

ارزیابی کارایی سنجنده‌های ASAR و PALSAR به کمک تداخل‌سنجی تفاضلی در شناسایی و پایش زمین‌لغزش‌ها در زاگرس

کوروش شیرانی^{۱*}، عبدالله سیف^۲ و محمد شریفی‌کیا^۳

^۱ استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، ^۲ استادیار دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان و ^۳ استادیار دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۲۴

چکیده

پرتاب ماهواره‌های دارای سنجنده‌های راداری با گشودگی ترکیبی (SAR)، به منظور کاربردهای تداخل‌سنجی تفاضلی، فرصت جدیدی برای آشکارسازی و پایش تغییر شکل‌های بطئی، کند و حتی سریع زمین فراهم آورده است. این پژوهش با هدف مقایسه و ارزیابی کارایی دو سنجنده راداری در شناسایی، پایش و تهیه نقشه ثبت زمین‌لغزش در ارتفاعات دناي زاگرس واقع در جنوب استان اصفهان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی تصاویر ماهواره‌ای راداری با گشودگی ترکیبی (D-InSAR) اجراء شده است. بدین منظور، دو سری تصویر شامل تعداد ۱۷ و ۲۱ تصویر راداری به ترتیب از سنجنده PALSAR و ASAR از ماهواره‌های ALOS و ENVISAT انتخاب و به روش D-InSAR پردازش شد. در نتیجه پردازش‌های اولیه، از بین زوج‌های تصویری تشکیل شده، ۱۶ زوج تداخل‌نگار از دو سنجنده فوق‌الذکر بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ میلادی مناسب پردازش‌های بعدی تشخیص داده شدند. بر اساس نتایج پردازش تصاویر راداری و مشاهدات میدانی ۹۱۴ زمین‌لغزش به مساحت ۱۳۵۷۸ هکتار تشخیص داده شد. بیشترین جابه‌جایی قائم در منطقه ۱/۵۸ متر از تاریخ ششم می ۲۰۱۰ تا دوم سپتامبر ۲۰۱۱ به ترتیب مربوط به دو زوج تصویر PALSAR و ASAR می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان داد تصاویر راداری PALSAR و ASAR و روش پردازش تداخل‌سنجی تفاضلی دارای دقت و کارایی مناسبی برای شناسایی، پایش و تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها نسبت به دیگر روش‌ها (بازدید زمینی در سطح گسترده، عکس‌های هوایی و تصاویر اپتیک) می‌باشد. تصاویر PALSAR به دلیل طول موج بلندتر، نفوذ بیشتر و کاهش ناهمدوسی نسبت به تصاویر ASAR توانایی بهتری در تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش دارند. در عین حال تصاویر ASAR به دلیل طول موج کوتاه‌تر، جزئیات بیشتری از لغزش را می‌تواند ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: تداخل‌نگار، روش D-InSAR، سنجنده‌های راداری، ماهواره ALOS، ماهواره ENVISAT

مقدمه

مناسب تا چند دهه قبل چندان مورد توجه دستگاه-های اجرایی و حتی نهادهای علمی قرار نگرفته بود. رخداد گروهی از زمین‌لغزش‌های کند و بطئی، به-

مسئله شناسایی، پایش و پهنه‌بندی خطرات ناشی از زمین‌لغزش به واسطه عدم وجود فن‌آوری‌های

Nagler, ۲۰۰۶). ساده‌ترین تکنیک در این زمینه به صورت تداخل‌نگاری با استفاده از اخذ حداقل دو تصویر از سنجنده‌های راداری با روزنه مصنوعی می‌باشد (Massonnet و Feigl, ۱۹۹۸؛ Rosen و همکاران, ۲۰۰۰) که ابتدا برای تحلیل فرونشست حاصل شده از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و سپس زمین‌لغزش به کار گرفته شد (Fruneau و همکاران, ۱۹۹۶؛ Rott و همکاران, ۱۹۹۹؛ Kimura و Yamaguchi, ۲۰۰۰). با توجه به پیشرفت‌های اخیر در تکنیک D-InSAR در زمینه شناسایی و پایش زمین‌لغزش به روش تداخل‌سنجی تفاضلی رادار پژوهش‌های متعددی انجام پذیرفته است (Brardinoni و همکاران, ۲۰۰۳؛ Colesanti و همکاران, ۲۰۰۳؛ Hilley و همکاران, ۲۰۰۴؛ Singhroy و Molch, ۲۰۰۴؛ Colesanti و Wasowski, ۲۰۰۶؛ Farina و همکاران, ۲۰۰۶؛ Strozzi و همکاران, ۲۰۰۵؛ Riedel و Walter, ۲۰۰۸؛ Zhao و همکاران, ۲۰۱۲). اخیراً محققین ایرانی به کمک روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری تصاویر یک سنجنده، اقدام به آشکارسازی، پایش و تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها پرداخته‌اند که نتایج قابل توجهی به دست آورده‌اند (Shirani, ۲۰۱۳؛ Roustaei و همکاران, ۲۰۱۳).

این پژوهش با هدف ارزیابی و مقایسه استفاده از تکنیک تداخل‌نگاری تفاضلی راداری (DInSAR) تصاویر سنجنده‌های ASAR و PALSAR به ترتیب از ماهواره‌های ENVISAT و ALOS به منظور شناسایی، پایش و تهیه نقشه‌های زمانی و مکانی پراکنش زمین‌لغزش در منطقه کوهستانی دنا واقع بین استان‌های اصفهان و کهگیلویه و بویر احمد پرداخته است. همچنین، اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی قائم زمین‌لغزش‌های پایش شده واقع در محدوده مورد مطالعه و دقت نقشه مذکور با نقشه پراکنش زمین‌لغزش حاصل از بازدید میدانی به ترتیب با استفاده از مقادیر پایش شده به وسیله GPS دو فرکانسه به روش استاتیک و منحنی ROC مورد ارزیابی، مقایسه و اعتبارسنجی قرار گرفت. اهداف مذکور دال بر منحصربه‌فرد بودن این پژوهش نسبت

سهولت قابل درک و شناسایی نمی‌باشند و اندازه‌گیری نرخ حرکت و تعیین عرصه و دامنه آن‌ها مستلزم مطالعات و ابزارهای خاصی است. روش‌های شناسایی و پایش پدیده زمین‌لغزش و نهایتاً تهیه نقشه‌های خطر و ارزیابی ریسک مبتنی بر پردازش تصاویر سنجش از دوری و تکنیک تداخل‌نگاری راداری در بین پژوهشگران خارجی سیر تحولی رو به پیشرفت به لحاظ تکنیک، دقت، هزینه و زمان سپری نموده ولی کاملاً مطلوب نبوده است.

در ایران شناسایی این پدیده در ابتدا متکی بر بررسی‌های پیمایشی و عکس‌های هوایی (که هنوز از آن به عنوان یکی از منابع استخراج زمین‌لغزش‌ها استفاده می‌شود) در سطح محدود و اخیراً اقدامات ترازیابی دقیق می‌باشد (Hong و همکاران, ۲۰۰۷). این روش‌ها علاوه بر دقت اندک عمدتاً زمان‌بر و پرهزینه بوده‌اند به نحوی که تنها در پاره‌ای از نقاط کشور که از نظر تهدید جان انسان‌ها، منابع و زیرساخت‌ها اهمیت قابل توجهی داشته، مورد استفاده قرار گرفته‌اند و سایر نواحی کمتر مورد توجه بوده‌اند. در دهه گذشته با فراگیر شدن ابزار GPS امکان پایش^۱ زمین‌لغزش با هدف رفتارسنجی مورد توجه قرار گرفت. این تکنیک هر چند به لحاظ دقت، مورد قبول و تایید بود، لیکن به لحاظ مسائلی چند مانند هزینه بالای اجرا در نصب و پایش ایستگاه‌های دائم، عدم سهولت در تعیین دامنه و گستره زمین‌لغزش، نابسامانی در دوره زمانی پایش به واسطه تغییر در بودجه و اعتبارات سالانه و نهایتاً عدم نظارت و مدیریت پیوسته از گذشته تا حال موفق نبوده و از حد چند مورد و برای تعدادی محدودی از سال‌ها تجاوز ننموده است.

