

لغزش خیز منطقه از روش تداخل سنجی راداری^۸ استفاده گردید. در این تحقیق ۱۱ تصویر راداری سنجنده ایلوس^۹/پالسار^{۱۰} در بازه زمانی سالهای ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ گرفته شد و با روش طول بازهای کوتاه^{۱۱} به منظور بدست آوردن سری زمانی جابجایی منطقه مورد پردازش قرار گرفت. مناطق فعال لغزش توسط مطالعات میدانی زمین شناسی بررسی شد و ویژگی های ژئومورفولوژیکی منطقه صحت جابجایی قسمت های مختلف لغزش را تأیید کرد. نتایج پردازش تصاویر ماهواره ای نشان داد که بیشترین نرخ جابجایی در راستای دید ماهواره در ناحیه شمالی، قدیمی تر و جوان تر به ترتیب ۵۱، ۴۶ و ۷۰ میلی متر در سال در حال دور شدن از سنجنده، می باشد.

کلید واژه ها: زمین لغزش ماسوله، تداخل سنجی راداری، روش طول بازهای کوتاه، مخاطرات طبیعی

مقدمه

زمین لغزش به حرکات رو به پایین دامنه های سنگی، خاکی یا مواد آلی تحت تاثیر نیروی اصلی (گرانش) گفته می شود [۱۶]. کنترل و مدیریت مناطق ناپایدار برای جلوگیری از بلایای طبیعی خصوصاً در مناطق با تراکم جمعیتی زیاد و مناطقی که زمین لغزش ها در محدوده شهری هستند لازم و ضروری است زیرا باعث تهدید و خسارت در زیرساخت ها می شوند [۵، ۸، ۱۲، ۲۵، ۲۷]. به طور کلی مطالعات اندکی جهت ارزیابی حساسیت خطر و میزان دقت روش های پایش به منظور نشان دادن خطرات زمین لغزش در مقیاس جهانی انجام گرفته است. با این حال روش های جدید از قبیل تداخل سنجی راداری برای پایش زمین لغزش و کاهش خطرات آن می تواند مفید واقع شود [۱۰، ۱۱، ۲۱]. این روش جدید برای کشف مناطق بی ثبات زمین لغزش و پایش آن بسیار کاربردی است زیرا توانایی پوشش کل منطقه تحت شرایط مطلوب و کسب اطلاعات مترکم جابجایی سطح زمین حتی در اندازه های کم را دارد [۱، ۱۷، ۲۲، ۲۶، ۲۸]. استفاده از روش تداخل سنجی راداری برای کنترل دقیق زمین لغزش و هم چنین جریان های توده ای در دهه گذشته با برنامه های کاربردی

بررسی میزان جابجایی زمین لغزش ماسوله با روش تداخل سنجی راداری به منظور مدیریت خطر لغزش

هادی ثابتی^۱، مهدی معتق^۲، محمدعلی شریفی^۳، بهمن اکبری^۴

مهرداد اکبریمهر^۵ و داوود فرد^۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۲۴

چکیده

یکی از شایع ترین پدیده های طبیعی که عموماً در نقاط کوهستانی جهان رخ می دهد زمین لغزش است که در بسیاری موارد منجر به خسارات مالی و جانی گشته و به عنوان بلای طبیعی شناخته می شود. ایران با توجه به شرایط جغرافیایی و اقلیمی خاص از مناطق مستعد به این پدیده می باشد که سالانه ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت مالی به واسطه آن بر این کشور تحمیل می گردد. در طی ۱۵ سال اخیر تحقیقات زیادی قابلیت های تصاویر راداری ماهواره ای و مزیت های روش تداخل سنجی را بررسی و اثبات کرده اند. در حال حاضر تداخل سنجی راداری یکی از تکنیک های مورد استفاده برای ارزیابی جابجایی زمین است و در حال تبدیل شدن به یک ابزار تلفیقی برای مقابله با خطرات زمین لغزش به منظور مدیریت مخاطرات طبیعی می باشد. تجزیه و تحلیل داده های ماهواره ای نقش مهمی در بررسی وقایع مربوط به لغزش در مراحل مختلف (از جمله: نقشه برداری، پایش، شناسایی و پیش بینی) دارد. منطقه ماسوله به دلیل شرایط زمین شناسی، ژئومورفولوژی و پتانسیل بالا در وقوع زمین لغزش، از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا به منظور بررسی دقیق نقاط

۱- نویسنده مسئول و دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی، دانشکده نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، پست الکترونیک: hadisabeti@ut.ac.ir

۲- استاد مرکز تحقیقات علوم زمین آلمان

۳- استاد دانشگاه لایپزیگ هانوفر

۴- دانشیار، دانشکده نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

۵- کارمند سازمان جنگل ها، مراتع و آبخیزداری کشور

۶- عضو هیئت مدیره شرکت مهندسین مشاور پایش فضا مبنا

۷- دانشجوی کارشناسی ارشد جنگل داری، دانشکده منابع طبیعی صومعه سرا دانشگاه گیلان

8. interferometric synthetic aperture radar (InSAR)

