده که موجب کاهش موفقیت این روش در اینگونه مناطق شده است (Hanssen, 2001).



شکل ۹. موقعیت معدن، فریم‌های تصاویر بر روی تصویر هوایی (Google Earth, 2012).

جدول ۱. تاریخ برداشت تصاویر ماهواره ای و نوع گذر و فریم آن‌ها.

No.	Date		Frame	Date		Frame
1	12/10/2014	1393/07/20	114	17	24/11/2015	1394/09/03
2	29/11/2014	1393/09/08		18	18/12/2015	1394/09/27
3	23/12/2014	1393/10/02		19	11/01/2016	1394/10/21
4	16/01/2015	1393/10/26		20	04/02/2016	1394/11/15
5	09/02/2015	1393/11/20		21	28/20/2016	1394/12/09
6	05/03/2015	1393/12/14		22	23/03/2016	1395/01/04
7	29/03/2015	1394/01/09		23	16/04/2016	1395/01/28
8	22/04/2015	1394/02/02		24	10/05/2016	1395/02/21
9	16/05/2015	1394/02/26		25	03/06/2016	1395/03/14
10	06/06/2015	1394/03/19		26	09/07/2016	1395/04/19
11	03/07/2015	1394/04/12		27	21/07/2016	1395/04/31
12	27/07/2015	1394/05/05		28	14/08/2016	1395/05/24
13	20/08/2015	1394/05/29		29	07/09/2016	1395/06/17
14	13/09/2015	1394/06/22		30	01/10/2016	1395/07/10
15	07/10/2015	1394/07/15		116	31	25/10/2016
16	31/10/2015	1394/08/09				

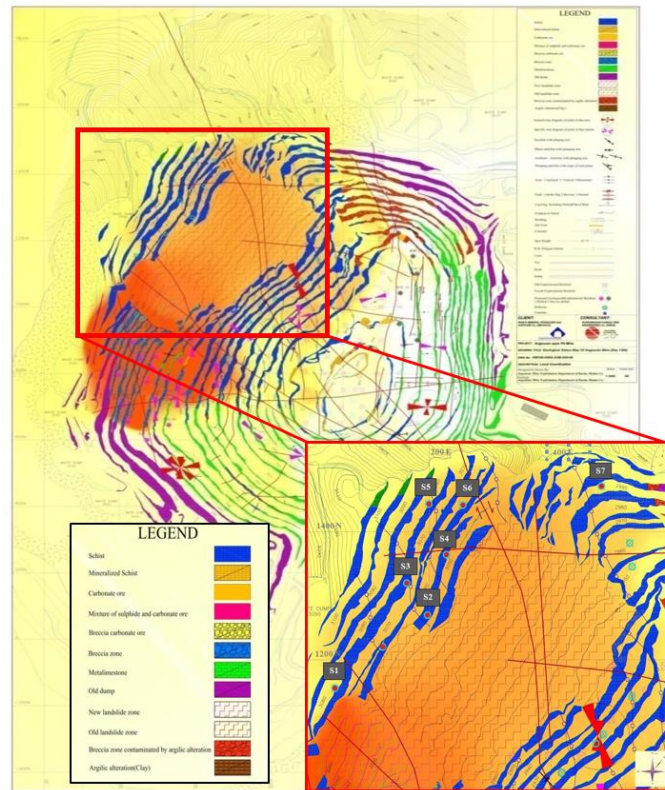
۴. بحث و نتایج

زمانی مختلفی صورت گرفته‌اند. فرمت این داده‌ها به صورت برداشت‌های طول، عرض و ارتفاع تعدادی ایستگاه در دیواره غربی معدن و در پله‌های بالایی این دیواره بوده است. برداشت‌های انجام شده در ماه‌های مختلف تعداد متفاوتی داشته است به صورتی که در برخی از ماه‌ها ۳ برداشت در طول ماه انجام شده است و در برخی از آن‌ها مانند بهمن ماه ۱۳۹۴، هفت قرائت در یک ماه صورت گرفته است. بعد از

۱-۴. نمودارهای جایجای حاصل از قرائت دوربین تئودولیت داده‌های حاصل از قرائت توسط دوربین تئودولیت استفاده شده از تیر ماه سال ۱۳۹۳ تا اسفند ۱۳۹۴ برداشت شده‌اند (شرکت معدن زمین، ۱۳). برداشت‌ها به صورت قرائت‌هایی در طول ماه می‌باشند که این برداشت‌ها در هر ماه در فواصل

ها به صورت جابجایی ماهیانه تهیه گردند. محل قرار گیری رفلکتورهای قرائت شده توسط دوربین تئودولیت در دیواره غربی معدن به صورت ایستگاه‌هایی شماره گذاری شده که در شکل (۱۰) قابل مشاهده اند.

