

بررسی و پایش زمین لغزش فعال با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (مطالعه موردی: زمین لغزش نقل، سمیرم)

کوروش شیریانی*؛ استادیار، بخش تحقیقات حفاظت و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، استان اصفهان
محبوبه خوش باطن؛ دانشجوی کارشناسی ارشد، زمین شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۰۳

چکیده

شناسایی و تأثیر زمین لغزش های فعال یکی از جلوه های مهم فرسایش در تهدید مناطق مسکونی، مزارع و تخریب جاده های ارتباطی است. بدین منظور فن تداخل سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) با برخورداری از پوشش زمینی وسیع و نیز قدرت تفکیک زمانی و مکانی زیاد، یکی از دقیق ترین و کم هزینه ترین فنون سنجش از دور، برای شناسایی و نمایش جابه جایی های به وجود آمده در سطح زمین است. هدف از انجام این پژوهش شناسایی مقدماتی محدوده لغزشی نقل و برآورد میزان فعالیت ناشی از این توده لغزشی است. بنابراین، در این پژوهش میزان جابه جایی سطحی ناشی از زمین لغزش نقل واقع در ۷۰ کیلومتری جنوب شهر حنا در شهرستان سمیرم، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری محاسبه شد. بدین منظور، تعداد ده تصویر راداری از سنجنده ASAR ماهواره ENVISAT انتخاب و به روش DInSAR پردازش شد. نتیجه پردازش های اولیه نشان داد از بین زوج های تصویری تشکیل شده، در مجموع نه زوج تداخل سنج در سال های ۲۰۰۴، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ میلادی مناسب پردازش های بعدی شناخته شد. بر اساس نتایج پردازش تصاویر راداری، بیشترین میزان جابه جایی صورت گرفته در سطح توده لغزشی نقل مربوط به زوج تصویری ۳ اگوست ۲۰۱۱ و ۳۱ دسامبر ۲۰۱۱ با بازه زمانی ۱۵۰ روزه، معادل ۸ سانتی متر بوده است. نتایج این پژوهش حاکی از فعال بودن توده لغزشی نقل در طول مدت زمان اخذ تصاویر راداری است. همچنین نشان داد، داده های راداری و روش پردازش تداخل سنجی تفاضلی در شناسایی، پایش زمین لغزش ها و محاسبه میزان جابه جایی آن ها از پتانسیل خوبی برخوردار است.

کلیدواژه ها: تصاویر راداری، روش DInSAR، زمین لغزش نقل، سنجنده ASAR، ماهواره ENVISAT.

مقدمه

یکی از فرایندهای بیرونی که موجب تغییر شکل سطح زمین می شود و اشکال و لندفرم های خاصی را به وجود می آورد، زمین لغزش است. به عبارتی دیگر، زمین لغزش یکی از خطرات طبیعی است که همه ساله خسارات جانی و مالی فراوانی را در مناطق کوهستانی، پرباران و لرزه خیز دنیا به همراه دارد. همچنین، حرکات توده ای، به ویژه رخداد زمین لغزش های فعال در دوران کواترنری، نقش مؤثری در تخریب جاده های ارتباطی، مراتع، ایجاد فرسایش و رسوب در حوضه های آبخیز داشته است و یکی از مهم ترین عوامل تغییردهنده فعال در لندفرم های کواترنر به شمار می رود (شیریانی، ۱۳۹۲). بنابراین، در مناطقی که خطر ناشی از زمین لغزش بالاست، روش های نقشه برداری در ارزیابی دقیق مکان شکستگی های شیب و اندازه زمین لغزش ها، همچنین برآورد میزان فعالیت و ویژگی های جابه جایی آن ها، بسیار لازم است. از آنجا که رخداد گروهی از زمین لغزش ها به واسطه حرکت کند و بطئی به سهولت قابل درک و شناسایی نیست، اندازه گیری میزان حرکت آن مستلزم مطالعات و ابزارهای خاصی است. تاکنون روش های گوناگونی برای شناسایی و

* نویسنده مسئول: k_sh424@yahoo.com

پایش پدیده زمین لغزش و در نهایت تهیه نقشه‌های خطر ارائه شده است، از جمله روش تاکتومتری، ترازبایی، فتوگرامتری برد کوتاه، مشاهدات حاصل از شبکه‌های ژئودتیکی (GPS)، تداخل‌سنجی راداری و لیدار (خوانین‌زاده، ۱۳۹۰).

در اوایل، شناسایی لغزش‌ها بیشتر بر اساس تفسیر بصری زوج‌های استریویی عکس‌های هوایی و از طریق مشاهدات صحرائی صورت می‌گرفت. هر چند تفسیر بصری عکس‌های هوایی در ترکیب با بررسی‌های صحرائی، تا به امروز نیز یکی از منابع اصلی در نقشه‌برداری زمین لغزش‌ها باقی‌مانده است. اما، این منابع اطلاعاتی ضمن اینکه برای اکثر مناطق دنیا به‌صورت به‌هنگام در دسترس نیست، تهیه آن نیز برای مناطق گسترده هزینه زیادی در بر خواهد داشت (هونگ و همکاران، ۲۰۰۷).

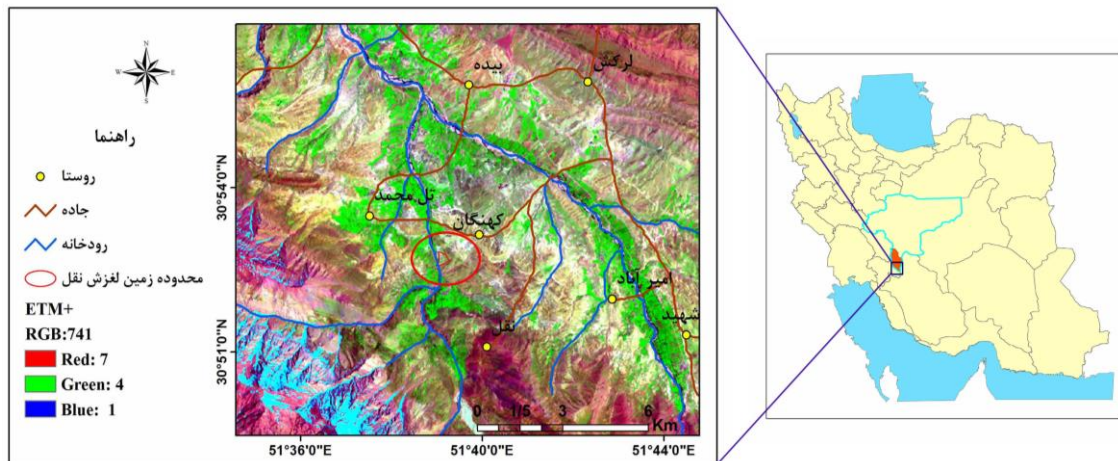
در دهه گذشته با فراگیر شدن ابزار GPS امکان پایش زمین لغزش با هدف رفتارسنجی مورد توجه قرار گرفت. این تکنیک هر چند به‌لحاظ دقت، مورد قبول و تأیید بود، به لحاظ مسائلی چند مانند هزینه بالای اجرا در نصب و پایش ایستگاه‌های دائم، عدم سهولت در تعیین دامنه و گستره زمین لغزش، نابه‌سامانی در دوره زمانی پایش به‌واسطه تغییر در بودجه و اعتبارات سالانه و در نهایت، عدم نظارت و مدیریت پیوسته از گذشته تا حال موفق نبوده و از حد چند مورد و تعدادی محدود از سال‌ها تجاوز نکرده است (شیرانی و همکاران، ۱۳۹۳).

