

شناسایی، پایش و بررسی سازوکار زمین لغزش با استفاده از روش تداخل سنجی پراکنش کننده‌های دائمی تصاویر ماهواره‌ای رادار با روزنه ترکیبی

کوروش شیرانی^{*۱}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۸/۸)

چکیده

تکنیک تداخل سنجی راداری ابزار ارزشمندی در پایش جابه‌جایی‌های سطح زمین است. یکی از روش‌هایی که به منظور کاهش محدودیت‌های این تکنیک وجود دارد، روش تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش کننده‌های دائمی (PS) است که جابه‌جایی را تنها بر روی پیکسل‌هایی که ویژگی‌های پراکنشی آنها در طول زمان تقریباً ثابت است، پایش می‌کند. در این پژوهش با هدف شناسایی و پایش لغزش با استفاده از فناوری پراکنش کننده‌های دائمی دو مجموعه داده‌های PALSAR و ASAR، به ترتیب با طول موج باند L و C، حالت مداری گذربالا و پایین در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ و ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ در منطقه روستای نقل از توابع پادنا‌ی علیای سمیرم استان اصفهان به کار گرفته شدند. نتایج اندازه‌گیری جابه‌جایی نشان داد که هر دو مجموعه داده PALSAR و ASAR، با استفاده از روش PS (با مقادیر ۱۲۵۳ میلی‌متر و ۱۵۷۸ میلی‌متر در دوبازه زمانی چهار و هفت سال) در شناسایی لغزش نقل، کارآمد هستند. لیکن نتایج پردازش تصاویر ASAR نسبت به PALSAR برای تعیین میزان جابه‌جایی قائم لغزش به دلیل حرکت مداری گذرپایین، مناسب‌تر هستند. این در حالی است که تصاویر PALSAR به دلیل شناسایی تعداد نقاط پراکنش کننده دائمی بیشتر، محدوده لغزش را بهتر شناسایی می‌کنند. نتایج حاصل از روش‌های GPS و PS برای روند لغزش نقل یکسان و مؤید یکدیگر به سمت غرب است. همچنین میزان جابه‌جایی قائم بین یک تا دو متر در قسمت‌های مختلف سطح لغزش اندازه‌گیری شد. در نهایت با استفاده از تلفیق داده‌های راداری PALSAR و ASAR که به ترتیب در دو گذربالا و پایین، امکان بررسی سازوکار، نوع لغزش و جهت حرکت آن فراهم شده است.

واژه‌های کلیدی: تداخل سنجی، پراکنش کننده‌های دائمی، رادار، زمین لغزش، ASAR, PALSAR

۱. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: K.Shirani@areeo.ac.ir

مقدمه

برداشت‌گر لیزری زمینی استوار هستند. این فن‌آوری‌ها با وجود استحکام و قابلیت اطمینان‌شان، زمان‌بر و مستلزم امکانات ویژه هستند، لذا برای به‌روزرسانی به موقع آنها، نیازمند صرف زمان و هزینه زیاد است (۳۲).

تداخل‌سنجی راداری با روزه ترکیبی (Interferometry Synthetic Aperture Radar) (InSAR) شاخه مهمی از سنجش از دور است. این شاخه در تهیه نقشه و پایش زمین‌لغزش با توجه به قابلیت‌های آن در تشخیص حرکات سطح زمین در حد دقت میلی‌متری نقش مهمی ایفا می‌کند (۳۹). روش پردازش مرسوم تداخل‌سنجی روزه ترکیبی رادار (InSAR) برای تشخیص و شناسایی حرکات زمینی عمدتاً بر تکنیک تفاضلی تداخل‌سنجی روزه ترکیبی رادار (Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar) (DInSAR) متمرکز شده است (۳۹). سودمندی روش (DInSAR) در مطالعه زمین لغزش به‌واسطه کارهای متعدد، اثبات شده است (۳۳ و ۳۴). در هر صورت کاربرد تکنیک‌های سنتی DInSAR به‌دلیل وجود اختلالات اتمسفری و عدم همبستگی زمانی و مکانی، محدود شده است (۱۳ و ۲۲). این عوامل محدود کننده منجر به ایجاد روش‌های پردازشی پیشرفته‌تر تصاویر SAR شده است. فاز تداخل‌سنجی راداری اندازه‌گیری شده تحت تأثیر عوامل گوناگونی قرار می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین این عوامل اثرات اتمسفری است که در فاز اینترفرومتریک اختلال ایجاد می‌کند (۴۰). ناهمبستگی زمانی یکی از دیگر عواملی است که بر فاز اینترفرومتریک اثر می‌گذارد. این اثر به‌خصوص در نواحی دارای پوشش گیاهی به‌علت تغییر ویژگی پراکنشی عوارض در طول زمان دیده می‌شود (۴۰). از دیگر عوامل تأثیرگذار می‌توان به اثر ناهمبستگی ناشی از بلند بودن خط مبنای مکانی (Spatial baseline) بین دو تصویر راداری اشاره کرد. در واقع با به‌کارگیری تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری چند زمانه (Multi temporal InSAR techniques)، می‌توان اثر ناهمبستگی‌های مختلف را روی فاز تداخل‌سنجی راداری

پدیده زمین‌لغزش یا همان فرایند تدریجی حرکت لایه سطحی زمین در بسیاری از مناطق کوهستانی اتفاق می‌افتد. این پدیده بسته به وسعت مکانی و شدت جابه‌جایی، اثرات محیطی مختلفی را در پی خواهد داشت. مطالعه و ارزیابی مکان‌های مستعد زمین‌لغزش و برآورد میزان جابه‌جایی و فعالیت آنها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است (۶، ۸، ۹ و ۲۹). وقوع زمین‌لغزش در کوهستان‌های فعال سبب فرسایش شدید شکل ظاهری زمین خواهد شد. علاوه بر این، زمین‌لغزش یکی از مخرب‌ترین سوانح طبیعی است که جان انسان‌ها و زیرساخت‌های شهری را در معرض تهدید قرار می‌دهد و هر ساله سبب خسارات گسترده‌ای در کل جهان می‌شود. در ایران نیز به‌سبب وجود مناطق کوهستانی با شیب تند و همچنین فاکتورهای تشدید کننده نظیر بارندگی و زمین‌لرزه، زمین‌لغزش‌های متعددی رخ می‌دهد. از این‌رو، بررسی مناطقی که در آن خطر وقوع زمین‌لغزش زیاد است ضروری به‌نظر می‌رسد. به این منظور نیاز به تکنیک‌هایی است که به‌وسیله آن بتوان موقعیت، اندازه لغزش و میزان جابه‌جایی را به‌طور دقیق برآورد کرد (۶ و ۸). ارزیابی درست پدیده‌های ژئومورفولوژیکی نظیر زمین‌لغزش، نیازمند بررسی و تحلیل الگوی زمانی و مکانی جابه‌جایی‌هاست. نظارت و پایش در قلمرو زمین‌لغزش، به مفهوم مقایسه وضعیت زمین‌لغزش (مانند گسترش سطحی، نرخ حرکت، توپوگرافی سطحی یا رطوبت خاک) در دوره‌های مختلف زمانی، به‌منظور ارزیابی فعالیت زمین‌لغزش است (۸). اندازه‌گیری جابه‌جایی سطحی ناشی از حرکت دامنه‌ای اغلب بیانگر مؤثرترین روش برای تعریف رفتار زمین‌لغزش بود که مشاهده واکنش نسبت به عوامل محرک و ارزیابی اثربخشی اقدامات کاهش خطر را امکان‌پذیر می‌سازد (۶، ۱۹ و ۲۹).

بازیابی جابه‌جایی‌های سطحی زمین با گذشت زمان، از نظر تاریخی بر مبنای فن‌آوری‌های سنتی، شامل کشش سنج سیمی معمولی، شیب‌سنج‌ها، سامانه موقعیت‌یاب جهانی (Global Position System) (GPS)، ترازایی یا فتوگرامتری و

تاریخ‌های اکتسابی مختلف را براساس تشخیص جابه‌جایی فاز وابسته به حرکات زمینی از مؤلفه فاز، با در نظر گرفتن اثر جو، توپوگرافی و نوفه برآورد می‌کند (۲۱ و ۲۲).

فاز بازیابی نشده \emptyset تداخل‌سنجی تفاضلی راداری مشاهده شده، ناشی از جمع فاز چند اثر فیزیکی است (۳۹). این اثرات فیزیکی شامل \emptyset DEFO تغییر فاز در اثر تغییر شکل بین مشاهدات، \emptyset ATM تغییر فاز در اثر سیگنال اتمسفری، \emptyset ORB خطای فاز ناشی از تغییر پارامترهای مداری، \emptyset DEM منتج از خطاهای ناشی از DEM استفاده شده برای حذف توپوگرافی و \emptyset NOS فاز ناشی از نوفه حاصل پراکنش‌کننده‌ها و تمام منابع نوفه غیر همبسته است. روش PS با دقت زیاد، اقدام به شناسایی و حذف فازهای \emptyset ATM، \emptyset ORB، \emptyset DEM و \emptyset NOS و تعیین \emptyset DEFO در نهایت می‌کند. فن‌آوری‌های PSI در پایش زمین لغزش‌ها به کار گرفته شده‌اند (۱۳، ۱۴ و ۳۰). به‌ویژه، دسترسی عظیم تاریخی به آرشیو SAR، روش PSI را در اندازه‌گیری و پایش جابه‌جایی‌های گذشته توانا و کارآمد کرده است. علاوه بر این، دسترسی به داده‌های آرشیوی SAR برای مطالعه تغییرات زمانی حرکت، که ارزیابی پایداری دامنه را امکان‌پذیر می‌سازد، مکملی برای سایر اطلاعات است (۱۶). این روش برای کاربردهای با دقت بالا علاوه بر مناطق وسیع در مناطق کم وسعت (در حد یک زمین لغزش موردی که در حد چند کیلومتر مربع وسعت دارد) نیز به کار می‌رود. روش PSI معرفی هندسه، حالت فعالیت و شدت زمین لغزش را بر مبنای سرعت فراهم می‌آورد. با دسترسی به تعداد زیادی از پراکنده سازهای دائمی در محدوده گستره زمین لغزش در بازه‌های زمانی نسبتاً متمادی مذکور از جابه‌جایی‌های لغزشی، الگوی تغییر شکل را می‌توان تعیین کرد. هدف از این پژوهش شناسایی و پایش زمین لغزش با استفاده از فن‌آوری‌های PSI و GPS است.

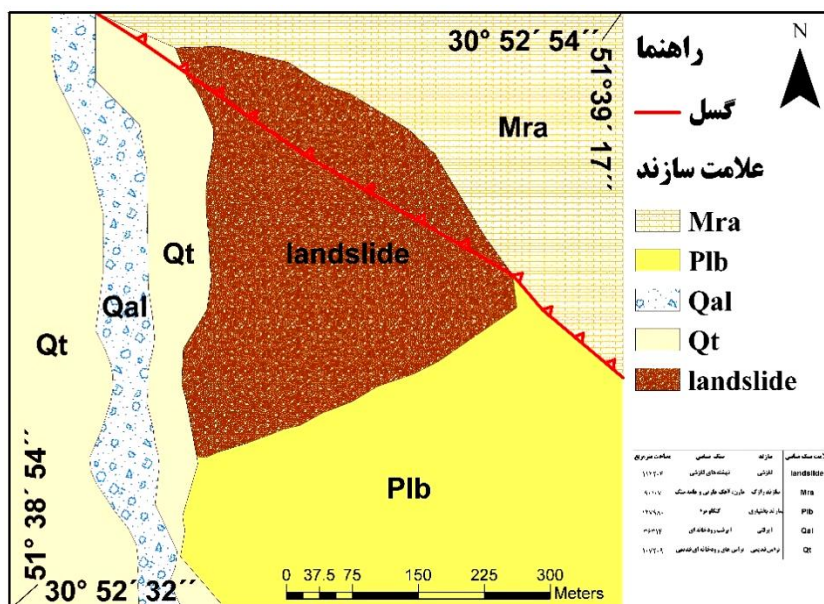
مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شمال روستای نقل از توابع دهستان پادنا،

کاهش داد. استفاده بیش از دو تصویر راداری سبب افزونگی در معادلات مشاهدات شده و امکان استفاده از روش سری زمانی را مهیا می‌سازد.

