نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال هفتم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹
صفحات ۱۷ – ۲۸

پایش و تحلیل فضایی پایداری شیب با استفاده از تکنیک پراکنش‌کننده‌های دائمی تصاویر راداری سنتینل ۱

مورد مطالعه: معدن مس سرچشمه

علی مهرابی[1]. استادیار، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید باهنرکرمان، کرمان، ایران.

دریافت مقاله : ۱۳۹۸/۰۶/۱۷ پذیرش نهایی:۱۳۹۹/۰۶/۰۷

چکیده

معدن مس سرچشمه یکی از بزرگترین معادن مس پورفیری جهان محسوب می‌شود. پایش و تحلیل حرکات رخ‌داده در محدوده معدن می‌تواند به تحلیل و بررسی پایداری دیواره آن کمک شایانی بنماید. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و اعمال روش تداخل‌سنجی پراکنش‌کننده‌های دائمی، پایداری شیب دیواره این معدن مورد پایش قرار گرفته و محدوده‌های ناپایدار احتمالی مشخص شود. در این راستا از ۱۰ فریم تصویر سنتینل۱ که از تاریخ ۲۰۱۸/۰۴/۱۲ تا ۲۰۱۹/۰۴/۱۰ طی یک سال تصویربرداری شده است استفاده شد. به منظور شناسایی نقاط پراکنش‌کننده دائمی از روش StaMPS استفاده شد، به طوری که با تهیه ۹ تداخل‌نگاشت و ورود آنها به آنالیز سری زمانی، تعداد ۶۵۰ نقطه که ویژگیهای پراکنشی آنها در طول زمان ثابت است و دچار عدم همبستگی زمانی نیستند، مورد شناسایی قرار گرفت. با اندازه‌گیری میزان جابجایی نقاط پراکنش‌کننده دائمی، تغییرات ارتفاعی رخداده در محدوده معدن مشخص شد. بر اساس نتایج به دست آمده تغییرات ارتفاعی رخداده در محدوده معدن بین ۴۵ میلیمتر تا ۴۵- میلیمتر در سال متغیر است. بر این اساس ۳ محدوده فرونشستی به ترتیب در بخش‌های غربی، شرقی و شمال غربی دیواره معدن با مساحت ۱۰۰ هزار، ۶۸ هزار و ۱۷ هزار متر مربع شناسایی شد. مطالعات میدانی انجام گرفته صحت نتایج را تایید می‌کند. با توجه به اهمیت موضوع و به منظور جلوگیری از تخریب و ریزش دیواره این معدن مطالعات ژئوتکنیکی دقیقتری در این محدوده‌های تعیین شده لازم به نظر می رسد.

واژه های کلیدی: تداخل‌سنجی راداری، سری زمانی، تحلیل پایداری، نرخ جابجایی، معدن مس سرچشمه.

۱. نویسنده مسئول: Email :Mehrabi@uk.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.17]

مقدمه

یکی از مشکلات اساسی و جدی در معادن روباز، عامل ناپایداری شیب است. به طوری‌که این پدیده همواره یکی از موارد خطرآفرین بوده و می‌تواند باعث ریزش و تخریب دیواره معادن بشود. ناپایداری شیب در معادن روباز باعث آسیب به نیروی انسانی، تخریب تجهیزات و متوقف شدن عملیات معدنکاری می‌شود (موسوی و همکاران، ۱۳۸۸). به منظور افزایش و ارتقاء ایمنی در اینگونه معادن، پایش رفتار و تغییر شکل‌های خطرناک شیب‌ها ضروری به نظر می‌رسد. پایش رفتار شیب با استفاده از ابزار دقیق، راهی مطمئن برای جلوگیری از ناپایداری در دیواره‌های شیب‌دار است (یعقوبی و همکاران، ۱۳۹۵). بسیاری از مطالعاتی که در این زمینه تاکنون انجام گرفته است بر پایه روش‌های ژئودینامیکی و نقشه‌برداری استوار بوده است به طوری که سوگاوارا و همکاران (۲۰۰۳) کاربرد موفقیت آمیز ابزار تیلت و کشیدگی سنج را در پایداری شیب معدن روباز شیریا در ایالت هوکایدو ژاپن مورد بررسی قرار دادند (Sugawara et al., ۲۰۰۳). شیمیزو (۲۰۰۹) با استفاده از سیستم مکانیاب جغرافیایی به اندازه‌گیری جابجایی در توده‌های سنگی می‌پردازد (Shimizu, ۲۰۰۹). ناکاشیما و همکاران (۲۰۱۲) از سیستم مکان‌یاب جغرافیایی برای اندازه‌گیری تغییر شکل و کنترل پایداری سدهای سنگریزه‌ای استفاده کردند (Nakashima et al., ۲۰۱۲). شیمیزو و همکاران (۲۰۱۲) سیستم مکانیاب جغرافیایی را به عنوان ابزاری کاربردی برای اندازه‌گیری جابجایی توده سنگ و کنترل پایداری شیب در معادن روباز معرفی کردند (Shimizu et al., ۲۰۱۲). عزیزی و همکاران (۲۰۱۵) خطر ناپایداری شیب در معادن روباز اندونزی را با استفاده از روش‌های ژئودتیکی مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند (Azizi et al., ۲۰۱۵). فردج و همکاران (۲۰۱۸) پایداری شیب معادن روباز کشور الجزایر را مورد تحلیل قرار داده‌اند (Fredj et al., ۲۰۱۸). موسوی و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از روش المان مجزای سه بعدی پایداری دیواره غربی معدن مس سرچشمه را مورد تحلیل و ارزیابی قرار داده‌اند. ایشان محدوده‌هایی را به عنوان مناطق ناپایدار مشخص و معرفی کرده‌اند. شمس الدینی فرد و همکاران (۱۳۹۴) محل نصب ابزارهای دقیق ژئودتیکی را جهت ارزیابی پایداری شیب در معدن مس سرچشمه را مکانیابی و مشخص می‌سازند. یعقوبی و همکاران (۱۳۹۵) پایداری دیواره معدن انگوران را با استفاده از خواص ژئومکانیکی سنگ‌ها دیواره و آزمایشات مکانیک سنگ مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