9. ALOS

10. PALSAR

11. Small Baseline Subsets (SBAS)

در زمینه‌های مختلف به خوبی مکتوب شده است [۲، ۶، ۸، ۹، ۲۴، ۳۰]. نرم‌افزار استمپس^۱، متدهای پراکنش‌گر دائمی [۱۳، ۱۴] و طول بازهای کوتاه [۴] را بر اساس الگوریتم توسعه یافته هوپر^۲ ارائه کرده است [۱۸، ۱۹، ۲۰] که روش مناسبی برای بررسی سری‌زمانی تغییرات زمین لغزش می‌باشد. با ارائه روش‌های پایش، شیوه‌های کنترل و مدیریت مناسب می‌توان تا حدی از وقوع زمین لغزش‌ها جلوگیری و یا آسیب‌های ناشی از وقوع آنها را کم کرد. ایران با توپوگرافی کوهستانی در بخش‌های وسیع، فعالیت‌های زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد و شرایط بسیار متنوع اقلیمی و زمین‌ساختی شرایط مساعد برای بروز زمین لغزش دارد و اهمیت آن در مناطق نزدیک به سکونتگاه‌ها و تأسیسات انسانی بیشتر احساس می‌شود. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۱۲ توسط ژاؤ^۳ و همکاران صورت پذیرفت به کمک تلفیق تصاویر همبستگی^۴ و پراکنشی^۵ راداری، تداخل‌سنجی راداری و تغییرات مدل ارتفاعی زمین، ۵۰ زمین لغزش در بخش کالیفرنای شمالی و اورگون جنوبی در ایالات متحده‌ی آمریکا شناسایی شدند. سپس به کمک روش طول بازهای کوتاه، تصاویر ماهواره‌ای ایلوس (تصاویری در حوزه فرکانسی L)، برای هر یک از زمین لغزش‌ها پردازش شدند تا سری‌زمانی الگوهای هر بخش از زمین لغزش بازیابی گردد. در یکی از زمین لغزش‌های مهم به اسم بولدر کریک سری زمانی جابجایی بدست آمده با بارش‌های فصلی منطقه همخوانی داشت به طوری که در طی زمان تأخیر بارش (یک الی دو ماهه) بین بیشینه‌ی بارش و بیشینه‌ی جابجایی این همخوانی مشهود بود و با توجه به این رفتار مشاهده شده نتیجه‌گیری شد که زمین لغزش عمیق بوده و تحت تأثیر فشار آب منفذی قرار دارد [۳۱].

تونگ^۶ و اشمیت^۷ در سال ۲۰۱۶ زمین لغزشی مرکب در ایالت واشنگتن آمریکا را به کمک روش تداخل‌سنجی راداری بررسی کردند. برای اجرای این روش از تصاویر راداری ایلوس استفاده شد. منطقه تحت مطالعه شامل چند لغزش بود که مطالعات تنها فعالیت یکی از لغزش‌ها را نشان داد که با نرخ ۲۵ سانتی‌متر در سال به صورت تجمعی، در حال دور شدن از سنجنده بود. نتایج حاصل از سامانه‌ی تعیین موقعیت جهانی^۸ نیز تا حد زیادی با نتایج روش مورد استفاده مطابقت داشت. هم‌چنین سری زمانی بارش نیز توسط ایستگاه نزدیک منطقه استخراج شد و وابستگی بسیار قابل توجهی بین جابجایی و میزان بارش کشف شد [۳۰].

بایر^۹ و همکاران در سال ۲۰۱۷ زمین لغزش‌هایی در ایتالیا را به کمک روش تداخل‌سنجی راداری بررسی کردند. این زمین لغزش‌ها

در اثر حفر دو تونل جاده‌ای از نو فعال گشتند. سری زمانی جابجایی حاصل از ماهواره‌های کازموس^{۱۰}، انویست^{۱۱} و سنتینل^{۱۲} فاز حاصل از جابجایی زمین لغزش‌ها را نشان داد که در مراحل انتهایی حفر تونل نرخ آن به ۳۰ میلی‌متر در سال در راستای دید سنجنده نیز می‌رسید. سری زمانی حاصل از پردازش تصاویر حوزه‌ی فرکانسی X ماهواره کازموس نشان داد که بین حفاری‌های تونل و نرخ جابجایی زمین لغزش که پیش از آن ساکن بود ارتباط برقرار است و بالعکس بارش‌های هم‌زمان تأثیر چندانی بر رفتار زمین لغزش‌ها ندارند [۳]. هدف اصلی این تحقیق شناسایی مناطق با بیش‌ترین جابجایی در زمین لغزش ماسوله جهت مدیریت محیط است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در حوزه آبخیز ماسوله واقع شده است که به دلیل شرایط زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی و پتانسیل بالای منطقه در وقوع زمین لغزش، از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به جاذبه گردشگری بسیار بالای روستای تاریخی ماسوله، بازدید سالانه هزاران توریست از منطقه و خطر وقوع زمین لغزش در این منطقه، اهمیت مطالعه دوچندان می‌شود (شکل ۱).