با گذشت زمان و آرشیو تصاویر راداری از ابتدای دهه ۱۹۹۰ تا به امروز، امکان استفاده از تعداد تصاویر بیشتر و در نتیجه الگوریتم‌های پیچیده‌تر و دقیق‌تر فراهم شد. در این زمینه، برای نخستین بار به این واقعیت دست یافتند که در تصاویر سری زمانی ماهواره ERS-1&2، عوارضی وجود دارند که میزان بازپراکنش برگشتی از آنها در طی زمان تقریباً ثابت می‌ماند (۲۱). با استفاده از آن به این نتیجه رسیدند که با انتخاب آن نقاط در تصویر به ایجاد شبکه‌ای از نقاط پردازند و محاسبات مربوط به اختلافات فازی و تداخل سنجی را به آن نقاط محدود کنند. برتری خاص این روش نسبت به روش ساده تداخل‌سنجی تفاضلی در حذف مزاحمت‌های اتمسفری است؛ در نتیجه می‌تواند به برآوردهای واقعی‌تری از میزان جابه‌جایی در سطح زمین دست یافت. این روش بعدها مورد استفاده تعداد زیادی از محققین قرار گرفت (۱۱ و ۳۶). پیشرفت‌های سریع و هم‌زمان در زمینه سنجنده‌های سنجنش از دوری و الگوریتم‌های پردازشی، دستیابی به نتایج قابل توجهی را در سال‌های اخیر فراهم آورده است. به‌ویژه، کاربرد فناوری تداخل‌سنجی SAR حاصل از چند تداخل‌نگار (PSI) (Persistent Scatterer InSAR) در مطالعه زمین لغزش‌های کند، موضوعی چالش‌برانگیز و نسبتاً جدید است (۱۸، ۲۸، ۳۱ و ۳۵). تاکنون الگوریتم‌های متعددی از فن‌آوری‌های PSI ارائه شده است (۱۵، ۱۷، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۴، ۲۵، ۲۶ و ۳۴). فن‌آوری تداخل‌سنجی SAR حاصل از پراکنش‌کننده‌های دائمی چند تصویری (۱۴، ۲۲ و ۴۰) و توانایی آن را در گردآوری اطلاعات در مورد تغییر شکل‌های زمینی در گستره وسیعی با دقت در حد میلی‌متر، نشان می‌دهد. استفاده از این روش نه تنها برای بررسی حرکات توده‌ای در مقیاس منطقه‌ای بلکه در یک دامنه شیب‌دار نیز مناسب است. این رویکرد از طریق تحلیل‌های آماری باز پراکنش شده سیگنال‌ها، از یک شبکه منفرد اهداف با فاز همدوس، جابه‌جایی‌های اتفاق افتاده بین



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی محدوده زمین‌لغزش نقل

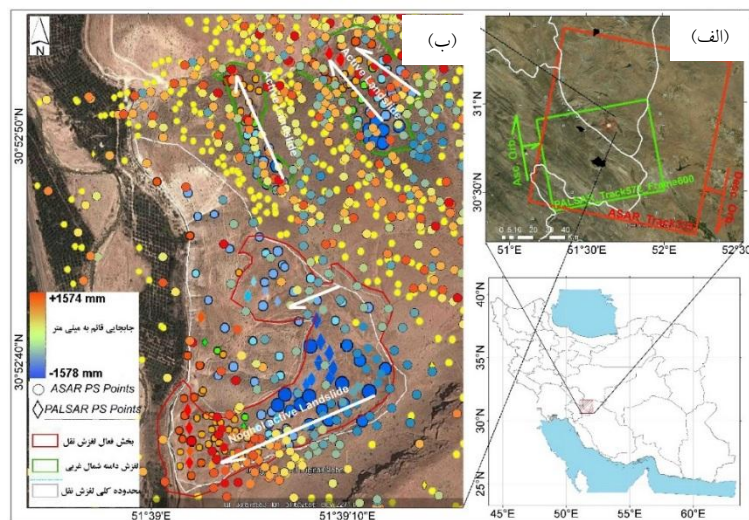
می‌شود (۱). این محدوده در برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ یاسوج تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور جای گرفته است. سازندهای موجود در منطقه عمدتاً شامل رخساره‌های رسوبی سنوزوئیک هستند که گسترش نسبتاً وسیعی در این ناحیه داشته و در محدوده مطالعاتی عمدتاً سازندهای رازک و بختیاری و نهشته‌های کوآترنری برونزد دارند. توده اصلی زمین لغزش روی سازند بختیاری و یا هم‌ارز بختیاری قرار دارد (شکل ۱). سازند رازک (M^{ra})، در منطقه مورد مطالعه متشکل از نهشته‌های تبخیری - آواری با ستبرای حدود ۲۰۰ متر از تناوب مارن و سنگ جوش سرخ‌رنگ با قله‌های گرد شده از جنس چرت و سنگ آهک با میان‌لایه‌های گچ، ماسه سنگ دانه درشت و سنگ آهک مارنی است. سازند بختیاری (P^{lb}) نیز متشکل از کنگلومرای مقاوم در بخش قاعده و کنگلومرای توده‌ای همراه با ماسه‌سنگ در قسمت‌های میانی و بالایی است (۳۰). رسوبات دوران چهارم در محدوده مورد مطالعه شامل تراس‌های آبرفتی جوان (Q^t) و رسوبات آبرفتی بستر رودخانه (Q^{al}) هستند. محدوده لغزشی مورد مطالعه با توجه به اینکه در ناحیه ساختاری زاگرس مرتفع قرار دارد از نظر تکنیکی پویا و فعال است (شکل ۱). این محدوده در بین دو گسل اصلی تراسی دنا

شهرستان سمیرم واقع در ۳۰۰ کیلومتری جنوب استان اصفهان است. این محدوده دارای مختصات جغرافیایی ۳۹' ۵۲' ۳۰" عرض شمالی و ۱۰' ۳۹' ۵۱" طول شرقی است (شکل‌های ۱ تا ۳). بهترین راه دسترسی به منطقه مورد مطالعه از طریق جاده آسفالتی سمیرم - حنا - کفته - نقل است.

از نظر شرایط آب‌وهوایی، محدوده مورد مطالعه دارای رژیم بارش مدیترانه‌ای است. متوسط میزان بارش سالانه در منطقه مورد مطالعه ۵۵۰ میلی‌متر و بیشترین مقدار آن ۷۰۰ میلی‌متر است. از لحاظ توزیع فصل بارندگی پر بارش‌ترین فصل، زمستان است که ۵۱/۶۶ درصد کل بارندگی را شامل می‌شود و بعد از آن فصل‌های پاییز، بهار و تابستان به ترتیب: ۲۵/۹۷، ۲۱/۵۰ و ۰/۸۷ درصد از بارندگی منطقه را شامل می‌شوند (۵) و (۷). روستای نقل در شرق این زمین‌لغزش واقع شده است. این زمین‌لغزش متشکل از یک لغزش قدیمی است که به‌صورت مرکب در حال حاضر در قالب یک لغزش چرخشی در حال فعالیت است (شکل ۲). گستره لغزش ۱۱/۲ هکتار بوده و براساس طبقه‌بندی‌های رایج در طبقه آهسته تا خیلی آهسته قرار می‌گیرد (۱۰). منطقه مورد مطالعه از نظر تقسیم‌بندی زمین‌ساختاری ایران، در ناحیه ساختاری زاگرس مرتفع واقع



شکل ۲. نمایی از توده لغزشی نقل (نگاه به سمت شرق)



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی زمین لغزش نقل (الف) حالت مداری تصاویر ASAR (گذرپایین) و PALSAR (گذربالا) و موقعیت منطقه لغزش نقل (ب) نقاط پراکنش کننده دائمی (PS) حاصل از تصاویر ASAR و PALSAR روی لغزش نقل

در جنوب غرب و کوه سیاه در شمال شرق واقع است.

داده‌های مورد استفاده

برای بررسی، شناسایی و پایش زمین لغزش مورد مطالعه، روش PSI با استفاده از ۱۸ تصویر SAR ENVISAT ASAR در بازه زمانی از تاریخ ۹ اکتبر ۲۰۰۳ (۲۰۰۳۱۰۰۹) تا ۷ اکتبر ۲۰۱۰ (۲۰۱۰۱۰۰۷) و ۱۷ تصویر SAR ALOS PALSAR در دو مد (Fine Beam Single polarization) FBS و (Fine Beam Dual polarization) FBD در بازه زمانی از تاریخ

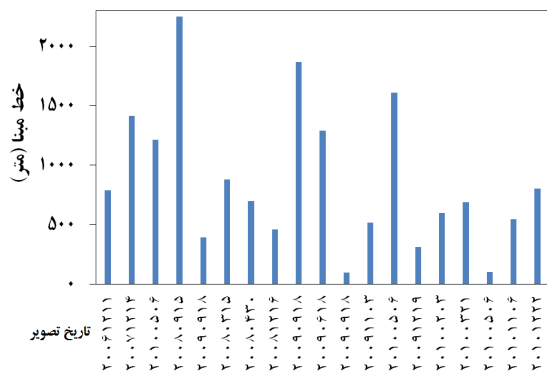
۱۱ دسامبر ۲۰۰۶ (۲۰۰۶۱۲۱۱) تا ۲۲ دسامبر ۲۰۱۰ (۲۰۱۰۱۲۲۲) به ترتیب با حالت مداری گذربالا و پایین اجرا شده است. طول موج سنجنده ENVISAT ۵/۶۶ سانتی متر (باند C) و زاویه فرود سیگنال ۲۳/۵ درجه نسبت به حالت قائم و تصویربرداری مجدد ۳۵ روز است. همچنین طول موج سنجنده ALOS-PALSAR ۲۳ سانتی متر (باند L)، زاویه فرود ۳۹ درجه نسبت به حالت قائم و ملاقات مجدد ۴۶ روز است (جدول ۱). برای PALSAR تصویر ۱۳ جون ۲۰۰۷ (۲۰۰۷۰۶۱۳) و برای ASAR تصویر ۹ اکتبر ۲۰۰۳

جدول ۱. فهرست داده‌های راداری مورد استفاده از سنجنده‌های ASAR و PALSAR در روش PSI