فن تداخل‌سنجی راداری تفاضلی (D-InSAR) با برخوردار بودن از پوشش زمینی وسیع، مکرر و پیوسته، و نیز قدرت تفکیک زمانی و مکانی زیاد، به عنوان یکی از دقیق‌ترین (در مقیاس میلی‌متر) و کم هزینه‌ترین فنون سنجش از دور، برای شناسایی و نمایش جابه‌جایی‌های به وجود آمده در سطح زمین ارائه شده است (Gabriel و همکاران, ۱۹۸۹؛ Rott و

^۱ Monitoring

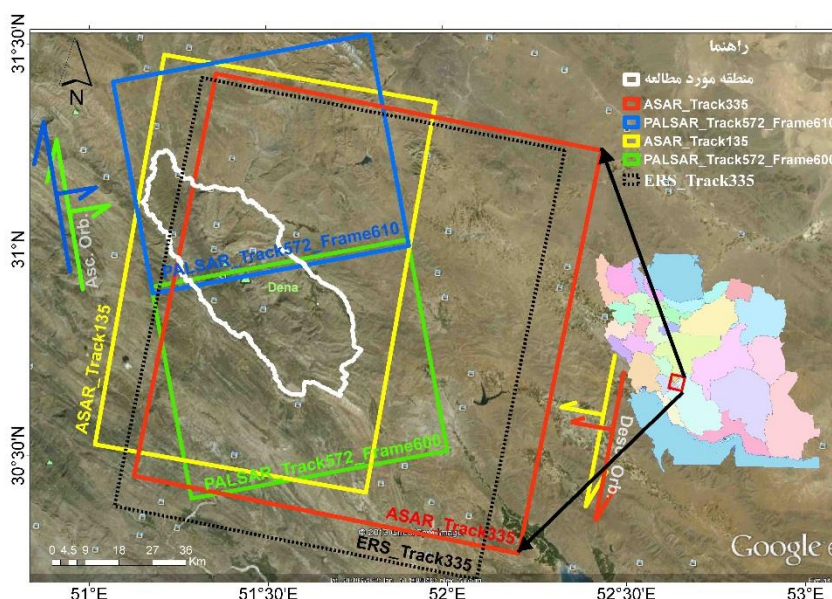
درصد مساحت منطقه را شیب‌های ۵۰-۳۰ درصد و بیشتر از ۵۰ درصد تشکیل می‌دهد.

از نظر زمین‌شناسی ۴۲ واحد سنگی در سطح منطقه رخنمون داشته که بیشترین رخنمون به ترتیب مربوط به سازندهای کنگلومرای بختیاری (۲۱ درصد)، آهک‌های ایلام و سروک (۱۸ درصد) و شیل و مارن گورپی (هفت درصد) می‌باشد (Shirani, ۲۰۱۳). گسل تراستی دنا به صورت فعال در حاشیه جنوب تا جنوب غربی حوضه مورد بررسی گسترش دارد. منطقه مورد مطالعه به دلیل وجود انشعابات گسلی متعدد نظیر گسل‌های فرعی بیده، بیژن و ناهمواری زیاد از جمله مناطقی است که در آن زمین‌لغزش‌های فعال از گسترش بسیار زیادی برخوردارند. مطالعات قبلی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش نشان می‌دهد، که حدود نیمی از منطقه (۴۳ درصد) از نظر پتانسیل خطر زمین‌لغزش در کلاس زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است (Shirani, ۲۰۱۳).

به سایر پژوهش‌های قبلی در ایران نظیر Roustaei و همکاران (۲۰۱۳) می‌باشد. لازم به ذکر است، در این مقاله به منظور سهولت بیان مطالب، از نقشه پراکنش لغزش حاصل از روش تداخل‌نگاری راداری تحت عنوان رویکرد تداخل‌نگاری راداری و از نقشه پراکنش زمین‌لغزش حاصل از بازدید میدانی تحت عنوان رویکرد بازدید زمینی یاد می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش از نظر مختصات جغرافیایی بین $51^{\circ} 12'$ تا $51^{\circ} 54'$ طول شرقی و $30^{\circ} 38'$ تا $31^{\circ} 12'$ عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). بارش سالانه در این منطقه بین ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد و رودهای ماربر در دامنه شمالی و بشار در دامنه جنوبی نیز از آن سرچشمه می‌گیرند. منطقه مورد مطالعه عمدتاً کوهستانی است، به طوری که ۴۹



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد پژوهش و قرارگیری موقعیت تصاویر راداری مورد استفاده نسبت به آن

با طول موج باند C در مدار نزولی، ۲۱ تصویر راداری از سنجنده PALSAR با طول موج باند L و دو تصویر راداری از سنجنده AMI با طول موج باند C در مدار نزولی به ترتیب از ماهواره‌های ENVISAT، ALOS و ERS1-2 سفارش داده شد (شکل ۱). شایان ذکر است که تصاویر ASAR و PALSAR مستقیماً در

داده‌های راداری مورد نیاز این پژوهش پس از تنظیم و ارائه پروپوزال به سازمان فضائی اروپا (ESA) و بررسی و موافقت آن‌ها مهیا شد. بررسی مشخصات تصاویر راداری موجود برای محدوده مورد مطالعه و سفارش آن‌ها با نرم‌افزار EOLI-SA انجام شد که در نتیجه آن، تعداد ۱۷ تصویر راداری از سنجنده ASAR

SLC از یک عدد مختلط شامل دامنه و فاز تشکیل یافته است. این فاز به صورت مطلق معلوم نیست ولی بر مبنای مقدار 2π اندازه گیری می شود. اختلاف فاز دریافتی از بازتاب های ناشی از دو مدار نزدیک، به آهستگی تغییر می یابند. این اختلاف فاز محاسبه شده برای هر پیکسل، همان تداخل نگار است. به عبارت دیگر مقدار تغییرات مربوط به فاصله عارضه تا سنجنده راداری در تداخل نگار موجود است. این تغییرات مربوط به خطای مداری ماهواره $(\Delta\phi G)$ ، اثر توپوگرافی $(\Delta\phi T)$ ، اثرات اتمسفری $(\Delta\phi Atm)$ و جابه جایی عارضه $(\Delta\phi D)$ می باشد. جهت استخراج میزان تغییرات سطح $(\Delta\phi D)$ می بایست تمام اثرات دیگر از تداخل نگار حذف شود (Dehghan Soraki, ۲۰۱۱؛ Roustaei و همکاران، ۲۰۱۳).

$$\phi_2 - \phi_1 = \Delta\phi G + \Delta\phi T + \Delta\phi Atm + \Delta\phi D + \Delta\phi nois \quad (1)$$

ساده ترین روش به منظور مقابله با مولفه توپوگرافی به حداقل رساندن خط مبنای عمودی زوج تصاویر انتخابی است. به این ترتیب، قسمت اعظم تاثیر توپوگرافی در ایجاد اختلاف فاز از بین می رود. به منظور بهبود نتایج می توان از یک مدل ارتفاعی رقومی زمین استفاده نمود تا بدین ترتیب باقی مانده اثر توپوگرافی را نیز از تصاویر تداخل نگار ایجاد شده، حذف نمود. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، در این پژوهش از نقشه DEM حاصل از تصاویر ERS و روش InSAR با دقت ارتفاعی ۲۰ متر به جای DEM تصاویر SRTM با دقت ارتفاعی ۸۵ متر استفاده شد.

به منظور انجام گام به گام روش دو عبوره، ابتدا هر دو تصویر به دقت نسبت به هم مبتنی بر الگوریتم خاصی ثبت هندسی شده و دو تصویر با یکدیگر هم مرجع می شوند^۱، سپس فاز مصنوعی ایجاد می شود^۲. تصویر اول (تصویر اصلی) به عنوان مرجع هندسی و تصویر دوم به عنوان تصویر فرعی محسوب می شود^۳. تداخل نگار محاسبه و با استفاده از فیلترینگ جابه-

شناسایی، پایش و تهیه نقشه ثبت زمین لغزش و تصاویر AMI ماهواره های ERS1-2 در تهیه نقشه DEM دقیق به روش تداخل نگاری راداری تفاضلی (D-INSAR) دخالت دارند. تصاویر AMI به صورت زوج تصویر (Tandem) با فاصله زمانی یک روزه می باشند. این تصاویر کمترین ناهم دوسی زمانی و مکانی را دارا بوده و لذا برای ایجاد نقشه DEM دقیق تر (۲۰ متر) نسبت به نقشه مدل رقومی ارتفاع حاصل از SRTM (مورد استفاده در تداخل نگاری راداری به منظور تهیه نقشه پراکنش لغزش) مناسب تر می باشد.

از آنجایی که در روش تداخل نگاری راداری، آشکارسازی تغییرات سطح زمین بیشترین حساسیت را در راستای دید ماهواره دارا خواهد بود (Singhroy, ۲۰۰۵؛ Plank و همکاران، ۲۰۱۰). لذا با توجه به محدودیت وجود داده راداری مناسب در آرشیو سازمان های تهیه کننده و به منظور دستیابی به نقشه دقیقی از پراکنش زمین لغزش های منطقه مورد مطالعه، لازم است از تصاویر راداری با دو عبور مداری صعودی و نزولی (ترجیحاً از یک سنجنده) استفاده شود. تصاویر ASAR و PALSAR با توجه به جهت عبور مداری شان به ترتیب لغزش های دامنه های غربی و شرقی را می توانند برداشت کنند.