زمین‌شناسی منطقه

حوزه آبخیز مورد مطالعه، حوزه ماسوله رودخان بوده که از سرشاخه‌های حوزه ماسوله می‌باشد. واحدهای زمین‌شناسی آن شامل سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک و سنگ‌های رسوبی ژوراسیک و کرتاسه می‌باشد. پی سنگ شهر ماسوله بر روی سنگ‌های فیلیتی و اسلیتی قرار گرفته است و به جز ارتفاعات منطقه سایر مناطق زیر پوشش جنگلی و مرتعی است. دو رودخانه دولیچال و خلیل دشت در جنوب غربی روستا به سمت جنوب روستا جاری هستند و تلاقی این دو رودخانه، رودخانه ماسوله رودخان را می‌سازد. سنگ بستر بلند، نفوذناپذیری و فرسایش سازندها (آهکی و سیلتستونی) منطقه را مستعد بروز رانش و زمین لغزش می‌کند. ناحیه رانشی مورد مطالعه توسط دو رودخانه ذکر شده از غرب و شرق احاطه شده است. عدم نفوذپذیری سنگ بستر، وجود دامنه‌های خاکدار سست از جنس سیلت و رس و هم‌جهت بودن شیب لایه‌ها با شیب دامنه‌ای موجب حرکت انتقالی لایه‌های سطحی به سمت نواحی کم ارتفاع در پایین‌ترین قسمت زمین لغزش، به خصوص در زمان بارندگی شده است.

ژئومورفولوژی منطقه

شیب زیاد منطقه، عدم پوشش جنگلی در ارتفاعات شمالی حوزه (دولیچال) و قرار گرفتن در دامنه شمالی به گستردگی فعالیت زمین لغزش کمک می‌کند. بستر آبراهه در این منطقه باریک بوده و به

1. Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS)

2. Hooper

3. Zhao

4. Correlation

5. Scattering

6. Tong

7. Schmidt

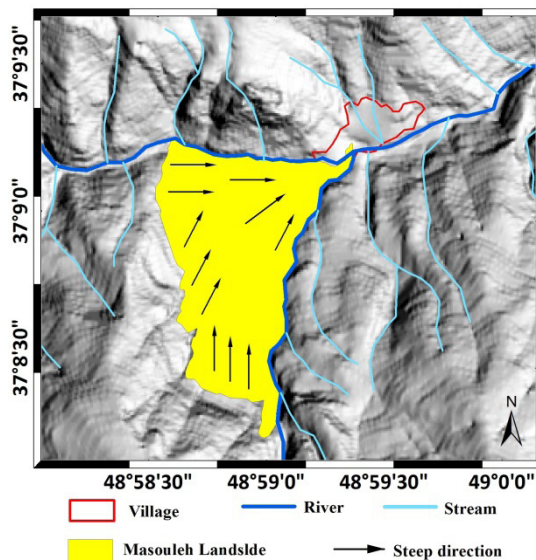
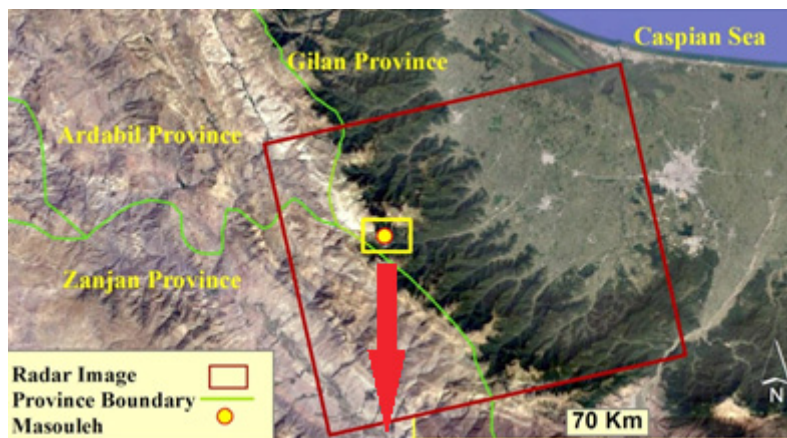
8. Global Positioning System

9. Bayer

10. Cosmo SkyMed

11. Envisat

12. Sentinel



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه (زمین لغزش ماسوله)

Fig 1. Location of study area (Masouleh Landslide)



شکل ۲- آثار حرکت زمین لغزش در منطقه

Fig 2. Trace of Landslide activity

شده است و بزرگترین آنها در حاشیه شهر ماسوله و دولیچال قابل مشاهده می باشد که آثار جابجایی لغزش ماسوله در شکل ۲ قابل مشاهده است. شکل ۳ شمای کلی منطقه را از روبرو نشان می دهد.

هنگام سیلاب رسوبات حاشیه رودخانه شسته شده و جریانات گلی در اثر کم شدن بار پاشنه لغزش به سمت رودخانه جریان می یابند که باعث ایجاد لغزش به طور پراکنده و با مقیاس های کوچک و بزرگ

به کمک تصویر اپتیکی اسپات^۱ و بازدیدهای میدانی نقشه ساختار ژئومورفولوژیکی لغزش تولید شد و رژیم حرکتی زمین لغزش به سه بخش جوان تر، قدیمی تر و شمالی تقسیم شد که هر بخش نیز قسمت فعال تر خود را داراست (شکل ۴).