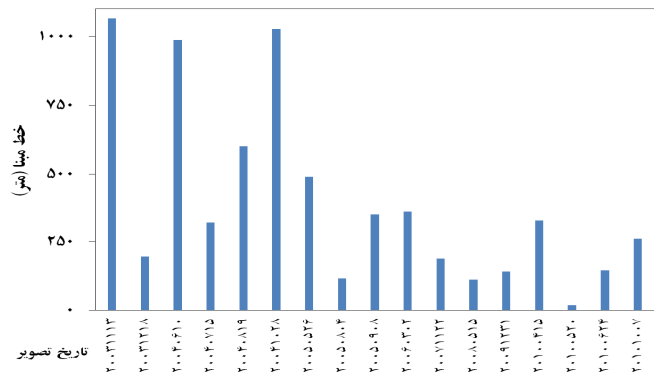
مد تصویر	حالت مدار	عبور	مسیر	قدرت تفکیک مکانی عمود بر امتداد پرواز متر	قدرت تفکیک مکانی	زاویه فرود (درجه)	تاریخ	نوع سنجنده
FBS	گذریبالا	۶۰۰	۵۷۲	۷/۴۹	۳/۰۵	۳۸/۷۰۹	۲۰۰۶/۱۲/۱۱	ALOS-PALSAR
FBD				۱۴/۹۸	۳/۰۵	۳۸/۷۰۲	۲۰۰۷/۰۶/۱۳	
FBS				۷/۴۹	۳/۰۵	۳۸/۷۰۲	۲۰۰۷/۱۲/۱۴	
FBS				۷/۴۹	۳/۰۵	۳۸/۷۰۰	۲۰۰۸/۰۳/۱۵	
FBD				۱۴/۹۸	۳/۰۵	۳۸/۶۸۴	۲۰۰۸/۰۴/۳۰	
FBD				۱۴/۹۸	۳/۰۵	۳۸/۶۹۸	۲۰۰۸/۰۶/۱۵	
FBD				۱۴/۹۹	۳/۰۵	۳۸/۶۷۲	۲۰۰۸/۰۹/۱۵	
FBS				۷/۴۹	۳/۰۵	۳۸/۷۱۱	۲۰۰۸/۱۲/۱۶	
FBD				۱۴/۹۸	۳/۰۵	۳۸/۶۹۳	۲۰۰۹/۰۶/۱۸	
FBD				۱۴/۹۹	۳/۰۵	۳۸/۶۷۵	۲۰۰۹/۰۹/۱۸	
FBS				۷/۴۹	۳/۰۵	۳۸/۷۰۹	۲۰۰۹/۱۱/۰۳	
FBS				۷/۴۹	۳/۰۵	۳۸/۷۰۴	۲۰۰۹/۱۲/۱۹	
FBS				۷/۴۸	۳/۰۵	۳۸/۷۱۳	۲۰۱۰/۰۲/۰۳	
FBS				۷/۴۸	۳/۰۵	۳۸/۷۱۷	۲۰۱۰/۰۳/۲۱	
FBD				۱۴/۹۹	۳/۰۵	۳۸/۶۷۶	۲۰۱۰/۰۵/۰۶	
FBD				۱۴/۹۹	۳/۰۵	۳۸/۶۷۸	۲۰۱۰/۱۱/۰۶	
FBS				۷/۴۹	۳/۰۵	۳۸/۶۹۶	۲۰۱۰/۱۲/۲۲	
				گذریپایین	۳۳۵	۲۹۷۹	۱۹/۷۹	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۱				۲۰۰۳/۱۱/۱۳	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۱				۲۰۰۳/۱۲/۱۸	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۲				۲۰۰۴/۰۶/۱۰	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۱				۲۰۰۴/۰۷/۱۵	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۲				۲۰۰۴/۰۸/۱۹	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۱				۲۰۰۴/۱۰/۲۸	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۳				۲۰۰۵/۰۵/۲۶	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۲				۲۰۰۵/۰۸/۰۴	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۲				۲۰۰۵/۰۹/۰۸	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۱				۲۰۰۶/۰۳/۰۲	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۱				۲۰۰۷/۱۱/۲۲	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۲				۲۰۰۸/۰۵/۱۵	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۱				۲۰۰۹/۱۲/۳۱	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۴				۲۰۱۰/۰۴/۱۵	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۱				۲۰۱۰/۰۵/۲۰	
	۱۹/۷۹	۴/۰۵	۲۳/۲۱				۲۰۱۰/۰۶/۲۴	

جهت ایجاد مجموعه (stack) تداخل‌سنج‌ها در نظر گرفته شدند (شکل‌های ۴ و ۵). همچنین در طی مراحل اجرای روش PS از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) تصاویر ASTER با قدرت

(۲۰۰۳۱۰۰۹) دارای مناسب‌ترین خط مبنای قائم (Perpendicular baseline) و همدوسی (incoherency) نسبت به دیگر تصاویر هستند. لذا به‌عنوان تصویر اصلی (master)



شکل ۵. توزیع مقادیر خط مبنای داده‌های ENVIAT ASAR (حرکت مداری: گذرپایین، گذر: ۳۳۵، زاویه فرود: ~ ۲۳°، سمت دید: راست، قطبش: HH)



شکل ۴. توزیع مقادیر خط مبنای داده‌های ALOS PALSAR (حرکت مداری: گذربالا، گذر: ۵۷۲، عبور: ۶۰۰، زاویه فرود: ~ ۳۸/۷°، سمت دید: راست، قطبش: HH)

شده، حذف شد. منظور از جابه‌جایی فاز همان میزان فاز باقی‌مانده از مرحله واپیچش فاز است که ناشی از خطاهای مداری، فاز حاصل از خطای رمپ است که بایستی برای تبدیل فاز به ارتفاع یا جابه‌جایی زمین با استفاده از نقاط GCP تعریف شده با استفاده از پالایش و تسطیح مجدد آن را تصحیح کرد. محاسبه این جابه‌جایی فاز روی پیکسل تصویر، با بالاترین نسبت میانگین به انحراف معیار انجام شد. به‌منظور تعیین اندازه‌گیری جابه‌جایی قابل اعتماد، یک یا چند نقطه کنترل زمینی (GCP) در پردازش وارد شد. این داده‌ها، ارزیابی روند جابه‌جایی را بهینه می‌کند. در مرحله بعد سرعت و تاریخ جابه‌جایی، ارتفاع باقی‌مانده همانند همه دیگر تولیدات وابسته به PS برای تمام پیکسل‌های تصویر ایجاد شد. پس از آن، پراکنده‌سازهای دائمی معتبر براساس آستانه همدوسی محصول، انتخاب و در نهایت PSها ژئوکد شدند. پس از اجرای روش پراکنده‌ساز دائمی (PS) بر روی هر دو سری تصویر (۱۷ عدد SARSCAPE 5.0 و ۱۸ عدد ASAR) در محیط SARSCAPE 5.0 به صورت مجزا برای هر یک از دو سری تصویر، یک فایل نقطه‌ای (نقاط PS) با فرمت رقومی حاصل شد. اطلاعات توصیفی این فایل‌ها حاوی میزان جابه‌جایی کل، سرعت یا نرخ و میزان جابه‌جایی لغزش بین تاریخ‌های هر تصویر فرعی با تصویر اصلی در طول دوره زمانی تصاویر مورد استفاده است.

تفکیک مکانی یک ثانیه‌ای و دقت ارتفاعی حدود ۳۰ متر برای حذف فاز توپوگرافی از تداخل‌سنج‌ها استفاده شد. آستانه همدوستی نیز در حین اجرای روش، ۰/۷۵ در نظر گرفته شد. به‌منظور اجرای روش PS از نرم‌افزار SARSCAPE 5.0 بر روی نرم‌افزار ENVI 5.0 برای پردازش تصاویر راداری و استخراج پراکنش‌کننده‌های دائمی و از نرم‌افزار Arc GIS برای بررسی، تحلیل و مدل‌سازی داده‌های حاصل از پردازش تصاویر در محیط ENVI 5.0 استفاده شد.

مواد و روش

در این پژوهش از روش PSI به صورت مجزا برای پردازش داده‌های سنجنده PALSAR (گذربالا) و ASAR (گذرپایین) به‌منظور پایش زمین‌لغزش نقل به صورتی که در ادامه آمده است، استفاده شد (شکل ۱). در مرحله آغاز پس از انتخاب تصویر مرجع (براساس خط مبنای مکانی و زمانی و همدوسی مناسب)، همه تصاویر نسبت به فایل مرجع به ثبت رسانده شدند. در مرحله بعدی جفت‌های تداخل‌نگار نسبت به تصویر مرجع، ایجاد شدند. سپس همه تداخل‌نگارها با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) حاصل از پردازش تصاویر ASTER تصویر شده روی هندسه برد مایل تصویر اصلی، تسطیح شدند. در مرحله بعد، جابه‌جایی فاز از تمامی تداخل‌نگارهای تسطیح

لغزش نزدیک باشد و شرط سوم، خط مبنای قائم کوچک، اثر توپوگرافی را کاهش می‌دهد (۳۴). به عبارت دیگر تصاویر گذربالا امکان پایش زمین لغزش‌ها در شیب‌های شرقی، شمال شرقی و جنوب شرقی را فراهم می‌سازد. با توجه به اینکه رادار تنها توان ثبت جابه‌جایی‌ها در راستای خط دید رادار (LOS) را دارد، بنابراین برای پایش زمین لغزش‌ها در شیب‌های غربی، شمال غربی و جنوب غربی باید از تصاویر گذربالایین استفاده کرد. تصاویر PALSAR به دلیل حرکت مداری گذربالا دارای خط دید (LOS) به سمت شرق است، بنابراین لغزش‌های دامنه‌های شرقی به طور کامل ثبت می‌شوند و به دلیل خطای کوتاه‌شدگی در جهات دیگر کمتر یا در دامنه غربی فاقد حساسیت (دامنه‌های غربی) هستند. بنابراین به منظور پایش دامنه‌های غربی لازم است از تصاویر ASAR با حرکت مداری گذربالایین که دارای دید به سمت غرب هستند و توانایی بالا در پایش دامنه‌های غربی دارند، استفاده شود (شکل ۱-الف). بر همین اساس با توجه به هندسه و قدرت تفکیک مکانی کلی تصاویر PALSAR (۱۰ متر) و ASAR (۲۰ متر) تراکم متوسط به ترتیب ۳۱۲ و ۱۱۳ نقطه PS بر کیلومتر مربع در سطح تصویر است (شکل ۱-ب). یکی از دلایلی که چگالی نقاط ps در PALSAR بیشتر است، برخورداری از باند L و کمتر بودن اثر عدم همبستگی نسبت به ASAR است. البته لازم به ذکر است فراوانی تعداد نقاط ps با تعداد تصویر مورد استفاده، رابطه مستقیم دارد. حداقل و حداکثر مقدار خط مبنای مکانی برای تصاویر ASAR به ترتیب ۲۹ و ۱۰۹۰ متر و برای PALSAR به ترتیب ۴۰۰ و ۲۴۵۰ متر است (شکل‌های ۴ و ۵).

ارزیابی و تفسیر نتایج PSI و پایش زمین لغزش

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، به منظور افزایش دقت پایش و تعیین میزان جابه‌جایی لغزش نقل از دو سری داده PALSAR با جهت مداری گذربالا از گذر ۵۷۲ و عبور ۶۰۰ با زاویه فرود ۳۸/۷ درجه و سمت دید راست با قطبش افقی - افقی از تاریخ ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ و ASAR با جهت مداری گذربالایین از گذر

به منظور مقایسه بهتر نتایج PS تصاویر PALSAR و ASAR (دو فایل نقطه‌ای) در محیط ArcGIS درون‌یابی مناسبی بین نقاط PS انجام شد. همچنین برای وضوح بیشتر زمین لغزش نقل، لازم است مقدار جابه‌جایی نقاط بین ۵- تا ۵+ میلی‌متر را معادل صفر در نظر گرفت. نهایتاً به منظور ارائه مدل جابه‌جایی زمین لغزش نقل، پس از استفاده از روش‌های مختلف زمین آماری و بررسی نرمال بودن مقادیر داده‌ها براساس توزیع مکانی نقاط، از روش محاسبه سلول‌های مجهول از معلوم مقادیر وزنی معکوس فاصله (IDW) به منظور درون‌یابی و ایجاد نقشه سطحی (سلولی) استفاده شد. به منظور ارائه و درک بهتر نتایج، در تمامی مراحل و خصوصاً برای نتایج نهایی پردازش به روش PS و نقشه‌های درون‌یابی، از تصاویر گوگل ارث به صورت هم‌پوشانی و تلفیقی استفاده شدند.

