Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 0:19 IRST on Sunday November 2nd 2025

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی فضای جغرافیایی

سال بیستم، شماره‌ی ۶۹
بهار ۱۳۹۹، صفحات ۱۶۴-۱۵۱

*جمشید یاراحمدی[۱]
احد حبیب زاده[۲]
مالک رفیعی[۳]
کریم عباس‌زاده[٤]

رفتارسنجی توده لغزشی دوپیق در حوزه آبخیز اهرچای با استفاده از روش پردازش پراکنشگرهای ثابت تداخل‌سنجی راداری و GPS سه فرکانسه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲٦ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۹

چکیده

زمین‌لغزش‌ها یکی از رایج‌ترین و خطرناک‌ترین تهدیدات طبیعی در جهان هستند که باعث خسارات قابل توجه و زیان‌های اقتصادی می‌شوند. شناسایی و نظارت بر زمین‌لغزش‌ها، دو جنبه تحقیق قابل توجه برای تحلیل زمین‌لغزش‌ها است. امروزه، پردازش تداخل‌سنجی راداری یکی از ابزارهای موثر در پایش زمین‌لغزش‌ها است. روش پراکنشگر دائمی (PSI) یکی از تکنیک‌های پیشرفته تداخل‌سنجی بوده که باعث بهبود دقت نتایج نسبت به سایر روش‌های متداول تداخل‌سنجی شده است. هدف اصلی این تحقیق، آشکارسازی و پایش زمین‌لغزش‌های زیرحوضه اهرچای با استفاده از روش پراکنشگر دائمی (PSI) بوده است. داده‌های مورد استفاده شامل ۲۲ تصویر ماهواره‌ای ENVISAT-ASAR در مدار پایین‌گذر بوده است. نتایج حاصل از پردازش تداخل‌سنجی راداری با مشاهدات زمینی از طریق GPS سه فرکانسه مقایسه گردید. در حالی که نتیجه مشاهدات بیانگر عدم فعالیت توده لغزشی دوپیق بود ولی نتایج پردازش

*۱- بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران. (نویسنده مسئوول). E-mail: yarahmadi1353@gmail.com

۲- بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان‌شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران.

۳- بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان‌شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران.

٤- دانشجوی دکتری منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی اهواز.

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 0:19 IRST on Sunday November 2nd 2025

اینترفرومتری نشان داد که سطح توده لغزشی دوپیق هنوز هم فعال است. محاسبه نرخ جابجایی سطح زمین در PS شناسایی شده در سطح توده لغزشی مورد نظر نشان داد که متوسط سالانه نرخ تغییرات سطح زمین در این توده لغزشی ۱۲/٤ میلی‌متر در سال در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ بوده است. لازم است احتمال ناپایداری‌های دامنه‌ای موجود در منطقه، با به‌کارگیری تکنیک‌های جدید پردازشی و داده‌های بروز و قابل دسترس راداری بررسی شده و نتایج حاصله جهت انجام اقدامات مقتضی در اختیار برنامه‌ریزان و مدیران قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: آشکارسازی، پایش، زمین‌لغزش، پراکنشگر دائمی، دوپیق.

مقدمه

زمین‌لغزش‌ها[5] یکی از عمده‌ترین مخاطرات محیطی هستند که باعث ایجاد خسارات هنگفت مالی و جانی و صدمه به ابنیه‌ها و پروژه‌های مهندسی در سراسر دنیا به‌ویژه در مناطق کوهستانی می‌شوند. این پدیده تقریباً در همه کشورهای جهان اتفاق می‌افتند و نقش مهمی در تحول سیمای زمین دارند. آن‌ها همچنین به‌عنوان مخاطره طبیعی جدی در اکثر مناطق دنیا به حساب می‌آیند (Guzzetti et al., 2012). برای اندازه‌گیری ناپایداری زمین روش‌های مختلف ژئودیتیکی و غیرژئودیتیکی وجود دارند. از جمله روش‌های ژئودیتکی می‌توان به مشاهدات زمینی از طریق برداشت‌های GPS، توتال استیشن، لیزر اسکنر اشاره کرد. مشاهدات حاصل از این روش‌ها، اندازه‌گیری‌های دقیق و پیوسته‌ای را در نقاط محدودی از مناطق ناپایدار ارائه می‌دهند؛ اما هیچ کدام از این‌ها، توانائی تعیین وسعت و الگوی فضائی مناطق ناپایدار را ندارند (Lanari et al., 2004). از طرف دیگر، تکرار انجام هرکدام از این روش‌ها به‌ویژه هنگامی‌که برای منطقه وسیعی مورد نظر باشد، بسیار پرهزینه و زمان‌بر خواهد بود. وجود چنین محدودیت‌هایی همواره از چالش‌های اساسی محققان در ارتباط با اندازه‌گیری‌های دقیق و پایش فضایی تغییرات سطح زمین محسوب می‌شود. امروزه، روش‌های غیرژئودیتیکی با ظهور سنجنده‌های دورسنجی مختلف و متعاقب آن، ماهواره‌های راداری تصویربرداری در دهه ۱۹۹۰ و توسعه سریع آن در سال‌های بعد از آن، افق تازه و بسیار امیدوار کننده‌ای را پیش روی محققان علوم زمین قرار داده است. با توجه به این‌که زمین‌لغزش‌ها مستقیماً سطح زمین را تحت تاثیر قرار می‌دهند، کاربرد تکنیک‌های سنجش از دور در مطالعات ناپایداری دامنه‌ها خیلی مناسب به نظر می‌رسد. از میان تکنیک‌های دورسنجی، تداخل سنجی راداری (InSAR) که قابلیت کار در تمام شرایط بد جوی و طول مدت شب و روز را داشته از جمله تکنیک‌های موثر و کارآمد در آشکارسازی و پایش تغییرات آرام سطح زمین محسوب می‌شود. البته، نبود همبستگی مکانی و زمانی در تصاویر راداری در دسترس، استفاده از روش تداخل سنجی راداری رایج را برای پایش جابه‌جایی سطح زمین محدود می‌کند. در سال‌های اخیر روش‌های نوینی بر پایه روش تداخل‌سنجی راداری ارائه شده است که تنها از نقاطی که در

5- Landslide

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 0:19 IRST on Sunday November 2nd 2025

طول زمان ویژگی‌های بازپراکنشی نسبتاً ثابتی دارند با عنوان پراکنش‌کننده‌های دائمی[6] برای پایش جابه‌جایی سطح زمین استفاده می‌کنند. پیکسل‌های پراکنش کننده دایمی با وجود خط مبناهای زمانی و مکانی بزرگ، کوهرنسی بالایی دارند و از نبود همبستگی تصاویر SAR کم‌تر تأثیر می‌پذیرند.