تکنیک مورد استفاده در این پژوهش روش تداخل سنجی تفاضلی با گشودگی ترکیبی دو عبور مکرر یا غیر مکرر (Two Pass D-InSAR) می باشد (Gabriel و همکاران، ۱۹۸۹) که با استفاده از دو تصویر SAR و یک تصویر DEM اقدام به تهیه و ایجاد تداخل نگارها می شود (شکل ۲). در این پژوهش از تصاویر ASAR و PALSAR به روش دو عبوره برای شناسایی و تعیین نقشه پراکنش زمین لغزش ها در دوره های زمانی (تداخل نگار) مختلف استفاده شد. به منظور افزایش دقت تداخل نگارها از نقشه DEM حاصل از تصاویر ERS به کمک تکنیک DInSAR به جای DEM تصاویر SRTM استفاده شد (شکل ۲).

تصاویر رادار مورد استفاده در این پژوهش به صورت SLC سفارش داده شده اند، لذا نیازی به انجام جمع یا تمرکز (Focusing) سیگنال در راستای برد و آزمون نمی باشد. مقدار عددی هر پیکسل در تصویر

¹ Coregistration

² Synthetic Phase Generation

³ Interferogram Generation

توجه به روابط ریاضی، نقشه DEM دقیق و نقاط کنترل زمینی (GCP) و تبدیل مقادیر فاز به جابه‌جایی^۷ استفاده شد. همچنین، بر اساس روش ذکر شده از یک زوج تصویر ERS در تاریخ ۱۹۹۶ با یک روز فاصله برای تهیه DEM دقیق و در نهایت به کمک آن برای ژئوکد کردن تصاویر استفاده شد.

مراحل مختلف پردازش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی دو عبوره برای تصاویر ASAR و PALSAR به همراه تهیه نقشه DEM از تصاویر رادار (ERS) در محیط نرم‌افزار SARscape4.4 به منظور آشکارسازی زمین‌لغزش‌ها در ارتفاعات دنا در شکل ۲ نشان داده شده است. در این تحقیق با توجه به حجم بالای نتایج پردازشی بر روی تصاویر مورد استفاده، تنها تصاویر نتایج پردازش شده زوج تصویر تداخل‌نگار ۲۰۱۱۰۹۰۲-۲۰۱۱۰۸۰۳ از ASAR برای شناسایی لغزش‌ها و زوج تصویر تداخل‌نگارهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ از ASAR و PALSAR به منظور پایش لغزش منطقه آب‌ملخ در شمال منطقه (موقعیت شماره ۱ در شکل ۴) نشان داده شده است (شکل‌های ۴ و ۵).

در پایان نقشه زمین‌لغزش‌های شناسایی شده حاصل از رویکرد راداری با نقشه پراکنش لغزش‌ها حاصل از رویکرد زمینی که به کمک اطلاعات موجود، پیمایش زمینی و GPS ثبت شده‌اند و به‌عنوان واقعیت زمینی در نظر گرفته شده است، به‌وسیله منحنی ROC مورد ارزیابی، مقایسه و اعتبارسنجی قرار گرفت. منحنی ROC از کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌هاست که میزان دقت مدل را به‌صورت کمی برآورد می‌کند (Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۲). سطح زیر منحنی ROC که AUC^۸ نامیده می‌شود، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وقوع زمین‌لغزش) و عدم وقوع رخداد (عدم وقوع زمین‌لغزش) آن است. مقادیر ROC بین صفر و یک است که هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، مدل یا نقشه پراکنش تهیه شده مطلوب‌تر خواهد بود. منحنی ROC نشان داد که حساسیت یا خطاهای مثبت حقیقی

جایی طیفی (فیلتر تطابقی بر مبنای تئوری پردازش سیگنال^۱) فیلتر شد.

نقشه همدوسی^۲ (نقشه یا تصویری که پیکسل‌های آن نمایانگر درجه همبستگی بین دو سیگنال دریافتی برای دو تصویر می‌باشد) نیز تهیه می‌شود. فاز تفاضلی دارای یک ابهام اندازه‌گیری در تعیین جابه‌جایی سطح زمین به نام پیچش^۳ می‌باشد. از آن‌جا که ظرفیت هر فاز فقط به میزان 2π (۶/۲۸) است. مقادیر اختلاف بیشتر از این عدد مجدداً به‌صورت 2π نوشته شده و امکان درج رقم نهایی جابه‌جایی میسر نیست. لذا لازم است این فاز برای مقادیر بزرگ‌تر از 2π بازایی شود. فرایند بازایی^۴ موجب رفع ابهام فاز (فاز بازایی شده) می‌شود. این مقدار متناسب با میزان تغییر شکل قائم سطح زمین می‌باشد. به‌منظور رفع خطای نوفه ($\Delta\phi_{nois}$) با انتخاب ۳۰۰ نقطه GCPs اقدام به ویرایش فاز نموده، سپس به‌منظور تفکیک سیگنال تغییر شکل، مولفه توپوگرافی به کمک DEM حاصل از اینترفرومتری تصاویر ERS تسطیح و پالایش می‌شود^۵. برای این منظور DEM با تصویر اصلی رادار نمونه‌برداری مجدد شده و فاز توپوگرافی مرجع را ایجاد می‌نماید. تداخل‌نگار تفاضلی از تفریق فاز توپوگرافی مرجع و تداخل‌نگار (تداخل‌نگار مسطح شده) حاصل می‌شود. نمایش این عملکرد در تصویر به‌صورت فرینج‌ها^۶ متجلی می‌شود. هر فرینج منطبق با نوسان فاز یک سیکل بوده و بیان‌کننده خطوط میزان تغییر شکل (زمین‌لغزش) و معادل نصف طول موج رادار تصویر مورد استفاده می‌باشد. این مقدار در تصاویر ASAR و ERS که دارای طول موج باند C (۵/۶ سانتی‌متر) بوده ۲/۸ سانتی‌متر و برای تصویر PALSAR با طول موج باند L (۲۳ سانتی‌متر) معادل ۱۱/۵ سانتی‌متر می‌باشد. در این مرحله از پنج زوج تصاویر PALSAR از تاریخ ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ و ۱۱ زوج تصاویر ASAR از تاریخ ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ برای شناسایی، پایش و تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها با

¹ Adaptive Filter and Coherence Generation

² Coherence map

³ Wrapped

⁴ Phase unwrapping

⁵ Refinement and Reflattening

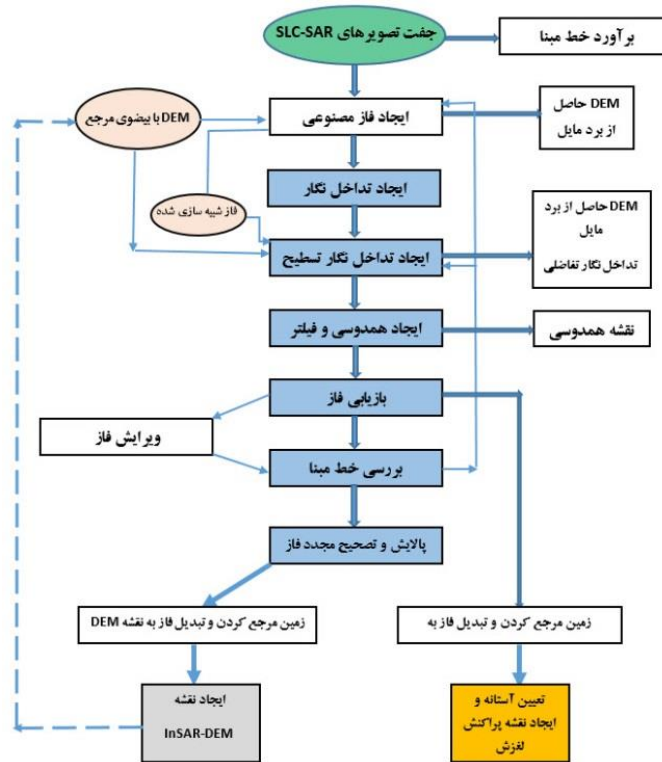
⁶ Fringes

⁷ Phase to Displacement and Geocoding

⁸ Area under curve

پیش‌بینی شده نسبت به کل) ترسیم می‌شود (Fratini و همکاران، ۲۰۱۰). این مقادیر توانایی مدل را نسبت به تمایز درست بین مشاهدات مثبت و منفی در نمونه اعتبارسنجی بیان می‌کند.

(TP) مدل از منحنی ROC (درصد سلول‌ها یا واحدهای ناپایدار که به‌درستی به‌وسیله مدل پیش‌بینی شده‌اند) در مقابل 1-specificity یا خطاهای مثبت کاذب (NP) (درصد سلول‌های ناپایدار



شکل ۲- نمودار گردش روش تداخل‌نگاری تفاضلی دو عبوره برای تصاویر ASAR و PALSAR

نتایج و بحث

تغییرات آن و بدون پوشش برف بر روی سطح زمین به کاهش عدم همبستگی و افزایش همدوسی کمک خواهد نمود.