نتایج و بحث

در این پژوهش از هر دو نوع حرکت مداری به منظور شناسایی، پایش و بررسی سازوکار لغزش نقل استفاده، مقایسه و تلفیق شده است. همان‌طور که در راهنمای شکل (۱-ب) و جدول‌های (۲ و ۳) آمده است، فاصله آستانه‌های حداقل و حداکثر جابه‌جایی لغزش برای داده‌های PALSAR نسبت به داده‌های ASAR کمتر است. از آنجایی که لغزش مورد پایش (لغزش نقل) در دامنه غربی رخ داده است (شکل ۳). لذا تصاویر ASAR با توجه به حرکت مداری گذربالایین و دید به سمت غرب، مقادیر بیشتری (نزدیک به واقعیت) را نسبت به تصاویر PALSAR پایش می‌کند، اما در عوض به دلیل زاویه فرود بیشتر و در نتیجه دقت مکانی بیشتر (در جهت بُرد) برای تصاویر PALSAR (۳۸/۷ درجه) نسبت به تصاویر ASAR (۲۳ درجه)، امکان تولید نقاط PS بیشتر برای این تصاویر وجود خواهد داشت. از آنجایی که زمین لغزش‌ها در شیب واقع شده‌اند، برای استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، سه شرط باید برقرار باشد. شرط اول، جهت دامنه لغزش با جهت دید رادار هم راستا باشد. شرط دوم، زاویه فرود به زاویه شیب

جدول ۲. میزان جابه‌جایی برحسب میلی‌متر در نواحی مختلف زمین لغزش نقل براساس داده‌های PALSAR از ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰

تاریخ تصویر	انباشتگی	تخلیه	میانگین	جمع	اختلاف
D_۲۰۰۶۱۲۱۱	۰	۰	۰	۰	۰
D_۲۰۰۷۰۶۱۳	۶۰	-۶۹	-۷	۳۰۲	۱۲۹
D_۲۰۰۷۱۲۱۴	۶۲	-۶۳	-۶	۲۳۹	۱۲۵
D_۲۰۰۸۰۳۱۵	۷۴	-۸۴	۰	۲۹۶	۱۵۷
D_۲۰۰۸۰۴۳۰	۸۴	-۵۸	-۵	۲۴۴	۱۴۲
D_۲۰۰۸۰۶۱۵	۵۰	-۶۳	-۵	۲۶۱	۱۱۳
D_۲۰۰۸۰۹۱۵	۶۱	-۷۵	-۱۰	۳۱۴	۱۳۶
D_۲۰۰۸۱۲۱۶	۷۷	-۷۸	-۴	۳۰۲	۱۵۵
D_۲۰۰۹۰۶۱۸	۱۰۸	-۱۰۸	-۱۲	۴۳۲	۲۱۶
D_۲۰۰۹۰۹۱۸	۱۱۳	-۹۷	-۴	۴۳۳	۲۱۰
D_۲۰۰۹۱۱۰۳	۱۲۰	-۹۲	-۳	۴۶۴	۲۱۲
D_۲۰۰۹۱۲۱۹	۱۱۹	-۱۱۶	-۷	۴۶۸	۲۳۵
D_۲۰۱۰۰۲۰۳	۹۹	-۱۰۳	-۶	۴۶۸	۲۰۲
D_۲۰۱۰۰۳۲۱	۱۲۸	-۱۰۰	-۸	۴۶۳	۲۲۸
D_۲۰۱۰۰۵۰۶	۱۲۸	-۹۶	-۸	۴۹۶	۲۲۴
D_۲۰۱۰۱۱۰۶	۱۱۱	-۱۱۰	-۱۱	۵۳۸	۲۲۱
D_۲۰۱۰۱۲۲۲	۱۲۲	-۱۰۹	-۲	۵۵۶	۲۳۱
جابه‌جایی کل	۱۲۰۳	-۱۲۰۷	-۱۱۰	-۸۷۲۶	۲۴۱۰
نرخ جابه‌جایی	۲۳	-۲۶	-۳	-۲۴۱	۴۹

جدول ۳. میزان جابه‌جایی برحسب میلی‌متر در نواحی مختلف زمین لغزش نقل براساس داده‌های ASAR از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱

تاریخ تصویر	انباشتگی	تخلیه	میانگین	جمع	اختلاف
D_۲۰۰۳۱۰۰۹	۰	۰	۰	۰	۰
D_۲۰۰۳۱۱۱۳	۱۳	-۱۴	-۰,۷	۵۲	۲۷
D_۲۰۰۳۱۲۱۸	۱۷	-۱۵	-۰,۴	۵۴	۳۳
D_۲۰۰۴۰۷۱۵	۲۵	-۲۴	-۰,۷	۷۲	۴۹
D_۲۰۰۴۰۶۱۰	۲۵	-۲۲	۰,۲	۶۳	۴۷
D_۲۰۰۴۰۸۱۹	۳۰	-۲۹	۰,۴	۶۸	۵۸
D_۲۰۰۴۱۰۲۸	۳۲	-۲۹	-۰,۳	۸۳	۶۱
D_۲۰۰۵۰۵۲۶	۴۰	-۴۱	-۰,۷	۹۹	۸۰
D_۲۰۰۵۰۸۰۴	۴۴	-۴۲	-۰,۲	۱۰۰	۸۶
D_۲۰۰۵۰۹۰۸	۴۵	-۴۸	-۰,۷	۱۱۵	۹۳
D_۲۰۰۶۰۳۰۲	۵۷	-۵۵	-۱,۳	۱۳۵	۱۱۲
D_۲۰۰۷۱۱۲۲	۸۰	-۹۲	-۴	۲۴۱	۱۷۳
D_۲۰۰۸۰۵۱۵	۸۲	-۸۶	-۴,۷	۲۶۷	۱۶۹
D_۲۰۰۹۱۲۳۱	۱۰۹	-۱۲۸	-۶,۶	۳۷۲	۲۳۷
D_۲۰۱۰۰۴۱۵	۱۱۴	-۱۳۵	-۷,۴	۳۹۶	۲۴۹
D_۲۰۱۰۰۵۲۰	۱۱۶	-۱۳۲	-۷,۹	۳۹۷	۲۴۸
D_۲۰۱۰۰۶۲۴	۱۳۱	-۱۴۱	-۵,۸	۴۰۱	۲۷۳
D_۲۰۱۰۱۰۰۷	۱۴۰	-۱۴۲	-۷	۴۲۰	۲۸۲
جابه‌جایی کل	۱۴۷۷	-۱۵۷۴	-۱۵۵,۳	۷۲۳۲	۳۰۵۱
نرخ جابه‌جایی	۲۳	-۲۶	-۳,۳	۱۴۵	۴۹

که با گذشت زمان تقریباً میزان حجم تخلیه با انباشتگی در زمین لغزش نقل برابر است. این نتیجه هم توسط پردازش داده‌های PALSAR و هم داده‌های ASAR با حرکت مداری گذر بالا و پایین تأیید می‌شود. از طرف دیگر معمولاً چنین تقارن جابه‌جایی (برداشت و انباشتگی) در زمین لغزش‌ها بیان‌کننده حرکت چرخشی آنها است (۵، ۷، ۳۷ و ۳۸).

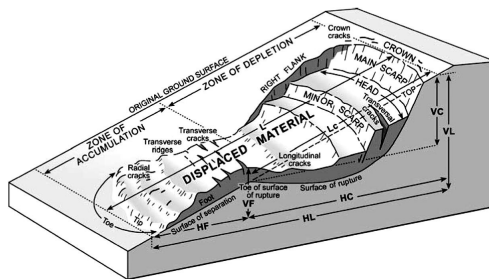
پس از ترسیم نقشه‌های درون‌یابی میزان جابه‌جایی بین تاریخ‌های مختلف با نقشه مرجع (برای تصاویر PALSAR تاریخ ۲۰۰۷۰۶۱۳ و تصاویر ASAR تاریخ ۲۰۰۳۱۰۰۹) زمین لغزش نقل به‌خوبی در تصاویر مشخص شد (اشکال ۸ و ۹). براساس ۱۲۴ نقطه PS به‌دست آمده از تصاویر ASAR، مشخص شد که نسبت به تاریخ مرجع (۲۰۰۳۱۰۰۹) جابه‌جایی زمین لغزش در سه مرحله خلاصه می‌شود:

در مرحله اول زمین لغزش نقل براساس نقشه‌های درون‌یابی مربوط به نقاط PS از تاریخ ۲۰۰۳۱۱۱۳ تا ۲۰۰۵۰۸۰۴ روند پیش‌رونده داشته است (تصاویر a تا h شکل ۸). به‌عبارت دیگر ناحیه برداشت (افزایش سطح مناطق آبی رنگ) و انباشتگی (افزایش سطح مناطق قرمز رنگ) از تصویر تاریخ ۲۰۰۳۱۱۱۳ تا ۲۰۰۵۰۸۰۴، در حال گسترش بوده است (تصاویر a تا h شکل ۸).

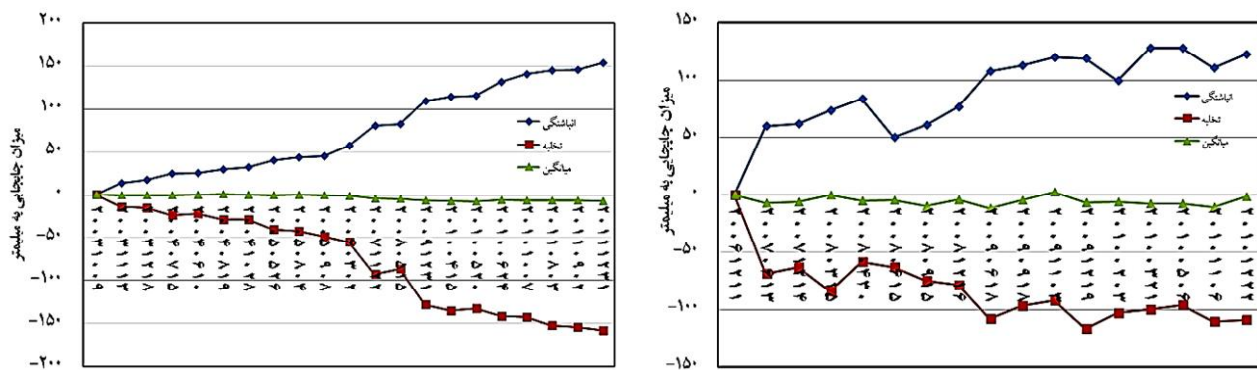
در مرحله دوم از تاریخ ۲۰۰۵۰۸۰۴ تا ۲۰۱۰۰۶۲۴، جابه‌جایی مواد در زمین لغزش نقل روند کاهشی پیدا می‌کند. به‌عبارت دیگر ناحیه برداشت (کاهش سطح مناطق آبی رنگ) و تا حدودی انباشتگی (کاهش سطح مناطق قرمز رنگ) در این مدت، دارای کاهش گسترش بوده است (تصاویر i تا p شکل ۸).

در مرحله سوم از تاریخ ۲۰۱۰۰۶۲۴ تا ۲۰۱۱۱۲۱۳ مجدداً زمین لغزش نقل روند پیش‌رونده پیدا کرده است (تصاویر p و q شکل ۸). با توجه به تعداد کم و نامنظم نقاط PS (۱۲۴ نقطه) حاصل از تصاویر ASAR، پایش تغییرات بین ناحیه برداشت و انباشتگی در بعضی از تصاویر شکل (۸) (مانند تاریخ‌های ۲۰۱۰۰۴۱۵، ۲۰۰۷۱۱۲۲ و ۲۰۰۴۰۷۱۵)، از دقت نسبتاً کمتری می‌تواند برخوردار باشد (تصاویر d، k و n شکل ۸).