برای بروز رسانی و پایش زمین‌لغزش‌های توسکانی[7] ایتالیا (Rosi et al., 2017) از روش PSInSAR استفاده کرده است. نتایج کار آن‌ها منجر به آشکارسازی ٦٧٢ نقطه لغزشی فعال شد. در تحقیقی Bayer et al (2017) نتیجه گرفته‌اند که روش‌های پیشرفته پرازش تداخل‌سنجی از قبیل PS-InSAR و SBAS حرکات آهسته زمین‌لغزش‌ها را دقیق‌تر از روش معمول تداخل‌سنجی اندازه‌گیری می‌کنند. رفتار زمین‌لغزش‌های منطقه گولابا[8] در ایالت هیماچال پرادش[9] هندوستان را Virk et al (2019) با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری سنجنده سنتینل ۱ (۳۰ تصویر بالاگذر و ۲۳ تصویر پایین گذر) با روش PSInSAR پایش کردند. نتایج آن‌ها بیانگر وجود تغییرات سطح زمین در محدوده زمین‌لغزش و مناطق مجاور آن در بازه ٢٦ ماهه تحقیق بود. تکنیک اینترفرومتری چند زمانه (MTI) در قالب تداخل-سنجی تفاضلی پیشرفته (A-DInSAR) توسط(Vicari et al., 2019) برای بررسی و پایش حرکات بطئی زمین‌لغزشی که با فعالیت مجدد خود باعث تخریب ساختمان‌های موود در مرکز شهر Stigliano در جنوب ایتالیا شده بود مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج کار آنان بیانگر تغییرات سطح زمین به اندازه ۵- تا ۲۵- میلی‌متر در سال در روش PS و ۵- تا ۱۵- میلی‌متر در سال SBAS بوده است. ناپایداری دامنه‌ای ناحیه آلپی Valle d'Aosta واقع در شمال‌غرب ایتالیا را Solari et al (2019) با استفاده از سری زمانی تصاویر سنتینل ۱ به روش SqueeSAR تکنیک اینترفرومتری چندزمانه (MTI) مطالعه کرده‌اند. خروجی کار آن‌ها منجر به آشکارسازی ۲۷۷ نقطه ناپایدار مرتبط با فعالیت زمین-لغزش‌ها و حرکات توده‌ای در این ناحیه شده است. روش پردازشی PSInSAR بر روی تصاویر بالاگذر سنجنده ALOS PALSAR (۲۰۰٦ تا ۲۰۱۰) و تصاویر پایین گذر سنجنده ENVISAT ASAR (۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰) جهت آشکارسازی و پایش زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه نوقول[10] توسط Shirani and Pasandi (2019) به‌کار گرفته شده و نتایج حاصله را با مشاهدات سیستم جهانی ناوبری ماهواره‌ای (GNSS[11]) ارزیابی کرده‌اند. نتایج کار بیانگر انطباق مناسب نتایج حاصله از هر دو روش یاد شده بوده و مقدار جابجایی در جهت جنوبی به میزان ۱/۲ تا ۱/۵ متر در دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ برآورد شده است. آشکارسازی و پایش زمین‌لغزش‌های فعال در حوضه آبریز گرم چای میانه با استفاده از تکنیک اینترفرومتری راداری و تصاویر راداری PALSAR موضوع تحقیق Yarahmadi (2014) بوده است. نتایج تحقیق ایشان منجر به شناسایی تعداد ٢٤ منطقه لغزشی فعال در سه بازه زمانی ۲۰۰۷، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ در

6- Persistent Scatterer
7- Tuscany
8- Gulaba
9- Himachal Pradesh
10- Noghol
11- Global Navigation Satellite System(GNSS)

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 0:19 IRST on Sunday November 2nd 2025

منطقه یاد شده گردید. در تحقیقی مشابه Sabeti et al (2019) اقدام به پایش و رفتارسنجی جابجایی سطحی ناشی زمین‌لغزش روستای ماسوله با استفاده از دو روش تداخل‌سنجی راداری با استفاده از ۱۱ تصویر راداری ماهواره‌ای در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ و روش مشاهدات ژئودیتکی (۲۱ ایستگاه GPS) نمودند. نتایج حاصل از بررسی جابجایی سطح زمین در هر دو روش یاد شده بسیار مشابه بوده و جابجایی قابل ملاحظه‌ای در قسمت پایین‌دست زمین‌لغزش نشان داد. برای ارزیابی پایداری زمین‌لغزش قدیمی سرچشمه در شمال خراسان (Akbari Mehr et al., 2013) از دو روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و سیستم مشاهدات جهانی (GPS) استفاده کرده‌اند. نقشه‌های حاصل از هر دو روش یاد شده حکایت از پایداری سطح زمین‌لغزش سرچشمه دارند. ایشان وقوع خشکسالی‌های اخیر را علت احتمالی پایداری توده لغزشی سرچشمه بیان کرده‌اند. با توجه به قابلیت‌های روش پردازشی اینترفرومتری راداری و بالاخص روش پیشرفته پراکنشگرهای دائمی (PSI)، در تحقیق حاضر از روش اخیر در آشکارسازی و پایش زمین‌لغزش دوپیق در حوضه اهرچای استفاده شده است.