با توجه به نتایج حاصل از بررسی خط مبنای زمانی و مکانی فوق برای تصاویر ASAR به‌ترتیب از بین ۳۴ زوج تداخل‌نگار از تاریخ ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ مجموعاً ۱۱ زوج تداخل‌نگار و برای تصاویر PALSAR از بین ۲۳ زوج تداخل‌نگار از تاریخ ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ مجموعاً پنج زوج تداخل‌نگار پس از کنترل همدوسی و خط مبنا و سایر پارامترها انتخاب و مبنای تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها شد. بیشترین همدوسی به-ترتیب در زوج تصاویر ۲۰۰۹/۰۶/۱۸-۲۰۰۹/۰۹/۱۸ از PALSAR به مقدار ۰/۵۷ و در زوج تصویر ۲۰۱۱/۰۸/۰۳-۲۰۱۱/۰۹/۰۲ از ASAR به مقدار

به‌منظور اجرای روش DInSAR ابتدا بین هر زوج تصویر اصلی^۱ و فرعی^۲، خط مبنا زمانی^۳ و مکانی^۴ بررسی شد (جدول ۱). البته لازم به ذکر است علاوه بر خط مبنای مکانی مناسب برای هر زوج تصویر، خط مبنای زمانی مناسب یعنی کمتر از یک سال یا شش ماه بایستی مد نظر قرار گیرد. این موضوع به کاهش عدم همبستگی^۵ و افزایش همدوسی^۶ فاز بین دو تصویر بر می‌گردد (Liu و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین، دوره‌های زمانی مناسب با کمترین تاج‌پوشش گیاهی و

¹ Master

² Slave

³ Temporal

⁴ Perpendicular

⁵ Decorrelation

⁶ Coherency

۰/۴۶ می‌باشد. انتخاب زوج‌های تداخل‌نگار بر مبنای سنجنده (ASAR و PALSAR) با جهت مداری مختلف (نزولی و صعودی) انجام گرفت (جدول ۱).

جدول ۱- زوج‌های انتخابی تداخل‌نگاری تصاویر ASAR و PALSAR برای منطقه مورد پژوهش

سنجنده	تصویر اصلی	تصویر فرعی	خط مبنای عمودی (متر)	خط مبنای بحرانی (متر)	خط مبنای زمانی (روز)	متوسط همدوسی
	۱۳/۱۱/۲۰۰۳	۱۸/۱۲/۲۰۰۳	۱۹۵/۶۱	۹۳۲/۰۲۶	۳۵	۰/۲۹
	۱۰/۶/۲۰۰۴	۱۵/۷/۲۰۰۴	۳۱۹/۹۷۵	۹۳۱/۵۴۶	۳۵	۰/۳۴
	۲۶/۵/۲۰۰۵	۴/۸/۲۰۰۵	۱۱۶/۳۲۳	۹۳۱/۴۸۷	۷۰	۰/۳۳
	۴/۸/۲۰۰۵	۸/۹/۲۰۰۵	۳۴۹/۷۹	۹۳۱/۵۴۷	۳۵	۰/۴۱
	۴/۸/۲۰۰۵	۲/۳/۲۰۰۶	۱۶/۹۲۲۲	۹۳۱/۴۸۷	۲۱۰	۰/۲۶
ASAR	۲/۳/۲۰۰۶	۲۲/۱۱/۲۰۰۷	۱۸۸/۶۹۳	۹۳۱/۲۳۹	۶۳۰	۰/۲۲
	۲۲/۱۱/۲۰۰۷	۱۵/۵/۲۰۰۸	۱۱۱/۲۳۲	۹۳۱/۱۹۴	۱۷۵	۰/۲۸
	۱۵/۵/۲۰۰۸	۳۱/۱۲/۲۰۰۹	۱۴۱/۲۴۸	۹۳۱/۵۹۸	۵۹۵	۰/۲۳
	۱۵/۴/۲۰۱۰	۲۰/۵/۲۰۱۰	۲۲/۹۵۱۶	۹۳۱/۲۳۹	۳۵	۰/۳۳
	۲۰/۵/۲۰۱۰	۲۴/۶/۲۰۱۰	۱۴۵/۴۱۳	۹۳۱/۵۹۸	۳۵	۰/۳۸
	*۳/۸/۲۰۱۱	*۲/۹/۲۰۱۱	۱۳۸/۰۱۸	۲۰۹۷/۶۴	۳۵	۰/۴۶
	۱۴/۱۲/۲۰۰۷	۱۵/۳/۲۰۰۸	۳۹۳/۸۳۸	۱۳۰۶۲/۲۹	۹۱	۰/۴۷
	۱۸/۶/۲۰۰۹	۱۸/۹/۲۰۰۹	۲۶۱/۰۴۹	۶۵۲۸/۰۵۷	۹۲	۰/۵۷
PALSAR	۱۸/۹/۲۰۰۹	۳/۱۱/۲۰۰۹	۶۷۶/۱۸۵	۶۵۲۳/۲۰۳	۴۶	۰/۵۲
	۲۱/۳/۲۰۱۰	۶/۵/۲۰۱۰	۲۳۵/۶۲۷	۱۳۰۷۰/۵۳	۴۶	۰/۵
	۶/۵/۲۰۱۰	۶/۱۱/۲۰۱۰	۵۴۱/۷۳۵	۶۵۲۳/۲۹۹	۱۸۳	۰/۴۵

در تصاویر ASAR علامت * گذر ۱۳۵ و بدون علامت * گذر ۳۳۵ می‌باشد

برفی و مدت زمان طولانی بین دو تاریخ زوج‌ها می‌باشد (Vreeling, ۱۹۹۹). در چنین حالتی امکان تشکیل نقشه جابه‌جایی وجود ندارد. پس از آن برای دیگر زوج‌های تداخل‌نگار، مراحل تا تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش ادامه یافت. در نهایت نقشه‌های پراکنش زمین‌لغزش حاصل از پردازش دو سنجنده تصاویر ASAR و PALSAR تلفیق و نقشه‌های نهایی پراکنش لغزش به تفکیک برای سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ تهیه شد (جدول ۲). شکل ۴ نتایج پردازشی تصویر در هر مرحله از روش D-InSAR را مطابق شکل ۲ برای زوج تداخل‌نگار ۲۰۱۱/۰۸/۰۳-۲۰۱۱/۰۹/۰۲ سنجنده ASAR گذر ۱۳۵ نشان می‌دهد. در این پژوهش حد آستانه‌ای بیشتر از پنج سانتی‌متر جابه‌جایی قائم در مدت کمتر از ۳۵ روز بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ میلادی که بر روی نقشه‌های جابه‌جایی برای تفکیک، شناسایی و تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها در نظر گرفته شد (شکل

با توجه به تاریخ دو تصویر که مربوط به ماه‌های شهریور و مهر بوده، پوشش گیاهی تغییرات رویشی نداشته و پوشش برفی سطح زمین در مناطق مرتفع وجود ندارد و از طرف دیگر فاصله زمانی بین دو تصویر ۳۰ روز می‌باشد، شرایط مورد اشاره موجب می‌شود تا دو زوج تداخل‌نگار همبستگی خوب و بالطبع همدوسی زیاد داشته باشند و نتیجتاً جابه‌جایی‌های قائم سطح زمین (زمین‌لغزش‌ها) در طول این زمان بهتر نمایان شوند (شکل ۳ سمت راست). همچنین، در تصاویر ASAR از بین تداخل‌نگارهای دارای همدوسی ضعیف به زوج ۲۰۱۱/۲۳۱-۲۰۱۱/۰۹۰۲ می‌توان اشاره نمود که دارای همدوسی میانگین ۰/۱۸ می‌باشد (شکل ۳ سمت چپ). البته بعضی از زوج‌ها دارای همدوسی بسیار ضعیف بوده که امکان اعمال فیلتر و ادامه مراحل روش DInSAR مهیا نبود. لازم به ذکر است همدوسی ضعیف ناشی از تغییرات زیاد پوشش گیاهی، پوشش برفی و احتمالاً بارندگی بر روی پوشش

به منظور پایش میزان جابه‌جایی زمین‌لغزش با استفاده از روش DInSAR از زوج تصویر تداخل‌نگارهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ از تصاویر ASAR و PALSAR برای تعیین میزان جابه‌جایی و پایش زمین‌لغزش در منطقه آب ملخ (منطقه شماره ۱ در شکل ۴) استفاده شده است (شکل ۵). با توجه به طول مدت زمان، بیشترین جابه‌جایی (۰/۶۴ سانتی‌متر در روز) مربوط به سال ۲۰۰۵ (شکل ۵ تصویر شماره ۵) و کمترین جابه‌جایی (۰/۰۳ سانتی‌متر در روز) مربوط به سال ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ (شکل ۵ تصویر شماره ۱) می‌باشد (جدول ۳).