محاسبات صورت گرفته برای هر ایستگاه در هر دو قرائت متوالی، مقادیر محاسبه شده شامل جابجایی افقی، شیبی و عمودی مربوط به قرائت‌های یک ماه با یکدیگر جمع شده است تا یک مقدار از این سه نوع جابجایی محاسبه و نمودار-



شکل ۱۰. نقشه معدن انگوران به همراه موقعیت ایستگاه‌های قرائت شده توسط دوربین تئودولیت در محدوده لغزشی (اقتباس از نقشه ۱:۲۰۰۰ معدن سرب و روی انگوران، شرکت معدن زمین، ۱۳۹۴).

جابجایی در جهت شیب این ایستگاه‌ها در شکل (۱۱) قابل مشاهده می‌باشد.

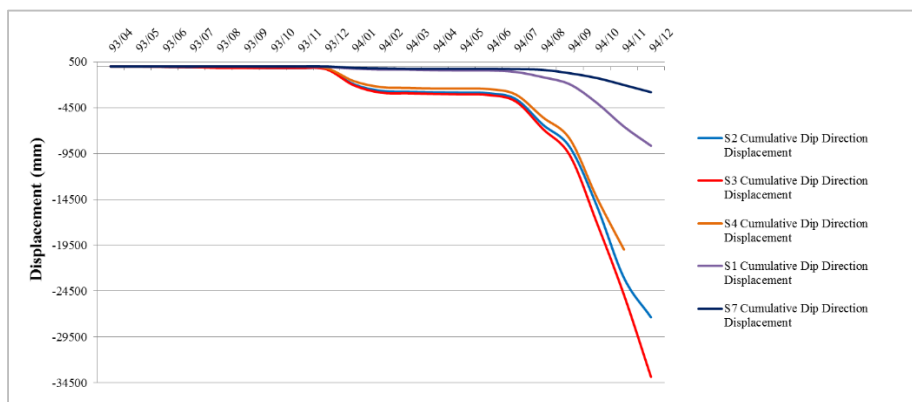
طبق این نمودار سه ایستگاه S2، S3 و S4 بیشترین مقادیر جابجایی را داشته و دو ایستگاه S1 و S7 نیز با توجه به قرار گرفتن در محدوده جانبی توده لغزشی، مقادیری به نسبت کمتر از سه ایستگاه ذکر شده از خود نشان می‌دهند ولی به مانند سه ایستگاه دیگر از یک روند جابجایی پیروی می‌کنند. دو ایستگاه S5 و S6 که در پله‌های بالاتر قرار گرفته اند، در بازه زمانی قرائت، جابجایی از خود نشان نداده اند. بیشترین مقدار جابجایی در بازه زمانی مورد مطالعه مربوط به سه

از آنجایی که در این مقاله سعی در بررسی چالش‌های استفاده و مقایسه نتایج پایش زمینی جابجایی‌ها با داده‌های ماهواره‌های راداری است، از بررسی علل و عوامل موثر در ایجاد این ناپایداری‌ها و حرکات دامنه‌ای صرف نظر شده است.

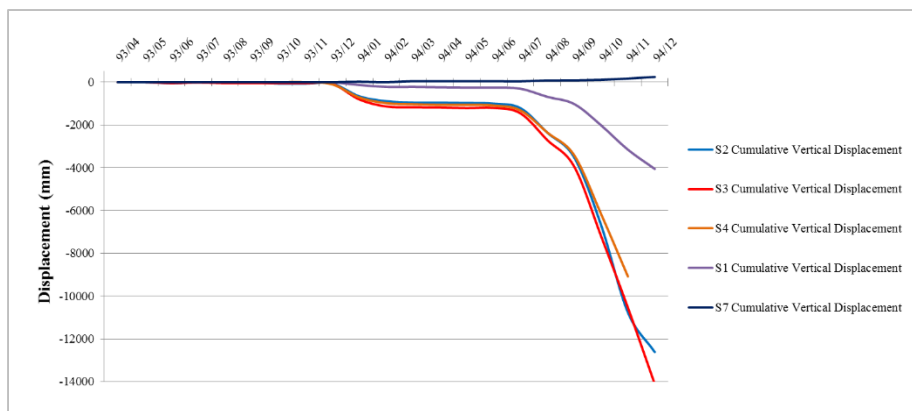
ایستگاه‌های S2، S3 و S4 در محدوده مرکزی دیواره غربی و ایستگاه‌های S1 و S7 نیز در محدوده جانبی قرار گرفته اند. همچنین دو ایستگاه S5 و S6 نیز در پله‌های بالاتری نسبت به دیگر ایستگاه‌ها واقع شده اند. نمودار مقادیر

کند. اما ایستگاه S7 نسبت به دیگر ایستگاه‌ها جابجایی عمودی از خود نشان می‌دهد. مقادیر بیشترین جابجایی عمودی تجمعی نیز به ترتیب با ۱۳، ۱۱ و ۸ متر مربوطه به ایستگاه‌های S3، S2 و S4 می‌باشد.