منطقه مورد مطالعه

این زمین‌لغزش با وسعت حدود ٤٢ هکتار در نزدیکی روستای دوپیق از توابع شهرستان اهر و در کیلومتر ۲۲ محور اهر–ورزقان، در استان آذربایجان‌شرقی واقع شده است. موقعیت جغرافیایی آن در ´۲۹ °۳۸ عرض شمالی ´٤٩ °٤٦ طول شرقی می‌باشد. محدوده لغزشی دوپیق در دامنه شمالی یکی از آبراهه‌های فرعی رودخانه اهرچای واقع شده است؛ حداقل و حداکثر ارتفاع آن از سطح دریا به ترتیب ۱۵۵۰ تا ۱٦۳۵ متر است. این توده لغزشی از نظر زمین‌شناسی بر روی سازند رسوبی مدفون مربوط به دوره پلیوسن قرار گرفته و لیتولوژی آن از کنگلومرا–ماسه سنگ با بافت درشت تا متوسط تشکیل شده است. کاربری اراضی غالب منطقه اراضی زراعی دیم می‌باشد. از نظر اقلیمی به روش دمارتن، منطقه مورد مطالعه در کلاس نیمه خشک سرد قرار دارد. مطابق اطلاعات هواشناسی ۳۰ سال اخیر ایستگاه سینوپتیک اهر، متوسط دمای هوا ۱۱ درجه سانتی‌گراد بوده و متوسط مجموع بارش سالانه ۲۹۲/۳ میلی‌متر بوده که بیش‌ترین مقدار آن در اردیبهشت ماه (٥٦/۳ میلی‌متر) و کم‌ترین آن در مردادماه (۷/۸ میلی‌متر) ثبت‌شده است. در تحقیق حاضر، با استفاده از برنامه EOLI-SA9.7.2 تعداد ۲۲ تصویر راداری از سنجنده ENVISAT-ASAR در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ مربوط به مدار پائین گذر[12] و قبطش[13] VV از سازمان فضایی اروپا برای منطقه مورد مطالعه تهیه شد (جدول ۱). جهت انجام پردازش سری زمانی، ابتدا تمامی تصاویر مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار SARscape5.2 به فرمت[14]SLC تبدیل شدند. جهت تشکیل اینترفروگرام‌ها، تصویر پایه[15] و تصاویر پیرو[16] انتخاب شدند. در اینجا، انتخاب تصویر پایه برمبنای همدوسی[17] تجمعی کل تداخل‌نماها صورت گرفته است. در این حالت، تصویری به عنوان

12- Descending
13- Polarization
14- Single Look Complex
15- Master image
16- Slave image
17- Coherence

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 0:19 IRST on Sunday November 2nd 2025

تصویر پایه انتخاب می‌شود که به ازای تداخل نماهای تشکیل شده بر مبنای آن، مقدار همدوسی تجمعی آن بیشینه باشد (Maghsodi and Mahdavi, 2015).

جدول ۱- لیست داده‌های راداری مورد استفاده

Table 1- Used ASAR data list

ردیف	ENVISAT-ASAR	ردیف	ENVISAT-ASAR
۱	ASAR_20030502_SLC	۱۲	ASAR_20061222_SLC
۲	ASAR_20030606_SLC	۱۳	ASAR_20070126_SLC
۳	ASAR_20030815_SLC	۱٤	ASAR_20070302_SLC
٤	ASAR_20031024_SLC	۱۵	ASAR_20070406_SLC
۵	ASAR_20040206_SLC	۱٦	ASAR_20070511_SLC
٦	ASAR_20040416_SLC	۱۷	ASAR_20080425_SLC
۷	ASAR_20040521_SLC	۱۸	ASAR_20090828_SLC
۸	ASAR_20040625_SLC	۱۹	ASAR_20091106_SLC
۹	ASAR_20041112_SLC	۲۰	ASAR_20091211_SLC
۱۰	ASAR_20060106_SLC	۲۱	ASAR_20100115_SLC
۱۱	ASAR_20060210_SLC	۲۲	ASAR_20100709_SLC

در تحقیق حاضر به‌خاطر وجود برخی محدودیت‌های موجود در روش پردازشی تداخل‌سنجی معمولی از قبیل: همدوسی بالا برای اخذ اطلاعات دقیق در زمینه تغییر شکل زمین و تعیین مدل رقومی ارتفاعی و همچنین خطای توپوگرافی باقیمانده در تداخل نماها، از روش تداخل‌سنجی پراکنشگر دائمی[۱۸] به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین تکنیک-های تداخل‌سنجی استفاده شده است. در اینجا، مجموعه نقاط پراکنشگر دائمی براساس شاخص پراکندگی دامنه[۱۹] انتخاب شده است. این شاخص بر پایه آنالیز سری زمانی دامنه بوده که در آن، هر پیکسل براساس نسبت بین انحراف معیار و میانگین دامنه در طول زمان ارزیابی می‌شود. شاخص پراکندگی دامنه براساس رابطه زیر بیان می‌شود.

$$D_a = \frac{\sigma_a}{\mu_a}$$ معادله (۱)

که در آن σ_a و μ_a به ترتیب برابر با انحراف معیار و میانگین دامنه بازپراکنش هر پیکسل است

پس از تولید تداخل نگارها، فاز(فاز بازیابی نشده[۲۰]) پیکسل Xام در تداخل نگار iام را می‌توان به‌صورت زیر نوشت (Hooper, 2006 و Hooper et al., 2007):

$$\emptyset_{int.x.i}=\emptyset_{def.x.i} + \Delta\emptyset_{\varepsilon.x.i} + \emptyset_{atm.x.i} + \Delta\emptyset_{orb.x.i} + \emptyset_{n.x.i}$$ معادله (۲)

18- Persistent (Permanent) Scatterer InSAR (PSI)
19- Amplitude Dispersion Index
20- Unwrapped Phase

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 0:19 IRST on Sunday November 2nd 2025

که در اینجا $\emptyset_{def.x.i}$ جابه‌جایی پیکسل Xام در راستای خط دید ماهواره، $\Delta\emptyset_{\varepsilon.x.i}$ باقی‌مانده فاز توپوگرافی به‌خاطر خطا در مدل رقومی ارتفاع، $\emptyset_{atm.x.i}$ خطای فاز اتمسفری پیکسل x ام، $\Delta\emptyset_{orb.x.i}$ باقی‌مانده خطای مداری به‌خاطر دقیق نبودن اطلاعات مداری مورد استفاده و در نهایت $\emptyset_{n.x.i}$ نویز موجود در فاز پیکسل X ام، مانند نویز گرمایی یا خطا در ثبت هندسی می‌باشد. در اینجا فرض می‌کنیم که ترم‌های $\emptyset_{def.x.i}$، $\emptyset_{atm.x.i}$ و $\Delta\emptyset_{orb.x.i}$ در یک مقیاس طولی مشخص به اندازه L همبستگی مکانی دارند و ترم‌های $\Delta\emptyset_{\varepsilon.x.i}$ و $\emptyset_{n.x.i}$در این فاصله ناهمبسته‌اند. اگر موقعیت دیگرPS قبلاً معلوم باشد، میانگین فاز آن‌ها که داخل یک دایره به مرکزیت پیکسل X ام و به شعاع L قرار دارند را محاسبه می‌کنیم (Hooper, 2006).

$$\overline{\emptyset}_{int.x.i}=\overline{\emptyset}_{def.x.i}+\overline{\emptyset}_{atm.x.i}+\Delta\overline{\emptyset}_{orb.x.i}+\overline{\emptyset}_{n.x.i}$$ معادله (۳)