از میان تکنیک‌های دورسنجی، تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) که قابلیت کار در تمام شرایط بد جوی و طول مدت شب و روز را دارد، از جمله تکنیک‌های مؤثر و کارآمد در پایش تغییرات آرام سطح زمین محسوب می‌شود، به‌گونه‌ای که این روش با برخورداری از پوشش زمینی وسیع و نیز قدرت تفکیک زمانی و مکانی زیاد، یکی از دقیق‌ترین (در مقیاس میلی‌متر) و کم‌هزینه‌ترین فنون سنجش از دور در شناسایی جابه‌جایی‌های اتفاق افتاده در سطح زمین به‌کار رفته است (گابریل و همکاران، ۱۹۸۹). ساده‌ترین روش در این زمینه استفاده از حداقل دو تصویر حاصل از سنجنده‌های راداری با روزه مجازی به‌صورت تداخل‌نگار است (مسونت و فیگل، ۱۹۹۸). با توجه به پیشرفت‌های اخیر در تکنیک تداخل‌سنجی راداری نظیر تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR)، در زمینه شناسایی و پایش زمین لغزش‌ها پژوهش‌های متعددی انجام پذیرفته است (کیمورا و یاماگوچی، ۲۰۰۰؛ سینقروی و مولج، ۲۰۰۴؛ کولسانتی و واسواسکی، ۲۰۰۶؛ ریدل و والتز، ۲۰۰۸؛ پلانک و همکاران، ۲۰۱۰؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۲؛ آردیزون و همکاران، ۲۰۱۲؛ هررا و همکاران، ۲۰۱۳؛ پوتری و همکاران، ۲۰۱۳؛ جیور و همکاران، ۲۰۱۴). بررسی زمین لغزش‌ها به کمک رادار در ایران انگشت‌شمار بوده است. از جمله محققانی که به کمک روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری، اقدام به شناسایی، پایش و تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها کردند و نتایج قابل توجهی به‌دست آوردند می‌توان به پژوهش‌های شیرانی (۱۳۹۲)، شیرانی و همکاران (۱۳۹۳) و روستایی و همکاران (۱۳۹۲) اشاره کرد.

در همین راستا، این پژوهش با هدف بررسی و پایش زمین لغزش نقل واقع در منطقه پادانای سمیرم با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) انجام گرفت. در این پژوهش، ضمن اندازه‌گیری حداکثر میزان جابه‌جایی زمین لغزش نقل و برآورد میزان فعالیت ناشی از حرکت این توده لغزشی در طول مدت زمان اخذ تصاویر راداری، نقشه جابه‌جایی زمین لغزش نیز تهیه شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه با وسعتی در حدود ۱۱ هکتار در شمال روستای نقل از توابع دهستان پادانای شهرستان سمیرم و در فاصله ۳۰۰ کیلومتری جنوب شهر اصفهان واقع شده است. این محدوده دارای مختصات جغرافیایی $39^{\circ} 10' 51''$ طول شرقی و $39^{\circ} 52' 30''$ عرض شمالی است. بهترین راه دسترسی به این منطقه از طریق جاده اصفهان-شهرضا-سمیرم-حنا-کیفته-نقل امکان‌پذیر است (شکل ۱). متوسط میزان بارش سالیانه در این منطقه ۵۵۰ میلی‌متر و بیشترین مقدار آن ۷۰۰ میلی‌متر است. رودخانه ماربر در امتداد غربی زمین لغزش نیز از آن سرچشمه می‌گیرد، به‌طوری که این رودخانه از پنجه دامنه عبور می‌کند و دائم در حال فرسایش و تخریب پنجه شیب است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

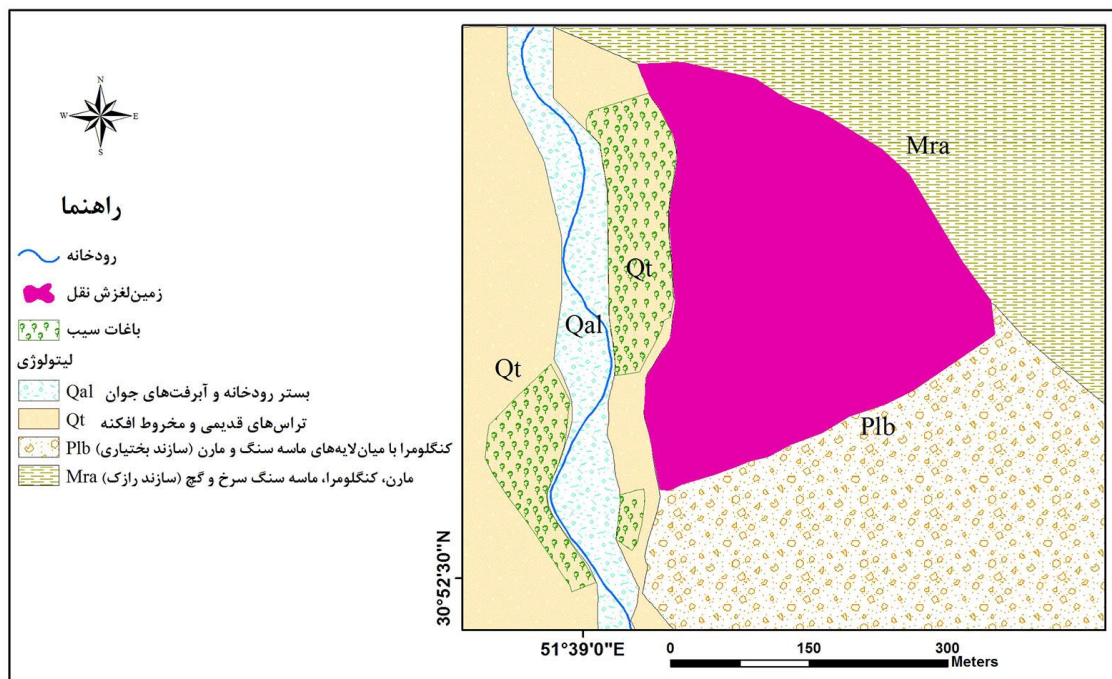
زمین لغزش نقل از لحاظ مورفولوژی تقریباً به شکل مثلث با زاویه رأس به سمت شرق است. قاعده آن با طول حدود ۷۰۰ متر در سمت غرب و به سمت رودخانه ماربر قرار دارد. بلندترین نقطه ارتفاعی در این توده لغزشی در رقوم ارتفاعی ۲۳۵۰ متر و پست‌ترین آن در پنجه لغزش و در رقوم ۲۲۰۵ متر قرار دارد. بر این اساس اختلاف ارتفاع بین تاج و پاشنه زمین لغزش ۱۴۵ متر است. همچنین، میانگین شیب دامنه ۲۷ درجه است.

بر اساس نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (شکل ۲)، سازندهای موجود در این منطقه عمدتاً از رخساره‌های رسوبی سنوزویک است. در محدوده زمین لغزش نقل عمدتاً سازندهای رازک و بختیاری و نهشته‌های کواترنری برنزد دارد، به طوری که پدیده زمین لغزش در منطقه، در سازند بختیاری ایجاد شده است. لازم به ذکر است که در این منطقه سازند بختیاری در اثر عملکرد روراندگی در زیر سازند رازک قرار گرفته است. بر این اساس زمین لغزش نقل در مجاورت زون رورانده بین سازند رازک و بختیاری رخ داده است. سازند بختیاری در منطقه مورد مطالعه شامل کنگلومرای توده‌ای تا ضخیم لایه با میان لایه‌های مارن و ماسه‌سنگ و سازند رازک نیز شامل مارن، کنگلومرا، ماسه‌سنگ سرخ و گچ است. در شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی محدوده زمین لغزش نقل و موقعیت رودخانه ماربر در پنجه این توده لغزشی و باغات سیب واقع در پایین دست زمین لغزش نشان داده شده است.

همچنین، منطقه مورد مطالعه از لحاظ تقسیم‌بندی زمین‌ساختاری ایران، در زون زاگرس مرتفع واقع شده است؛ بنابراین، از نظر تکتونیکی پویا و فعال است، به طوری که این محدوده در بین گسل اصلی تراستی دنا در جنوب غرب و گسل‌های فرعی کوه سیاه و بیده در شمال شرق واقع شده است. بر این اساس، منطقه پادانای سمیرم به دلیل ویژگی‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی و زمین‌ساختی از جمله مناطقی است که در آن زمین لغزش‌های فعال گسترش زیادی دارد.

در این پژوهش به منظور پایش و تعیین میزان جابه‌جایی ناشی از حرکت توده لغزشی نقل از روش پردازش تداخل‌سنجی تفاضلی رادار و تصاویر راداری سنجنده ASAR ماهواره ENVISAT با طول موج باند C در حالت مدار نزولی استفاده شده است. تداخل‌سنجی راداری یا همان اینترفرومتری روش استفاده از اختلاف فاز سیگنال‌های برگشتی از سطح زمین در دو تصویر SAR گرفته‌شده با تأخیر زمانی یا دارای پارالاکس از یک منطقه برای استخراج ارتفاع یا اطلاعات مربوط به تغییرات سطح زمین اطلاق می‌شود (روستایی و همکاران، ۱۳۹۲).