۳۳۵ با زاویه فرود تقریبی ۲۳ درجه و سمت دید راست با قطبش افقی - افقی از تاریخ ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ استفاده شد. پس از اجرای روش PSI در سطح ۰/۶۷۵ کیلومتر مربع برای تصاویر ASAR و PALSAR، به‌ترتیب ۱۲۴ و ۱۸۷۵ عدد نقطه PS به‌دست آمد. براساس داده‌های جدول (۲) فایل نقطه‌ای حاصل در دوره زمانی اشاره شده برای تصاویر PALSAR میزان نرخ جابه‌جایی زمین لغزش به‌ترتیب ۲۵/۹- تا ۲۵/۶+ میلی‌متر در سال و جابه‌جایی کلی به‌ترتیب ۱۲۰۷- میلی‌متر تا ۱۲۵۳+ میلی‌متر در چهار سال و برای ASAR ۱۹/۸- تا ۲۳/۹+ میلی‌متر در سال و میزان جابه‌جایی کلی ۱۵۷۴- تا ۱۵۷۸+ میلی‌متر در مدت هفت سال به‌دست آمد (جدول‌های ۲ و ۳). با توجه به اینکه اعداد بالا براساس نزدیکی (مثبت) و دوری (منفی) اهداف زمینی (نقاط PS) نسبت به ماهواره در راستای دید آن هستند، بنابراین با در نظر گرفتن و مقایسه وضعیت و ساختار زمین لغزش بر روی تصاویر گوگل ارث و برداشت‌های میدانی، به‌ترتیب مؤید و منطبق با ناحیه انباشتگی در نزدیکی پنجه یا پای لغزش و ناحیه برداشت یا تخلیه در نزدیکی تاج لغزش هستند (شکل‌های ۶ تا ۹). از این موضوع چنین استنباط می‌شود که مناطق تخلیه و انباشت نهشته‌های لغزشی همان کم ارتفاع شدن (گودشدن) و مرتفع شدن (بالآمدگی) سطح زمین است. گودی‌ها و بالآمدگی‌ها به‌ترتیب با اعداد منفی و مثبت نقاط PS منطبق هستند، البته اعداد نزدیک به صفر نماینده منطقه انتقال (تغییرات جابه‌جایی کمتر) می‌تواند باشد. بیشترین جابه‌جایی در منطقه برداشت ۱۵۷۴- میلی‌متر و در منطقه انباشتگی ۱۵۷۸+ میلی‌متر در دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ است. با توجه به شکل‌های ۷ تا ۹ و مقایسه آنها با برداشت‌های میدانی و مقایسه با تصاویر دوره‌ای گوگل ارث، لغزش نقل را نوعی لغزش چرخشی می‌توان در نظر گرفت (شکل ۶). نمودارهای ترسیم شده در شکل (۷) که براساس مقادیر جداول (۲) و (۳) به‌دست آمده است، براساس انطباق مناطق با اعداد منفی (دور شدن اهداف زمینی نسبت به ماهواره) و مثبت (نزدیک شدن اهداف زمینی نسبت به ماهواره) بیانگر آن است



شکل ۶. اجزای زمین لغزش و بخش‌های تخلیه و انباشت (۲۳ و ۳۷)

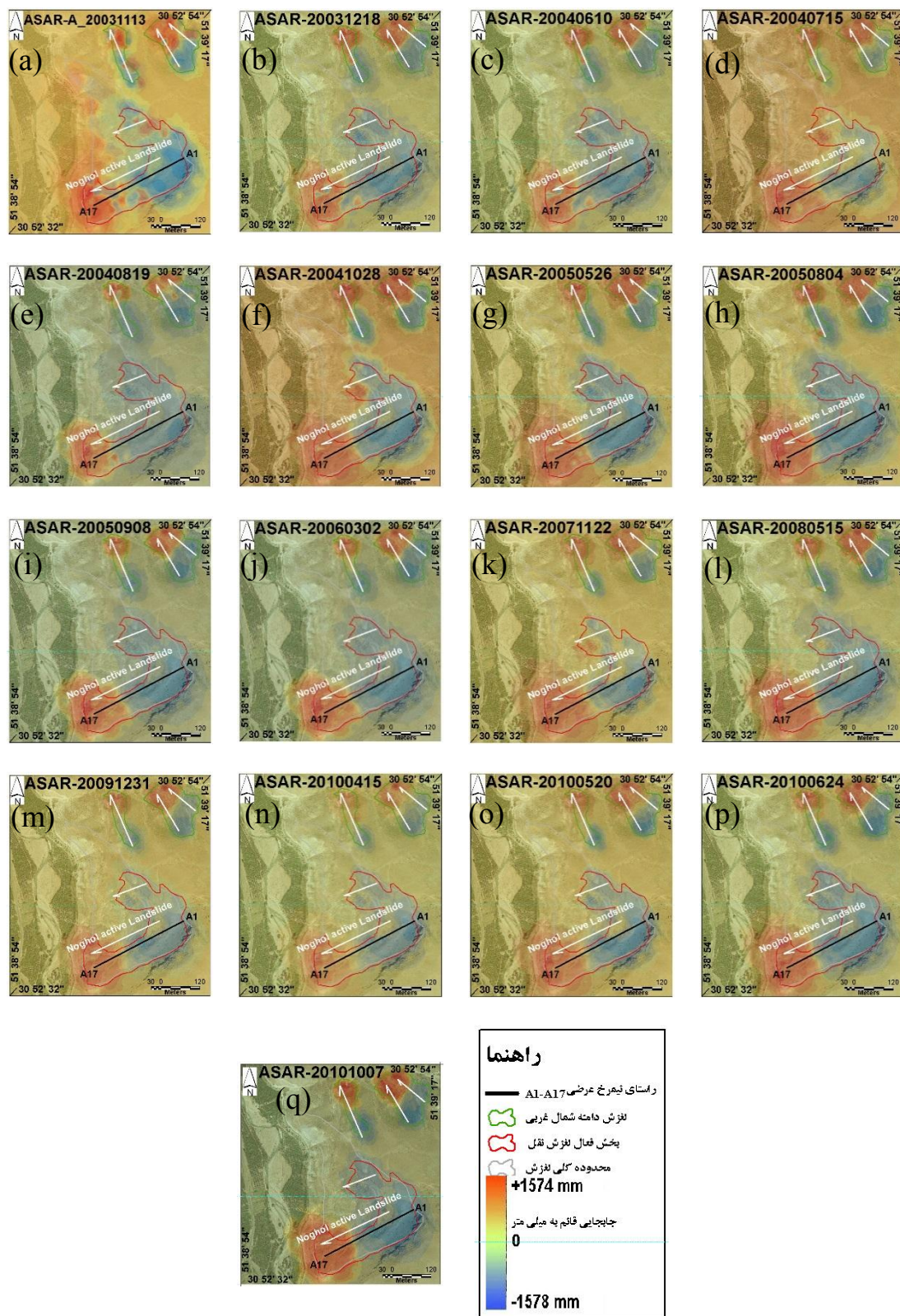


شکل ۷. نمودار میزان جابه‌جایی در نواحی انباشت و تخلیه زمین لغزش نقل براساس روش PS، الف) داده‌های PALSAR و ب) داده‌های ASAR

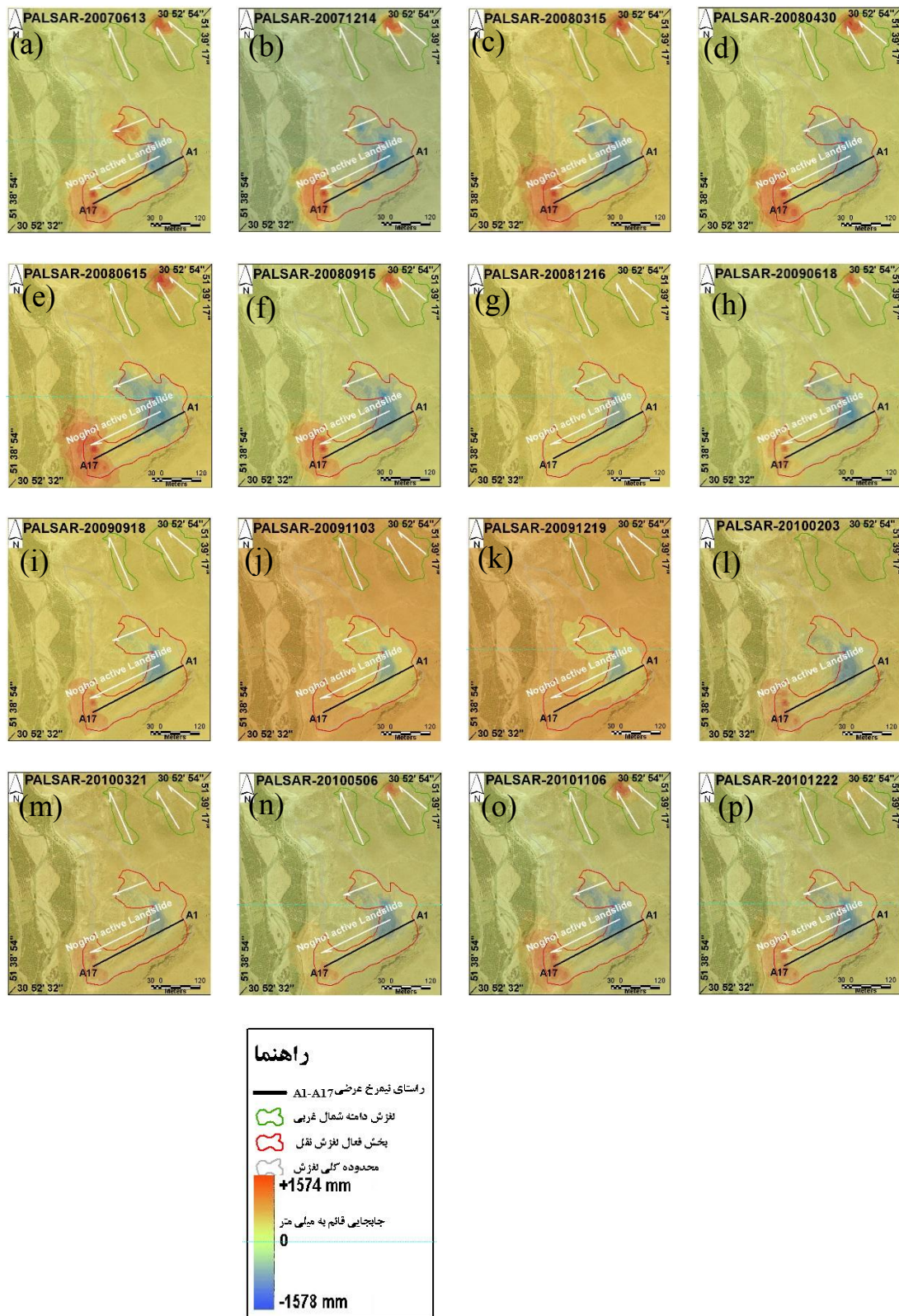
جابه‌جایی قائم و افقی سطح لغزش یا منطقه لغزشی است. همچنین پردازش نقشه‌های درون‌یابی حاصل از نقاط PS تصاویر ASAR، حاکی از وجود دو لغزش فعال در دامنه شمال غربی است که به‌خوبی تشخیص داده شده است (شکل ۸) و در تصاویر پردازش حاصل از PALSAR، به وضوح دیده نمی‌شود. در این دو لغزش، دو ناحیه برداشت و انباشتگی به وضوح قابل شناسایی و تشخیص است. این موضوع بیانگر آن است که تصاویر ASAR در شناسایی لغزش‌های دامنه شمال‌غربی نیز بهتر از تصاویر PALSAR کارایی دارند.

به‌طورکلی با توجه به هندسه مختلف تصاویر PALSAR (زاویه دید ۳۹ درجه) و ASAR (زاویه دید ۲۳ درجه)، حرکت مداری به‌ترتیب گذربالا و پایین این دو سنجنده، موقعیت نقاط PS (تمرکز و مقدار نقاط مثبت و منفی شکل ۳a) که در حقیقت نزدیک یا دور شدن نقاط PS را نسبت به سنجنده نشان