امروزه با پیشرفت تکنولوژی به ویژه در حیطه علم سنجش از دور، افق نوین و جدیدی در زمینه مطالعات زمینی و جغرافیایی ایجاد شده است (Mehrabi et al. ۲۰۱۵; Wang et al. ۲۰۱۹). به‌طوری که استفاده از تصاویر راداری جهت بررسی تغییرات و پایش جابجایی‌های رخداده به دلایل مختلف بر روی سطح زمین، به طور روزافزونی رو به گسترش می‌باشد (المدرسی و همکاران، ۱۳۹۵؛ زارع کمالی و همکاران، ۱۳۹۶؛ مهرابی، ۱۳۹۷). از آنجایی‌که پدیده ناپایداری شیب به مرور زمان اتفاق افتاده و در نتیجه آن سطح زمین دچار تغییرات ارتفاعی و ژئومورفولوژیکی خاصی می‌شود، اندازه‌گیری این تغییرات و جابجایی‌ها به روش های ژئودتیکی از قبیل مثلث بندی سه پهلو و سامانهٔ موقعیت سنجی جهانی به ترازیابی و نقشه برداری های مکرر زمینی نیاز است، روش تداخل سنجی راداری در ضمن پوشش دادن منطقه وسیعی از زمین، احتیاج به نقشه برداری زمینی ندارد. از طرف دیگر در مقایسه با فنونی همچون سامانهٔ موقعیت سنج جهانی و ترازیابی که اندازه‌گیری نقطه ای به دست می دهند، این روش ضمن اینکه بیان دو بعدی از تغییرات سطح را عملی می سازد، وسعتش نسبت به روش های نقطه ای نیز بیشتر است (رهنمون فر و همکاران، ۱۳۸۵؛ Pourkhosravani et al. ۲۰۱۸; Intrieri et al. ۲۰۱۹). بنابراین با توجه به توانایی و قابلیت تصاویر رادار در تعیین میزان تغییرات و جابجایی‌های اتفاق افتاده بر روی سطح زمین در بازه زمانی خاص، می‌توان از این تصاویر در این زمینه به خوبی بهره برد (مهرابی و پورخسروانی، ۱۳۹۷؛ ملکی و همکاران، ۱۳۹۷؛ Mehrabi et al. ۲۰۱۹). علی‌رغم مزایای تکنیک تداخل سنجی راداری، تغییر در ماهیت پراکندگی سطح زمین با گذشت زمان به کارگیری این روش را محدود می‌کند. در پایان سال

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.17]

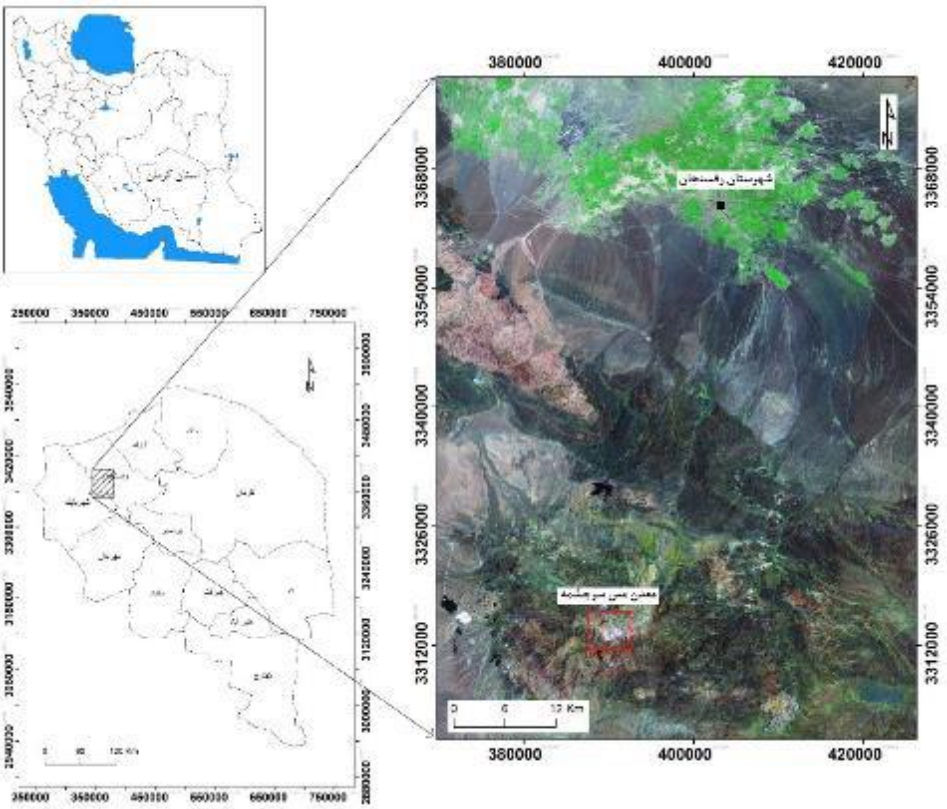
۱۹۹۰ گروه‌های مختلفی راه‌هایی برای کاهش محدودیت‌های تداخل سنجی راداری ارائه کردند. یک روش تشکیل اینترفروگرام و معکوس‌کردن آنها برای استخراج جابجایی افزایشی با زمان بود که روش متداول خط مبنای مکانی کوتاه نام گرفت (Ferretti et al. ۲۰۰۷; Hooper and Bekaert, ۲۰۱۲; Lundgren et al. ۲۰۰۱). به دلیل محدودیت های روش تداخل سنجی متداول، تکنیک بازپراکنش کننده های دائمی ارائه شد. این تکنیک در مواردی که نرخ جابجایی در منطقه کم بوده و پیکسل‌ها دچار عدم همبستگی زمانی می‌شوند مفید است (Ferretti et al. ۲۰۱۵; Li et al. ۲۰۲۰; Hooper, ۲۰۰۶; Hooper et al. ۲۰۱۲).

در این تحقیق، با توجه به اهمیت معدن مس سرچشمه به عنوان یکی از بزرگترین معادن مس جهان و وجود گزارشاتی مبنی بر رخداد ناپایداری خصوصاً در بخش‌هایی از دیواره غربی این معدن، سعی شد تا در این تحقیق با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ و اعمال تکنیک پراکنش‌کننده‌های دائمی، با اندازه‌گیری میزان جابجایی رخداده در محدوده معدن، پایداری شیب در این معدن مورد تحلیل و پایش قرار بگیرد.

داده ها و روش کار

الف)قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

معدن مس سرچشمه در شهرستان رفسنجان و استان کرمان واقع شده است، این معدن با مختصات عرض جغرافیایی ۵۶′ ۲۹° شمالی وطول جغرافیایی ۵۱′ ۵۵° شرقی یکی از بزرگترین معادن مس پورفیری جهان محسوب می‌شود. جاده دسترسی به این معدن از طریق جاده رفسنجان-سرچشمه-شهربابک امکان پذیر است. از لحاظ ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی این معدن درون کمربند آتشفشانی ارومیه-دختر قرار دارد و اکثر سنگ‌ها منطقه از نوع سنگ‌های آتشفشانی مانند آندزیت، دیوریت و گرانودیوریت است. شکل شماره ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل۱: محدوده مورد مطالعه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.17]

ب) روش کار

در این پژوهش از ۱۰ سری داده راداری مربوط به سنجنده SENTINEL ۱، ماهواره Soyuz سازمان فضایی اروپا با فرمت SLC از نوع مد Image با پلاریزاسیون VV، که در فاصله زمانی یک ساله از ۱۲ آوریل ۲۰۱۸ تا ۱۰ آوریل ۲۰۱۹ برداشت شده است، استفاده شد. تحلیل‌های انجام‌گرفته در محیط سیستم عامل لینوکس و با استفاده از نرم‌افزارهای SNAP ٦ و StaMPS ٤،١-beta انجام گرفت. همچنین مدل ارتفاع رقومی استفاده شده در این تحقیق از نوع SRTM ۳۰ می‌باشد. جدول شماره ۱ مشخصات داده‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات تصاویر سنتینل مورد استفاده در تحقیق