ایستگاه S3، S2 و S4 بوده که به ترتیب ۳۳ و ۲۷ و ۱۹ متر می‌باشد. همچنین در شکل (۱۲) نمودار جابجایی عمودی تجمعی ایستگاه‌ها نشان داده شده است. در این نمودار، جابجایی‌های ایستگاه‌های مختلف، از یک الگو پیروی می‌



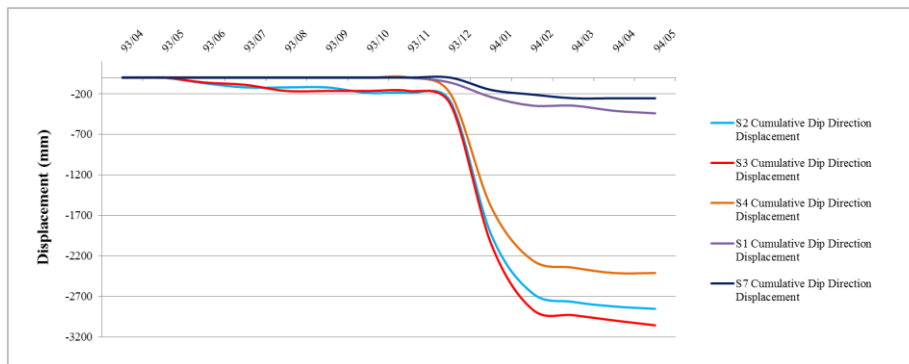
شکل ۱۱. نمودار جابجایی در جهت شیب تجمعی ایستگاه‌های قرائت شده توسط دوربین تئودولیت در بازه زمانی تیر ۱۳۹۳ تا اسفند ۱۳۹۴ (مقادیر جابجایی منفی نشان دهنده کاهش ارتفاع می‌باشند).



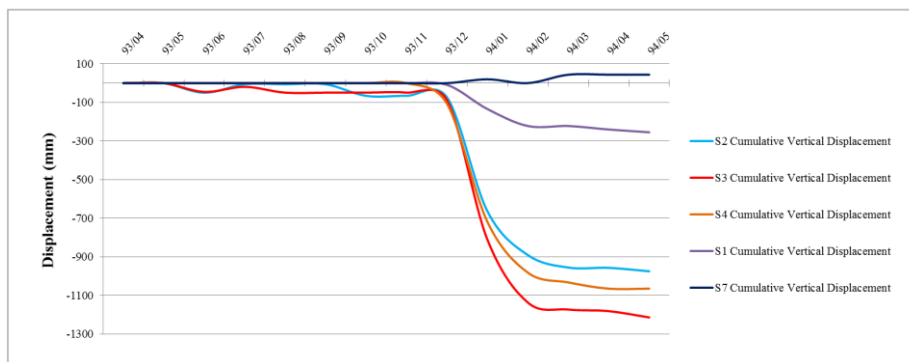
شکل ۱۲. نمودار جابجایی عمودی تجمعی ایستگاه‌های قرائت شده توسط دوربین تئودولیت در بازه زمانی تیر ۱۳۹۳ تا اسفند ۱۳۹۴ (مقادیر جابجایی منفی نشان دهنده کاهش ارتفاع می‌باشند).

تا اسفند ۱۳۹۴ افزایش چشمگیری در میزان جابجایی مشاهده می‌شود. این بازه زمانی (مهر تا اسفند ۱۳۹۴) نیز مرحله دوم جابجایی نامگذاری شده است. با توجه به بزرگی مقادیر جابجایی در مرحله دوم نسبت به مرحله اول و برای درک بهتر، نمودار جابجایی در جهت شیب و عمودی مرحله اول در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) رسم گردیده‌اند.

با بررسی شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌گردد که از تیر تا بهمن ماه ۱۳۹۳، جابجایی قابل توجهی صورت نگرفته است. اما بعد از بهمن ماه ۱۳۹۳ تا خرداد ۱۳۹۴، شاهد یک افزایش جابجایی بوده و جابجایی رخ داده در این بازه زمانی جابجایی مرحله اول نامیده شده است. سپس از خرداد تا شهریور ماه ۱۳۹۴ نیز نمودار جابجایی ثابت بوده ولی از مهر



شکل ۱۳. نمودار جابجایی در جهت شیب تجمعی ایستگاه‌های قرائت شده توسط دوربین تئودولیت در مرحله اول جابجایی در بازه زمانی تیر ۱۳۹۳ تا مرداد ۱۳۹۴ (مقادیر جابجایی منفی نشان دهنده کاهش ارتفاع می‌باشند).