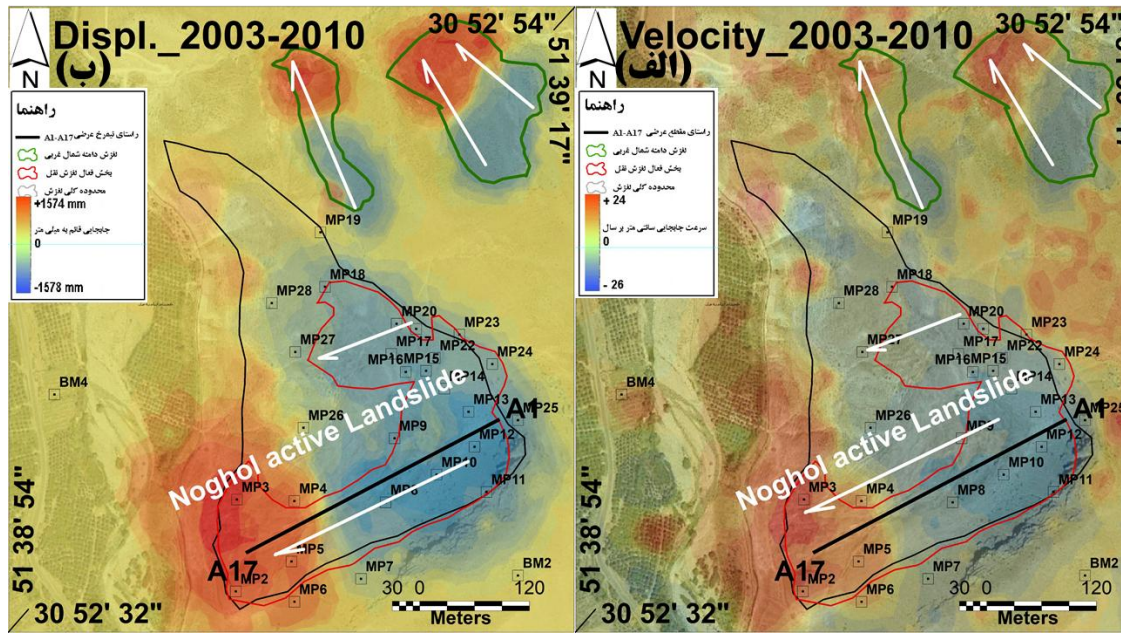
همچنین تصاویر PALSAR مطابق مراحل پردازشی تصاویر ASAR مورد پردازش قرار گرفت و تعداد ۱۸۷۵ نقطه PS به‌دست آمد که در محیط ArcGIS نیز اقدام به درون‌یابی آنها شد. با توجه به تعداد بیشتر نقاط PS نسبت به تصاویر ASAR به دلیل دقت مکانی بیشتر و شرایط هندسه این نوع تصاویر، نقشه‌های درون‌یابی دارای جزئیات زیادی نیستند. همانند تصاویر ASAR روند تغییرات جابه‌جایی در نقشه‌های حاصل از پردازش تصاویر PALSAR تا حدودی دارای دو مرحله روند پس‌رونده (از تاریخ ۲۰۰۷۰۶۱۳ تا ۲۰۱۰۰۲۰۳) و پیش‌رونده (از تاریخ ۲۰۱۰۰۲۰۳ تا ۲۰۱۰۱۲۲۲) هستند. به‌دلیل تراکم زیاد نقاط PS، درون‌یابی نقاط PS جزئیات بیشتری را نشان می‌دهند (شکل ۹). ولی همان‌طورکه در شکل (۸) نیز نمایش داده شده است، تصاویر ASAR به‌دلیل حرکت مداری گذرپایین و راستای دید مناسب، دارای نقاط PS، نماینده دقیق‌تری برای



شکل ۸. نقشه‌های درونیابی حاصل از نقاط PS استخراج شده از تصاویر ASAR. طیف رنگ آبی نشانگر میزان جابه‌جایی در منطقه برداشت و طیف رنگ قرمز نماینده میزان جابه‌جایی در منطقه انباشتگی (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۹. نقشه‌های درون‌یابی حاصل از نقاط PS استخراج شده از تصاویر PALSAR. طیف رنگ آبی نشانگر میزان جابه‌جایی در منطقه برداشت (منطبق با مناطق اعداد منفی) و طیف رنگ قرمز نماینده میزان جابه‌جایی در منطقه انباشتگی (منطبق با مناطق اعداد مثبت) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



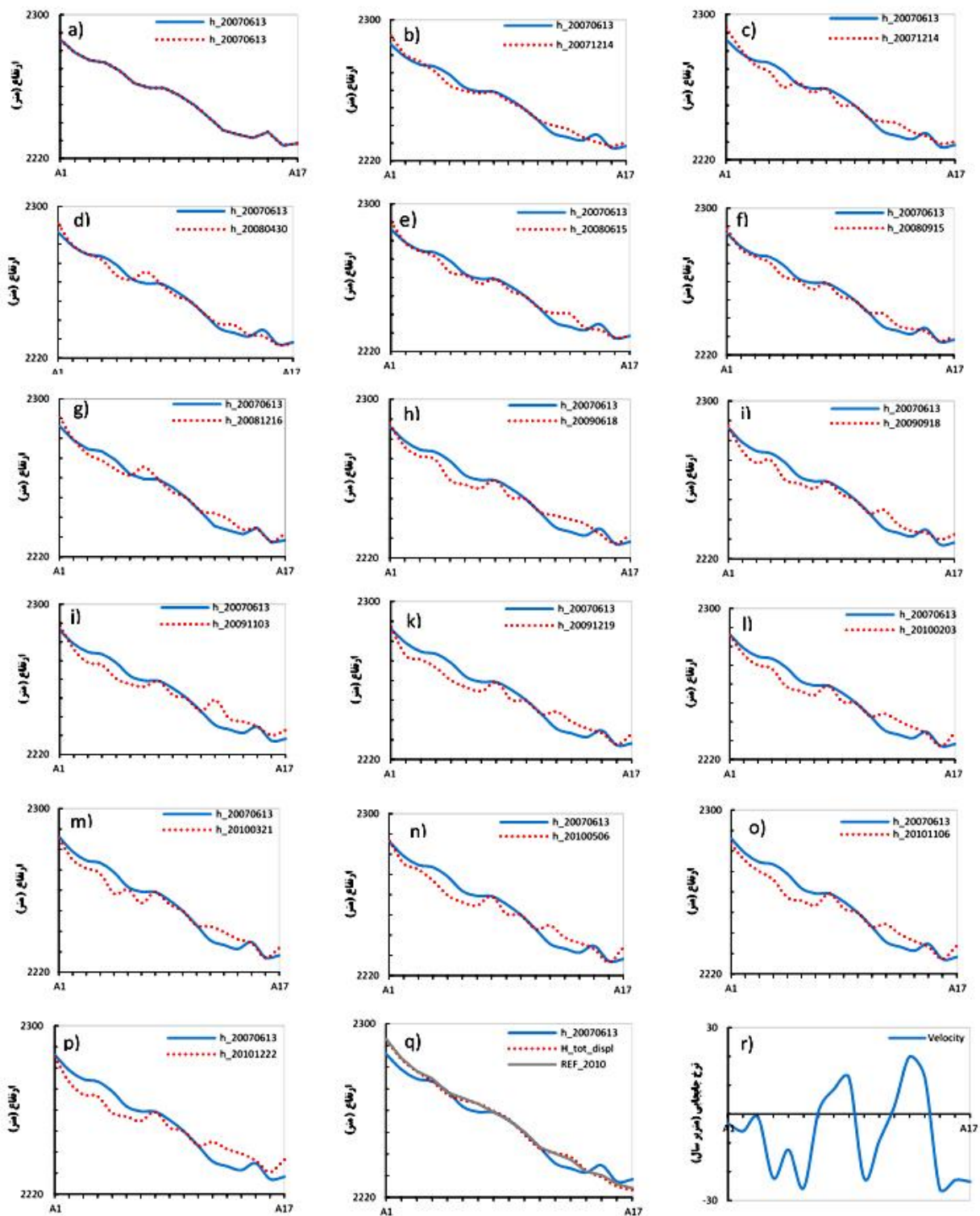
شکل ۱۰. نرخ جابه‌جایی زمین لغزش نقل در منطقه برداشت (مناطق آبی رنگ) و انباشتگی (مناطق قرمز رنگ) و نمایش نیمرخ طولی A1-A17 خط قرمز. محدوده لغزش فعال که با خط قرمز نشان داده شده است با توجه به برداشت های زمینی و تصاویر گوگل ارث ترسیم شده است (رنگی در نسخه الکترونیکی).

پاره خط A1-A17 را به مدل برداری نقطه‌ای تبدیل کرده و سپس با دستور استخراج مقادیر در محیط ArcGIS، جابه‌جایی قائم نقشه‌های سلولی حاصل از پردازش تصاویر راداری برای هر دوره زمانی استخراج می‌شود. مقادیر فاصله نقاط بر روی پاره خط (راستای نیمرخ طولی) A1-A17 برحسب متر به محور طول‌ها (X) و مقادیر جابه‌جایی قائم برحسب متر به محور عرض‌ها (Y) منتقل می‌شود. به‌منظور وضوح نمایش جابه‌جایی بین نیمرخ‌های طولی در زمان‌های مختلف، مقادیر اختلاف جابه‌جایی عمودی با بزرگ‌نمایی ۱۰ برابر نشان داده شده است. پیرو اجرای روش PS که از تصویر تاریخ ۲۰۰۳۱۰۰۹ به‌عنوان تصویر اصلی و مرجع استفاده کرده است، در ترسیم نیمرخ‌های طولی نیز از نیمرخ مبنا (خط ممتد آبی رنگ در شکل (۱۱)) جهت مقایسه با سایر پروفیل‌ها در تاریخ‌های دیگر (خط چین قرمز در شکل (۱۱)) استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰-الف و ب) آمده است، روند برداشت مواد از منطقه تخلیه که نزدیک قسمت فوقانی یا تاج

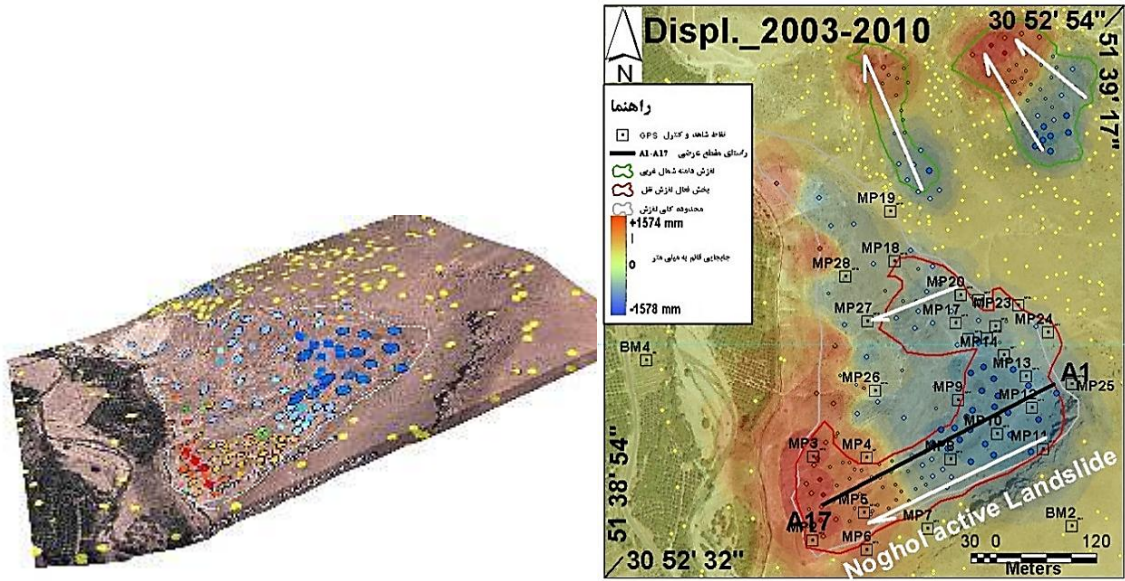
می‌دهند) و موقعیت مناطق برداشت (نقاط منفی) و انباشت (نقاط مثبت)، به‌ترتیب رنگ آبی و قرمز در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ با در نظر گرفتن وجه شیب دامنه، همه بیانگر آن است که زمین لغزش نقل دارای جابه‌جایی متوسط به سمت غرب تا جنوب غرب است. البته پردازش داده‌های رفتارسنجی با GPS دو فرکانسه (شکل‌های ۱۳ و ۱۴) و بازدیدهای میدانی این موضوع را نیز تأیید می‌کند. مقادیر تلفیقی جابه‌جایی زمین لغزش حاصل از پردازش تصاویر ASAR نسبت به PALSAR به واقعیت (داده‌های GPS) نزدیک‌تر هستند. همچنین سطح زمین لغزش در پردازش تصاویر ASAR بهتر نمایش داده می‌شود.