شماره	تاریخ	مدار	پولاریزاسیون	نوع تصویربرداری
۱	۲۰۱۹/۰۴/۱۰	۲۴۷۲۹	VV	IW
۲	۲۰۱۹/۰۳/۱۸	۲۵۰۲۹	VV	IW
۳	۲۰۱۹/۰۲/۰۳	۲۵۳۷۹	VV	IW
۴	۲۰۱۸/۱۲/۲۷	۲۵۶۷۹	VV	IW
۵	۲۰۱۸/۱۱/۲۰	۲۶۰۲۹	VV	IW
۶	۲۰۱۸/۰۹/۱۵	۲۶۳۷۹	VV	IW
۷	۲۰۱۸/۰۷/۱۰	۲۶۷۲۹	VV	IW
۸	۲۰۱۸/۰۶/۲۱	۲۷۰۷۹	VV	IW
۹	۲۰۱۸/۰۵/۱۹	۲۷۳۷۹	VV	IW
۱۰	۲۰۱۸/۰۴/۱۲	۲۷۷۲۹	VV	IW

- **تداخل سنجی راداری و تکنیک پراکنش کننده های دائمی**

فن‌آوری تداخل سنجی راداری (InSAR) اولین بار توسط گابریل وهمکارانش (۱۹۸۹) با استفاده از ۳ تصویر استفاده شد. این فن آوری امکان تشخیص تغییرات بسیار کوچک در مقیاس روزانه تا سالانه را در سطح زمین و در ابعاد جهانی، با قابلیت اعتماد زیاد در شب و روز و در هر شرایط آب و هوایی فراهم می سازد. استفاده عمده از این روش در مطالعه زمین لرزه اغلب روی تغییرات و جابجایی های حاصل از زمین لرزه و بررسی تصاویر راداری قبل و بعد از آن، و استفاده از آن در خصوص ارزیابی مقدار جابجایی زمین در نواحی گسل‌ها و شناسایی سازوکار آنها در زمان زلزله می باشد(Livio et al. ۲۰۱۷; Wright et al. ۲۰۰٤). در روش InSAR دو تصویر SAR که توسط آنتن های مخصوص نصب شده بر روی ماهواره یا هواپیما اخذ شده‌اند با هم ترکیب می شوند تا نقشه تغییر شکل پوسته زمین حاصل شود. البته لازم به ذکر است که یکی دیگر از محصولات این روش، مدل رقومی زمین (DEM) است. تداخل نگاشت ها با ضرب تصویر اول بعنوان Master در مزدوج تصویر دوم Slave که به صورت اعداد مختلط هستند، حاصل می شوند. نتیجه این حاصل ضرب شامل اختلاف فاز دو تصویر خواهد بود. حلقه‌های (فرینجهای) حاصله معرف جابجایی پوسته زمین در راستای دید ماهواره و در حد فاصله زمانی اخذ دو تصویر هستند. همانطور که از رابطه ۱ مشخص می شود، فاز تداخل نگاشت مشاهده شده مجموع چند مولفه است:

$$\emptyset_{int} = \emptyset_{topo} + \emptyset_{disp} + \emptyset_{atm} + \emptyset_{orb} + \emptyset_{nois} \qquad (۱)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.17]

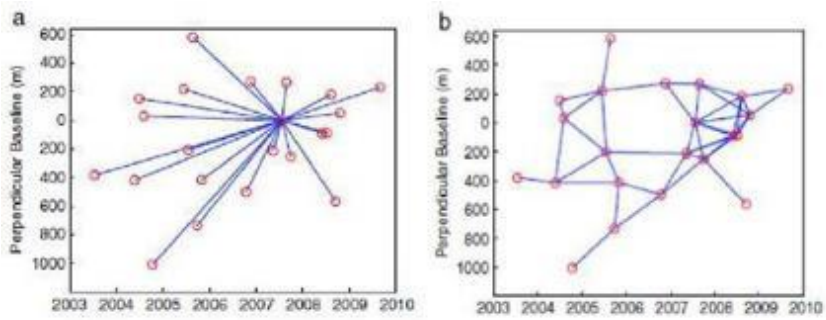
مولفه‌های این معادله به ترتیب عبارتند از: اثر فاز مولفه توپوگرافی، سیگنال جابجایی پوسته، اثر مولفه اتمسفر، اثر مولفه مداری و نویز، در اینجا هدف اصلی یافتن مولفه جابجایی پوسته زمین است که با از بین بردن و یا کاهش اثرات مولفه های دیگر انجام می شود اثر مدار با استفاده از پارامترهای دقیق مدار ماهواره نظیر پارامترهای مداری،کاهش می یابد. همچنین میزان باقیمانده خطای مداری نیز می تواند به صورت یک ترند کلی از نتایج حذف شود. اثر اتمسفر در مناطق گرم و خشک به دلیل عدم وجود رطوبت معمولا صفر در نظر گرفته می شود. اثر مولفه توپوگرافی نیز توسط یک مدل رقومی زمین قابل حذف یا کاهش است. با حذف اثرات مزاحم، حلقه هایی به دست می آید که هر سیکل آنها معادل جابجایی پوسته زمین به میزان نصف طول موج رادار، برای سنتینل ۱ معادل ۲۸ میلیمتر در امتداد خط دید ماهواره خواهد بود.

به دلیل محدودیت‌های روش تداخل سنجی متداول فرتی و همکارانش (۲۰۰۱) تکنیک باز پراکنش‌کننده‌های دائمی را ارائه کردند. پراکنش‌کننده‌های دائمی عوارضی هستند که ویژگی‌های پراکنشی آنها در طول زمان ثابت است و دچار عدم همبستگی زمانی نمی‌شوند. این عوارض که عمدتا سازه های دست بشر هستند، دچار عدم همبستگی زمانی نمی‌شوند. پیکسل‌هایی وجود دارند که در آنها یک پراکنش‌کننده در آن پیکسل غالب است و مانند یک پراکنش‌کننده نقطه‌ای دائم رفتار می‌کند. بنابراین مقدار عدم همبستگی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. با استفاده از تکنیک پراکنش کننده های دائمی امکان اندازه گیری جابجایی زیر سانتیمتر وجود دارد. این تکنیک در مواردی که نرخ جابجایی در منطقه کم بوده و پیکسل‌ها دچار عدم همبستگی زمانی می‌شوند مفید است. همچنین خطای توپوگرافی باقیمانده و اثر اتمسفر را تا حدود زیادی تصحیح می‌کند.