شکل ۱۴. نمودار جابجایی عمودی تجمعی ایستگاه‌های قرائت شده توسط دوربین تئودولیت در مرحله اول در بازه زمانی تیر ۱۳۹۳ تا مرداد ۱۳۹۴ (مقادیر جابجایی منفی نشان دهنده کاهش ارتفاع می‌باشند).

دیگر PS‌های انتخاب شده در قسمت بیرونی دیواره‌ها قرار گرفته‌اند.

PS‌های محدود انتخاب شده پس از پردازش که بر روی دیواره غربی و محدوده لغزش واقع شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. موقعیت قرارگیری این PS‌ها نسبت به ایستگاه‌های قرائت شده توسط دوربین تئودولیت (رفلکتورها) در شکل (۱۷) مشخص گردیده‌اند. میانگین جابجایی در جهت دید ماهواره (LOS) این PS‌ها نسبت به زمان به صورت نمودار در شکل (۱۸) رسم گردیده است. جابجایی محاسبه شده پس از پردازش تصاویر ماهواره‌ای نشان دهنده جابجایی PS‌ها در جهت دید ماهواره (LOS) می‌باشد. جهت دید ماهواره تقریباً

۲-۴. نتایج پردازش تصاویر ماهواره‌ای

پس از پردازش اولیه تصاویر SLC ماهواره Sentinel-1A در نرم افزار SNAP و تولید تداخل نگارهای مورد نیاز و در ادامه پردازش آن‌ها در پکیج Stamps، پراکنده سازهای پایدار (PS) توسط این پکیج انتخاب شده و میزان جابجایی آن‌ها محاسبه گردیده است. موقعیت این PS‌ها در محدوده معدن در شکل (۱۵) نرخ جابجایی میانگینی از PS‌ها در شکل (۱۶) قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که تعداد PS کمی در محدوده درونی معدن و بر روی پله‌ها و دیواره‌ها انتخاب شده است و تعداد معدودی PS در دیواره غربی معدن و در بالای محدوده لغزشی انتخاب شده است.

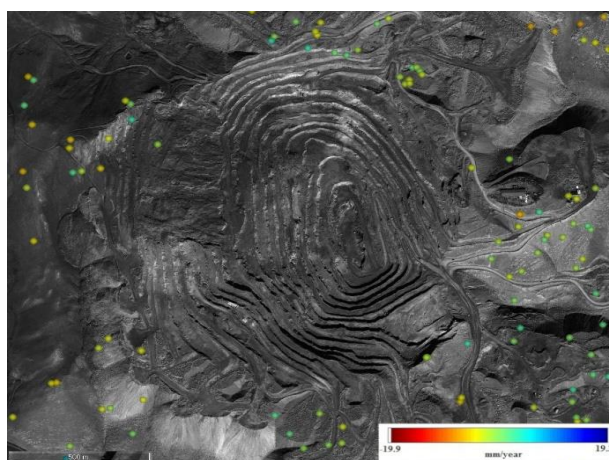
و تصویر Master، مقادیر جابجایی محاسبه شده است. به عبارتی این مقادیر تفاوت محل قرارگیری PSها در راستای جهت دید ماهواره (LOS)، بین تصویر Master و هر یک از دیگر تصاویر می باشد. به عنوان مثال، محل قرارگیری PSها در زمانی که تصویر ۲ دی ۱۳۹۳ اخذ شده است، نسبت ۹ آبان ۱۳۹۴ که تصویر Master توسط ماهواره اخذ گردیده است (شکل ۱۸)، ۴۷ میلیمتر در جهت دید ماهواره به ماهواره نزدیک تر بوده است. با توجه به این که جهت دید ماهواره عمود فرض شده است، از ۲ دی ۱۳۹۳ تا ۹ آبان ۱۳۹۴، PSها ۴۷ میلیمتر کاهش ارتفاع داشته اند.

به سمت شمال شرقی بوده و زاویه آن نزدیک به عمود می باشد. بنابراین این مقادیر جابجایی PSها را می توان جابجایی عمودی آنها در نظر گرفت. به همین دلیل در شکل های (۱۹) و (۲۰)، نمودار جابجایی در جهت دید ماهواره PSها با نمودار جابجایی عمودی تجمعی ایستگاهها مقایسه گردیده است. الگوریتم پکیج StaMPS، یکی از تصاویر ماهواره ای را به عنوان تصویر Master (اصلی) در نظر می گیرد و زوج تصاویری را از ۳۰ تصویر دیگر نسبت به این تصویر ایجاد می کند. مقدار جابجایی PSها در تصویر Master صفر در نظر گرفته شده و از مقایسه محل قرارگیری PSها در تصاویر دیگر