رادار با دهانه ترکیبی (SAR) نوعی سیستم تصویربرداری فعال پهلونگر است که سیگنال‌های میکروموج را در فواصل زمانی معین در طول مسیر حرکت به صورت پالس‌هایی به طرف سطح زمین ارسال و سیگنال‌های برگشتی به آنتن را در دو حالت دامنه و فاز ثبت می‌کند. اساس کار این روش، استفاده از اطلاعات فاز راداری بازتابی از زمین است، به نحوی که تغییرات ایجادشده در سطح زمین سبب اختلاف فاز در دو تصویر رادار در دو زمان مختلف از منطقه‌ای مشابه می‌شود. با بررسی اختلاف فاز و مدل‌سازی آن، تغییرات سطح زمین کمی‌سازی می‌شود. به کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری تصویری به نام تداخل‌نگار ساخته می‌شود. تداخل‌نگار تصویری است حاوی اختلاف فاز دو تصویر راداری که



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده زمین لغزش نقل به همراه موقعیت رودخانه ماربر و باغات سیب واقع در پایین‌دست این توده لغزشی

به‌دقت نسبت به هم ثبت هندسی شده است. به عبارتی دیگر، مقدار تغییرات مربوط به فاصله عارضه تا سنجنده راداری در تداخل‌نگار موجود است. این تغییرات مربوط به خطای مداری ماهواره $(\Delta\phi G)$ ، اثر توپوگرافی $(\Delta\phi T)$ ، جابه‌جایی عارضه $(\Delta\phi D)$ و آثار اتمسفری $(\Delta\phi Atm)$ است. به منظور استخراج میزان تغییرات سطح باید تمام آثار دیگر از تداخل‌نگار حذف شود (دهقانی و همکاران، ۱۳۸۵). رابطه (۱) بیانگر عوامل تأثیرگذار در به‌وجود آمدن اختلاف فاز میان دو تصویر راداری است.

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

از بین آثار فوق، توپوگرافی و جابه‌جایی عارضه (دگرشکلی) مؤثرترین عوامل است که با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (DInSAR) و با به‌حداقل رساندن خط مبنای عمودی زوج تصاویر انتخابی می‌توان قسمت اعظم تأثیر توپوگرافی در ایجاد اختلاف فاز را از بین برد. همچنین، به منظور بهبود نتایج می‌توان از مدل ارتفاعی رقومی زمین استفاده کرد. بدین ترتیب، باقی‌مانده اثر توپوگرافی نیز از تصاویر تداخل‌نگار ایجاد شده حذف می‌شود. در این پژوهش، از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) تصاویر ASTER با دقت ارتفاعی ۳۰ متر استفاده شد. در نهایت، آنچه در تصاویر تداخل‌نگار مشهود خواهد بود مربوط به اختلاف فاز ناشی از دگرشکلی یا جابه‌جایی زمین در راستای دید سنجنده است. لازم به ذکر است که در روش تداخل‌سنجی راداری، آشکارسازی تغییرات سطح زمین، تنها در راستای دید ماهواره بیشترین حساسیت را دارد (پلانک و همکاران، ۲۰۱۰).

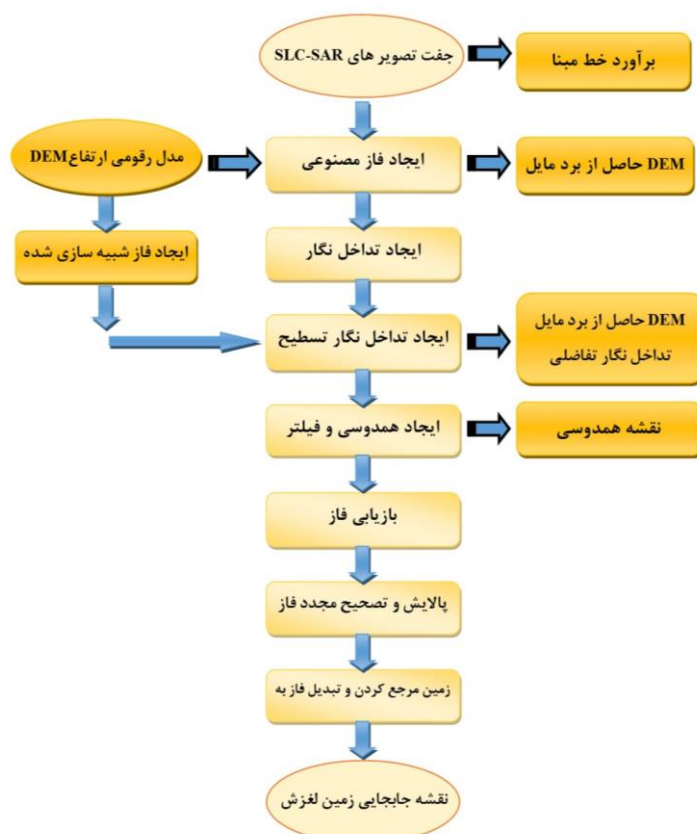
داده‌های راداری مورد نیاز این پژوهش با ارائه پروپوزال به سازمان فضایی اروپا (ESA) و بررسی و موافقت آن‌ها فراهم شده است. بررسی مشخصات تصاویر راداری موجود در محدوده مورد مطالعه و سفارش آن با نرم‌افزار EOLI-SA انجام شد. در نتیجه آن، ده تصویر راداری از سنجنده ASAR سفارش داده شد.

تکنیک مورد استفاده در این پژوهش روش تداخل‌سنجی تفاضلی رادار با گشودگی ترکیبی دو عبوره مکرر (Two Pass DInSAR) است (گابریل و همکاران، ۱۹۸۹). در روش دو عبوره تنها از دو تصویر SAR برای محاسبه دگرشکلی

استفاده و مدل ارتفاعی رقومی برای حذف مؤلفهٔ توپوگرافی وارد پردازش می‌شود. در نهایت، تداخل‌نگار تشکیل می‌شود (شکل ۳). به‌منظور انجام گام‌به‌گام روش دو عبوره، ابتدا دو تصویر به دقت نسبت به هم ثبت هندسی و هر دو تصویر با یکدیگر هم‌مرجع شد. سپس، فاز مصنوعی ایجاد شد. تصویر اول (تصویر اصلی) مرجع هندسی و تصویر دوم تصویر فرعی محسوب می‌شود. بدین ترتیب، تداخل‌نگار مسطح‌شده‌ای حاصل می‌شود که حاوی نوفه‌هایی است که باعث پایین آمدن کیفیت بصری فرینج‌ها می‌شود. هر فرینج یک چرخهٔ رنگ کامل از آبی (صفر رادیان) تا قرمز 2π (رادیان) را نشان می‌دهد و بیانگر سیکل اختلاف فاز است. مقدار هر فرینج برابر با نصف طول موج تصویر راداری مورد استفاده است. بدین منظور، در ادامه کار از فیلتر تطبیقی برای حذف نوفهٔ تداخل‌نگار مسطح‌شده استفاده شد. این عمل به‌طور معناداری باعث بهبود کیفیت فرینج تداخل‌نگار شد. همچنین، باعث حذف نوفه‌هایی خواهد شد که منشأ آن به‌دلیل عدم همبستگی ناشی از پارامترهای مربوط به خط مناسبت. همچنین، با عمل فیلترگذاری نقشهٔ همدوسی تهیه شد (نقشه یا تصویری که پیکسل‌های آن نمایانگر درجهٔ همبستگی بین دو سیگنال دریافتی برای دو تصویر است). فاز تفاضلی دارای ابهام اندازه‌گیری در تعیین جابه‌جایی سطح زمین به نام بیچش است. از آنجا که تغییرات فاز به‌صورت مضربی از 2π (۶/۲۸) اندازه‌گیری می‌شود و تعداد دقیق چرخه‌های فاز در هر اندازه‌گیری از دست می‌رود، تداخل‌نگار بدون انجام فرایندی برای بازیافت چرخه‌های از دست رفته به نقشهٔ تغییر شکل تبدیل نمی‌شود. لذا، لازم است این فاز برای مقادیر بزرگ‌تر از 2π بازیابی شود. فرایند بازیابی موجب رفع ابهام فاز (فاز بازیابی‌شده) می‌شود. این مقدار متناسب با میزان تغییر شکل قائم سطح زمین است. به‌منظور تبدیل صحیح فاز بازیابی‌شده به مقادیر ارتفاعی و محاسبات میزان جابه‌جایی سطح زمین، حتماً لازم است مرحلهٔ پایش یا تسطیح مجدد اجرا شود. اجرای این مرحله باعث می‌شود تا خطاهای احتمالی مداری تصحیح و مقدار انحراف فاز محاسبه شود تا از این طریق مقادیر فار مطلق به‌دست آید. برای اجرای این پروسه حتماً باید از نقاط کنترل زمینی (GCP) استفاده شود. این نقاط برای تصحیح پارامترهای مورد نظر در تنظیمات فرایند پایش از قبیل تصحیح خطای مداری سنجنده استفاده می‌شود. مراحل مختلف پردازش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری دو عبوره برای تصاویر ASAR به‌منظور پایش و محاسبهٔ میزان جابه‌جایی زمین‌لغزش نقل با استفاده از نرم‌افزار SARscape 5 در شکل ۳ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای