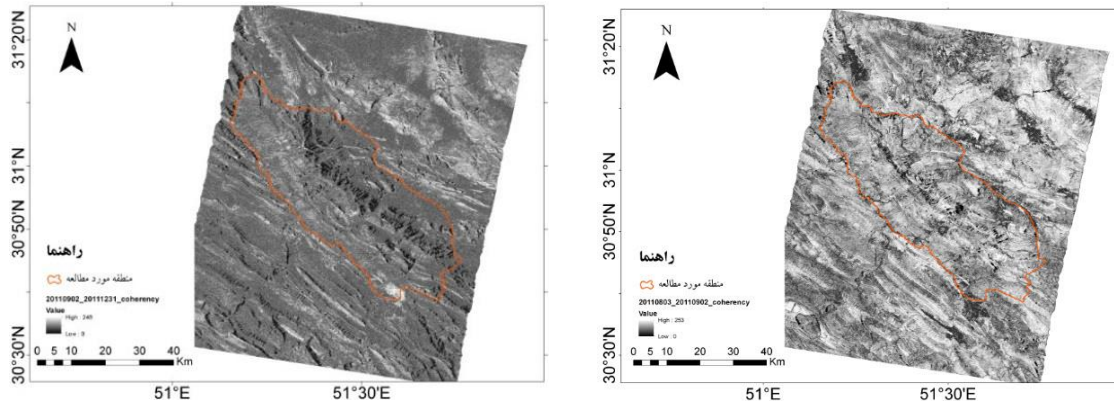
متوسط میزان جابه‌جایی از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ برای این زمین‌لغزش حدود ۰/۲۱ سانتی‌متر در روز می‌باشد. بر مبنای اصول فیزیکی هر فرینج (فاز) در تصویر تداخل‌نگار تسطیح شده معادل نصف طول موج (λ/2) یعنی ۲/۸ سانتی‌متر جابه‌جایی ایجاد می‌کند (Liu و همکاران، ۲۰۱۳). جابه‌جایی اصلی که به صورت فرینج‌های نسبتاً منظم می‌باشد، در شکل ۵ تصاویر ۱، ۳، ۴، ۶، ۸ و ۹ تشکیل شده است و فرینج‌های نامنظم و بهم ریخته در شکل ۵ تصاویر ۲، ۵ و ۷ مربوط به جریان‌های واریزه‌ای پای دامنه ارتفاعات می‌باشد.

۴. همچنین، براساس بازدیدهای زمینی، تفسیر فرم فرینج‌ها در تصاویر تداخل‌نگار و نقشه‌های تبدیل فاز به جابه‌جایی حاصل از پردازش تصاویر راداری PALSAR و ASAR پنج نوع لغزش به تفکیک از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ تشخیص داده شد که نتایج آن در جدول ۲ آمده است.

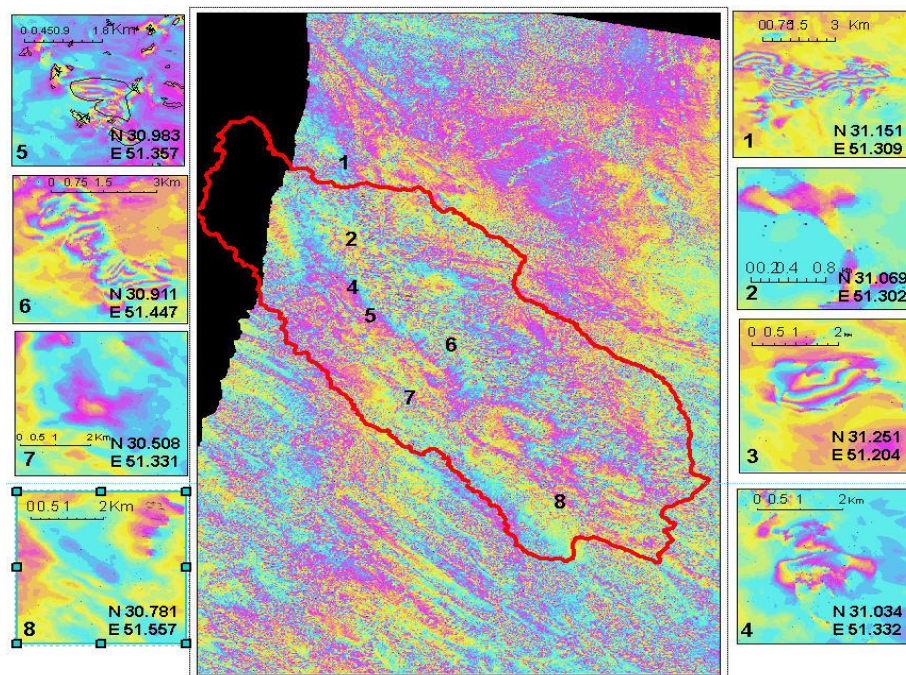
با توجه به زوج‌های تصویری مناسب، یعنی زوج تصویری که خط مبنای عمودی آن‌ها کمتر از یک دوم خط مبنای بحرانی باشد، اقدام به اجرای روش DInSAR به وسیله نرم‌افزار SARscape4.4 در محیط ENVI4.8 برای تعیین نقشه پراکنش یا ثبت زمین‌لغزش در دوره زمانی مربوطه شد. شکل ۴ که حاصل پردازش تصاویر ASAR بر مبنای زوج تداخل‌نگار ۲۰۱۰۵۲۰-۲۰۱۰۶۲۴ می‌باشد، موید این مطلب است که اکثر زمین‌لغزش‌های شناسایی شده الگوی کشیده دارند (شکل ۴). بخش‌هایی ناپیوسته مانند زمین‌لغزش شماره ۱ در شکل ۴ در هر لغزش به علت عدم هم‌دوسی ناشی از بزرگی تغییر شکل و پوشش گیاهی متراکم می‌باشد. اندازه زمین‌لغزش‌های شناسایی شده از ۰/۸ هکتار تا ۷۹۹ هکتار در قالب چهار نوع جریان واریزه‌ای، زمین‌لغزش سطحی، زمین‌لغزش فعال و سنگ افت می‌باشند.

جدول ۲- نوع، تعداد و مساحت زمین‌لغزش‌های شناسایی شده از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ حاصل از پردازش تصاویر PALSAR و ASAR بر مبنای روش DInSAR

روش DInSAR								نوع لغزش
۲۰۰۶		۲۰۰۵		۲۰۰۴		۲۰۰۳		
تعداد	مساحت (ha)	تعداد	مساحت (ha)	تعداد	مساحت (ha)	تعداد	مساحت (ha)	
۵۲	۱۲۴۴	۳۹	۹۳۱	۶۶	۱۹۷۱	۴۱	۱۱۵۹	جریان واریزه‌ای
۱۱	۲۴۰۴	۱۰	۱۵۷۵	۱۸	۲۹۸۸	۱۱	۱۷۱۷	جریان واریزه‌ای و سنگ افت
۳۰	۳۸۰	۲۴	۲۶۱	۴۴	۴۴۴	۲۷	۳۲۲	زمین‌لغزش سطحی
۱۴۴	۲۲۷۱	۱۰۹	۱۵۸۶	۱۸۷	۲۸۸۲	۱۲۵	۱۵۸۳	زمین‌لغزش فعال
۱۲	۴۴۸	۷	۲۷۹	۱۶	۴۷۱	۱۳	۲۷۸	سنگ افت
۲۰۱۱		۲۰۰۹		۲۰۰۸		۲۰۰۷		نوع لغزش
تعداد	مساحت (ha)	تعداد	مساحت (ha)	تعداد	مساحت (ha)	تعداد	مساحت (ha)	
۴۶	۱۶۴۱	۴۲	۱۰۲۷	۲۵	۹۰۱	۳۲	۸۲۶	جریان واریزه‌ای
۱۲	۱۳۱	۱۰	۱۷۹۰	۸	۱۷۰۷	۷	۶۷۶	جریان واریزه‌ای و سنگ افت
۱۵	۱۸	۲۷	۱۷۷	۱۸	۲۶۰	۲۲	۱۸۲	زمین‌لغزش سطحی
۵۹۱	۳۳۹۷	۱۰۷	۱۶۶۷	۹۱	۱۶۸۹	۱۰۹	۱۶۳۲	زمین‌لغزش فعال
۱۰	۱۱	۱۲	۴۵۰	۷	۱۶۱	۸	۲۹۰	سنگ افت