بررسی مراحل مورفولوژیک سطح لغزش

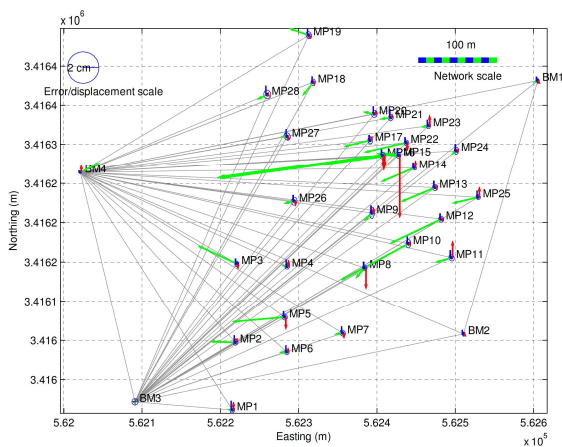
پس از تهیه نقشه‌های درون‌یابی حاصل از پردازش تصاویر PALSAR، از مقادیر جابه‌جایی استفاده شد و در راستای طولی زمین لغزش (خط A1-A17) بر روی تصاویر تاریخ‌های مربوطه اقدام به تهیه نیمرخ طولی شد (شکل ۱۱). برای این منظور ابتدا



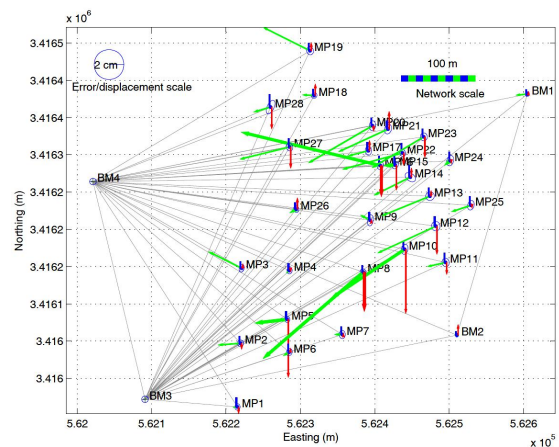
شکل ۱۱. نیمرخ طولی جابه‌جایی در امتداد خط A1-A17 از زمین لغزش فعال نقل که در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشخص شده است. خط ممتد آبی رنگ نماینده نیمرخ طولی در تاریخ ۲۰۰۷۰۶۱۳ و خط چین قرمز نماینده تغییر شکل و جابه‌جایی سطحی در زمان‌های مختلف استخراج شده از روش PS تصاویر PALSAR (به منظور وضوح جابه‌جایی در نیمرخ‌های طولی، اختلاف جابه‌جایی عمودی دارای بزرگ‌نمایی ۱۰ برابر است) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۲. تصویر محدوده مورد مطالعه در گوگل ارث و موقعیت نقاط شبکه‌ای ثابت و متحرک و PS بر روی آن



شکل ۱۳. جابه‌جایی‌های گرافیکی مسطحاتی و ارتفاعی نقاط کنترل و شاهد (منطقه نقل - بین مرحله دوم و سوم)



شکل ۱۴. جابه‌جایی‌های گرافیکی مسطحاتی و ارتفاعی نقاط کنترل و شاهد (منطقه نقل - بین مرحله اول و دوم)

است (شکل ۱۱). همچنین میزان تغییرات جابه‌جایی قائم در راستای نیمرخ طولی ۵۰ میلی‌متر بر سال (۳۰- میلی‌متر مناطق تخلیه یا برداشت تا ۲۰+ میلی‌متر انباشت) است (تصویر I شکل ۱۱).

نرخ جابه‌جایی در طول نیمرخ طولی A1-A17 در منطقه برداشت، انباشتگی تقریباً متقارن و از ۲۰- تا ۳۰+ میلی‌متر در سال در مدت زمان ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ متغیر است (شکل ۱۰-الف).

لغزش است با گذشت زمان توسعه یافته و به منطقه انباشتگی اضافه می‌شوند. این وضعیت تا تاریخ ۲۰۱۰ ادامه یافته است. در این تاریخ نیمرخ طولی حاصل از پردازش تصویر PALSAR با نیمرخ طولی حاصل از نقشه توپوگرافی که با روش نقشه برداری ترازبایی و پیمایش میدانی در سال ۲۰۱۰ (خط ممتد سبز رنگ) تهیه شده است، کاملاً منطبق می‌شود (تصویر q شکل ۱۱). این موضوع بیانگر صحت نتایج PSI تصاویر رادار



شکل ۱۵. تصویر یکی از نقاط شاهد و ثابت روی توده لغزشی نقل

روی لغزش تعیین شد (شکل ۱۵). این نقاط تحت عنوان شبکه نقاط شاهد (نشانه‌روی) منطقه زمین لغزشی با نام MP (نقاط MP۱ تا MP۲۸) مشخص شدند (شکل‌های ۱۲ تا ۱۴). شبکه نقاط ژئودزی ماهواره‌ای منطقه با استفاده از سه دستگاه GPS/GNSS دو فرکانسه سیستم ۱۲۰۰ لایکا انجام شده است. تکنیک تعیین موقعیت استاتیک مورد استفاده قرار گرفته است. مدت مشاهدات هر خط مبنا ۴۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. طرح مشاهداتی به گونه‌ای بود که تمام نقاط Rover از حداقل دو ایستگاه مرجع (در مرحله پردازش) تعیین مختصات شوند. مشاهدات شبکه ماهواره‌ای در سه مرحله (مرحله اول ۲۰۱۰/۸ حدود ۱۰ ماه انجام پذیرفته است. مشاهدات مرحله دوم و سوم نیز برای ۲۸ نقطه انجام شده است.

نرم‌افزار پردازش مورد استفاده LeicaGeoOffice5 (LGO) است. این نرم‌افزار برای پردازش خط مبناها استفاده شده و خروجی پردازش برای مراحل سرشکنی و میکروژئودزی استخراج شده است. مشاهدات جلسات مختلف مشاهداتی در هر مرحله با انتخاب مناسب پارامترهای مربوطه پردازش شد.

پس از محاسبه مختصات نقاط در دو مرحله میزان جابه‌جایی‌ها محاسبه می‌شود. همچنین با استفاده از قانون انتشار خطاها ماتریس واریانس - کواریانس، جابه‌جایی‌ها قابل محاسبه است. جابه‌جایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی نقاط کنترل و شاهد روی منطقه زمین لغزش به همراه ابعاد بیضی خطای جابه‌جایی و

اعتبارسنجی نتایج حاصل از پردازش PS

در بسیاری از پژوهش‌های پایش زمین لغزش به کمک تصاویر رادار، دو استراتژی برای اعتبارسنجی نتایج به کار می‌رود. استراتژی اول مقایسه یک زمین لغزش در پردازش سری‌های تصاویر گذرایی هم‌جوار با دو جهت مداری گذرپایین و بالا است، در صورتی که نتایج پایش حاصل از هر سری از گذرها با سری گذر هم‌جوار دیگر یا حرکت مداری گذرپایین و بالا دارای روند یکسان باشند، می‌توان نتایج حاصل را معتبر دانست (۱۲ و ۲۷). در این پژوهش در بخش ارزیابی و تفسیر نتایج PSI و پایش زمین لغزش برای تصاویر گذر بالا و گذرپایین، نتایج پردازش هر دو سری تصویر بیانگر حرکت لغزش به میزان ۱۲۱ تا ۱۵۷ سانتی‌متر جابه‌جایی قائم به سمت غرب است (شکل‌های ۸ و ۹).

استراتژی دوم استفاده از تکنیک‌های پایش زمین لغزش به کمک GPS به روش RTK است. خوشبختانه در منطقه مورد مطالعه زمین لغزش نقل در قالب طرح مطالعاتی رفتارسنجی زمین لغزش تحت پایش قرار گرفته است (۲ و ۴).

نتایج داده‌های GPS

برای بررسی رفتارسنجی منطقه، از سیستم تعیین موقعیت یاب جهانی GPS به صورت استاتیک استفاده شده است. در این تکنیک چهار نقطه ثابت (فرض) با نام BM در قالب نقاط شبکه اصلی خارج از منطقه لغزش انتخاب شد. سپس ۲۸ نقطه بر

مطالعه این تحقیق، روش PS برای داده‌های ASAR از نقطه‌نظر شناسایی پراکنش کننده‌های دائمی دقیق‌تر و بازسازی الگوی مکانی جابه‌جایی نتایج بهتری را در پی داشت. همچنین روش PS برای داده‌های ASAR با توجه به حالت مداری گذرپایین، موفق به شناسایی دو زمین‌لغزش در دامنه شمال‌غربی زمین‌لغزش نقل شده است. این در حالی است که داده‌های PALSAR با حالت مداری گذربالا با وجود تعداد نقاط زیاد پراکنده ساز از دقت ارتفاعی دقیقی در پایش دامنه‌های غربی و شمال غربی برخوردار نیست.

موقعیت زمین‌لغزش‌های شناسایی شده به روش تداخل‌سنجی راداری با اطلاعات زمینی جمع‌آوری شده، مقایسه شدند که هم‌پوشانی با تصاویر گوگل ارث، مؤید این موضوع نیز بود و با نتایج استخراجی از پردازش تداخل‌سنجی داده‌های راداری به روش PS هم‌خوانی دارد. مقایسه نتایج حاصل از روش‌های GPS و PS برای روند و مقادیر جابه‌جایی زمین‌لغزش نقل، یکسان و مؤید یکدیگر بوده و در نقاط مختلف سطح لغزش بین یک تا دو متر به سمت غرب است. لازم به ذکر است نتایج این تحقیق برای تعیین جهت حرکت لغزش با تحقیقات شیرانی و همکاران (۸) و شیرانی و خوش‌باطن مشابه است (۹)، اما به دلیل به‌کارگیری روش پراکنش کننده‌های دائمی و حذف خطاهای اتمسفری و مداری به دلیل ماهیت ذاتی این روش در افزایش دقت تعیین جابه‌جایی نسبت به روش تداخل‌سنجی تفاضلی، می‌توان از آن استفاده کرد.

در این مقاله با استفاده از مزایای تکنیک پراکنش‌کننده‌های دائمی از جمله دقت میلی‌متری در تعیین جابه‌جایی‌ها و رزولوشن مکانی بالا امکان بررسی و مطالعه زمین‌لغزش‌های فعال فراهم شد. اما به‌کارگیری این روش‌ها در مناطق کوهستانی با محدودیت‌های نیز همراه است. نخست اینکه رادار تنها قادر به تشخیص جابه‌جایی‌ها در راستای خط دید است. در نتیجه در تشخیص جابه‌جایی‌های عمود بر خط دید رادار هستند با مشکل مواجه خواهد شد. همچنین ماهواره‌های راداری با

خطای تعیین جابه‌جایی ارتفاعی در سطح و فاصله اطمینان ۹۵ درصد محاسبه شده است. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مقدار این جابه‌جایی‌ها را به صورت گرافیکی نشان می‌دهد. در این شکل بیضی‌های خطای جابه‌جایی در سطح اطمینان ۹۵ درصد به رنگ آبی مشخص شده است. میزان جابه‌جایی مسطحاتی نقاط با رنگ سبز نمایش داده شده است. جهت فلش‌ها جهت جابه‌جایی‌هاست و مقیاس بردار جابه‌جایی‌ها در شکل‌ها ارائه شده است. میزان جابه‌جایی ارتفاعی و خطای جابه‌جایی ارتفاعی به ترتیب با رنگ قرمز و آبی نمایش داده شده است. جهت بالا در جابه‌جایی‌های ارتفاعی جهت افزایش ارتفاع است، و جهت‌های پائین فلش‌های قرمز کاهش ارتفاع را نشان می‌دهد.

نقاطی که جابه‌جایی آنها زیاد است و با مقیاس در نظر گرفته شده قابل نمایش در شکل نیست، با فلش‌های ضخیم‌تر در شکل‌ها ارائه شده است که مقیاس آنها ۱۰ برابر کوچک‌تر است. نتایج ارائه شده از رفتارسنجی، حکایت از جابه‌جایی معنی‌دار زمین‌لغزش نقل دارد. این جابه‌جایی‌ها در مؤلفه‌های مسطحاتی بیشتر است. بزرگ‌ترین جابه‌جایی در نقاط MP۸، MP۱۰ و MP۱۶ است که میزان جابه‌جایی مسطحاتی آنها حدود یک تا دو متر است. جابه‌جایی مسطحاتی منطقه بیشتر به سمت غرب است. در مرحله سوم نقطه MP16 همچنان جابه‌جایی قابل توجهی را نشان می‌دهد.