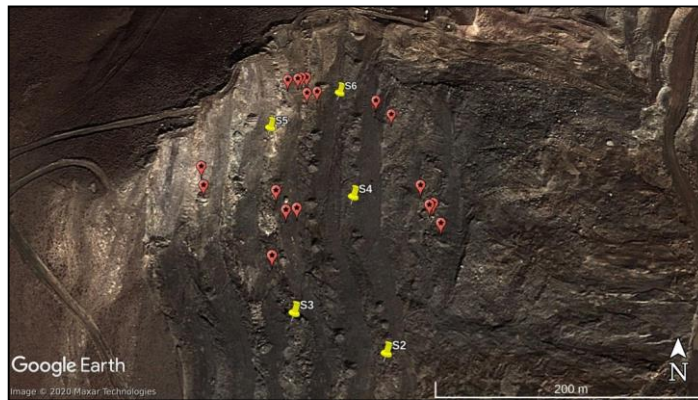


شکل ۱۵. نقشه پراکندگی PSها در محدوده معدن انگوران.

(توزیع PS انتخاب شده پس از پردازش تصاویر توسط پکیج StaMPS در محدوده معدن که تعداد آنها بسیار محدود می باشد و اکثر نقاط بر روی دیواره های معدن، PS انتخاب نشده است. محدوده ای از دیواره غربی که تعدادی PS بر روی آنها انتخاب شده است توسط دایره قرمز مشخص گردیده است)

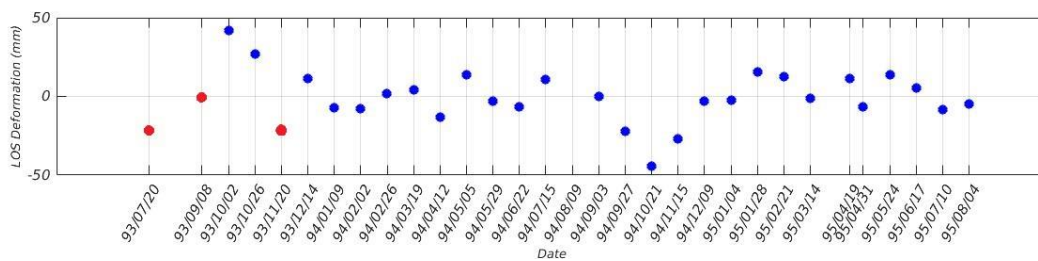


شکل ۱۶. نقشه نرخ جابجایی میانگین PSها در محدوده معدن انگوران.



شکل ۱۷. محل قرار گیری PSهای انتخاب شده بر روی دیواره غربی معدن نسبت به ایستگاه‌های اندازه گیری جابجایی (رفلکتور-ها)، (نقاط قرمز رنگ نشان دهنده PS و نقاط زرد رنگ نشان رفلکتور می‌باشد)

در شکل (۱۸)، در نمودار جابجایی PSها، با توجه به روند کلی مشاهده شده در نمودار، مقادیر جابجایی در تصاویر اخذ شده در تاریخ‌های ۲۰ مهر، ۷ آبان و ۲۰ بهمن به عنوان داده پرت در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱۸. نمودار میانگین جابجایی PSهای قرار گرفته بر روی محدوده لغزشی.

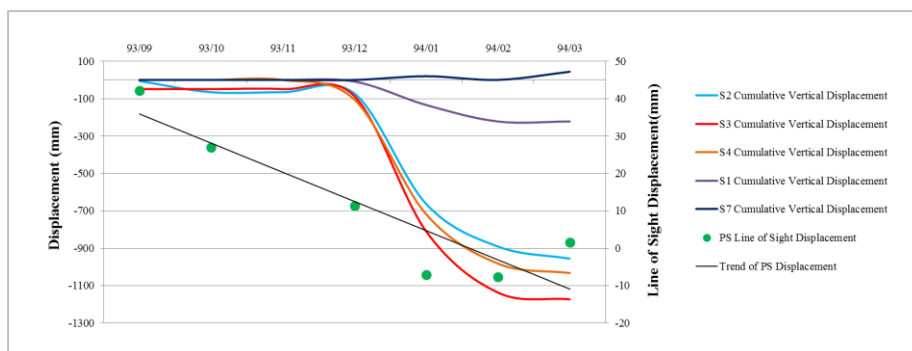
مقادیر جابجایی در نمودار حاصل از تفاوت محل قرارگیری PSها در تصاویر مختلف نسبت به تصویر Master (۹ آبان ۱۳۹۴) محاسبه شده است. داده‌های پرت با رنگ قرمز مشخص شده‌اند

در نمودار جابجایی مرحله اول (شکل ۱۹)، جابجایی‌ها در PSها از دی ۱۳۹۳ شروع شده و تا اردیبهشت ۱۳۹۴ ادامه داشته که از لحاظ زمانی مقداری با نمودار جابجایی عمودی تجمعی (شکل ۱۳) اختلاف داشته است که شروع جابجایی در نمودار جابجایی عمودی تجمعی ایستگاه‌ها از اسفند ۱۳۹۳ بوده است. اما با این وجود، روند هر دو نمودار تقریباً یکسان می‌باشد.