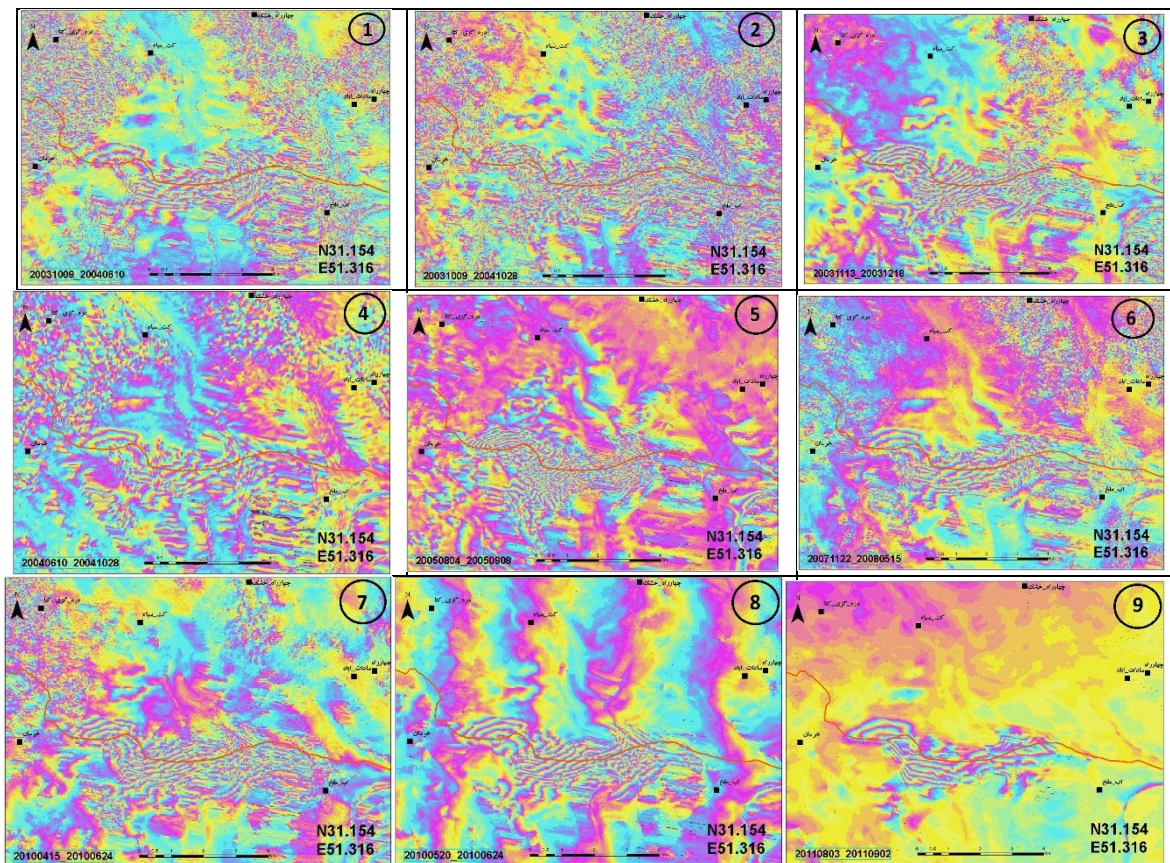
شکل ۳- تصاویر همدوسی زوج‌های ۲۰۱۱۰۹۰۲-۲۰۱۱۱۲۳۱ (شکل چپ) و ۲۰۱۱۰۹۰۲-۲۰۱۱۰۸۰۳ (شکل راست) از تصاویر ASAR گذر ۱۳۵



شکل ۴- پراکنش انواع زمین‌لغزش‌های شناسایی شده بر مبنای زوج تداخل‌نگار ۲۰۱۰۰۵۲۰-۲۰۱۰۰۶۲۴ از تصاویر ASAR گذر ۳۳۵

شد (شکل ۶a,b). لذا از زوج تصاویر تداخل‌نگار ۲۰۱۰/۰۵/۰۶-۲۰۱۰/۱۱/۰۶ تصاویر PALSAR و ۲۰۱۱/۰۸/۰۳-۲۰۱۱/۰۹/۰۲ تصاویر ASAR به‌منظور مقایسه با نتایج اندازه‌گیری طرح رفتارسنجی استفاده شد. پس از تهیه نقشه جابه‌جایی از فاز به‌روش D-InSAR حداکثر میزان جابه‌جایی قائم ۱/۵ متر به-سمت غرب در بازه زمانی مذکور به‌دست آمد (شکل ۶c). روند میزان جابه‌جایی قائم اندازه‌گیری شده حاصل از هر دو روش با توجه به بازه‌های زمانی اندازه‌گیری، قابل قبول و نزدیک به هم می‌باشد، اما جهت حرکت در هر دو روش یکسان می‌باشد.

در منطقه مورد مطالعه معاونت آبخیزداری اداره کل منابع طبیعی استان اصفهان یکی از زمین‌لغزش‌های واقع در غرب روستای نقل در حاشیه رودخانه ماربر از توابع پادانای علیای سمیرم را بین تاریخ‌های ۲۰۱۰/۰۸/۱۰ و ۲۰۱۲/۰۴/۱۳ طی سه مرحله برداشت در قالب طرح رفتارسنجی با استفاده از سیستم GPS (چهار نقطه کنترلی ثابت و ۲۸ نقطه شاهد متحرک) به‌صورت استاتیک مورد ارزیابی قرار داده است. بیشترین مقدار جابه‌جایی قائم برای این لغزش در سه نقطه شاهد بین یک تا دو متر به‌سمت غرب در بازه زمانی ۶۰۳ روز (سری زمانی) اندازه‌گیری



شکل ۵- پایش میزان جابه‌جایی زمین لغزش آب ملخ (منطقه شماره ۱ در شکل ۴) از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ به روش تداخل‌نگاری تصاویر PALSAR و ASAR

جدول ۳- زوج تداخل‌نگارهای انتخابی به‌منظور پایش جابه‌جایی زمین لغزش محدوده آب ملخ از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱

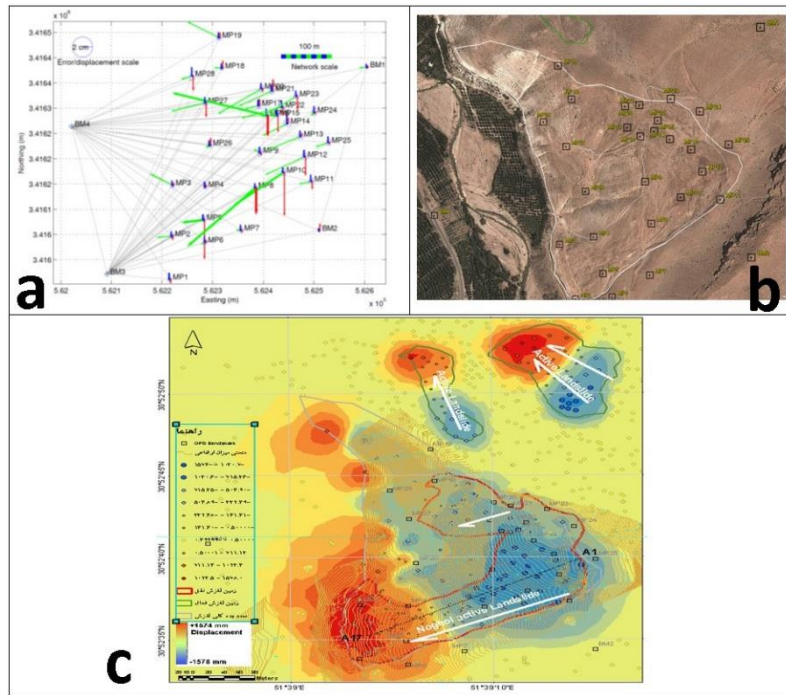
شماره تصویر در شکل ۸	میزان جابه‌جایی سانتی‌متر در روز	تعداد فرینچ	مدت زمان (روز)	زوج تداخل‌نگار
۱	۰/۰۳	۳	۲۴۵	۱۰/۰۶/۲۰۰۴ - ۰۹/۱۰/۲۰۰۳
۲	۰/۰۴	۶	۳۸۵	۲۸/۱۰/۲۰۰۴ - ۰۹/۱۰/۲۰۰۳
۳	۰/۳۲	۴	۳۵	۱۸/۱۲/۲۰۰۳ - ۱۳/۱۱/۲۰۰۲
۴	۰/۰۴	۲	۱۴۰	۲۸/۱۰/۲۰۰۴ - ۱۰/۰۶/۲۰۰۴
۵	۰/۶۴	۸	۳۵	۰۴/۰۸/۲۰۰۵ - ۰۴/۰۸/۲۰۰۵
۶	۰/۰۳	۲	۱۷۵	۱۵/۰۵/۲۰۰۸ - ۲۲/۱۱/۲۰۰۷
۷	۰/۲	۵	۷۰	۲۴/۰۶/۲۰۱۰ - ۱۵/۰۴/۲۰۱۰
۸	۰/۳۲	۴	۳۵	۲۴/۰۶/۲۰۱۰ - ۲۰/۰۵/۲۰۱۰
۹	۰/۲۴	۳	۳۵	۰۳/۰۹/۲۰۱۱ - ۰۳/۰۸/۲۰۱۱