به‌منظور اجرای روش DInSAR ابتدا باید بین هر زوج تصویر راداری (تصویر اصلی و فرعی) به دو اصل توجه داشت که نخست، خط مبنای زمانی و مورد دوم خط مبنای مکانی است. در این پژوهش نیز ابتدا قابلیت و کیفیت تصاویر راداری مورد استفاده برای تهیهٔ تداخل‌نگار با محاسبهٔ مقادیر خط مبنای مکانی آن‌ها بررسی شد (جدول ۱). البته، لازم به ذکر است که علاوه‌بر خط مبنای مکانی مناسب برای هر زوج تصویر، لازم است به خط مبنای زمانی مناسب، یعنی اختلاف زمانی میان تصاویر کمتر از یک‌سال و ترجیحاً شش ماه نیز توجه داشت. این موضوع به کاهش عدم همبستگی و افزایش همدوسی فاز بین دو تصویر برمی‌گردد (لیو و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین، دوره‌های زمانی مناسب با کمترین تاج پوشش گیاهی و تغییرات آن و حداقل پوشش برف روی سطح زمین به کاهش عدم همبستگی و افزایش همدوسی کمک خواهد کرد. با توجه به نتایج حاصل از بررسی خط مبنای زمانی و مکانی فوق در تصاویر ASAR از بین دوازده زوج تداخل‌نگار تشکیل‌شده در تاریخ‌های ۲۰۰۴، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱، در مجموع نه زوج تداخل‌نگار پس از کنترل پارامترهای حاصل از خط مبنا و همدوسی برای پردازش‌های بعدی مناسب تشخیص داده شد و مبنای تهیهٔ نقشهٔ جابه‌جایی زمین‌لغزش قرار گرفت. پس از انتخاب زوج‌های تداخل‌نگار (تداخل‌سنج) مناسب بر مبنای خط مبنای زمانی و مکانی کم، در مرحلهٔ بعدی از پردازش این تصاویر و به‌منظور حذف اثر توپوگرافی از تداخل‌نگار، از روش تهیهٔ تداخل‌نگار همراه با مدل ارتفاعی رقومی (ASTER DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری استفاده شد. خروجی این مرحله از کار در قالب تداخل‌نگار تفاضلی (DInSAR) به‌صورت تداخل‌نگار مسطح‌شده‌ای است که در آن فاز ثابت (به‌دلیل هندسهٔ تصویربرداری) و فاز توپوگرافی از تداخل‌نگار حذف شده است. از آنجا که تداخل‌نگار مسطح‌شده حاوی نوفه‌هایی است که باعث پایین آمدن کیفیت بصری فرینج‌ها می‌شود، بدین منظور در ادامه کار فیلتر تطبیقی گلدشتاین برای حذف نوفهٔ تداخل‌نگار مسطح‌شده اعمال شد. همچنین، با عمل فیلترگذاری نقشهٔ همدوسی نیز تهیه شد.



شکل ۳. نمودار گردش پردازش به روش تداخلسنجی تفاضلی دو عبوره برای تصاویر ASAR

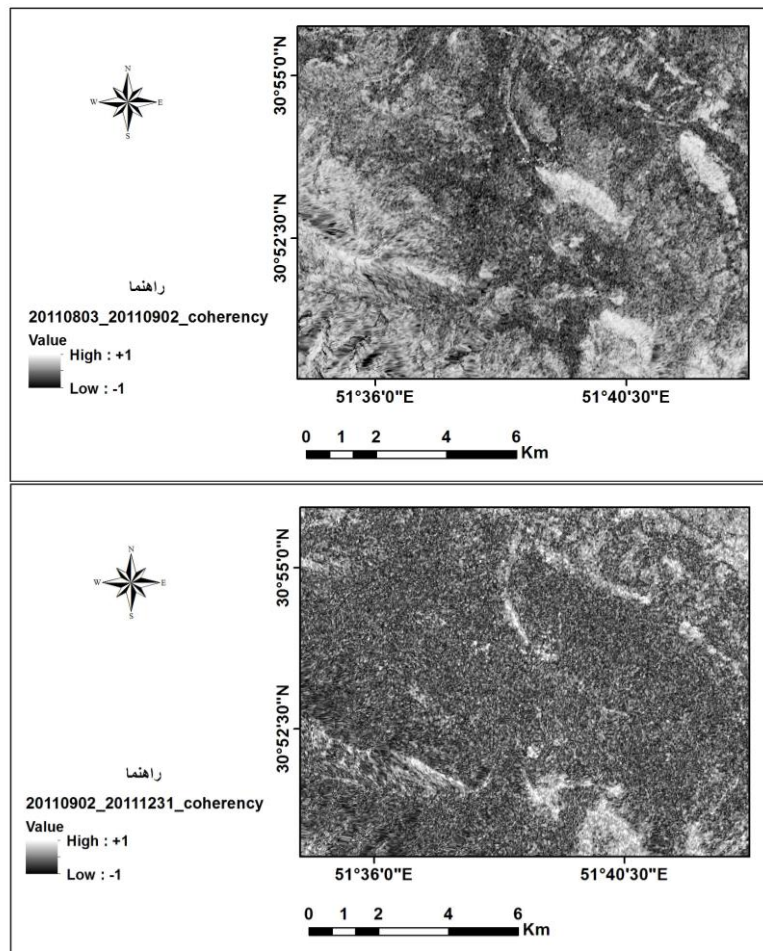
جدول ۱. مشخصات زوج‌های انتخابی تداخل‌نگاری تصاویر ASAR و پارامترهای مرتبط با خط مبنا از دو گذر مختلف در منطقه مورد مطالعه. تصاویر با علامت * گذر ۱۳۵ و بدون علامت * گذر ۳۳۵ است.

تصویر اصلی	تصویر فرعی	خط مبنای عمودی (متر)	خط مبنای بحرانی (متر)	خط مبنای زمانی (روز)	متوسط همدوسی
۲۰۰۴/۶/۱۰	۲۰۰۴/۷/۱۵	۳۱۹/۹۷۵	۹۳۱/۴۸۷	۳۵	۰/۵۱
۲۰۰۴/۶/۱۰	۲۰۰۴/۱۰/۲۸	۱۰۸/۳۸۶	۹۳۱/۴۸۷	۱۴۰	۰/۴۷
۲۰۰۴/۷/۱۵	۲۰۰۴/۱۰/۲۸	۴۲۶/۳۷	۹۳۱/۱۹۴	۱۰۵	۰/۴۲
۲۰۱۰/۵/۲۰	۲۰۱۰/۶/۲۴	۱۴۵/۷۴۶	۹۳۱/۰۶۴	۳۵	۰/۵۶
۲۰۱۰/۵/۲۰	۲۰۱۰/۱۰/۷	۱۱۵/۱۴۸	۹۳۱/۰۶۴	۱۴۰	۰/۴۴
۲۰۱۰/۶/۲۴	۲۰۱۰/۱۰/۷	۲۶۰/۴۴۷	۹۳۱/۲۴۹	۱۰۵	۰/۵
۲۰۱۱/۸/۳*	۲۰۱۱/۹/۲*	۱۳۹/۰۵۹	۲۰۹۷/۶۲۷	۳۰	۰/۶۶
۲۰۱۱/۸/۳*	۲۰۱۱/۱۲/۳۱*	۳۲۲/۶۳۲	۲۰۹۷/۶۲۷	۱۵۰	۰/۳۷
۲۰۱۱/۹/۲*	۲۰۱۱/۱۲/۳۱*	۳۹۲/۸۷۱	۲۰۹۶/۷۰۱	۱۲۰	۰/۳۵