شکل ۳- تصویر منطقه مورد مطالعه به همراه زمین لغزش که محدوده قرمز فعالترین قسمت لغزش، خطوط آبی به ترتیب از راست به چپ نشان دهنده مسیر رودخانه های دولیچال و خلیل دشت می باشد.

Fig3. The image of the studied region along with landslide wherein the red area implies the most active part of the slide and blue lines from right to left represent the pathway of the Khalildasht and Dolichal rivers, respectively

تصاویر راداری ایلوس

داده های مورد استفاده در این مطالعه شامل تصاویر ماهواره ای راداری در محدوده فرکانسی L است که در مناطق با پوشش گیاهی کارایی مناسبی دارد [۳۰]. محدوده های فرکانسی دیگر از جمله C و X، که طول موج کوتاهتری دارند، نسبت به پوشش گیاهی قدرت نفوذ کمتری دارند. ۱۱ تصویر از سنجنده پالسار ماهواره ایلوس مدار بالاگذر^۲ در طی سال های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ اخذ شد (جدول ۱). هم چنین از مدل ارتفاعی رقومی اس آر تی ام^۳ ۳۰۳ برای کاهش اثر توپوگرافی بر تداخل نماها استفاده گردید.

بررسی روش تداخل سنجی

روش تداخل سنجی راداری با استفاده از زوج تصویر راداری، تغییرات نسبی فاز هر پیکسل را تعیین می کند که به تصویر حاصل تداخل نما^۴ می گویند. به کمک تغییر فاز تحت شرایط مشخص و با حذف خطاهای موجود در تداخل نمای بدست آمده، می توان تا

حد مطلوبی به فاز حاصل از جابجایی مانند پدیده های ژئودینامیکی دست یافت. طبق شکل ۵ دو تصویر P1 و P2 در دوزمان مختلف از منطقه عبور کرده و مقدار برد^۵ متفاوتی دارند. این اختلاف برد یا همان طول باز^۶ حاصل از آن می باشد که در شکل با نماد B نمایش داده شده است و طبق رابطه ۱ منجر به اختلاف فاز می گردد:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\delta R}{\lambda} \quad (1)$$

در این رابطه λ طول موج، δR برد و Φ مقدار فاز می باشد.

جدول شماره ۱- لیست تصاویر راداری به همراه مشخصات آن

Table 1. List of SAR images with their Characteristics

ردیف	گذر	قاب	مدار	تاریخ
No	Pass	Frame	Orbit	Date
1	بالاگذر Ascending	0730	13241	2008/07/19
2	بالاگذر Ascending	0730	13912	2008/09/03
3	بالاگذر Ascending	0730	14583	2008/10/19
4	بالاگذر Ascending	0730	15254	2008/12/04
5	بالاگذر Ascending	0730	16596	2009/03/06
6	بالاگذر Ascending	0730	18609	2009/07/22
7	بالاگذر Ascending	0730	19280	2009/09/06
8	بالاگذر Ascending	0730	21293	2010/01/22
9	بالاگذر Ascending	0730	21964	2010/03/09
10	بالاگذر Ascending	0730	22635	2010/04/24
11	بالاگذر Ascending	0730	23306	2010/06/09

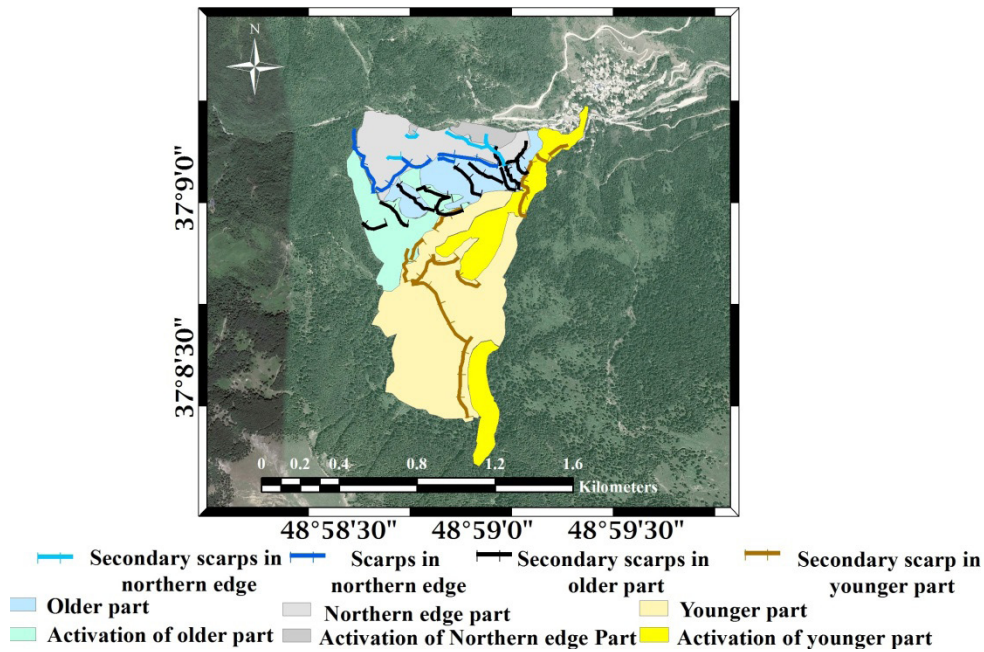
البته باید توجه داشت که میزان اختلاف فاز تنها به طول باز مربوط نمی گردد و به عوامل زیادی ارتباط دارد:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_D + \Delta\phi_{ATM} + \Delta\phi_T + \Delta\phi_G + \Delta\phi_{Noise} \quad (2)$$