های مشترک) نقشه پراکنش لغزش کلی براساس روش تداخل‌نگاری از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ در قالب یک نقشه نهایی تهیه شد (شکل ۷a). تعداد لغزش رخ داده براساس روش تداخل‌نگاری تصاویر راداری ۹۱۴ زمین لغزش به مساحت ۱۳۵۷۸ هکتار است که بیشترین و کمترین سطح لغزش به ترتیب مربوط به زمین لغزش‌های فعال با مساحت ۵۹۵۶ هکتار و زمین لغزش‌های سطحی با مساحت ۴۰۵ هکتار

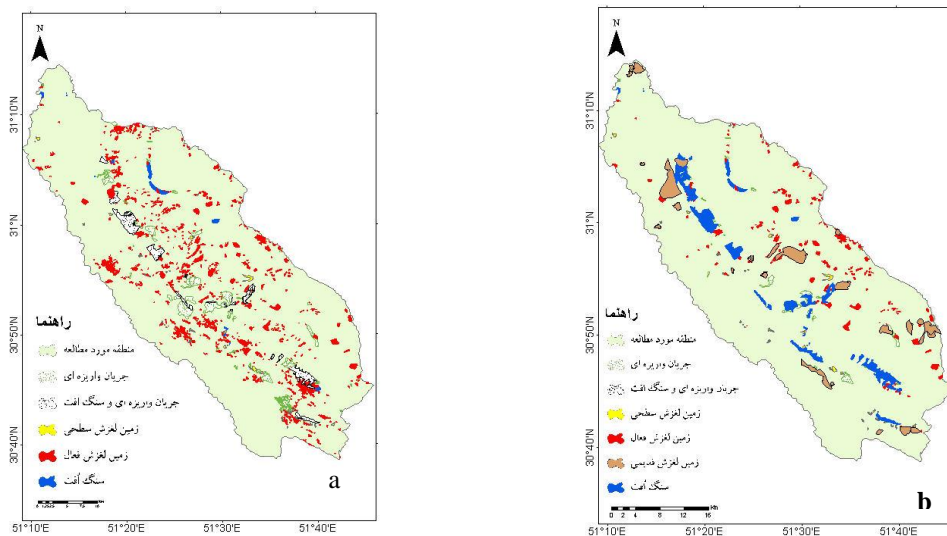
به‌منظور اعتبارسنجی روش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی، دو نقشه نهایی ثبت زمین لغزش‌ها براساس روش تداخل‌نگاری و بازدید میدانی تهیه شد (شکل ۷a,b). نقشه اول حاصل تلفیق نقشه‌های پراکنش لغزش به تفکیک سال براساس تداخل‌نگاری تصاویر راداری ASAR و PALSAR می‌باشد. با تلفیق و هم-پوشانی نقشه‌های مذکور (شکل ۷) در محیط ArcGIS10.1 و حذف لغزش‌های تکراری (پلی‌گون-

می‌باشد (جدول ۴). نقشه دوم پراکنش لغزش که بر مبنای اطلاعات حاصل از بازدیدهای میدانی است حاصل ثبت زمین‌لغزش‌ها به‌وسیله نگارنده این پژوهش و مدیریت آبخیزداری استان اصفهان از سال ۱۳۷۷ شمسی تاکنون می‌باشد. این لغزش‌ها به کمک بازدیدهای میدانی و مقایسه آن‌ها با عکس‌های هوایی

موجود به نقشه در آمده‌اند (شکل ۷b). مجموعاً ۳۱۹ لغزش با سطحی بالغ بر ۱۴۱۶۰ هکتار (با احتساب لغزش‌های قدیمی) به ترسیم در آمده است. بیشترین و کمترین سطح لغزش به ترتیب مربوط به سنگ آفت با مساحت ۴۸۰۵ هکتار و زمین‌لغزش‌های سطحی با مساحت ۴۰۵ هکتار می‌باشد (جدول ۴).



شکل ۶ - مقایسه نتایج میزان اندازه‌گیری جابه‌جایی قائم حاصل از دو روش GPS و تداخل‌سنجی تفاضلی راداری لغزش نقل، (a) نقشه جابه‌جایی‌های گرافیکی مسطحاتی و ارتفاعی نقاط کنترل و شاهد به روش GPS، (b) هم‌پوشانی تصویر Google-Earth و نقاط کنترل و شاهد GPS، (c) نقشه تبدیل فاز به جابه‌جایی به روش D-InSAR



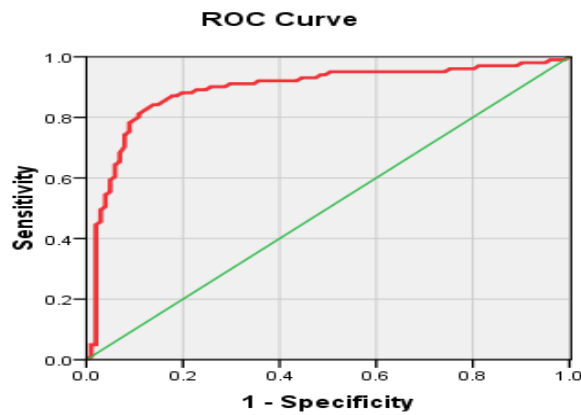
شکل ۷- نقشه پراکنش لغزش حاصل از رویکرد تداخل‌سنجی رادار (a)، نقشه پراکنش لغزش حاصل از رویکرد بازدید میدانی (b)

جدول ۴- تعداد و مساحت انواع زمین لغزش حاصل از روش تداخل نگاری و بازدید میدانی

نوع لغزش	رویکرد تداخل سنجی تصاویر رادار			رویکرد بازدیدهای میدانی		
	تعداد	مساحت (هکتار)	مساحت (مترمربع)	تعداد	مساحت (هکتار)	مساحت (مترمربع)
جریان واریزه‌ای	۸۶	۳۵۴۳	۳۵۴۲۹۵۲۶	۳۸	۱۵۳۸	۱۵۳۸۱۶۰۰
جریان واریزه‌ای و سنگ آفت	۱۸	۲۸۱۷	۲۸۱۶۵۳۳۵	۰	۰	۰
زمین لغزش سطحی	۴۴	۸۳۳/۴۶	۸۳۳۴۶۳۹	۴۴	۴۰۵	۴۰۴۵۷۰۰
زمین لغزش فعال	۷۵۰	۵۹۵۶	۵۹۵۵۸۴۰۰	۱۷۹	۲۴۸۷	۲۴۸۷۳۰۰۰
زمین لغزش قدیمی	۰	۰	۰	۲۷	۴۹۲۵	۴۹۲۵۴۷۰۰
سنگ آفت	۱۶	۴۲۹/۲۰	۴۲۹۲۰۲۰	۳۱	۴۸۰۵	۴۸۰۴۶۹۰۰
جمع	۹۱۴	۱۳۵۷۸	۱۳۵۷۷۹۹۲۰	۳۱۹	۱۴۱۶۰	۱۴۱۶۰۱۹۰۰

براساس نتایج منحنی ROC حاصل از هم پوشانی نقشه پراکنش لغزش حاصل از رویکرد راداری و بازدید زمینی، مقدار سطح زیر منحنی منطقه مورد پژوهش (۸۹ یا ۸۹ درصد) با انحراف استاندارد ۰/۰۲۵ میزان

دقت یا اعتبار مدل به صورت کمی برآورد شد. شکل ۸ نشان دهنده اعتبار خیلی خوب نقشه پراکنش لغزش حاصل از رویکرد راداری نسبت به رویکرد بازدید زمینی است.



شکل ۱۰- منحنی ROC حاصل از هم پوشانی نقشه پراکنش لغزش حاصل از رویکرد راداری و بازدید زمینی

نتایج این پژوهش نشان داد، تصاویر راداری PALSAR و ASAR و روش پردازش تداخل سنجی تفاضلی از پتانسیل خوبی برای شناسایی، پایش و تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش دارند. اما با توجه به تفکیک (خط مبنا) زمانی، مکانی و فرکانس بالاتر (باند C) تصاویر ASAR توانایی بهتری در تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش حاصل از تداخل سنجی تفاضلی با جزئیات بیشتر لغزش های منطقه دارا می باشد. اما همدوسی ضعیف تر تصاویر ASAR نسبت به PALSAR نقش محدود کننده ای در استفاده از این تصاویر در بر دارد. همچنین، پوشش گیاهی نسبتاً زیاد در فصول بهار و

تابستان و پوشش برفی در زمستان عامل محدود کننده ای برای استفاده از روش تداخل سنجی تصاویر راداری ASAR و PALSAR در منطقه مورد مطالعه ایجاد می کند. در مجموع تصاویر PALSAR به دلیل دارا بودن طول موج بلندتر (L) و نفوذ بیشتر محدودیت کمتری از این لحاظ دارند. ضمناً با توجه به اینکه تصاویر راداری ASAR استفاده شده در دو زاویه بُرد ۲۳ و ۴۰ درجه در دسترس بودند، لذا امکان آشکارسازی لغزش های بیشتری در دامنه های کوهستانی فراهم شد. براساس نتایج اندازه گیری های میدانی، به عنوان نتیجه گیری کلی این پژوهش نشان

دیگر در شناسایی، پایش و تهیه نقشه ثبت زمین‌لغزش‌ها باشد. در واقع سه عامل سرعت، دقت و مقرون به صرفه بودن، امتیازاتی است که کاربرد این روش را توجیه‌پذیر می‌کند.