که در این فرمول علامت بار نشان دهنده میانگین $\overline{\emptyset}_{n.x.i}$ و $\emptyset_n+\Delta\emptyset_\varepsilon$ و فرض می‌شود مقدار کوچکی دارد. حال اگر معادله (۲) را از (۳) کم کنیم، خواهیم داشت:

$$\emptyset_{int.x.i}-\overline{\emptyset}_{int.x.i}=\Delta\emptyset_{\varepsilon.x.i}+\emptyset_{n.x.i}+\overline{\emptyset}_{n.x.i}$$ معادله (٤)

در معادله (٤) $\overline{\emptyset}_{n.x.i}$ برابر $\overline{\emptyset}_n$بعلاوه اختلاف بین مقدار میانگین فازهای $\emptyset_{def.x.i}$،$\emptyset_{atm.x.i}$ و $\Delta\emptyset_{orb.x.i}$ در مسیر دایره‌ای و مقدار آن‌ها در پیکسل xام می‌باشد. خطا در عدم صحت مدل ارتفاع رقومی متناسب است با مؤلفه خط مبنای عمودی $B_\perp$ است. بنابراین می‌توان آن را به صورت زیر نوشت (Hooper, 2006).

$$\Delta\emptyset_{\varepsilon.x.i}=B_{\perp.x.i}K_{\varepsilon.x}$$ معادله (۵)

که در رابطه بالا $K_{\varepsilon.x}$ ثابت تناسب است. با جایگزینی رابطه (۵) و(۴) داریم.

$$\emptyset_{int.x.i}-\overline{\emptyset}_{int.x.i}=B_{\perp.x.i}K_{\varepsilon.x}+\emptyset_{n.x.i}+\overline{\emptyset}_{n.x.i}$$ **معادله (۶)**

با استفاده از تمامی تداخل نگارهای موجود می‌توان مقدار $K_{\varepsilon.x}$ را برای پیکسل xام با روش کمترین مربعات برآورد کنیم. یک کمیت همدوسی زمانی γ_Xاز تغییرات فاز باقیمانده که معیاری است از PS بودن، در هر مرحله از تکرار محاسبه می‌شود (Hooper, 2006).

$$\gamma_X=\frac{1}{N}\left|\sum_{i=1}^{N}exp\left\{j\left(\emptyset_{int.x.i}-\overline{\emptyset}_{nt.x.i}-\Delta\emptyset_{\varepsilon.x.i}\right)\right\}\right.$$ معادله (۷)

که در رابطه بالا N تعداد تداخل نگارهای موجود و $\Delta\emptyset_{\varepsilon.x.i}$ برآورد محاسبه شده برای $\Delta\emptyset_{\varepsilon.x.i}$ است. با فرض این‌که مقدار $\overline{\emptyset}_{n.x.i}$ کوچک باشد؛ بنابراین γ_X نشان دهنده پایداری فاز پیکسل Xام می‌باشد و می‌تواند معیاری برای شناسایی پیکسل‌هایPS باشد، از نظر آماری پیکسل‌های که دارای مقدار بزرگ‌تر γ_Xباشند احتمالPS بودنشان افزایش می‌یابد. بنابراین در یک فرایند تکراری پیکسل‌های با مقدار بیش‌تر γ_X استخراج شده و بعد از انجام یک تست آماری روی

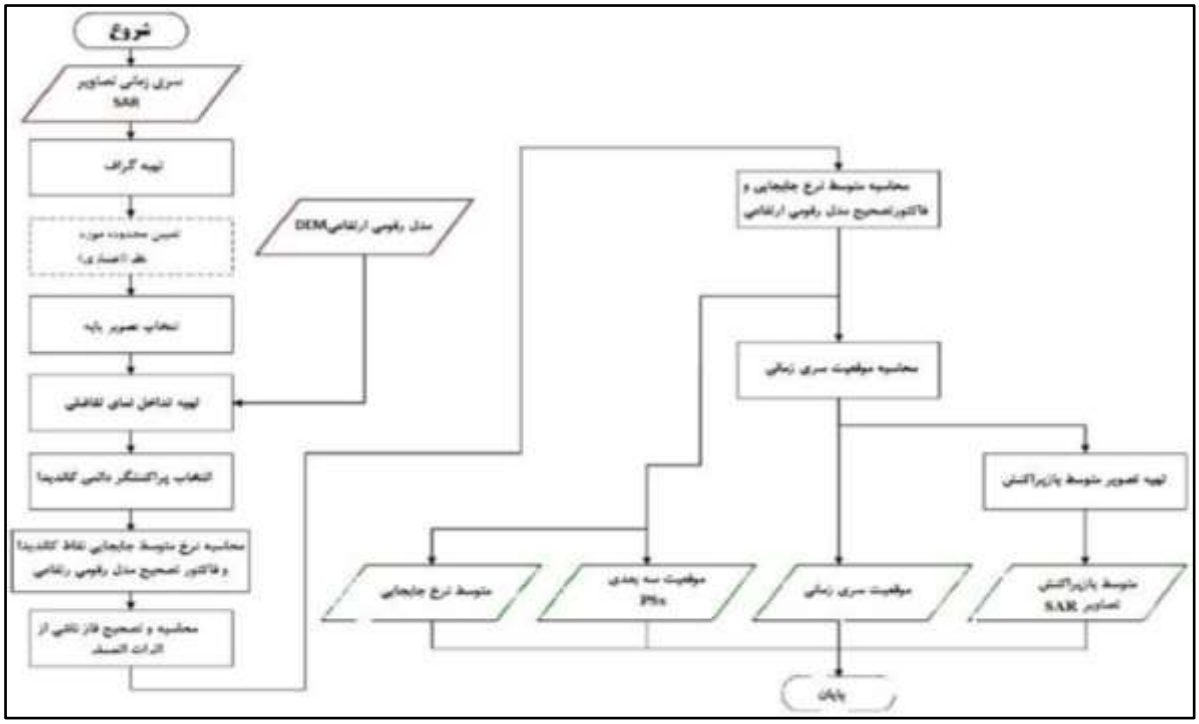
Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 0:19 IRST on Sunday November 2nd 2025

مقادیر γ_X نهایی، پیکسل‌های PS اصلی شناسایی شده و بقیه کنار گذاشته می‌شوند و در نهایت رفتار فاز سری زمانی جابجایی این پیکسل‌ها بررسی می‌شوند. در این روش، از یک مدل خطی معادله (۸) جهت محاسبه ارتفاع باقی‌مانده[۲۱] و سرعت جابجایی استفاده می‌شود.

$$Disp= V. (t-t_0)$$ معادله (۸)

در اینجا، Disp میزان جابجایی در زمان t1 بوده و V نیز سرعت جابجایی می‌باشد.