با مقایسه نقشه‌های حاصل از روش GPS (شکل‌های ۱۳ و ۱۴) و نقشه‌های حاصل از پردازش روش PS تصاویر راداری (شکل‌های ۸ و ۹) میزان و جهت حرکت (به سمت غرب) توسط هر دو روش مشابه است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان می‌دهد که تداخل‌سنجی راداری ابزاری قدرتمند در شناسایی میزان حرکت و الگوی مکانی زمین‌لغزش‌هاست. تکنیک PS بسته به پوشش سطحی و عوارض منطقه دارای مزایا و معایبی خواهد بود. در منطقه مورد

زمین لغزش شده است. استفاده از تلفیق داده‌های رادار در دو گذر مختلف امکان مدل‌سازی نوع زمین لغزش و جهت حرکت آن را فراهم می‌سازد. در پایان پیشنهاد می‌شود از این روش‌ها برای شناسایی زمین لغزش‌های فعال کشور استفاده شود.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از نتایج طرح پژوهشی در حال اجرا در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان است و داده‌های راداری مورد نیاز و داده‌های سامانه موقعیت یاب جهانی مربوط به زمین لغزش، به ترتیب توسط سازمان فضایی اروپا و معاونت آبخیزداری اداره کل منابع طبیعی اصفهان در اختیار قرار گرفته است و بدین وسیله مراتب قدردانی و سپاس از آنان به عمل می‌آید.

راستای شمالی-جنوبی، در مدارهای نزدیک به قطبی دید نزدیک به صفر خواهند داشت. لازم به ذکر است برای حل این مشکل می‌توان از ترکیب تصاویر گذربالا و پایین به صورت تلفیقی استفاده کرد. دومین مسئله به اثرات هندسی رادار مانند سایه و روی هم افتادگی مربوط می‌شود که مناطق تحت بررسی با تداخل‌سنجی راداری را محدود می‌سازد. خوشبختانه زمین لغزش مورد مطالعه در شیب‌هایی که تحت تأثیر این خطاها قرار دارند، واقع نشده است. از طرف دیگر به کارگیری تصاویر گذربالای PALSAR به دلیل استخراج تعداد پراکنش کننده دائمی بیشتر نسبت به تصاویر گذرپایین ASAR، امکان شناسایی گستره زمین لغزش‌ها در شیب‌های غربی را صرف نظر از دقت نیز فراهم می‌سازد.

در این تحقیق به کارگیری تلفیقی تصاویر گذربالا و پایین منجر به گرفتن اطلاعات جامع‌تر و دقیق‌تر برای شناسایی و پایش

منابع مورد استفاده

- آقاباتی، ع. ۱۳۸۵. زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی کشور. تهران.
- بخش آبخیزداری اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری اصفهان. ۱۳۹۰. گزارش رفتارسنجی زمین لغزش نقل. اصفهان.
- درویش زاده، ع. ۱۳۸۰. زمین شناسی ایران، انتشارات امیرکبیر. تهران.
- شرکت مهندسی آریافزار. ۱۳۹۰. گزارش رفتارسنجی زمین لغزش نقل. اصفهان.
- شیرانی، ک. ۱۳۸۳. ارزیابی مهمترین روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به منظور انتخاب مناسب‌ترین روش در سمیرم، جنوب اصفهان، طرح تحقیقاتی وزارت جهاد کشاورزی. اصفهان.
- شیرانی، ک. ۱۳۹۶. مدل‌سازی و ارزیابی پتانسیل حساسیت اراضی نسبت به لغزش با استفاده از مدل‌های احتمالاتی آنتروپی شانون و وزن شاهد تنوری بیزین (مطالعه موردی: حوضه سرخون کارون)، نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی) ۲۱(۱): ۶۸-۵۱.
- شیرانی، ک. و ع. سیف. ۱۳۹۲. بررسی عوامل موثر بر حرکات توده‌ای به کمک نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش (مطالعه موردی: حوضه کارون شمالی، فصلنامه علوم زمین ۲۳(۸۹): ۱۰-۳.
- شیرانی، ک.، ع. سیف و م. شریفی‌کیا. ۱۳۹۳. ارزیابی سنجنده‌های ASAR و PALSAR به منظور شناسایی و پایش زمین لغزش با استفاده روش تداخل‌سنجی تفاضلی در ارتفاعات زاگرس، مجله مهندسی و مدیریت آبخیز ۶(۳): ۲۸۸-۳۰۱.
- شیرانی، ک. و م. خوش‌باطن. ۱۳۹۵. بررسی و پایش زمین لغزش فعال با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی با دهانه مجازی رادار (مطالعه موردی: زمین لغزش نقل، سمیرم)، فصلنامه کوآترنری ایران، انجمن کوآترنری ایران ۲(۵): ۶۳-۵۳.
- طاحونی، س. ۱۳۸۴. اصول مهندسی ژئوتکنیک، انتشارات پارسائیان. ایران.

11. Blanco-Sanchez, P., J. J. Mallorqui, S. Duque and D. Monells. 2008. The coherent pixels technique (cpt): an advanced dinsar technique for nonlinear deformation monitoring. *Pure Applied Geophysics* 165: 1167–1193.
12. Bovenga, F., J. Wasowski, D. O. Nitti, R. Nutricato and M. T. Chiaradia. 2012. Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. *Remote Sensing of Environments* 119: 272–285.
13. Colesanti, C. and J. Wasowski. 2006. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology* 88: 173–199.
14. Colesanti, C., A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca. 2003. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique *Engineering Geology* 68: 3–14, 2003.
15. Costantini, M., S. Falco, F. Malvarosa and F. Minati. 2008. A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images. In: Proceedings of the IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS'08), Boston, MA, USA. PP: 449–452.
16. Crosetto, M., E. Biescas, J. Duro, J. Closa and A. Arnaud, 2008. Generation of advanced ERS and Envisat interferometric SAR products using the Stable Point Network technique. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 74: 443–451.
17. Crosetto, M., O. Monserrat, M. Cuevas and B. Crippa. 2011. Spaceborne differential SAR interferometry: data analysis tools for deformation measurement. *Remote Sensing* 3: 305–318.
18. Cruden, D. M. and D. J. Varnes. 1996. Landslide types and processes. PP: 36–75. In: A. K. Turner and R. L. Schuster (Eds.), Landslides: Investigation and Mitigation, Special Report 247-Transportation Research Board, National Research Council; National Academy Press: Washington, DC, USA.
19. Farina, P., D. Colombo, A. Fumagalli, F. Marks and S. Moretti. 2006. Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. *Engineering Geology* 88: 200–217.
20. Ferretti, A., A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca and A. Rucci. 2011. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR IEEE Trans. *Geosciences and Remote Sensing* 49: 3460–3470.
21. Ferretti, A., C. Prati and F. Rocca. 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using Permanent Scatterers in differential SAR interferometry. *Geosciences and Remote Sensing* 38: 2202–2212.
22. Ferretti, A., C. Prati and F. Rocca. 2001. Permanent Scatterers in SAR interferometry. IEEE Trans. *Geosciences and Remote Sensing* 39: 8–20.
23. Glade, T. and M. J. Crozier. 2005. A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. PP: 75-138. In: T. Glade, M. G. Anderson and M. J. Crozier (Eds.), Landslide Risk Assessment. John Wiley. England.
24. Herrera, G., D. Notti, J. C. Garcia-Davalillo, O. Mora, G. Cooksley, M. Sanchez, A. Arnaud and M. Crosetto. 2011. Analysis with C- and X-band satellite SAR data of the Portalet landslide area. *Landslides* 8: 195–206.
25. Hooper, A., P. Segall and H. Zebker. 2007. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos. . *Journal of Geophysics and Remote Sensing* 112: B07407.
26. Lanari, R., O. Mora, M. Manunta, J. J. Mallorqui, P. Berardino and E. Sansosti. 2004. A small baseline approach for investigating deformation on full resolution differential SAR interferograms. IEEE Trans. *Geosciences and Remote Sensing* 42: 1377–1386.
27. Liu, P., Z. Li, T. Hoeya, C. Kincal, J. Zhang, Q. Zeng and J. P. Muller. 2013. Using advanced InSAR time series techniques to monitor landslide movements in Badong of the Three Gorges region, China. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21: 253-264.
28. Lu, P., N. Casagli, F. Catani and V. Tofani. 2012. Persistent Scatterers Interferometry hotspot and cluster analysis (PSI-HCA) for detection of extremely slow-moving landslides. *Remote Sensing* 33: 466–489.
29. Mantovani, F., R. Soeters and C. Van Westen. 1994. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology* 15: 213–225.
30. Perissin, D. and T. Wang. 2012. Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets. IEEE Trans. *Geosci. Geosciences and Remote Sensing* 50: 271–280.
31. Righini, G., V. Pancioli and N. Casagli. 2012. Updating landslide inventory maps using Persistent Scatterer interferometry (PSI). *International Journal of Remote Sensing* 33: 2068–2096.
32. Scaioni, M., L. Longoni, V. Melillo and M., Papini. 2014. Remote sensing for landslide investigations: an overview of recent achievements and perspectives. *Remote Sensing* 6, doi: 10.3390/rs60x000x.
33. Singhroy, V. 2005. Remote Sensing for Landslide Assessment: Chapter 16, in Book on Landslides Hazard and Risk edited by Glade Anderson and Crozier. Wiley Press. England.
34. Strozzi, T., U. Wegmuller, H. R. Keusen, K. Graf and A. Wiesmann. 2006. Analysis of the terrain displacement along a funicular by SAR interferometry. *Geosciences and Remote Sensing* 3: 15–18.
35. Tofani, V., S. Segoni, A. Agostini, F. Catani and N. Casagli. 2013. Technical note: Use of remote sensing for landslide studies in Europe”. *Nat. Natural Hazards and Earth Systems* 13: 1–12.

36. Tomas, R., G. Herrera, J. M. Lopez-Sanchez, F. Vicente, A. Cuenca and J. J. Mallorqu. 2010. Study of the land subsidence in Orihuela City (SE Spain) using PSI data: distribution, evolution and correlation with conditioning and triggering factors. *Engineering Geology* 115(1-2): 105-121.
37. Varnes, D. J. 1978. Slope Movement Types and Processes, In Special Report 176: Landslides Analysis and Control PP. 11-33. In: R. L. Schuster and R. J. Krizer (Eds.), TRB, National Research Council Washington.
38. Varnes, D. J. 1984. The IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements. Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice. The UNESCO Press, Paris.
39. Wasowski, J. and F. Bovenga. 2014. Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives. *Engineering Geology* 174: 103-138.
40. Zebker, H. A., P. A. Rosen and S. Hensley. 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research* 102(B4): 7547-7563.
41. Zhao, C., Z. Lu, Q. Zhang and J. Fuente. 2012. Large-area landslide detection and monitoring with ALOS/PALSAR imagery data over Northern California and Southern Oregon, USA, *Remote Sensing of Environment* 124: 348-359.

Detection, Monitoring and Mechanism of Landslide using Persistent Scattering Interferometry (PSI)

K. Shirani^{1*}

(Received: June 27-2016 ; Accepted: October 30-2017)

Abstract

The persistent scattering interferometry (PSI) technique is a valuable tool in displacements' monitoring of earth's surface. The persistent scattering interferometry (PSI) based on persistent scatterer (PSInSAR) is one of the techniques used to reduce constraints (temporal and spatial incoherency). It is based on persistent scatterer and monitor displacement of only the pixels with timely-constant properties of scatterer. In order to detect and monitor landslides, two time series SAR data sets including PALSAR ascending images from 2007 to 2010 and ASAR images from 2003 to 2010 with C-band and L-band wavelength were applied, respectively. Also, the PSI technique was implemented in a landslide near Noghol village, Padena, Semirom of Isfahan province. The results revealed that both PALSAR and ASAR data set were efficient in identifying Noghol landslide. The results obtained from ASAR and PALSAR images processing (with the values of 1253 mm and 1578 mm in two stages of time 4 and 7 years, respectively) were compared. The obtained vertical displacement's rate of the landslide by using ASAR data was more suitable because of its descending orbit. However, PALSAR images that identified more persistent scatterer points were better in the detection of the landslide area. The results of GPS and PSInSAR techniques revealed that landslide displacement values and aspect were the same, confirming 135 centimeters of displacement to the west aspect. Finally, a combination of radar data in two different passes provided the possibility of monitoring the mechanism of landslide and its movement direction.

Keywords: Interferometry, Persistent Scatterer, RADAR, PALSAR, ASAR, Landslide

1. Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: K.Shirani@areeo.ac.ir