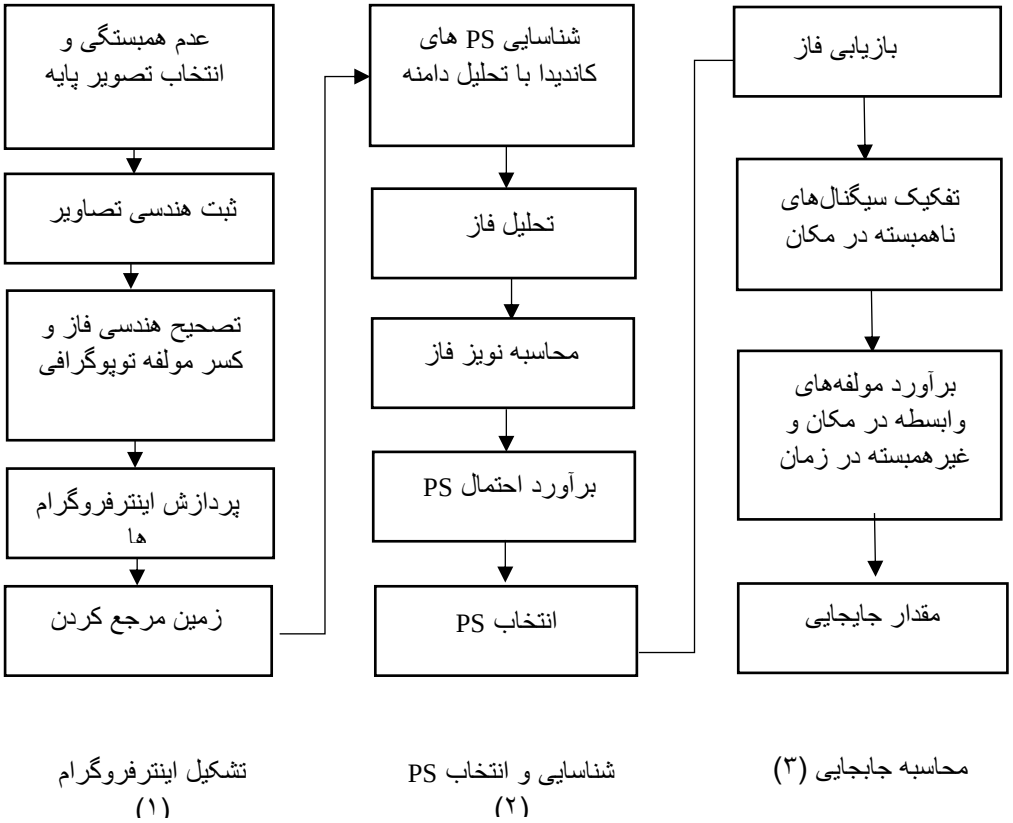
در روش پردازش پراکنش کننده‌های دائمی Stamps که اخیرا توسط دانشگاه استانفورد ارائه شده است، با استفاده از تحلیل فاز می‌توانیم بسیاری از نقاط پراکنش‌کننده دائمی را که حتی در مناطق غیر شهری (عاری از بازتابنده‌های‌گوشه‌ای) قرار دارند، مشخص نماییم. در این روش به جای استفاده از یک مدل زمانی برای تغییر شکل از همبستگی مکانی اندازه‌گیری فاز استفاده می‌کند، به همین دلیل در مناطقی که جابجایی دارای رفتار غیر ثابت و نامشخص است می‌توان از این روش استفاده کرد. زمانی که پراکنش کننده های دایمی مشخص شدند، این الگوریتم مراحل مختلفی را برای حذف اثرات اتسفر، خطای توپوگرافی و خطای مداری به کار خواهد برد. روش Stamps قادر است پراکنش کننده های دایمی با تغییر شکل متغیر در زمان را شناسایی کند و از آنجا که در انتخاب پراکنش کننده های دایمی از تحلیل فاز استفاده می‌کند، می تواند در مناطقی که عاری از عوارض دست ساز بشری است، مورد استفاده قرار گیرد. روش‌هایی که تنها بر اساس تحلیل دامنه کار می کنند، تنها قادر خواهند بود عوارضی متل باز تابنده های گوشه ای که برگشت قوی به سمت سنجنده دارند را مشخص می‌کنند و از یافتن باز پراکنش کننده های دایمی که برگشت قوی به سمت سنجنده ندارند، اما در طول زمان ویژگیهای باز پراکنش کننده دایمی دارند، مانند یک قطعه سنگ، عاجزند. برخلاف روش خط مبنای کوتاه، الگوریتم پراکنش کننده دایمی در سری زمانی همه اینترفروگرام‌ها را نسبت به یک تصویر پایه تشکیل می دهد. در این روش اینترفروگرام‌هایی که تنها در نقاط خاصی همبسته هستند و خط مبنای زمانی مکانی بلند دارند، بدون توجه به عدم همبستگی زمانی تشکیل می شوند. بنابر این قادر به تشکیل اینترفروگرام از تمام جفت تصاویر نسبت به یک تصویر مرجع خواهیم بود (شکل ۲)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.17]



شکل ۲:نمایش خط مبناها برای الف: روش پراکنش کننده ثابت، ب- روش خط مبنا کوتاه. دایره‌ها نشان دهنده تصاویر و خطوط نمایش اینترفروگرامهای تشکیل شده است .(Hooper, ۲۰۰۸)