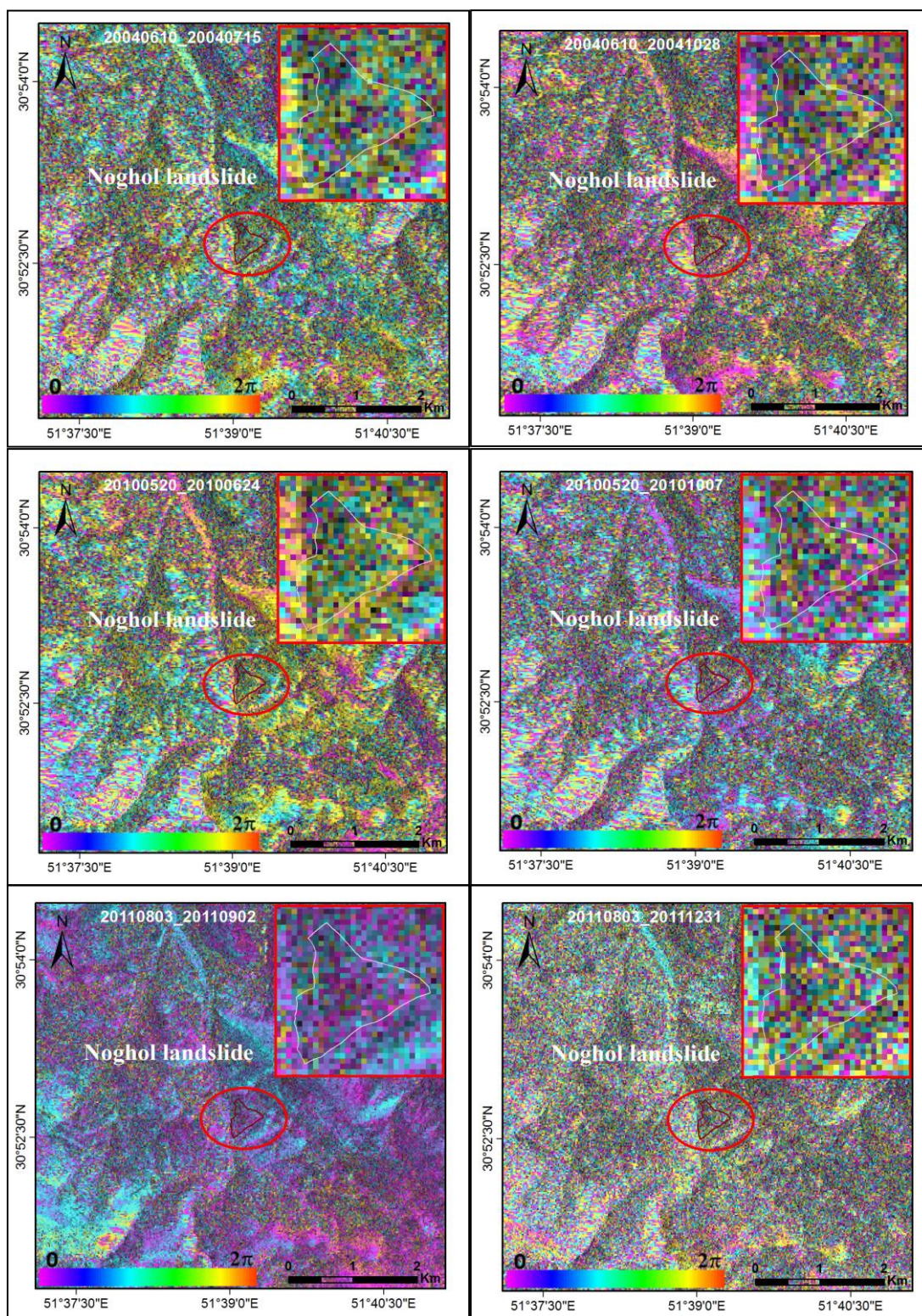
در این پژوهش نیز از بین تداخل‌سنج‌های انتخاب‌شده از سنجنده ASAR (جدول ۱) تداخل‌سنج تاریخ ۲۰۱۱/۸/۳ و ۲۰۱۱/۹/۲ بیشترین همدوسی را با میانگین عددی ۰/۶۶ داراست. با توجه به تاریخ دو تصویر که مربوط به ماه‌های شهریور و مهر است، پوشش گیاهی تغییرات رویشی نداشته است و پوشش برفی سطح زمین در مناطق مرتفع حداقل بوده یا وجود ندارد. از طرف دیگر، فاصله زمانی بین دو تصویر نیز سی روزه است. این شرایط موجب می‌شود تا دو زوج تداخل‌نگار همبستگی خوب و در پی آن همدوسی زیادی داشته باشد. در نتیجه، جابه‌جایی‌های ارتفاعی سطح زمین (زمین‌لغزش‌ها) در طول این زمان بهتر نمایان می‌شود. همچنین، از بین تداخل‌سنج‌های دارای همدوسی ضعیف می‌توان به زوج تصویر ۲۰۱۱/۹/۲ - ۲۰۱۱/۱۲/۳۱ اشاره کرد که دارای همدوستی میانگین ۰/۳۵ است. علت همدوستی ضعیف

این زوج تصویر ناشی از وجود پوشش برف و احتمالاً بارندگی روی پوشش برفی و مدت زمان طولانی بین دو تاریخ زوج هاست. تاریخ تصویربرداری این دو زوج تصویر مربوط به ماه‌های مهر و دی بوده است، همچنین، اختلاف زمانی بین دو تصویر نیز ۱۲۰ روز است. در شکل ۴ نقشه هم‌دوسی منطقه مورد مطالعه، برای زوج‌های تداخل‌نگاری با هم‌دوسی زیاد و هم‌دوسی ضعیف نشان داده شده است. دامنه عددی این نقشه‌ها بین -۱ تا +۱ است. مقادیر مثبت همبستگی بالا و مقادیر منفی پایین بودن همبستگی را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج حاصل، تا این مرحله و انتخاب زوج‌های تصویری مناسب، یعنی زوج تصویری که خط مبنای عمودی آن‌ها کمتر از یک‌دوم خط مبنای بحرانی و دارای هم‌دوسی بالایی است اقدام به اجرای روش DInSAR با استفاده از نرم‌افزار SARscape 5 در محیط ENVI 5 برای تهیه نقشه جابه‌جایی زمین لغزش در دوره‌های زمانی مربوط شد. بدین ترتیب، پس از انجام فرایند بازیابی فاز، به منظور رفع خطای نوفه ($\Delta\phi_{noise}$) با انتخاب نقاط کنترل زمینی (GCP) فاز ویرایش شد. سپس، به منظور تفکیک سیگنال تغییر شکل، مؤلفه توپوگرافی به کمک (ASTER- DEM) تسطیح و پالایش شد. برای این منظور DEM با تصویر اصلی رادار نمونه‌برداری مجدد شد و فاز توپوگرافی مرجع را ایجاد کرد. تداخل‌نگار تفاضلی از تفریق فاز توپوگرافی مرجع و تداخل‌نگار (تداخل‌نگار مسطح‌شده) حاصل می‌شود. نمایش این عملکرد در تصویر به صورت فرینچ‌ها متجلی می‌شود. در شکل ۵ نمایی از تداخل‌نگار تفاضلی حاصل از تفریق فاز توپوگرافی مرجع و تداخل‌نگار مسطح‌شده مربوط به زوج‌های تصویری با هم‌دوسی بالا همراه با محدوده زمین لغزش نقل با بزرگ‌نمایی بیشتر و در پنجره‌ای جداگانه نشان داده شده است.