در این رابطه $\Delta\phi_G$ عدم قطعیت در تعیین موقعیت مداری ماهواره،

5. Range
6. Baseline

1. SPOT
2. Ascending
3. SRTM30
4. Interferogram



شکل ۴- نقشه ساختار رانش ماسوله براساس مطالعات میدانی زمین‌شناسی
Fig 4. The structure map of the Masouleh Landslide based on geological field studies

$$\left. \begin{array}{l} I = dt_2 - dt_1 \\ I = dt_3 - dt_2 \\ \vdots \\ I = dt_N - dt_{N-1} \end{array} \right\} = y \quad (6)$$

A ماتریس طرح بوده و به صورت زیر است:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & -1 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$x = (A^T p A)^{-1} p y \quad (8)$$

پس از حل شبکه معادلات به کمک رابطه ۸، میزان جابجایی تمامی تصاویر، نسبت به یک تصویر که به عنوان مرجع انتخاب شده بدست می‌آید و برای هر پیکسل به تعداد تصاویر مقدار جابجایی حاصل می‌گردد که در اصل همان سری زمانی جابجایی است که با برازش یک خط به این مقادیر، نرخ جابجایی بدست می‌آید. متغیر p ماتریس وزن است که بعضاً مقادیر همدوسی پیکسل‌ها می‌باشد. شکل ۶ نشان دهنده یک تداخل‌نمای تولید شده و شکل ۷ شبکه طول بازهای کوتاه تصاویر را نمایش می‌دهد.

به دلیل جانب‌نگر بودن سیستم رادار و با توجه به توپوگرافی احتمال عدم حساسیت سنجنده به شیب باجهتی خاص وجود دارد. با توجه به شیب منطقه و جهت آن و همین‌طور زاویه دید و آزیموت سنجنده میزان حساسیت آن برآورد می‌گردد [۷، ۱۵].

$\Delta\phi_T$ فاز ناشی از توپوگرافی، $\Delta\phi_D$ فاز ناشی از جابجایی و $\Delta\phi_{ATM}$ فاز ناشی از اتمسفر می‌باشد. ترم $\Delta\phi_{Noise}$ شامل خطاهایی مانند خطاهای پردازشی مانند ثبت تصاویر و همچنین نویزهای مختلف مانند نویز حرارتی است.

برای غلبه بر محدودیت‌های روش پراکنشگرهای دائمی با یک تصویر مرجع، روش طول بازهای کوتاه ارائه شد. این روش مهم‌ترین معیار وضوح یک تداخل‌نما یا همان همدوسی را تا حد مناسبی حفظ می‌کند. مقدار همدوسی همیشه بین صفر تا یک است. در این مطالعه از نرم افزار استمپس^۲ جهت اجرای روش طول بازهای کوتاه استفاده شد. در این روش با توجه به تداخل‌نماهای انتخاب شده شبکه‌ای از تصاویر تشکیل می‌گردد که توسط معادلات به هم متصل شده‌اند. معلومات این شبکه تداخل‌نماها و خروجی آن، جابجایی در زمان برداشت تصویر است. با داشتن M تداخل‌نما در رابطه‌ی ۳ و N تصویر در رابطه‌ی ۴ که در زمان t_i اخذ شده‌اند، معادله‌ی ۵ که سیستمی با افزونگی اطلاعات است، طی فرآیند کم‌ترین مربعات حل می‌گردد:

$$y = [I_1 \dots I_M] \quad (3)$$

$$x = [dt_1 \dots dt_N] \quad (4)$$

$$y = Ax \quad (5)$$

طرف چپ معادله به صورت رابطه‌ی ۶ می‌باشد:

1. Coherency
2. StaMPS

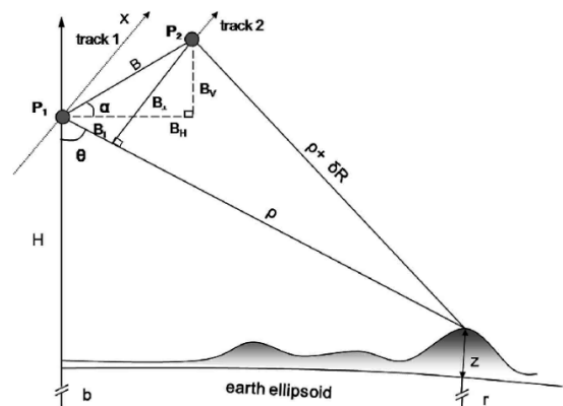
بررسی حساسیت سنجنده نسبت به شیب لغزش، از رابطه ۹ استفاده می‌گردد:

$$S = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\alpha)\sin(\theta) \\ -\cos(\alpha)\sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

در این رابطه u و v شیب و جهت شیب پیکسل مورد نظر، α و θ آزیموت و زاویه برخورد سنجنده و S معیار حساسیت می‌باشد. برای داده‌های مورد استفاده آزیموت 321° درجه و متوسط زاویه برخورد 34° درجه می‌باشد.