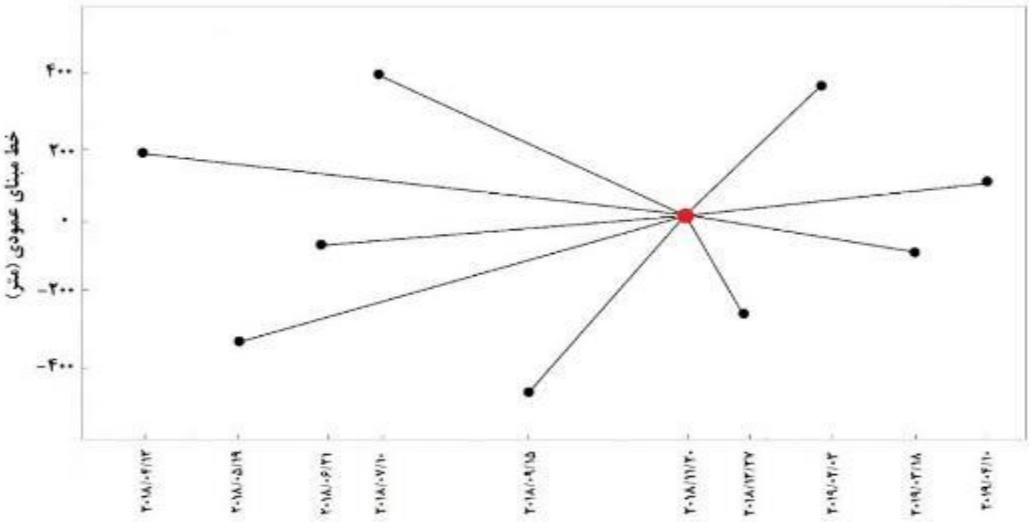
شکل ۳: مراحل پردازش الگوریتم StaMPS

شرح و تفسیر نتایج

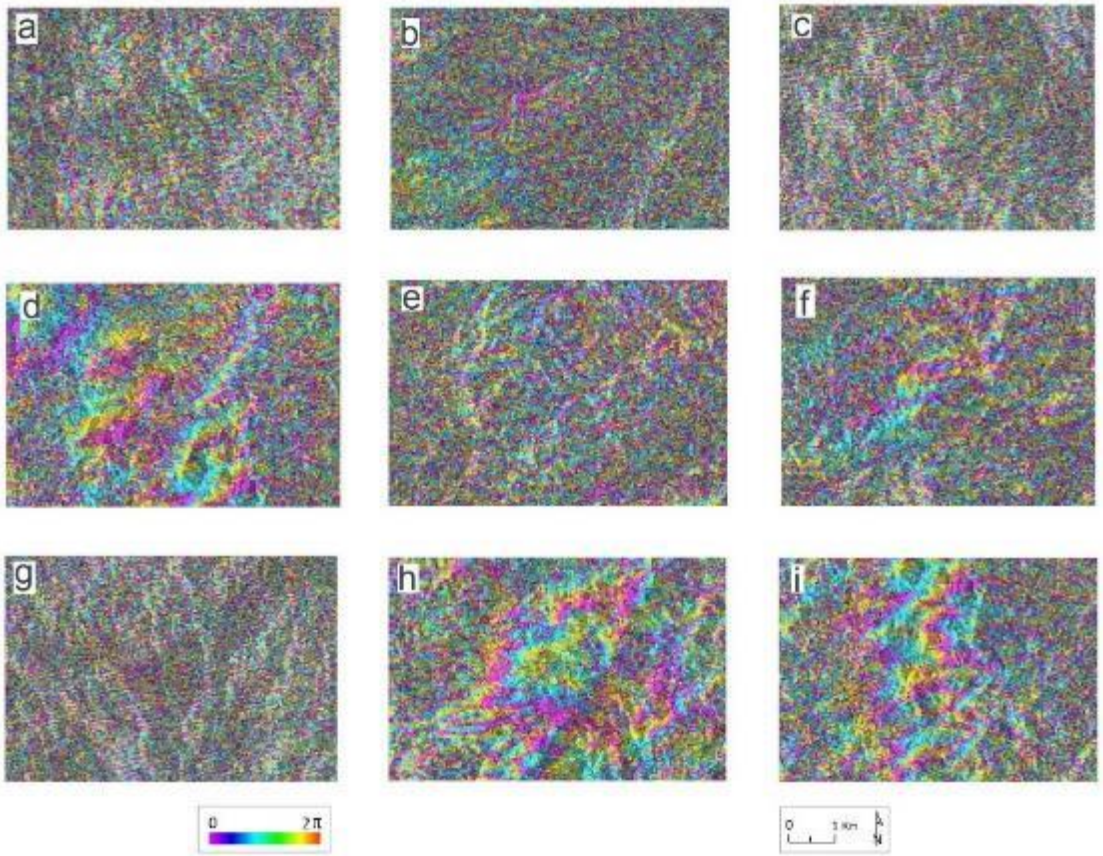
بر اساس نمودار ارتباطی تهیه شده بین تصاویر پیرو و تصویر پایه (شکل ۴) جفت تصاویر مناسب به لحاظ کوتاه‌ترین خط مکانی و زمانی، جهت تولید تداخل‌نگاشت مشخص شده است. همان‌طور که در شکل شماره ۴ مشخص است، حداکثر خط مبنای عمودی بین ۴۰۰+ تا ۴۰۰- به دست آمده است. همچنین کوهرنسی منطقه بالاتر از ۰/۶ است. علاوه بر آن جهت انجام الگوریتم تداخل‌سنجی پراکنش‌کننده‌های دائمی، تصویر مربوط به تاریخ ۲۰۱۸/۱۱/۲۰ به عنوان تصویر پایه و تصاویر دیگر به عنوان پیرو به کار رفته‌اند. با اعمال روش تداخل‌سنجی به صورت سری زمانی بر روی ۱۰ تصویر اخذ شده، تعداد ۹ تداخل نگاشت از محدوده مورد مطالعه استخراج شد. (شکل ۵). تداخل‌نگاشت‌های به دست آمده نشانگر فاز تجمعی منطقه مورد مطالعه که بین

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.17]

صفر و ۲π در نوسان است، می‌باشد. با کسر مولفه توپوگرافی، تصاویر آماده تحلیل و پردازش الگوریتم StaMPS و شناسایی و انتخاب نقاط پراکنش‌کننده دائمی می‌شود.



شکل ۴: موقعیت و ارتباط بین تصویر پایه و مرجع (نقطه قرمز) با تصاویر پیرو (نقاط تیره) مورد استفاده در روش PS

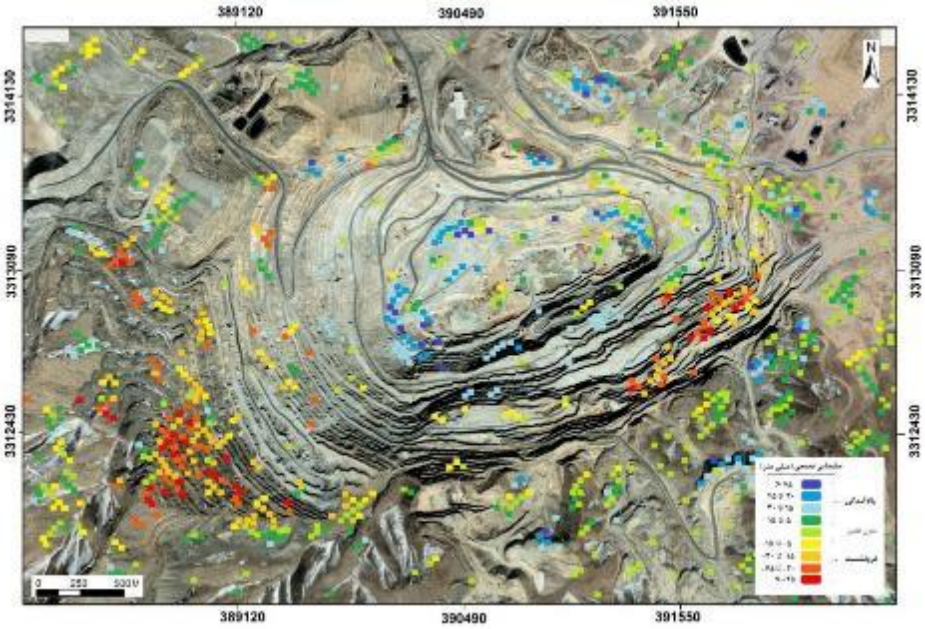


شکل ۵: تصاویر تداخل‌نگاشت به دست آمده از منطقه مورد مطالعه، a: مربوط به تاریخ ۲۰۱۸/۰۴/۱۲، b: مربوط به تاریخ ۲۰۱۸/۰۵/۱۹، c: مربوط به تاریخ ۲۰۱۸/۰۶/۲۱، d: مربوط به تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۰، e: مربوط به تاریخ ۲۰۱۸/۰۹/۱۵، f: مربوط به تاریخ ۲۰۱۸/۱۲/۲۷، g: مربوط به تاریخ ۲۰۱۹/۰۲/۰۳، h: مربوط به تاریخ ۲۰۱۹/۰۳/۱۸، i: مربوط به تاریخ ۲۰۱۹/۰۴/۱۰، برای تهیه این تداخل‌نگاشت‌ها از تصویر ۲۰۱۸/۱۱/۲۰ به عنوان تصویر پایه استفاده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.17]