شکل ۴. نقشه هم‌دوسی زوج‌های تداخل‌نگاری ۲۰۱۱/۸/۳-۲۰۱۱/۹/۲ (شکل بالا) و ۲۰۱۱/۹/۲-۲۰۱۱/۱۲/۳۱ (شکل پایین)



شکل ۵. نمایی از تداخل نگار تفاضلی تشکیل شده و مربوط به زوج های تصویری با هم‌دوسی بالا در سال های مختلف به روش تداخل سنجی تفاضلی تصاویر ASAR

همان طور که در شکل ۵ نیز مشاهده می شود، فرینج های تشکیل شده در اینترفروگرام های تفاضلی الگوی میهمی دارد و در محدوده زمین لغزش نقل فرینج کامل و واضحی تشکیل نشده است. دلیل این امر نامنظم بودن فروافتادگی ها و پراکنده بودن آن ها در قسمت های مختلف سطح توده لغزشی است، به طوری که می توان گفت زمین لغزش نقل در اصل زمین لغزش تثبیت شده قدیمی بوده است که تحت تأثیر عوامل اصلی فعال سازی قرار دارد. این امر منجر به فعال شدن مجدد تعدادی از زمین لغزش های کوچک در سطح این توده لغزشی شده است.

در آخرین مرحله از پردازش تصاویر راداری ASAR و در صورتی که بتوان جفت های تداخل سنجی مناسبی بین تاریخ های مختلف تصاویر اخذ شده ایجاد کرد، امکان بررسی میزان جابه جایی زمین لغزش در زمان اخذ تصاویر مربوط وجود خواهد داشت. بر این اساس میزان جابه جایی زمین لغزش نقل به کمک پردازش تصاویر ASAR به روش (DInSAR)، در بازه های زمانی مختلف برای برخی زوج تصاویر راداری مربوط به سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ به طور نمونه و در قالب نقشه های تبدیل فاز به جابه جایی نمایش داده شده است (شکل ۶).

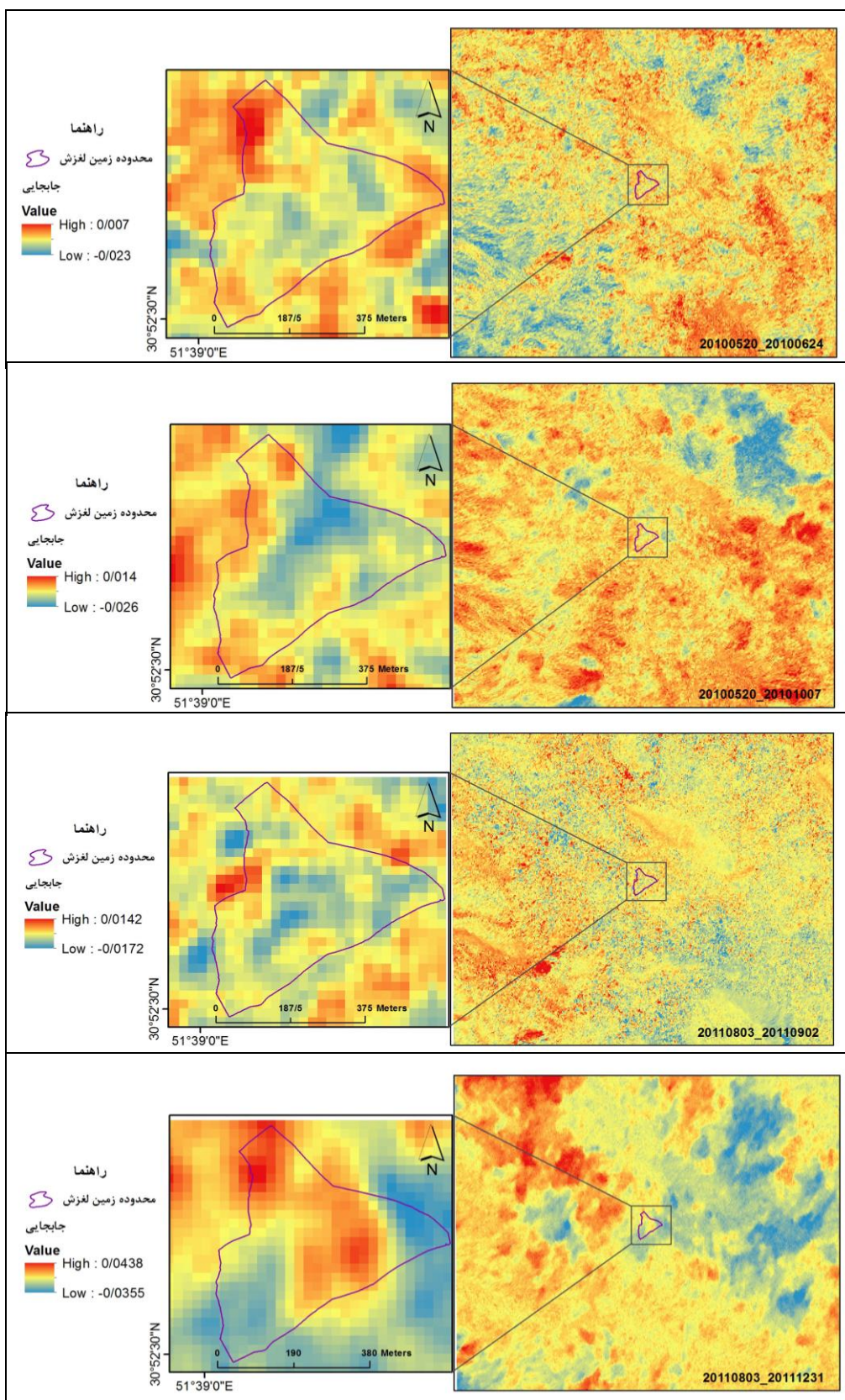
همان طور که در شکل ۶ نیز ملاحظه می شود، میزان جابه جایی در این نقشه ها به صورت دامنه ای عددی بین مقادیر منفی تا مقادیر مثبت بر حسب متر نشان داده شده است. در تفسیر این نتایج و برآورد میزان جابه جایی توده لغزشی، مقادیر منفی نشان دهنده میزان فروافتادگی یا کنده شدگی در سطح دامنه و مقادیر عددی مثبت گویای انباشتگی رسوبات در پای دامنه و در داخل بستر رودخانه است. در این نقشه ها رنگ آبی (نشان دهنده کنده شدگی یا فروافتادگی) و رنگ قرمز نشان دهنده انباشتگی یا تجمع رسوبات است. همچنین، در این نقشه ها محدوده زمین لغزش نقل با بزرگنمایی بیشتر و در پنجره ای جداگانه مشخص شده است.

با توجه به نقشه های تبدیل فاز به جابه جایی زمین لغزش و تحلیل تصاویر در بازه های زمانی مختلف، می توان دگرذیسی سطح زمین لغزش را نیز به خوبی تشریح کرد. بدین منظور، در این پژوهش محدوده ای از زمین لغزش نقل بررسی و تجزیه و تحلیل شد که با توجه به بازدیدهای مکرر میدانی نسبت به سایر قسمت ها فعال تر به نظر می رسید. ضمن پایش میزان جابه جایی زمین لغزش در طول مدت زمان اخذ تصاویر راداری، نتایج حاکی از افزایش میزان جابه جایی زمین لغزش، همچنین افزایش گستره و دامنه لغزش به صورت تدریجی و هم زمان با افزایش بازه زمانی بین جفت های تداخل سنجی تشکیل شده در تاریخ های تصاویر مورد استفاده بوده است (شکل ۷).