آشکارسازی زمین‌لغزش‌ها و پایش رفتار آن‌ها به روش پراکنش گر دائمی، مطابق روش موجود در روند نمای شکل (۱) انجام گرفته است.



شکل ۱: روند نمای پردازش پراکنشگرهای دائمی (PSI)

Figure 1: Workflow of PSI model

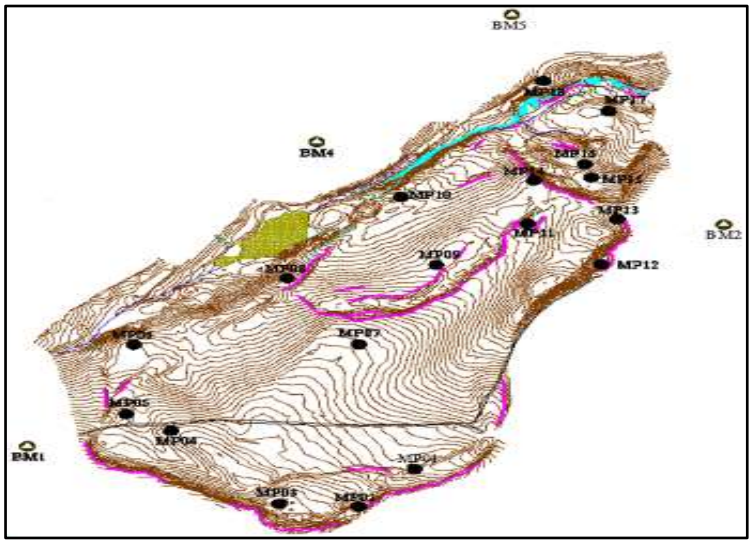
رفتارسنجی توده لغزشی دوپیق با استفاده از GPS های سه فرکانسه

به‌منظور رفتارسنجی این توده یک شبکه نقاط ژئودتیک با ۲۳ ایستگاه مشاهداتی شامل نقاط مبنا و شاهد در سطح منطقه لغزشی یاد شده جهت انجام مشاهدات (GPS) طراحی و ایجاد گردیده است (شکل ۲). در اینجا، ۵ ایستگاه (BM.1، BM.2، BM.3، BM.4 و BM.5) به‌عنوان نقاط مبنا بر روی محل‌های پایدار و ثابت از دیدگاه زمین‌شناسی

21- Residual Height

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 0:19 IRST on Sunday November 2nd 2025

مانند تخته سنگ‌های ریشه‌دار و اطراف منطقه لغزشی در نظر گرفته شدند. باقی نقاط نیز شبکه نقاط شاهد را تشکیل می‌دهند که در سطح منطقه لغزشی و نزدیک به درز و شکاف‌های ناشی از زمین‌لغزش در نظر گرفته شده‌اند. بدین ترتیب حرکات نقاط شاهد نشان دهنده حرکات توده‌ای و رو به پایین محل قرارگیری پیلارها می‌باشد. مشاهدات شبکه نقاط مبنا و نقاط شاهد منطقه لغزشی در مرحله اول مشاهداتی با استفاده از چهار گیرنده سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای (GPS) سه فرکانسه که شامل یک گیرنده مدل R4 و سه گیرنده مدل SPS850 با قابلیت دریافت سیگنال‌های ماهواره‌ای GLONASS ساخت شرکت Trimble، در مرحله دوم مشاهداتی با استفاده از چهار گیرنده دو فرکانسه کمپانی Trimble شامل دو گیرنده مدل TRM5800 و یک گیرنده مدل TRM39105 به روش استاتیک و به مدت ۳۰ دقیقه برای هر طول باز و نرخ ۱۰ ثانیه برای مشاهدات، صورت پذیرفته است (Razhan Ab e Zagros, 2016).



شکل ۲: نقشه توپوگرافی توده لغزشی دوپیق به همراه جانمایی نقاط رفتارسنجی در سطح آن

Figure 2: Topographic map of dopiagh landslide with monitoring benchmarks

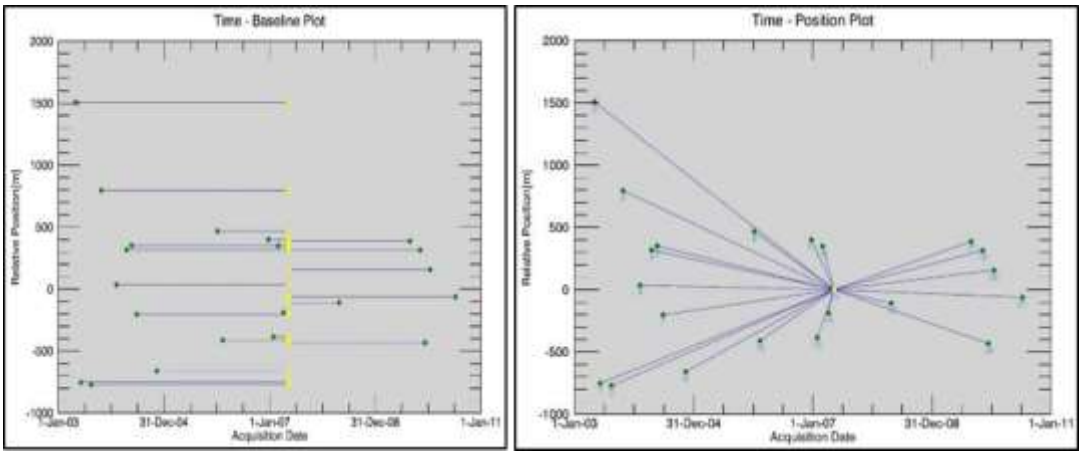
نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، بر مبنای کم‌ترین مقدار خط مبناهای عمودی، زمانی و داپلر، تصویر ۲۰۰۷۰۵۱۱ به‌عنوان تصویر پایه انتخاب شده و ۲۱ تصویر دیگر نسبت به این تصویر در راستای برد[22] ثبت هندسی شدند. شکل (۳) به ترتیب موقعیت زمانی و خط مبنای تصاویر پیرو و تصویر رفرنس را در فرآیند پردازش پراکنشگرهای دائمی برای ۲۱ تصویر راداری مورد استفاده را نشان می‌دهد. مقدار آستانه همدوسی برای انتخاب نقاط پراکنشگر دائمی ۰/۶ انتخاب شده است؛ به‌طوری‌که نقاط دارای همدوسی پایین‌تر از آستانه انتخابی به‌عنوان پراکنشگر دائمی انتخاب نخواهند شد. در ادامه، از شاخص پراکندگی دامنه (ADI) برای شناسایی و انتخاب نقاط PS کاندیدا استفاده شده است. در این تحقیق، با انتخاب حد آستانه ۰/۵ برای شاخص پراکندگی دامنه، تعداد ۲۶۲ نقطه پراکنشگر دائمی (PS) در منطقه مورد مطالعه شناسایی