با انجام روش StaMPS بر روی تداخل‌نگاشت‌ها، تعداد ۶۵۰ نقطه به عنوان نقاط پراکنش‌کننده دائمی در محدوده مورد مطالعه شناسایی و انتخاب شد. سپس میزان جابجایی این نقاط محاسبه گردید. نقشه موقعیت این نقاط و میزان جابجایی آنها در شکل شماره ۶ مشاهده می‌شود. از آنجایی که ویژگی‌های پراکنشی نقاط پراکنش‌کننده دائمی در طول زمان ثابت بوده و دچار عدم همبستگی زمانی نمی‌شوند، می‌توانند در شناسایی مناطق با تغییر شکل متغیر در زمان مورد استفاده قرار گیرند، به همین دلیل در مناطقی که جابجایی دارای رفتار غیر ثابت و نامشخص است، مانند محدوده‌های معدنی، میزان جابجایی آنها نیز دقیقاً مورد استناد بوده و نشانگر تغییرات سطحی رخداده بر روی زمین است. همانطور که در شکل شماره ۶ مشاهده می‌شود جابجایی تجمعی نقاط پراکنش‌کننده دائمی از بیش از ۴۵+ میلیمتر تا ۴۵- میلیمتر متغیر است. جابجایی‌های رخداده در جهت دید ماهواره است به طوری که اعداد مثبت نشانگر نزدیک شدن سطح به ماهواره و بالاآمدگی و اعداد منفی نشانگر فاصله گرفتن سطح از ماهواره و فرونشست است. در شکل شماره ۶ نقاط پراکنش‌کننده دائمی بر روی تصویر به دست آمده از Google Earth قرار گرفته است. نقاط قرمز رنگ واقع در محدوده مورد مطالعه در طول یک سال دچار بیش از ۴۵ میلیمتر نشست شده‌اند. این میزان برای نقاط نارنجی به ۳۰ تا ۴۵ میلیمتر می‌رسد. همانطور که در شکل مشخص است، در بخش غربی دیواره معدن، محدوده‌ای به مساحت ۱۰۰۰۰۰ متر مربع دچار فرونشست زیادی شده است. که این فرونشست بر اساس نقاط پراکنش‌کننده دائمی به بیش از ۴۵ میلیمتر نیز می‌رسد. محدوده بعدی که دارای نقاط فرونشستی بالایی است، در بخش شرقی دیواره معدن و به مساحت ۶۸۰۰۰ متر مربع می‌باشد. محدوده سوم در بخش شمال غربی معدن با مساحت ۱۷۰۰۰ متر مربع واقع شده است. البته بر اساس نتایج به دست آمده بین میزان فرونشست و بالاآمدگی رخداده در محدوده معدن نوعی تعادل برقرار است به طوری که در مناطق مرکزی و دیواره شمالی معدن غالباً رفتار سطح زمین به صورت بالاآمدگی بوده و میزان آن نیز در حدود ۴۵ میلیمتر در سال بوده است. که این مسئله می‌تواند به موضوع ایزوستازی مرتبط باشد، زیرا بنا به اصل ایزوستازی اگر در محدوده‌ای از سطح زمین بار رویی برداشته شود، زمین جهت برقراری دوباره تعادل ایزوستازی به سمت بالا حرکت می‌کند (حنیفی و همکاران، ۱۳۹۷؛ صالح آبادی، ۱۳۸۲؛ Margirier et al. ۲۰۱۸).



شکل ۶: نقشه موقعیت نقاط پراکنش‌کننده دائمی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.17]

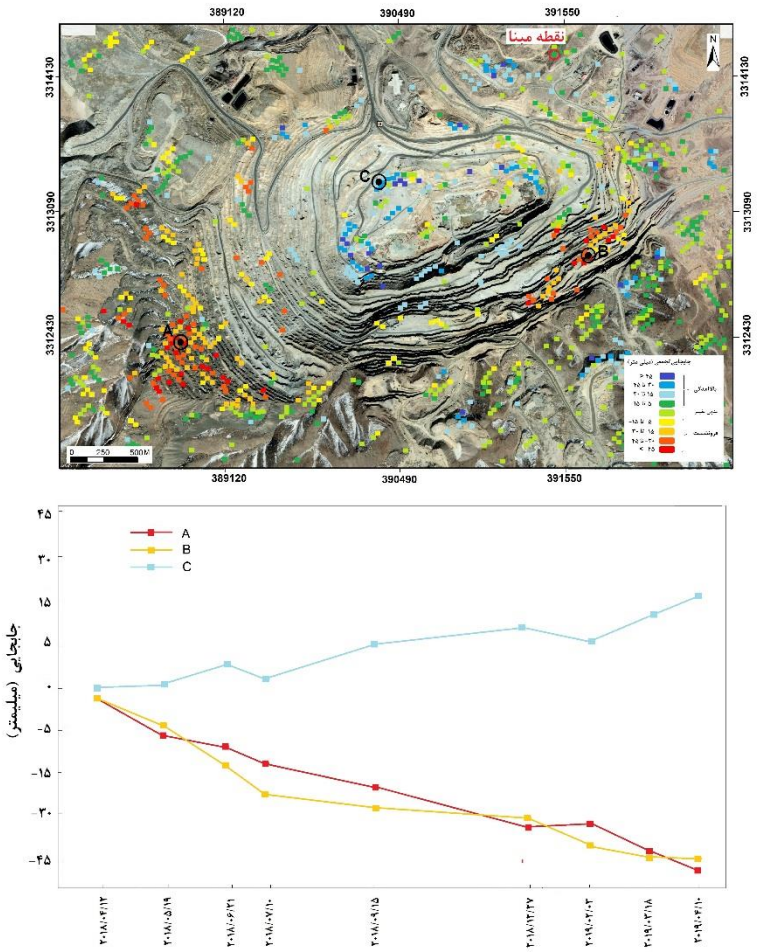
با توجه به اینکه پایش رفتار حرکتی سطح زمین در طول زمان یکی از مهمترین روش‌های تحلیل پایداری و عدم پایداری سطوح محسوب می‌شود (شمس الدینی و همکاران، ۱۳۹۴؛ Azizi et al. ۲۰۱۸; Du et al. ۲۰۱۸; Hu et al. ۲۰۱۷) در این راستا و به منظور بررسی میزان و چگونگی تغییرات رخداده بر روی دیواره معدن و تحلیل پایداری آن، نمودار آنالیز سری زمانی جابجایی در سه نقطه از دیواره معدن مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل شماره ۸ مشاهده می‌شود نقاط A و B بر روی محدوده-های فرونشستی واقع شده و نقطه C بر روی منطقه بالاآمده قرار دارد. بر اساس نمودار بدست آمده رفتار نقاط A وB با نقطه C کاملاً عکس هم بوده است، به طوری که نقاط A و B در این بازه یک ساله با یک روند تقریباً یکنواختی دچار فرونشست شده‌اند. که ادامه این روند می‌تواند زنگ خطری برای پایداری دیواره معدن در این محدوده‌ها قلمداد شود.

وجود شکستگی‌ها و لغزش‌ها در محدوده های فرونشستی به دست آمده از مطالعات میدانی (شکل ۷)، می‌تواند مؤید کاربرد روش و تکنیک پراکنش‌کننده‌های دائمی در تحلیل پایداری شیب باشد. علاوه براین، نتایج به دست آمده از این تحقیق ضمن تایید نتایج حاصل از تحلیل پایداری انجام گرفته توسط موسوی و همکاران (۱۳۸۸) بر روی دیواره غربی معدن مس سرچشمه با استفاده از روش المان مجزای سه‌بعدی، باعث شناسایی محدوده‌های ناپایدار بیشتری شده است. علاوه بر این استفاده از روش-های سنجش از دور و مخصوصاً پردازش تصاویر راداری در تحلیل پایداری شیب نسبت به روش‌های ژئودتیکی و نقشه‌برداری می‌تواند علاوه بر بالا بردن سرعت و دقت کار، باعث کاهش بسیار زیاد هزینه‌های تحقیق و مطالعه شود (Carla et al. ۲۰۱۸) آنچه که در این تحقیق نیز مشهود است.