تقدیر و تشکر

این پژوهش بخشی از یافته‌های طرح تحقیقاتی مصوب در سازمان فضایی اروپا (ESA) می‌باشد. لذا نویسندگان لازم می‌دانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از حسن اعتماد آن سازمان به‌خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های راداری مورد نیاز، اعلام نمایند. همچنین، از مساعدت مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان به‌خاطر فراهم نمودن زمینه این پژوهش سپاس‌گزاری می‌شود.

داد که روش تداخل‌سنجی راداری با باند C خیلی مستعد عدم همبستگی زمانی بوده و استفاده از رادارهای با طول موج کوتاه (باند C) برای پایش جابه‌جایی سطحی طولانی مدت به‌ویژه در نواحی با پوشش گیاهی دارای محدودیت می‌باشند. در مقابل روش تداخل‌نگاری تفاضلی با استفاده از رادارهای با طول موج بلند (باند L) از حیث عدم همبستگی زمانی و وجود پوشش گیاهی فاقد محدودیت می‌باشد. با عنایت به این‌که برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر از نقشه‌های حساسیت لغزش و بررسی رابطه بعضی از عوامل محرک نظیر بارش و ایجاد رسوب در حوزه‌های آبخیز، که نیازمند نقشه‌های پراکنش دوره‌ای و زمانی از لغزش‌ها می‌باشد، روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری می‌تواند به‌عنوان روش تکمیلی و حتی جایگزین مناسب و قابل توصیه‌ای به‌جای روش‌های

منابع مورد استفاده

1. Brardinoni, F., O. Slaymaker and M.A. Hassan. 2003. Landslide inventory in a rugged forested watershed: a comparison between air-photo and field survey data. *Geomorphology*, 54: 179–196.
2. Colesanti, C. and J. Wasowski. 2006. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, 88(3–4): 173–199.
3. Colesanti, C., A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca. 2003. Monitoring landslides and tectonic motion with the Permanent Scatterers technique. *Engineering Geology*, 68(1–2): 3–14.
4. Dehghan Soraki, Y. 2011. Subsidence mapping and rate estimation using D-InSAR techniques in Marand plain areas, East Azerbaijan, Iran. Department of Remote Sensing and Geographic Information Systems, Tarbiat Modares University, M.Sc. Thesis, 121 pages (in Persian).
5. Farina, P., D. Colombo, A. Fumagalli, F. Marks and S. Moretti. 2006. Remote sensing techniques for landslide risk analysis: outcomes from the ESA-SLAM project. *Engineering Geology*, 88: 200–217.
6. Frattini, P., G. Crosta and A. Carrara. 2010. Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology*, 111:62-72.
7. Fruneau, B., J. Achace and C. Delacourt. 1996. Observation and modeling of the Saint-Etienne-de-Tine'e landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, 265(3–4): 12-22.
8. Gabriel, A.K., R.M. Goldstein and H.A. Zebker. 1989. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94: 9183-9191.
9. Hilley, G.E., R. Bürgmann, A. Ferretti, F. Novali, and F. Rocca. 2004. Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. *Science*, 304(5679): 1952–1955.
10. Hong, Y., R.F. Adler and G. Huffman. 2007. An experimental global prediction system for rainfall-triggered landslides using satellite remote sensing and geospatial datasets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote*, 45: 1671–1680.
11. Kimura, H. and Y. Yamaguchi. 2000. Detection of landslide areas using radar interferometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(3): 337-344.
12. Liu, P., Z. Li, T. Hoey, 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. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21: 253-264.
13. Massonnet, D. and K.L. Feigl. 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4): 441–500.
14. Plank, S., J. Singer, C. Minet and K. Thuro. 2010. GIS based suitability evaluation of the differential radar interferometry method (DInSAR) for detection and deformation monitoring of landslides, Proc. 'Fringe 2009 Workshop', Frascati, Italy.

15. Pourghasemi, H.R., M. Mohammady and B. Pradhan. 2012. Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena*, 97: 71–84.
16. Riedel, B. and A. Walter. 2008. InSAR processing for the recognition of landslides. *Advances in Geosciences*, 14: 189–194.
17. Rosen, P.A., S. Hensley, I.R. Joughin, F.K. Li, S.N. Madsen, E. Rodríguez and R.M. Goldstein. 2000. Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3): 333–382.
18. Rott, H. and T. Nagler. 2006. The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. *Advances in Space Research*, 37(4): 710–719.
19. Rott, H., B. Scheuchl, A. Siegel and B. Grasmann. 1999. Monitoring very slow slope motion by means of SAR interferometry: a case study from a mass waste above a reservoir in the Otzal Alps, Austria. *Geophysical Research Letters*, 26: 1629-1632.
20. Roustaei, S., M. Roustaei, M. Sharifikia and J. Yarahamadi. 2013. Application of differential interferometry synthetic aperture RADAR on detection and monitoring landslides, case study: Garmchaei Watershed, Miyaneh. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 5(4): 190-198 (in Persian).
21. Shirani, K. 2013. Detection, monitoring and landslide risk assessment by using RADAR satellite images, case study: Dena Mountains. University of Isfahan, PhD Thesis, 268 pages (in Persian).
22. Singhroy, V. 2005. Remote sensing of landslides. In: Glade, T., M. Anderson, M.J. Crozier, (Eds.): *Landslide Hazard and Risk*, Wiley & Sons, Chichester, pp. 1-40.
23. Singhroy, V. and K. Molch. 2004. Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques. *Advances in Space Research*, 33: 290-295.
24. Strozzi, T., P. Farina, A. Corsini, C. Ambrosi, M. Thüning, J. Zilger, A. Wiesmann, U. Wegmüller and C. Werner. 2005. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. *Landslides*, 2: 193-200.
25. Vreeling, W.J. 1999. *Introduction to Interferometry*. ITC, Enschede, the Netherlands, 77 pages.
26. 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.

ASAR and PALSAR sensors assessment for landslide detection, monitoring using differential interferometry in Zagros Mountains

Kouros Shirani^{*1}, Abdollah Seif² and Mohamad Sharifikia³

¹Assistant Professor, Agricultural and Natural Resources Research Center, Isfahan, Iran, ²Assistant Professor, Faculty of Geographic and planning Science, University of Isfahan, Iran and ³Assistant Professor, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Iran

Received: 14 June 2014

Accepted: 07 September 2014

Abstract

Launching satellites with Synthetic Aperture Radar (SAR) sensors onboard, purposely built for differential interferometry (D-InSAR) applications opened new opportunities for mapping and monitoring slow ground deformations and even high speed landslides, for the updating of regional landslide inventories as well as retrieving time series of landslide movements. The present work has been done by using DInSAR method, with objection of performance assessment of two radar sensors in order to detecting, monitoring and landslide inventory mapping in Dena Mountain of Zagros located in south of Isfahan province. For this purpose two sets of images including 17 and 21 RADAR images of PALSAR and ASAR sensors from ALOS and ENVISAT satellites were chosen and processed by D-InSAR method. The preliminary processing result showed that 16 interferometer images were suitable for the next processing stages from all applied data sets. The outcome of interfrogam analysis along with field checking showed that 914 segments are marked as landslides anomaly over the area of 13578 ha. The maximum land sliding activities was identified as 1.58 meter vertical displacement during May 2010 to September 2011. Furthermore, results showed differential interferometry method applied for above mentioned frequencies has sufficient accuracy and conform efficiency for landslide detection, monitoring and distribution mapping compared to other methods (field survey in extend area, aerial photo and optical satellite images). Out of this two frequency, low frequency of PALSAR images has better ability in landslide zonation due to its capabilities such as longer wavelength and reduced incoherency. Where the high frequency of ASAR images can offer more details of the landslides due to its shorter wavelength.

Key words: ALOS satellite, D-InSAR method, ENVISAT satellite, Interferometer, RADAR sensors.

* Corresponding author: k_sh24@yahoo.com