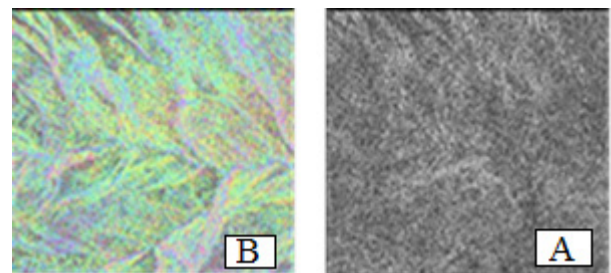
نتایج

نتایج نقشه نرخ سرعت جابجایی در شکل ۸ قابل مشاهده است. این نتایج نسبت به منطقه مسکونی روستا که تقریباً بی‌حرکت و باثبات است، بدست آمده است. قابل ذکر است که تمامی نتایج عددی بیان شده در راستای دید سنجنده بوده و در حال دور شدن از آن می‌باشد. نرخ متوسط جابجایی برای قسمت شمالی، قدیمی‌تر و جوان‌تر لغزش به ترتیب ۱۶، ۱۵/۳ و ۴ میلی‌متر در سال می‌باشد. براساس شکل ۸، الگوی اصلی جابجایی مطابق انتظار، حرکت نسبی بخش پایین‌دست لغزش را نمایان کرد. سرعت متوسط جابجایی



شکل ۵- شماتیک و هندسه روش تداخل سنجی راداری

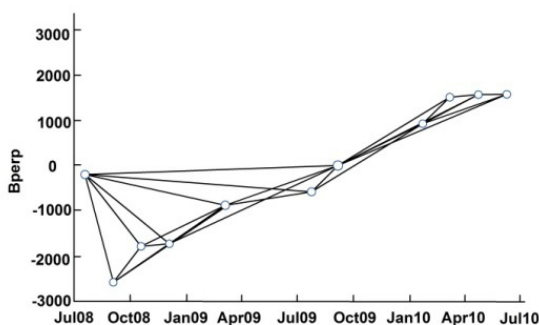
Fig 5. Schematic and geometry of InSAR method



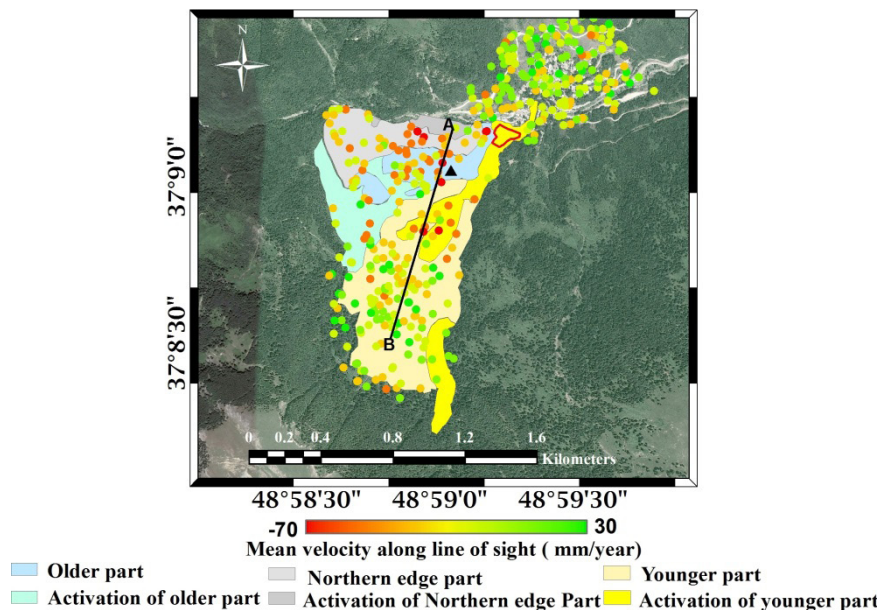
شکل ۶- نمونه تداخل نمای تولید شده با متوسط همدوسی ۰/۴۵
(A تصویر همدوسی B) تداخل نما

Fig 6. The interferograms with 0.45 mean coherence (A) coherence image B) interferogram