22- Slant Range Geometry

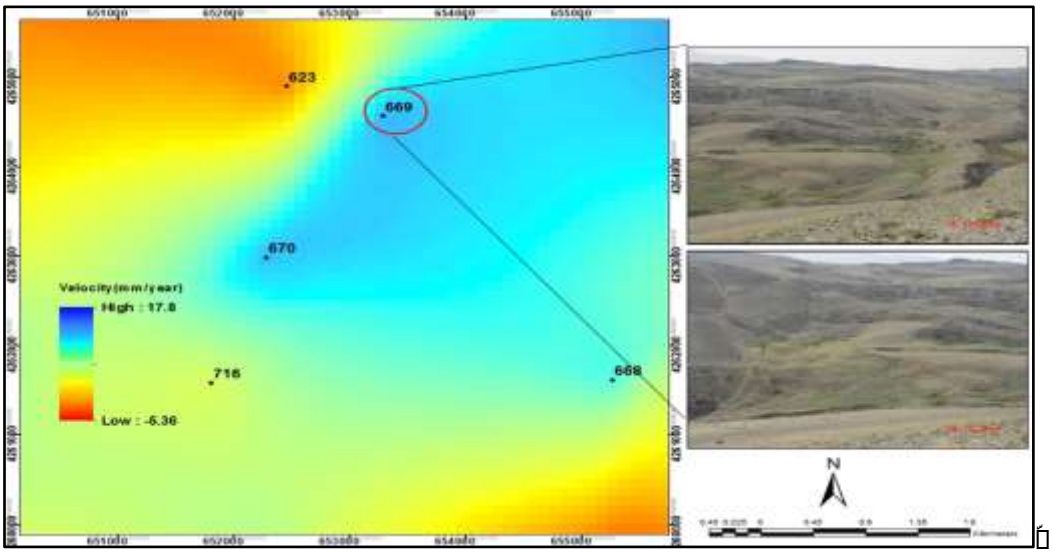
Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 0:19 IRST on Sunday November 2nd 2025

گردید. با برش محدوده حوضه آبخیز اهرچای از کل تصویر، مشخص گردید که تعداد ۳۲۰ نقطه PS دائمی در داخل منطقه مورد مطالعه قرار گرفته که PS شماره ٦٦٩ مربوط به محدوده توده لغزشی دوپیق شناسایی شده است (شکل ٤). نتایج سری زمانی اختلاف فاز PS مذکور نشان داد که متوسط سالانه نرخ تغییرات سطح زمین در توده لغزشی دوپیق ۱۲/٤ میلی‌متر در سال در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ بوده است. در نقشه‌های نهایی مربوط به جابجایی حاصل از پردازش اینترفرومتری، همیشه مقادیر مثبت به معنی کاهش فاصله سنجنده تا سطح زمین بوده و مقادیر منفی نیز به معنی عکس این عمل در جهت دید ماهواره (LOS۲۳) تفسیر می‌شوند.



شکل ۳: شبکه گراف ترسیمی: موقعیت زمانی (سمت راست) و موقعیت خط مبنا (سمت چپ)

Figure 3: Plots of connection graph: time-position (on the left), and time-normal baseline (on the right)



شکل ٤: موقعیت PS های شناسایی شده در محدوده توده لغزشی دوپیق و نرخ جابجایی در سطح آن (۲۰۰۳-۲۰۱۰)

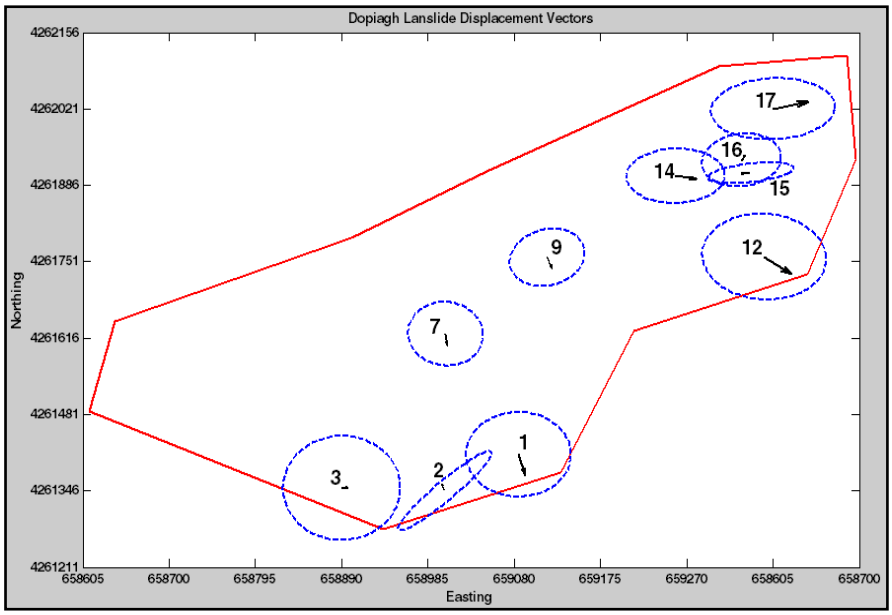
Figur 4: Positions of detected PS on Dopiagh landslide and its surface displacment velosity (2003-2010)

23- Line of Sight

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 0:19 IRST on Sunday November 2nd 2025

نتایج جابجایی ناشی از مرحله اول و دوم مشاهداتی شبکه نقاط مبنا در جدول (۲) ارائه شده است. اطلاعات این جدول نشان می‌دهد که جابجایی‌های مسطحاتی به‌ترتیب 2، 5 و 0.2 میلی‌متر برای نقاط BM.2، BM.4 و BM.5 بوده که کم‌تر از مقادیر تعیین شده مجاز جابجایی می‌باشند. این امر، نشانگر ثبات شبکه نقاط مبنا است.