شکل ۷: الف- نمونه ترک ها و شکستگی های رخ داده در بخش شمال غربی معدن ب- لغزش شکل گرفته در محدوده فرونشستی بخش غربی دیواره معدن

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.17]



شکل۸: الف- موقعیت نقاط مورد استفاده در آنالیز سری زمانی ب- نمودار سری زمانی

مقایسه نتایج به دست آمده از این پژوهش با مطالعات مشابه در دیگر نقاط جهان موید کارآمدی روش‌های سنجش از دوری نظیر تفسیر تصاویر راداری در پایش ناپایداری‌های دامنه‌ای دارد، به طوری که فردج و همکاران (۲۰۱۸) با مطالعه پایداری شیب معادن روباز کشور الجزایر به این نتیجه رسیده‌اند که در بسیاری از دامنه‌های این معادن، توده‌های لغزشی خطرناکی وجود دارد که سالانه تا ۲۷ میلیمتر نیز نرخ جابجایی آنها می‌باشد. همچنین مطالعات عزیزی و همکاران (۲۰۱۵) نشان می‌دهد که استفاده از روش پراکنش‌کننده‌های راداری در بررسی خطر ناپایداری شیب در معادن روباز می‌تواند بسیار مفید و ارزشمند باشد به طوری که ایشان نیز به مانند نتایج به دست آمده در این تحقیق یکسری از محدوده ها را به عنوان مناطق پرخطر به جهت ناپایداری دامنه و ریزش احتمالی تشخیص داده‌اند.

نتیجه‌گیری

عدم پایداری دیواره در معادن روباز همواره می‌تواند خطرآفرین باشد. پایش تغییرات ارتفاعی رخ‌داده در محدوده این معادن را می‌توان یکی از راهکارهای مناسب جهت تحلیل پایداری و شناسایی محدوده‌های در معرض تخریب دانست. در این تحقیق با استفاده از روش پراکنش‌کننده‌های دائمی میزان تغییرات سطحی رخداده در محدوده معدن مس سرچشمه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این روش نشان از وجود چندین محدوده فرونشستی در سطح این معدن دارد. به طوری که نرخ فرونشست در سه محدوده به بیش از ۴۵ میلیمتر در سال می‌رسد. که ادامه این روند می‌تواند باعث خطر ریزش دیواره در این محدوده‌ها شود. علاوه بر این نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد، از آنجایی که روش تداخل‌سنجی ساده، به دلیل تغییرات گسترده و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.17]

سریع رخ‌داده در سطح معادن روباز در نتیجه برداشت مواد معدنی و تغییرات مداوم توپوگرافی، نمی‌تواند تغییرات رخداده طبیعی سطح زمین را مشخص کند. که می‌توان از روش تداخل‌سنجی پراکنش‌کننده‌های دائمی به سبب ویژگی خاص پراکنشی نقاط پراکنش‌کننده دائمی، از این روش به خوبی در اینگونه مناطق استفاده کرد.

منابع

المدرسی، سید علی؛ جواد حاتمی و علی سرکارگر. ۱۳۹۵. محاسبه خصوصیات فیزیکی برف با استفاده از تکنیک تداخل سنج تفاضلی راداری و تصاویر سنجنده ترا سارایکس باند (TerraSAR-X) و مودیس (MODIS). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، **۷(۲)**: ۷۵-۵۹.

حنیفی، زینب؛ بهزاد زمانی و اکبر اصغری. ۱۳۹۷. مخاطرات ناشی از بازجهش ایزوستازی پوسته در منطقه دریاچه ارومیه بر اثر خشک شدن. کنفرانس ملی پژوهش‌های دانش بنیان در علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز. صص. ۱-۱۰.

رهنمون فر، محبوبه؛ رضا حیدری و محمد رضا قیطانچی. ۱۳۸۵. تعیین جابه جایی و بزرگی زلزله سال ۱۳۸۲ بم در جنوب شرقی ایران با استفاده از داده های ماهواره با روش تداخل سنجی راداری. مجلهٔ فیزیک زمین و فضا، **۳۲ (۲)**: ۱۱۷-۱۲۴.

زارع کمالی، محمد؛ سید علی المدرسی و کیوان نقدی. ۱۳۹۶. مقایسه میزان جابجایی عمودی زمین با استفاده از الگوریتم SBAS در باندهای راداری X و C (مطالعهٔ موردی: اراضی تهران). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، **۸(۳)**: ۱۰۴-۱۲۰.

شمس‌الدینی، علی؛ لیلا فرامرزی؛ رضا باقرپور و مهدی اسدی‌پور. ۱۳۹۴. مکان یابی محل نصب ابزاردقیق در دیواره غربی معدن مس سرچشمه با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی. روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، **۵ (۱۰)**: ۲۷-۴۰.

صالح آبادی، علی. ۱۳۸۲. ژئودزی جاذبه. اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، **۱۲ (۴۶)**: ۱۸-۲۳.

مهرابی، علی. ۱۳۹۷. شناسایی شواهدی بر وجود گنبد نمکی مدفون و جدید در ناحیه زاگرس با استفاده از روش تداخل¬سنجی تصاویر راداری سنتینل-۱ و ایسار. سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، **۹ (۴)**: ۱۰۱-۹۰.

مهرابی، علی و محسن پورخسروانی. ۱۳۹۷. اندازه گیری میزان جابجایی سطح زمین ناشی از زلزله ۱۳۸۳ داهوئیه زرند استان کرمان و شناسایی گسله عامل آن با استفاده از روش تداخل سنجی راداری. فصلنامه ژئومور فولووژی کمی، **۷(۱)**: ۶۱-۷۳

ملکی، محمد؛ سید مهدی توکلی صبور؛ پرویز ضیائیان فیروزآبادی و محمد رئیسی. ۱۳۹۷. مقایسه داده‌های اپتیک و رادار در استخراج عوارض و پدیده‌های زمینی. سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، **۹ (۲)**: ۹۳-۱۰۷.

موسوی، مهدی؛ علی یاراحمدی و حمید رضا بخشی. ۱۳۸۸. تحلیل پایداری دیواره غربی معدن مس سرچشمه با استفاده از روش المان مجزای سه‌بعدی. نشریه دانشکده فنی، **۴۳ (۳)**: ۳۱۱-۳۲۳.

یعقوبی، احمد؛ محمد شمس الدین سعید و پیمان معارف‌وند. ۱۳۹۵. تحلیل پایداری و ارزیابی ریزش سنگین مجدد در دیواره معدن روباز انگوران. روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، **۶ (۱۲)**: ۳۳-۴۵.

Azizi, M. A.; S. R. Kramadibrata, K. Wattimena, and D. Sidi. ۲۰۱۵. Risk Assessment of Open Pit Slope Design at PT Adaro Indonesia. *Indonesian Mining Journal*, ۱۷ **(۳)**:۱۱۳-۱۲۱.