بخش قدیمی‌تر و شمالی به اندازه قابل توجهی نسبت به بخش جوان‌تر بیش‌تر بود اما اگر وضعیت بخش جوان‌تر دقیق‌تر مورد توجه قرار بگیرد، شرایط پیچیده‌تر این بخش نمایان می‌گردد. تعداد پیکسل‌های کشف شده در منطقه فعال بخش جوان‌تر زیاد نیست اما تمامی آن‌ها نرخ جابجایی بالایی را نشان می‌دهند. اگر تنها قسمت فعال بخش جوان‌تر در نظر گرفته شود، میانگین نرخ متوسط جابجایی در آن ۲۴ میلی‌متر در سال می‌باشد که اشاره به جابجایی قابل توجه این بخش می‌کند. قسمت فعال بخش قدیمی‌تر نیز نرخ جابجایی قابل توجهی را داراست اما در قسمت فعال بخش شمالی پیکسل بسیار کمی کشف شد. با توجه به اینکه حساسیت سنجنده به این قسمت نسبتاً خوب است (شکل ۸ و ۹ محدوده زرد رنگ) یک احتمال بسیار قوی این است که به دلیل جابجایی سریع و شاید ریزش، همدوسی در منطقه از دست رفته است. دیگر منطقه مهم که با توجه به بررسی میدانی جابجایی زیادی داشت پایین‌ترین قسمت لغزش (منطقه تراسه‌ای) بود (شکل ۸ و ۹، محدوده قرمز رنگ). در این منطقه نیز به رغم حساسیت نه چندان ضعیف سنجنده نسبت به این منطقه (شکل ۹) احتمالاً به دلیل سرعت جابجایی، پیکسلی شناسایی نشد. با توجه به جدول ۲ و شکل ۱۰، درصد پراکندگی پیکسل‌های با نرخ جابجایی بالای ۱۰ میلی‌متر در سال در شیب‌های مختلف قابل مشاهده است. قابل ذکر است که حدود ۵۰ درصد پیکسل‌های کشف شده در پهنه زمین لغزش دارای نرخ جابجایی بالای ۱۰ میلی‌متر در سال بودند که در جدول ۲ طبقه‌بندی شدند. حدود ۸۹ درصد پیکسل‌های با نرخ جابجایی بالای ۱۰ میلی‌متر دارای شیب بیش از ۳۰ درصد بودند و ۵۳ درصد پیکسل‌های با نرخ جابجایی بالای ۱۰ میلی‌متر دارای شیب بیش از ۴۵ درصد بودند. نکته مهم قابل توجه در پراکندگی پیکسل‌های با نرخ جابجایی بالای ۴۰ میلی‌متر عدم وجود این پیکسل‌ها در شیب‌های زیر ۳۰ درصد می‌باشد. قابل ذکر است که تقریباً تمامی پیکسل‌های در حال جابجایی دارای جهت شیب به سمت شمال و شمال شرقی می‌باشند (شکل ۱۱). برای بررسی سری زمانی نقطه‌ای دلخواه در منطقه (مثلاً مشکی، شکل ۸) شعاعی به قطر ۵۰ متر در نظر گرفته شد و از نقاط موجود در ناحیه مشخص شده متوسط‌گیری به عمل آمد و با

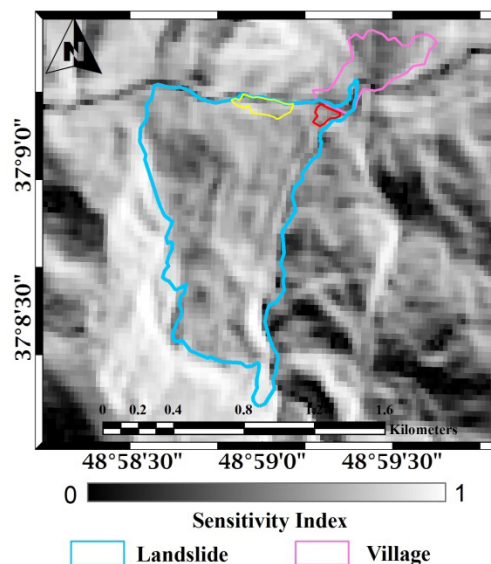


شکل ۷- شبکه تصاویر راداری در الگوریتم طول بازهای کوتاه
Fig 7. Images and interferograms network in SBAS method



شکل ۸- نقشه نرخ جابجایی در راستای دید سنجنده، محدوده قرمز نشان دهنده فعال ترین قسمت لغزش می باشد، مثلث مشکی نقطه انتخابی در منطقه برای بررسی سری زمانی است (شکل ۱۵)، خط مشکی پروفیل AB برای بررسی تفسیر میزان نرخ جابجایی در مناطق مختلف لغزش است (شکل ۱۶). علامت مثبت به معنی نزدیک شدن و علامت منفی به معنی دور شدن از سنجنده می باشد.

Fig 8. The map of displacement rate along line of sight. In this map, the red area represents the most active part of the slide, the black triangle is based for interpretation of the AB rate level in the area for investigation of the time series (Fig. 13), The black line of AB profile is employed to determine the displacement rate in different region of landslide. The positive and negative singes indicate approaching and distancing to/from line of sight, respectively.