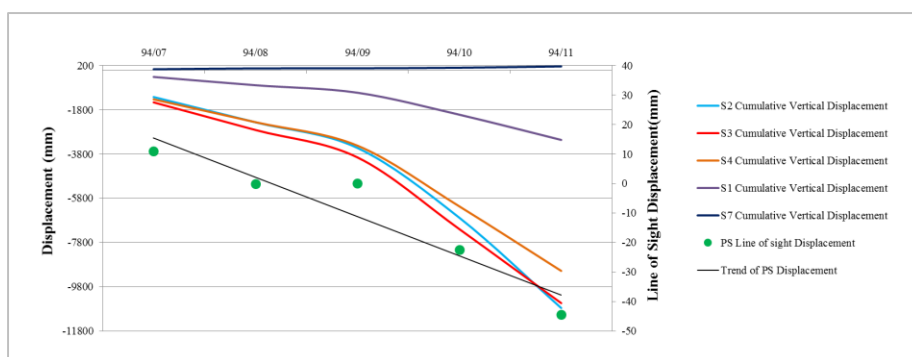
در مرحله دوم جابجایی، تطابق بین دو نمودار بیشتر از مرحله اول جابجایی بوده و از مهر ۱۳۹۴ جابجایی شروع شده و تا بهمن ۱۳۹۴ ادامه داشته است. همچنین افزایش

در شکل‌های (۱۹) و (۲۰)، نمودار میانگین جابجایی PSها با نمودار جابجایی عمودی تجمعی حاصل از قرائت توسط دوربین تئودولیت، مقایسه گردیده است. برای درک بهتر این مقایسه، نمودارها به تفکیک جابجایی مرحله اول (شکل ۱۹) و مرحله دوم (شکل ۲۰) رسم شده‌اند. در مقایسه هر دو مرحله جابجایی‌ها، مقادیر جابجایی PSها نسبت به جابجایی عمودی تجمعی ایستگاه‌ها، اختلاف قابل توجهی داشته و بسیار کمتر بوده است. علیرغم این اختلاف، روند و الگوی جابجایی هر دو نمودار در هر دو مرحله از جابجایی-ها، با یکدیگر مطابقت داشته‌اند.

شدید جابجایی‌ها از آذر ۱۳۹۳ به بعد در هر دو نمودار قابل مشاهده است.



شکل ۱۹. مقایسه نمودار جابجایی عمودی تجمعی ایستگاه‌های قرائت شده توسط دوربین تئودولیت با نمودار میانگین جابجایی در جهت دید ماهواره (LOS) PSها، در مرحله اول و در بازه زمانی آذر ۱۳۹۳ تا خرداد ۱۳۹۴ (کاهش در مقادیر جابجایی در جهت دید ماهواره به معنی کاهش ارتفاع در جهت دید ماهواره می‌باشد و این مقادیر در مقایسه با تصویر Master که صفر در نظر گرفته شده است، محاسبه گردیده‌اند)



شکل ۲۰. مقایسه نمودار جابجایی عمودی تجمعی ایستگاه‌های قرائت شده توسط دوربین تئودولیت با نمودار میانگین جابجایی در جهت دید ماهواره (LOS) PSها، در مرحله دوم و در بازه زمانی مهر ۱۳۹۴ تا بهمن ۱۳۹۴ (کاهش در مقادیر جابجایی در جهت دید ماهواره به معنی کاهش ارتفاع در جهت دید ماهواره می‌باشد و این مقادیر در مقایسه با تصویر Master که صفر در نظر گرفته شده است، محاسبه گردیده‌اند)

این اختلاف زمانی ایجاد شده در مرحله اول جابجایی بین دو نمودار و همچنین متفاوت بودن روند جابجایی در انتهای روند جابجایی مرحله دوم، با توجه به مواردی از جمله، کمبود تعداد PSها، میزان جابجایی بسیار زیاد در معدن، تفکیک مکانی ماهواره، نوع و قابلیت سنسور، نوع تصاویر ماهواره‌ای و عملکرد الگوریتم استفاده شده و کوچک بودن وسعت لغزش مورد مطالعه توجیه کرد. اما با این وجود تطابق بین نمودارها قابل توجه می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

پس از پردازش تصاویر ماهواره‌ای راداری و رسم نمودار میانگین جابجایی PSهای انتخاب شده توسط پکیج StaMPS و مقایسه آن با نمودار جابجایی عمودی تجمعی ایستگاه‌های قرائت شده، علیرغم تطابق بین این دو نمودار در زمان شروع و الگوی جابجایی و ناپایداری در دیواره غربی، مقادیر جابجایی در نمودارها اختلاف نسبتاً زیادی از خود نشان داد-