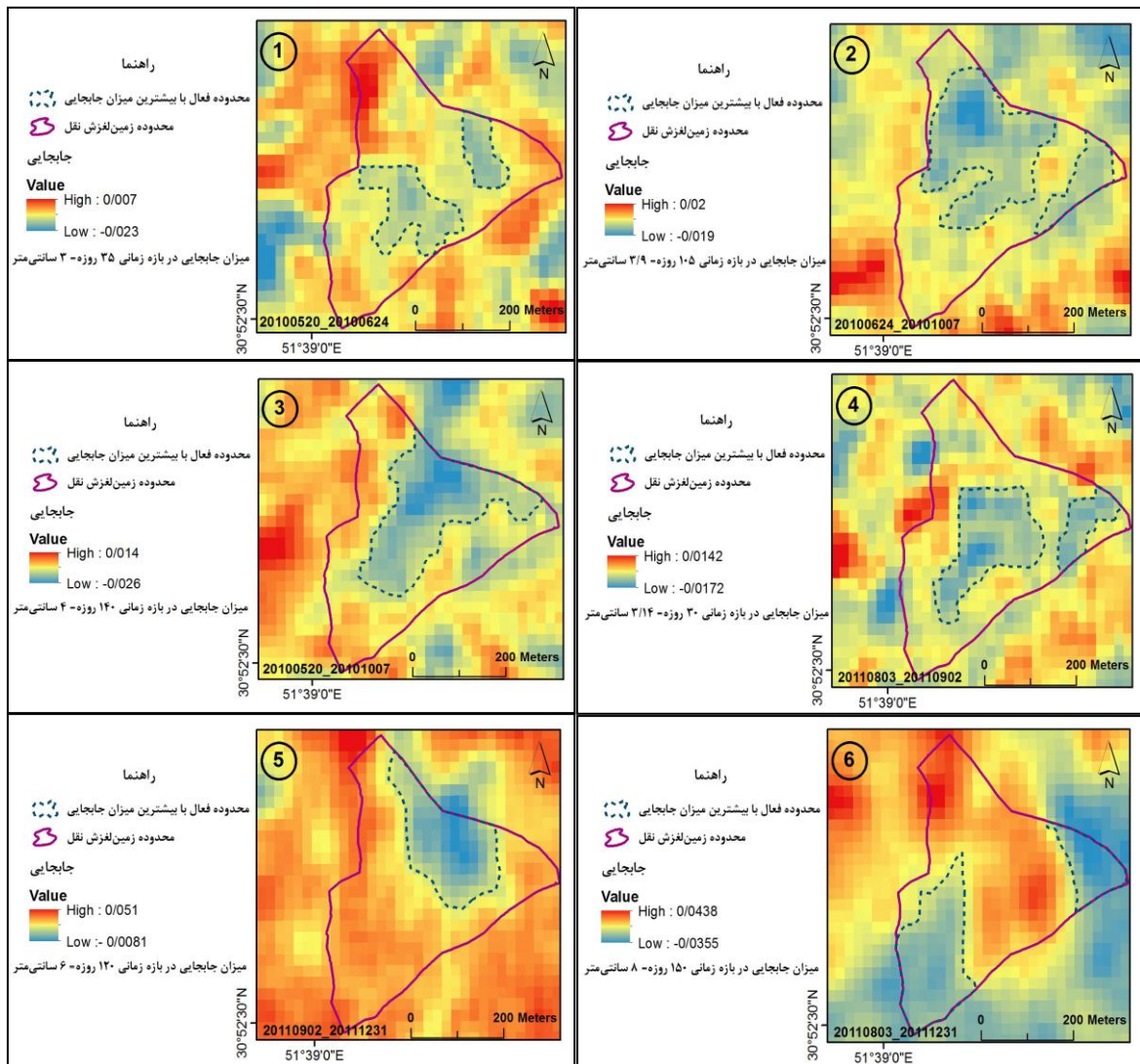
در شکل ۷، محدوده هایی با بیشترین میزان جابه جایی در سطح توده لغزشی نقل در هر بازه زمانی با خط چین روی نقشه های تبدیل فاز به جابه جایی زمین لغزش نشان داده شده است. بر این اساس می توان بیان کرد که دامنه زمین لغزش نقل، همچنین میزان جابه جایی توده لغزشی با توجه به طول مدت زمان بین اخذ تصاویر راداری به طور تدریجی گسترش یافته است، به طوری که کمترین میزان جابه جایی صورت گرفته در سطح این توده لغزشی مربوط به زوج تصویر ۲۰ می ۲۰۱۰ و ۲۴ ژوئن ۲۰۱۰ با بازه زمانی ۳۵ روزه، به مقدار ۳ سانتی متر است (شکل ۷، تصویر ۱) که به طور تدریجی، دامنه و محدوده فعالیت لغزش از قسمت های شمال و شمال شرق توده لغزشی به تدریج به سمت قسمت های مرکز و جنوب و در نهایت قسمت های جنوب غرب توده لغزشی گسترش یافته است. هم زمان با گسترش محدوده فعالیت زمین لغزش میزان جابه جایی نیز افزایش یافته است، به طوری که در نهایت بیشترین میزان جابه جایی، مربوط به زوج تصویری ۳ در شکل ۷، آگوست ۲۰۱۱ و ۳۱ دسامبر ۲۰۱۱ با بازه زمانی ۱۵۰ روزه و ۸ سانتی متری (شکل ۷، تصویر ۶) است (جدول ۲).

همچنین، در جدول ۲ اطلاعات مربوط به تمامی جفت تداخل سنجی های انتخابی به منظور پایش و برآورد میزان جابه جایی زمین لغزش در سال های ۲۰۰۴، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ ارائه شده است. بر این اساس میزان تقریبی متوسط نرخ جابه جایی در بین تداخل نگارهای تشکیل شده در سال های ۲۰۰۴، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ برای این زمین لغزش حدود ۲ سانتی متر در ماه است.

اخذ داده های DInSAR از داخل توده لغزشی، اطلاعات بنیادی و بسیار مهمی را علاوه بر پی بردن به وضعیت حرکت توده لغزشی به منظور رفتار سنجی و مدل سازی آن و نیز پی بردن به میزان فعالیت توده لغزشی در طول دوره های مختلف زمانی، در رابطه با نوع زمین لغزش نیز به دست می دهد.



شکل ۶. نقشه‌های تبدیل فاز به جابه‌جایی زمین لغزش به روش تداخل‌سنجی تفاضلی تصاویر ASAR در بازه‌های زمانی مختلف مربوط به سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱



شکل ۷. نقشه‌های گستره زمین لغزشی نقل در بازه‌های زمانی مختلف در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ تصاویر ASAR

جدول ۲. جفت تداخل سنج‌های انتخابی به منظور پایش جابه‌جایی زمین لغزشی نقل در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ تصاویر

ASAR			
جفت تداخل سنج	مدت زمان (روز)	میزان جابه‌جایی (سانتی‌متر)	متوسط میزان جابه‌جایی (سانتی‌متر در ماه)
۲۰۰۴/۰۶/۱۰ - ۲۰۰۴/۰۷/۱۵	۳۵	۴/۴	۲
۲۰۰۴/۰۷/۱۵ - ۲۰۰۴/۱۰/۲۸	۱۰۵	۴/۷	
۲۰۰۴/۱۰/۲۸ - ۲۰۰۴/۰۶/۱۰	۱۴۰	۴/۷۲	
۲۰۱۰/۰۵/۲۰ - ۲۰۱۰/۰۶/۲۴	۳۵	۳	۱/۷
۲۰۱۰/۰۶/۲۴ - ۲۰۱۰/۱۰/۰۷	۱۰۵	۳/۹	
۲۰۱۰/۱۰/۰۷ - ۲۰۱۰/۰۵/۲۰	۱۴۰	۴	
۲۰۱۱/۰۸/۰۳ - ۲۰۱۱/۰۹/۰۲	۳۰	۳/۱۴	۱/۸۲
۲۰۱۱/۰۹/۰۲ - ۲۰۱۱/۱۲/۳۱	۱۲۰	۶	
۲۰۱۱/۱۲/۳۱ - ۲۰۱۱/۰۸/۰۳	۱۵۰	۸	

همان‌طور که در شکل ۶ و توضیحات مربوط به نقشه‌های تبدیل فاز به جابه‌جایی زمین‌لغزش نیز به آن اشاره شد، با توجه به اینکه در این نقشه‌ها زون‌های کنده‌شدگی تقریباً متقارن با زون‌های تجمع رسوبات در پای دامنه صورت گرفته است، و با توجه به بازدهی میدانی انجام‌شده درخصوص شکل سطح گسیختگی و نوع مصالح لغزش، همچنین با توجه به فعالیت زمین‌لغزش طی چندین مرحله تاکنون، می‌توان بیان کرد که زمین‌لغزش نقل نوعی زمین‌لغزش چرخشی مرکب است.

همچنین، لازم به ذکر است که نتایج حاصل از پردازش داده‌های راداری ASAR در رابطه با تعیین محدوده فعال زمین‌لغزش با بیشترین میزان جابه‌جایی در سطح توده لغزشی نقل و گسترش تدریجی دامنه زمین‌لغزش طی مدت زمان اخذ تصاویر راداری کاملاً با مشاهدات میدانی تطابق دارد. زمین‌لغزش نقل طی چندین مرحله فعالیت داشته و محل زمین‌لغزش‌های قدیمی با خطچین مشکی در قسمت‌های شمال توده لغزشی و منطقه فعلی لغزش با بیشترین میزان جابه‌جایی در سطح این توده لغزشی نشان داده شده است (شکل ۸) که پایش آن نیز در تصاویر راداری بررسی و تحلیل با خطچین زردرنگ و در سمت جنوب توده لغزشی نشان داده شده است. همچنین، بر اساس شکل ۸، جهت حرکت کلی زمین‌لغزش نقل نیز از سمت شرق به غرب و به طرف رودخانه است.