نتایج جابجایی مسطحاتی و ارتفاعی نقاط شاهد به همراه ابعاد بیضی خطای نسبی جابجایی و خطای تعیین جابجایی ارتفاعی در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ در مرحله دوم نسبت به مرحله اول مشاهدات تعیین موقعیت ماهواره‌ای محاسبه گردیده و در جدول (۳) درج شده‌اند. جابجایی‌های مشاهده شده دارای مقادیر ناچیزی می‌باشند که با توجه به بازه مشاهداتی تقریباً یک ساله، نقاط مشاهداتی دارای نرخ جابجایی نزدیک به صفر خواهند بود. بردار جابجایی مسطحاتی نقاط به همراه بیضی خطای نقاط در سطح اطمینان ۹۵٪ (میدان جابجایی محدوده لغزشی) در شکل (۵) به صورت گرافیکی ارائه گردیده است.



شکل ۵: نمایشی کلی از بیضی خطای نقاط شاهد به همراه بردار جابجایی هر کدام از نقاط در منطقه لغزشی (بین مرحله اول و دوم مشاهداتی)

Figure 5: An overview of the ellipsoid error of the control points with the displacement vector of each points in the slip zone (between the first and second observation stages)

جدول ۲- مقادیر جابجایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی شبکه نقاط مبنا منطقه لغزشی در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ در بازه ۱۱ ماهه مرحله اول و دوم مشاهدات

Table 2- Flat and elevation displacement values of banchmark points network in slide zone at 95% confidence level and 11 month interval

Point Name	Δx (mm)	Δy (mm)	D (mm)	AZ (deg)	a (mm)	b (mm)	phi (deg)	Horizontal Status	Δz (mm)	$Sd.\Delta z$ (mm)	Vertical Status
BM.2	−۱	−۲	۲	۲۰۵	۲	۲	۷	N	۸	۸/۳	N
BM.4	۱	−۵	۵	۱۷۲	۵	۲	۰	N	-۸	۱۱	N
BM.5	۰/۱	−۰/۲	۰/۲	۱٤	۱	۰/٦	۰	N	۰/۱	۲	N

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 0:19 IRST on Sunday November 2nd 2025

جدول ۳- مقادیر جابجایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی شبکه نقاط شاهد منطقه لغزشی در سطح و فاصله اطمینان ۹۵٪ در بازه ۱۱ ماهه مرحله اول و دوم مشاهدات

Table 3- Flat and elevation displacement values of control points network in slide zone at 95% confidence level and 11 month interval

Point Name	Δx (mm)	Δy (mm)	D (mm)	AZ (deg)	a (mm)	B (mm)	Phi (deg)	Horizontal Status	Δz (mm)	Sd.Δz (mm)	Vertical Status
MP.1	۲	-۷	۷	۱٦٤	۱۷	۱۵	-٦۷	N	۱۱	۳۷	N
MP.2	-۱	۲	۲	۳۳۳	٤	۰	-٤٦	N	۹	٤۹	N
MP.3	۲	۰	۲	۹۰	٤	۳	-٤۵	N	۱۹	٤۵	N
MP.7	۱	-٤	٤	۱٦٦	۱۳	۱۲	٦۷	N	۱۲	۲٦	N
MP.9	۱	-۳	٤	۱٦۲	۱۵	۱۳	۲۳	N	۱۳	۲٤	N
MP.12	۸	-٦	۹	۱۳۱	۱٦	۹	-٦	N	۱۰	۳۱	N
MP.14	٦	-۱	٦	۹۹	۱٦	۱۰	۲	N	۱٦	۲۷	N
MP.15	-۲	۰	۲	۹۰	۱۵	۱۱	۸	N	۸	۲۸	N
MP.16	۱	۲	۲	۲۷	۱٤	۱۱	۱۰	N	۹	۳۱	N
MP.17	۱۰	۲	۱۰	۷۹	۱۱	۹	٤	N	۱	۳٤	N

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، از روش نقاط پراکنشگر دائمی (PSInSAR) به‌عنوان یکی از روش‌های پیشرفته پردازش تداخل-سنجی راداری در آشکارسازی و پایش ناپایداری توده لغزشی دوپیق در حوزه آبخیز اهرچای استفاده شده است. برای این منظور، تعداد ۲۲ تصویر راداری ENVISAT در مدار پائین‌گذر در نظر گرفته شد. در این تحقیق، بخاطر محدودیت خط مبنای عمودی، از روش PSInSAR جهت آشکارسازی و پایش رفتار توده لغزشی مذکور استفاده شده است. نتایج سری زمانی اختلاف فاز PS مذکور نشان داد که متوسط سالانه نرخ تغییرات سطح زمین در توده لغزشی دوپیق ۱۲/٤ میلی‌متر در سال در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ بوده است. علیرغم این‌که مشاهدات GPS سه فرکانسه انجام گرفته در تاریخ‌های دی‌ماه ۹۱ و آذرماه ۹۲ بیانگر غیرفعال بودن توده لغزشی دوپیق داشت ولی نتایج پردازش اینترفرومتری راداری نتایج یاد شده را رد می‌کند.

قابلیت روش اینترفرومتری تفاضلی (DInSAR) راداری در آشکارسازی و پایش زمین‌لغزش‌ها در مطالعات متعددی گزارش شده است. در همین راستا، از دو دهه اخیر، تکنیک‌های مبتنی بر پردازش سری زمانی جهت غلبه بر محدودیت-های یاد شده توسعه یافته است. با این وجود، تکنیک مذکور دارای محدودیت‌های همچون عدم همبستگی زمانی و ژئومتریکی (Zebker and Villasenor, 1992) و تاثیرات اتمسفری (Massonnet and Feigl, 1998) می‌باشد

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 0:19 IRST on Sunday November 2nd 2025

(Berardino et al., 2003, Hooper, 2007 and Iglesias et al., 2015). اخیراً، (Dong et al., 2018) برای تهیه نقشه جابجایی سطح زمین‌لغزش جیاجو[۲۴] در چین، روش اینترفرومتری پراکنشگر همبسته (CSI[۲۵]) را از طریق ترکیب پراکنشگر دائمی (PS) و پراکنشگر توزیع شده (DS[۲۶]) توسعه داده‌اند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که حرکت قسمت شمالی زمین‌لغزش یاد شده سریع‌تر از قسمت جنوبی آن بوده و میزان آن را ۱۲۰ میلی‌متر در سال محاسبه کرده‌اند. نتایج مشابه در پژوهش (Villasenor et al., 2018) در پایش میزان حرکت خزش[۲۷] دامنه‌های مشرف به دریاچه ناینتال[۲۸] در استان اتاراخاند[۲۹] هندوستان که با استفاده از ۱۵ تصویر راداری ENVISAT ASAR در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ و روش PSI مشاهده شده است. مطابق نتایج ایشان، میزان حرکت توده خزشی در مناطق بالادست دامنه شرقی ۲۱ میلی‌متر در سال و در پایین‌دست آن ۵ میلی‌متر در سال محاسبه شده است؛ بنابراین، در صورت دسترسی به سری زمانی تصاویر راداری، پردازش پیشرفته اینترفرومتری راداری به روش پراکنشگرهای دائمی ضمن آشکارسازی مناطق ناپایدار، امکان پایش این مناطق و محاسبه نرخ جابجایی آن‌ها را با دقت بالا در حد میلی‌متر فراهم می‌سازد و تحقیق حاضر تلاشی در جهت بیان قابلیت ذکر شده در شرایط کشور ایران بوده است.