نسبت به دیگر نرم افزارهای تجاری و گران قیمت، که شرایط مالی و بین المللی تهیه نسخه اصلی آن در ایران وجود ندارد، بر تعداد PSهای انتخابی و قابل اطمینان بودن نتایج، تاثیر گذار بوده‌اند. در نتیجه، جابجایی‌های بسیار زیاد به همراه عواملی همچون مساحت مورد مطالعه و پردازش و حساسیت سنجنده مورد استفاده، از چالش‌های استفاده از روش PSI در شناسایی لغزش‌ها و ناپایداری‌های دیواره‌های معادن روباز دانست.

اینگونه به نظر می‌رسد که استفاده از تصاویر X باند سنجنده‌های غیر رایگانی همچون TerraSAR-X و نرم افزار-های تجاری، نسبت به تصاویر سنجنده‌های C باند و رایگانی همچون Sentinel-1 و نرم افزارهای رایگان مانند SNAP و Stamps، نتایج قابل اعتماد تری را تولید کنند. به ویژه در صورتی که نیاز به پایش‌های روزانه جابجایی دیواره معادن وجود دارد، این روش و داده‌های این ماهواره، برای شرایط موجود در این تحقیق، از دقت بالایی برخوردار نباشد. بدین ترتیب، به کارفرمایانی مانند شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران و وزارت صنعت، معدن و تجارت توصیه می‌گردد نسبت به مشاورینی که از این روش استفاده می‌کنند دقت نظر بیشتری داشته باشند.

در نقطه مقابل، به نظر می‌رسد مطالعات انجام گرفته در محدوده‌های وسیع تری نسبت به منطقه مورد مطالعه این تحقیق (مانند شناسایی فرونشست در دشت‌ها) که شدت تغییرات ارتفاعی کمتر و در بازه زمانی طولانی تری اتفاق می‌افتند، روش تحلیل ارائه شده بر روی ه این نوع از تصاویر ماهواره‌ای، کارایی بیشتری از خود نشان می‌دهد.

اند و موجب عدم قابلیت اطمینان نتایج حاصل از پردازش تصاویر تحت روش PSI در معدن روباز انگوران گردیده است. اختلاف موجود در مقادیر جابجایی را می‌توان به ناکافی بودن تعداد PSهای انتخاب شده در پردازش تصاویر توسط پکیج Stamps، ارتباط دانست که عواملی مانند کوچک بودن محدوده لغزش، جابجایی‌های زیاد حاصل از لغزش و همچنین برداشت در دیواره معدن، ایجاد فازهای اتمسفری اضافی ناشی از پستی و بلندی‌های شدید توپوگرافی و حساسیت رادار و کیفیت تصاویر استفاده شده بر آن تاثیر گذار بوده‌اند.

از سال ۱۳۸۵ و پس از لغزش بزرگ رخ داده در دیواره غربی و همچنین بارش‌های فصلی و یخبندان‌های متوالی، ناپایداری‌های متعددی در دیواره غربی معدن رخ داده است که بروز این ناپایداری‌ها موجب گردیده است که سبک سازی پله‌ها و برداشت واریزه‌های حاصل از لغزش متناوباً در معدن انجام گردد. به علاوه، پس از بررسی نمودارهای جابجایی تجمعی ایستگاه‌های قرائت شده توسط دوربین تئودولیت، در بازه زمانی این تحقیق، جابجایی در حدود ۲۰ الی ۳۵ متری در دیواره غربی مشاهده گردیده است که مقادیری نسبتاً زیاد می‌باشند.

جابجایی بزرگ رخ داده در معدن، به ویژه دیواره غربی، موجب گردیده است که در روش PSI مورد استفاده قرار گرفته در این تحقیق، PSهای متعددی در محدوده معدن انتخاب نگردد. علاوه بر جابجایی‌های بسیار زیاد، عواملی همچون مساحت کم محدود لغزشی، حساسیت پایین تر سنجنده‌های C باند مانند Sentinel-1، نسبت به سنجنده‌های X باند و احتمالاً کد باز بودن و رایگان بودن پکیج Stamps،

منابع

- پارسایی، ل.، علیمحمدی، ص. ۱۳۹۱. زمین لغزش در ایران. انتشارات جهاد دانشگاهی.
- برهانی تخته جان، ا. لشکری پور، غ. غفوری، م. ۱۳۹۴. بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی شیب‌های جنوب مشهد، دومین همایش ملی زمین شناسی و اکتشاف منابع، شیراز.