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از روش پردازش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) به‌منظور شناسایی محدوده فعال زمین‌لغزش نقل و محاسبه میزان جابه‌جایی ناشی از حرکت این توده لغزشی استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد، تصاویر راداری و روش پردازش تداخل‌سنجی تفاضلی برای شناسایی مناطق فعال ناپایدار دامنه‌ای، همچنین محاسبه میزان جابه‌جایی آن پتانسیل خوبی دارد. در این میان، تصاویر راداری ASAR با توجه به تفکیک (خط مینا) زمانی، مکانی و فرکانس بالاتر (باند C)، در تهیه نقشه جابه‌جایی زمین‌لغزش‌های حاصل از تداخل‌سنجی تفاضلی با جزئیات بیشتر لغزش‌های منطقه توانایی بهتری دارد.

بر اساس نتایج حاصل از پردازش تصاویر راداری ASAR در این پژوهش، بیشترین مقدار جابه‌جایی صورت‌گرفته در سطح توده لغزشی نقل مربوط به زوج تصویری ۳ آگوست ۲۰۱۱ و ۳۱ دسامبر ۲۰۱۱ با بازه زمانی ۱۵۰ روزه و به میزان ۸ سانتی‌متر برآورد شد. همچنین، متوسط میزان جابه‌جایی در بین تداخل‌نگارهای تشکیل‌شده در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ برای این زمین‌لغزش حدود ۲ سانتی‌متر در ماه است. با توجه به طول مدت زمان اخذ تصاویر راداری، میزان جابه‌جایی زمین‌لغزش نیز افزایش یافته است و این مسئله بیانگر فعال بودن توده لغزشی نقل طی مدت زمان تصاویر راداری مورد استفاده و گسترش تدریجی دامنه لغزشی از سمت شمال و شمال‌شرق به سمت مرکز و در نهایت جنوب و جنوب‌غرب زمین‌لغزش و در امتداد رودخانه ماربر است.



شکل ۸. محدوده فعالیت زمین‌لغزش نقل در دوره‌های مختلف زمانی حاصل از مشاهدات میدانی (دید به سمت شرق). خطچین مشکی بیانگر محل زمین‌لغزش‌های قدیمی و خطچین زردرنگ بیانگر منطقه فعلی لغزش با بیشترین میزان جابه‌جایی است.

نتایج حاصل از پردازش تداخل سنجی تفاضلی تصاویر راداری ASAR به‌ویژه در رابطه با تعیین محدوده‌ای از زمین لغزش با بیشترین میزان جابه‌جایی، با مشاهدات میدانی نیز تطابق داشت. بر این اساس نوع زمین لغزش نقل با توجه به شکل سطح گسیختگی و جنس مصالح لغزشی حاصل از بازدیدهای میدانی و نیز الگوهای حرکتی و رفتار سنجی زمین لغزش نقل حاصل از تحلیل نقشه‌های جابه‌جایی زمین لغزش، چرخشی مرکب تعیین شد.

منابع

- خواین زاده، ن. (۱۳۹۰). استفاده از روش تداخل سنجی راداری برای مطالعه زمین لغزش. گروه مهندسی نقشه‌برداری و ژئوماتیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ۱۴۸ ص.
- دهقانی، م.؛ ولدان زوج، م.ج.؛ پارسون، ب. و وایت، ت. (۱۳۸۵). ارزیابی فرونشست زمین در شمال شرق مشهد به‌وسیله فناوری INSAR، کنگره زمین‌شناسان ایران، دانشگاه آزاد واحد مشهد.
- روستایی، ش.؛ روستایی، م.؛ شریفی کیا، م. و یار احمدی، ج. (۱۳۹۲). کاربرد تداخل سنجی تفاضلی راداری در شناسایی و پایش زمین لغزش‌ها (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرم‌چای میانه). نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، ۵(۳): ۱۹۰-۱۹۸.
- شیرانی، ک.؛ سیف، ع. و شریفی کیا، م. (۱۳۹۳). ارزیابی کارایی سنجنده‌های ASAR و PALSAR به کمک تداخل سنجی تفاضلی در شناسایی و پایش زمین لغزش‌ها در زاگرس. نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، ۶(۳): ۲۸۸-۳۰۱.
- شیرانی، ک. (۱۳۹۲). شناسایی، پایش و سنجش خطرپذیری زمین لغزش مبتنی بر تکنیک تصاویر ماهواره‌ای رادار (مطالعه موردی: ارتفاعات دنا زاگرس). رساله دکتری، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، ۲۶۸ ص.
- Ardizzone, F.; Angeli, M.G.; Calo, F.; Castaldo, R.; Federica, F.; Guzzetti, F.; Lollino, P.; Manconi, A.; Manunta, M. and Manzo, M. (2012). Temporal and spatial analysis of landslides through the SBAS-DInSAR approach: the Ivancich, Assisi, test case, Paper presented at: the EGU General Assembly Conference Abstracts; Vienna, Austria.
- Colesanti, C.; and Wasowski, J. (2006). Investigating landslides with space borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry, *Engineering Geology*, 188(3-4): 173-199.
- Dehghani, M.; Valadanjoz, M.J.; Parsons, B. and Weight, T. (2006). Land subsidence evaluation of north-western part of Mashhad by INSAR technique, 26th Iranian's Geology Congress, Islamic Azad University Mashhad Branch. [in Persian]
- Gabriel, A.K.; Goldstein, R.M. and Zebker, H.A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry, *Journal of Geophysical Research*, 94: 9183-9191.
- Herrera, G.; Gutierrez, F.; Garcia-Davalillo, J.C.; Guerrero, J.; Notti, D.; Galve, J.P.; Fernandez-Merodo, J.A. and Cooksley, G. (2013). Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: the Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees), *Remote Sensing Environ*, 128: 31-43.
- Hong, Y.; Adler, R.F. and Huffman, G. (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.
- Jebur, M.N.; Pradhan, B. and Tehrany, M.S. (2014). Detection of vertical slope movement in highly vegetated tropical area of Gunung pass landslide, Malaysia, using L-band InSAR technique, *Geosciences Journal*, 18(1): 61-68.
- Khavaninzadeh, N. (2011). Using RADAR interferometry for landslide studying, MSc Thesis, Faculty of Engineering, Tehran University, 145 pp. [in Persian]
- Kimura, H. and Yamaguchi, Y. (2000). Detection of landslide areas using radar interferometry, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(3): 337-344.
- Liu, P.; Li, Z.; Hoeya, T.; Kincal, C.; Zhang, J.; Zeng, Q. and Muller, J.P. (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.
- Massonnet, D. and Feigl, K.L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Reviews of Geophysics*, 36(4): 441-500.
- Plank, S.; Singer, J.; Minet, C. and Thuro, K. (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.
- Putri, R.; Wibirama, S.; Alimuddin, I.; Kuze, H. and Sumantyo, J. (2013). Monitoring and analysis of landslide Hazard using DInSAR technique applied to ALOS PALSAR imagery: A case study in Kayang catchment area, Yogyakarta, Indonesia, *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 7(2): 308-322.
- Riedel, B. and Walther, A. (2008). InSAR processing for the recognition of landslides, *advances in geosciences*, 14: 189-194.
- Rustaei, S.; Rustaei, M.; Sharifikia, M. and Yarahmadi, J. (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(3): 190-198. [in Persian]
- Shirani, K. (2013). Detection, monitoring and landslide risk assessment by using RADAR satellite images, Case study: Dena Mountains, University of Isfahan, PhD Thesis, 268 pp. [in Persian]
- Shirani, K.; Seif, A. and Sharifikia, M. (2014). ASAR and PALSAR sensors assessment for landslide detection, monitoring using differential interferometry in Zagros Mountains, *Jornal of Watershed Engineering and*

- Management, 6(3): 288-301. [in Persian]
- Singhroy, V. and Molch, K. (2004). Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques, *Advances in Space Research*, 33: 290- 295.
- Zhao, C.; Lu, Z.; Zhang, Q. and Fuente, J. (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.