تشکر و قدردانی

از سازمان فضایی اروپا (ESA) به خاطر فراهم آوردن امکان تهیه تصاویر راداری مورد استفاده در تحقیق حاضر، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان‌شرقی بالاخص همکاران طرح، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

24- Jiaju
25- Coherent Scatterer InSAR
26- Distributed Scatterers
27- Creep
28- Nainital
29- Uttarakhand

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 0:19 IRST on Sunday November 2nd 2025

References

- Akbarimehr, M., Motagh, M., Haghighi, M. H., (2013), "Slope stability assessment of Sarcheshmeh landslide, Northeast Iran, investigated using InSAR and GPS observation". ***Remote Sens***, 5: 3681-3700.
- Bayer, B., Schmidt, D., Simoni, A., (2017), "The influence of external digital elevation models on PS-InSAR and SBAS results: Implications for the alanysis of deformation signals caused by slow moving landslides in northern Apennines(Italy)", ***IEEE Transection on Geoscince and Remote Sensing***, 62: 84-12. [on line]: http://www.ieee.org
- Brardinoni, F., Slaymaker, O., Hassan, M. A., (2003), "Landslide inventory in a rugged forested watershed: A comparison between air-photo and field survey data", ***Geomorphology***, 54: 179-196.
- Dong, J., Zhang, L., Tang, M., Liao, M., Xu, Q., Gong, J., Ao, M., (2018), "Mapping landslide surface displacement with series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiaju landslide in Danba, China", ***Remote Sensing of Environment***, 205: 180-198. [on line]: www.elsevier.com/locate/rse
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo M., Chang, K. T., (2012), "Landslide inventory maps: New tools for an old problem", ***Earth-Science Reviews***, 112: 42-66. [on line]: www.elsevier.com/locate/earscirev
- Hooper, A., Segall, P., Zebker, H., (2007), "Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos", ***Journal of Geophysical Research: Solid Earth***, 112 (B7): 17-32
- Hooper, A. J., (2006), "***Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation***", Stanford University, California.
- Iglesias, R., Mallorqui, J., Monells, D., López-Martínez, C., Fabregas, X., Aguasca, A., Gili, J., Corominas, J., (2015), "PSI deformation map retrieval by means of temporal sublook coherence on reduced sets of SAR images", ***Remote Sens***, 7: 530-544
- Larani, R., Lundgren, P., Manzo, M., Casu, F., (2004), "Satellite radar interferometry time series analysis of surface deformation for Los Angeles", ***California, Geophysical research letters***, 31 (23): 1-5.
- Maghsodi, Y., Mahdavi, S., (2015), "***The principles of radar remote sensing***, Tehran, Kntu. Publication". [In Persian].
- Massonnet, D., Feigl, K. L., (1998), "Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface", ***Reviews of Geophysics***, 36 (4): 441-500.
- Razhan Ab e Zagros Cosl. Eng., (2016), "Dopiagh landslide monitoring research report in Ahar region based on GPS observations", Natural Resources and Watershed Management of East Azerbaijan Province Adminstration, Tabriz, Iran, [In Persian].
- Rosi, A., Tofani, V., Tanteri, L., Tacconi Stefanelli, C., Agostini, A., Catani F., casagli, N., (2017), "The new landslide inventory of Tuscany(Italy) updated with PS-InSAR", ***geomorphological features and landslide distribution, Landslides***, 15: 5-19
- Sabeti H., Motagh, M., Sharifi, M. A., Akbari, B., Akbarimehr, M., Fard, D., (2019), "Determination of the displacement rate of the Masouleh landslide for management of landslide risk by Radar Interferometry", ***Jwmseir***, 16 (44) :103-113. [In Persian].
- Shirani, K., Pasandi, M., (2019), "Detecting and monitoring of landslides using persistent scattering synthetic aperture radar interferometry", ***Environmental Earth Sciences***, 78:42-57.

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 0:19 IRST on Sunday November 2nd 2025

- Solari, L., Soldato, M. D., Montali, R., Bianchini, S., Raspini, F., Thuegaz, P., Bertolo, D., Tofani, V., Casagli, N., (2019), "A Sentinel-1 based hot-spot analysis: landslide mapping in north-western Italy", ***International Journal of Remote Sensing***, 13: 1-24.
- Vicari, A., Famiglietti, N. A., Colangelo, G., Cecere, G., (2019), "A comparison of multi temporal interferometry techniques for landslide susceptibility assessment in urban area: An example on Stigliano (MT), A town of Southern of Italy", ***Geomatics, Natural Hazards and Risk***, 10 (1): 836-852.
- Virk, A. S., Singh, A., Mittal, S. K., (2019), "Monitoring and analysis of displacement using InSAR techniques for Gulaba landslide site", ***Journal of Engineering Science and Technology***, 14 (3): 1558-1571.
- Yarahmadi, J., (2014), "Detection and monitoring of landslides based on InSAR technique and estimation of their sedimentation by WEPP model, Case study: Garmi Chai basin", Phd thesis, Tabriz unversity, Faculty of Geography. [In Persian].
- Yhokhan, A., Pradeef, K. G., Chung, P. C., Jiun, Y. Y., Kuo-En, C., Kmanini, A., (2018), "Application of persistent scatterer interferometry(PSI) in monitoring slope movements in Nainital, Uttrakhand lesser Himalaya, India", ***J. Earth Syst. Sci.***, 127: 6-18.
- Zebker, H.A., Villasenor, J., (1992), "Decorrelation in interferometric radar echoes", ***IEEE Trans. Geosci. Remote Sens***, 30: 950-959.