Azizi, M. A.; I. Marwanza, S. A. Amala, and N. A. Hartanti. ۲۰۱۸. Three dimensional slope stability analysis of open pit limestone mine in Rembang District, Central Java. *Earth and Environmental Science* **۲۱۲**:۱۲-۳۵.

Carla, T.; P. Farinac, E. Intrierib, H. Ketizmend, and N. Casaglib. ۲۰۱۸. Integration of ground-based radar and satellite InSAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine. *Engineering Geology* **۲۳۵**: ۳۹_۵۲.

Du, Z.; L.Ge, A. Hay-Man, X. Li, and L. Li. ۲۰۱۸. Monitoring of ground deformation in Liulin district, China using InSAR approaches. *International Journal of Digital Earth*, ۱۱**(۳)**: ۲٦٤-۲۸۳.

Ferretti, D.; A. Colombo, F. Fumagalli, M. Novali, and A. Rucci. ۲۰۱۵. InSAR data for monitoring land subsidence: time to think big-proc-iahs.net.

Ferretti, A.; C. Prati, and F. Rocca. ۲۰۰۱. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, **۳۹ (۱)**: ۸ – ۲۰.

Ferretti, A.; G, Savio, R. Barzaghi, A. Borghi, S. Musazzi, F. Novali, C. Prati, and F. Rocca. ۲۰۰۷. Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation, Geoscience and Remote Sensing. *IEEE Transactions*, **٤٥**: ۱۱٤۲-۱۱٥۳.

Fredj, M.; A. Hafsaoui, Y. Khedri, R. Boukarm, R. Nakache, A. Saadoun, and K. Menacer. ۲۰۱۸. Study of Slope Stability (Open Pit Mining, Algeria). *Sustainable Civil Infrastructures*, **۳(۱۱)**:٤٦-٦۷.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.17]

Gabriel, A. K.; R. M. Goldstein, and H. A. Zebker. ۱۹۸۹. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *J. Geophys. Res.*, **۹٤(B۷)**: ۹۱۸۳-۹۱۹۱.

Hooper, A. ۲۰۰٦. Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation. *PH.D. thesis*, Standford University.

Hooper, A. ۲۰۰۸. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophys. Res. Letters*, **۳۵**: L۱٦۳۰.

Hooper, A.; and D. Bekaert. ۲۰۱۲. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *The International Journal of Integrated Solid Earth Siences*, **٥۱٤**: ۱-۱۳.

Hooper, N.; D. Bekaert, K. Spaans, and M. Arikan. ۲۰۱۲. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, **۲۳**: ٥۱٤- ٥۱۷.

Hu, J.; X. Ding, L. Zhang, Q. Sun, Z. Li, J. Zhu, and Z. Lu. ۲۰۱۷. Estimation of ۳-D surface displacement based on inSAR and deformation modeling. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote sensing*, **٥٥(٤)**: ۲۰۰۷-۲۰۱٦.

Intrieri, E.; Carlà, T. and G. Gigli ۲۰۱۹. Forecasting the time of failure of landslides at slopescale: a literature review. *Earth Sci. Rev.* **۱۹۳**, ۳۳۳–۳٤۹.

Li, M.; Zhang, L. Ding, C. Li, W. Luo, H. Liao, M. and Q. Xu. ۲۰۲۰. Retrieval of historical surface displacements of the Baige landslide from time-series SAR observations for retrospective analysis of the collapse event. *Remote Sens. Environ.* **۲٤۰,** ۲۲-۳٥.

Livio, F.; L. Serva, and A. Gürpinar. ۲۰۱۷. Locating distributed faulting: Contributions from InSAR imaging to Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA). *Quaternary International* **٤٥۱**: ۲۲۳-۲۳۳.

Lundgren, P.; S. Usai, E. Sansosti, R. Lanari, M. Tesauro, G. Fornaro, and P. Berardino. ۲۰۰۱. Modeling surface deformation observedwith synthetic aperture radar interferometry, at Campi Flegrei caldera. *Journal of Geophysical Research*, **۱۰٦ (۱۹)**: ۳٥٥–۳٦٦.

Margirier, A.; J. Brauna, X. Robertb, and L. Audinb. ۲۰۱۸. Role of erosion and isostasy in the Cordillera Blanca uplift: Insights from landscape evolution modeling (northern Peru, Andes). *Tectonophysics* **۷۲۸**: ۱۱۹–۱۲۹.

Mehrabi, A.; M. Dastanpour, Sh. Radfar, M. R. Vaziri, and R. Derakhshani. ۲۰۱٥. Detection of fault lineaments of the Zagros fold-thrust belt based on Landsat imagery interpretation and their spatial relationship with Hormoz Series salt dome locations using GIS analysis. *Geosciences*, **۲٤ (۹٥)**: ۱۷-۳۲.

Mehrabi, A.; M. Khabazi, S. A. Almodaresi, M. Nohesara, and R. Derakhshani. ۲۰۱۹. Land use changes monitoring over ۳۰ years and prediction of future changes using multi-temporal Landsat imagery and the land change modeler tools in Rafsanjan city (Iran). *Sustainable Development of Mountain Territories*, **۱۹(۱)**: ۲٦-۳٥.

Nakashima, S.; H. Kawasaki, S. Kubota, T. Nakano, N. Shimizu. ۲۰۱۲. Measurement of exterior deformation of an earth-filled dam using GPS displacement monitoring system. *12th ISRM International Congress on Rock Mechanics*, Taylor & Francis, ۱۰٦۹-۱۰۷۲.

Pourkhosravani, M.; A. Mehrabi, and S. H. Mousavi. ۲۰۱۸. Drought Spatial Analysis of Sirjan Basin Using Remote Sensing. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, **۷(۱۲)**: ۳٤-٤٥.

Shimizu, N. ۲۰۰۹. Displacement measurements using Global Positioning System for rock movements-Fundamentals, new developments and practical applications. *Proc. Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering*, ۱۷-٤۳.

Shimizu, N, T. Masunari, and T. Iwasaki. ۲۰۱۲. GPS displacement monitoring system for the precise measuring of rock movements, *12th ISRM International Congress on Rock Mechanics*, Taylor & Francis, ۱۱۱۷-۱۱۲۰.

Sugawara, K.; D. Fukahori, L. Faramarzi, and N. Nakamura. ۲۰۰۳. High-resolution tilt monitoring for slope stability assessment in limestone quarry. *Proc. of the 1st Kyoto Int. Sym. on Underground Environment* (keynote lecture), ٥۱-٦۲, Japan.

Wang, Y.: Guo, Y. Hu, H. and W. Le. ۲۰۱۹. Ground Deformation Analysis Using InSAR and Backpropagation Prediction with Influencing Factors in Erhai Region, China. *Sustainability*, ۱۱, ۲۸٥۳.

Wright, T. J.; Z. Lu, and C. Wicks. ۲۰۰٤. Constraining the slip distribution and fault geometry of the Mw ۷,۹, ۳ November ۳ ۲۰۰۲, Denali Fault earthquake with InSAR and GPS. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **۹٤(٦B)**: ۱۷٥–۱۸۹.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.3.17]