- جعفری، ا. کشمیری، ب. و خدایاری، ع. ا. ۱۳۸۵. برآورد ذخیره معدن انگوران با استفاده از مدل سازی سه بعدی. نشریه بین‌المللی علوم مهندسی، شماره ۳، جلد ۱۷، صفحه ۸۷-۹۴.
- سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ۱۳۷۱. نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بر گره تخت سلیمان.
- شرکت معدن زمین. شهریور ۱۳۸۵. بررسی گسترده ناپایداری ضلع شمال غرب معدن انگوران و شناخت عوامل محرک و ارائه راهکارها. گزارش نهایی، جلد اول.
- شرکت معدن زمین. ۱۳۹۶. نقشه زمین شناسی معدن انگوران.
- شرکت معدن زمین. دی ۱۳۹۴. نقشه وضعیت معدن سرب و روی انگوران.
- شرکت مهندسی مشاور همپا دانش شیدوش. اسفند ۱۳۹۴. بررسی علت حرکت جدید شیب‌های سطحی در محدوده شمال غرب مجتمع سرب و روی انگوران.
- Barra, A., Monserrat, O., Mazzanti, P., Esposito, C., Crosetto, M. & Mugnozza, G.S. 2016. First insights on the potential of Sentinel-1 for landslides detection. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. Vol. 7, NO. 6: 1874_1883
- Bovenga, F., Nutricato, R., Refice, A., Wasowski, J. 2006. Application of multi-temporal differential interferometry to slope instability detection in urban/peri-urban areas. *Eng. Geol.* 88 (3-4): 218-239.
- Bovenga, F., Wasowski, J., Nitti, D.O., Nutricato, R., Chiaradia, M.T. 2012. Using Cosmo/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslide analysis. *Remote Sens. Environ.* 119, 272-285.
- Carlà, T., Farina, P., Intrieri, E., Ketizmen, H. & Casagli, N. 2018. Integration of ground-based radar and satellite InSAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine. *Engineering Geology* 235: 39-52.
- Colesanti, C. & Wasowski, J. 2006. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology* 88: 173-199.
- Fiaschi, S., Mantovani, M., Frigerio, S., Pasuto, A. & Floris, M. 2017. Testing the potential of Sentinel-1A TOPS interferometry for the detection and monitoring of landslides at local scale (Veneto Region, Italy). *Environ Earth Sci*: 76:492.
- Google Earth V 6.2.2.6613. Digital Globe 2012. <http://www.earth.google.com>
- Hanssen, R. 2001. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Hanssen, R., 2005. Satellite radar interferometry for deformation monitoring: a priori assessment of feasibility and accuracy. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 6, 253-260.
- Hartwig, M.E. 2016. Detection of mine slope motions in Brazil as revealed by satellite radar interferograms. *Bull Eng Geol Environ* 75:605-621.
- Hooper, A., Segall, P., Zebker, H. 2007. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research*, vol. 112: B07407.
- Koehorst, B.A.N., Kjekstad, O., Patel, D., Lubkowski, Z., Knoeff, J.G. & Akkerman, G.J. 2005. Determination of Socio-Economic Impact of Natural Disasters. *Assessing socioeconomic Impact in Europe, Work Package 6*.
- Mahapatra, P., Samiei-Esfahany, S., Hansen, R., 2012. Towards repeatability, reliability and robustness in time-series InSAR. *Proceedings of Fringe 2011 Workshop, September 19-23, 2011, Frascati, Italy. ESA Special Publication, SP-697 (January 2012, CD. ISBN 978-92-9092-261-2, ISSN 1609-042X)*
- 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*.
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I. & Papathanassiou, K. P. A, 2013. Tutorial on Synthetic Aperture Radar. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*.
- Styles, T., McCormack, H., Holly, R. Thomas, A. Larkin, H. & Elmer, R. 2016. Using satellite InSAR to detect pit wall failure. *19th Extractive Industry Geology Conference, Birmingham*.

- Temporim, F.A., Gama, F. F., Mura, J.C., Paradella, W.R. & Silva, G.G. 2017. Application of persistent scatterersinterferometry for surfacedisplacements monitoring in N5E openpit iron mine, using TerraSAR-X data, in Carajás Province, Amazon region. *Brazilian Journal of Geology* 47(2): 225-235.
- Wasowski, J., Singhroy, V. (Eds.), 2003. Remote Sensing and Monitoring of Landslides-Special Issue. *Eng. Geol.* 68(1-2).
- Wasowski, J. & Bovenga, F. 2014. Investigating landslides and unstable slopes with satellite multi temporal interferometry: Current issues and future perspectives. *Eng. Geol.* 174: 103-138.
- Yonezawa, C., Watanabe, M. & Saito, G. 2012. Polarimetric decomposition analysis of ALOS PALSAR observation data before and after a landslide event. *Remote Sens.* 4: 2314-2328.