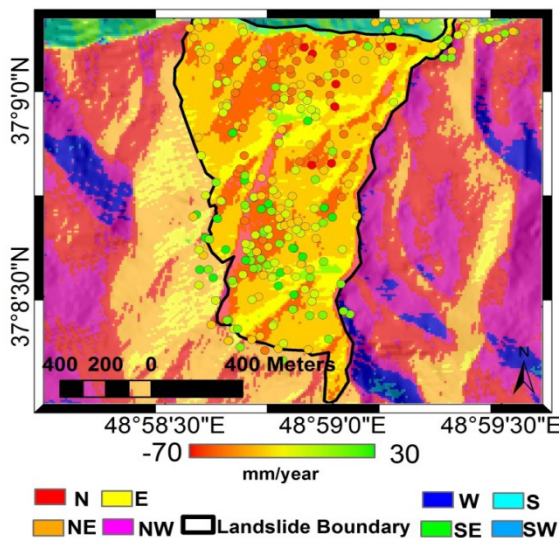


شکل ۹- نقشه حساسیت سنجنده به شیب، محدوده زرد قسمت فعال بخش شمالی و محدوده قرمز فعال ترین قسمت لغزش است.

Fig 9. Sensor sensitivity map to slope, yellow polygon is active part of northern part, Red polygon is most active part

در ۷۰ الی ۱۰۰ متری نقطه A در بخش شمالی ۳۰ میلی متر در سال است. نرخ جابجایی در ۲۰۰ تا ۳۵۰ متری نقطه A در قسمت فعال بخش قدیمی تر به طور متوسط از بخش شمالی بیشتر است و به ۶۰ میلی متر در سال نیز می رسد. قسمت فعال بخش جوان تر تقریباً در ۶۰۰ متری نقطه A قرار گرفته و نرخ آن به ۵۰ میلی متر در سال نیز

برازش خط نرخ جابه جایی بدست آمد. که ۱۳ میلی متر در سال بود و بیش ترین میزان جابجایی ۳۴ میلی متر بود (شکل ۱۲). در شکل ۱۳ میزان نرخ جابجایی نقاط در طی پروفیل AB (شکل ۸) نمایش داده شده است. میزان نرخ جابجایی در نقطه A در قسمت فعال بخش شمالی ۱۰ میلی متر در سال است. بیش ترین مقدار آن

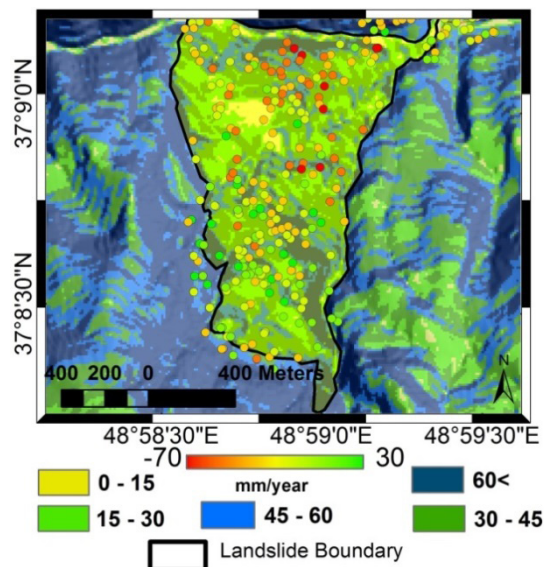


شکل ۱۱- نقشه نرخ جابجایی در راستای دید سنجنده مطابق بر نقشه‌ی جهت شیب لغزش، جهت پیکسل‌های در حال جابجایی به سمت شمال و شمال شرق می‌باشد.

Fig11. The displacement rate map along line of sight according to the slide slope map. As shown in the figure, the direction of the displacing pixels is towards north and east north

جابجایی در بخش‌های قدیمی‌تر و شمالی به ترتیب ۱۵/۳ و ۱۶ میلی‌متر در سال اندازه‌گیری شد. بیش‌ترین پیکسل‌های کشف شده در بخش قدیمی‌تر، در قسمت فعال آن بود در حالی که پیکسل‌های بسیار کمی در قسمت فعال بخش شمالی ثبت شد که آن‌ها نیز چیزی نشان نمی‌دادند. به نظر می‌آید که جابجایی‌های سریع همدوسی را تحت شعاع قرار داده است. این اتفاق برای فعال‌ترین قسمت زمین‌لغزش در پایین‌ترین بخش آن نیز رخ داد. روش کاربردی برای اینچنین مناطقی مشاهدات سامانه تعیین موقعیت جهانی^۱ و ترکیب این مشاهدات با روش‌های مبتنی بر سنجنش از دور مانند تداخل‌سنجی راداری می‌باشد که نتایج قابل اعتمادتری به دست خواهند داد.

در مطالعه‌ای مشابه در سال ۲۰۱۶ در نیوزلند، زمین‌لغزشی مشکوک به کمک روش طول بازهای کوتاه و با استفاده از داده‌های حوزه‌ی فرکانسی C ماهواره‌ی انویست و حوزه‌ی فرکانسی X ماهواره‌ی تراسار^۲ توسط حق‌شناس و معتق بررسی شد. این زمین‌لغزش از جهت تراکم پوشش گیاهی بسیار شبیه زمین‌لغزش ماسوله است. نتیجه سری‌زمانی حاصل از هر دو دسته تصاویر راداری مناطق نسبتاً کمی را به صورت فعال نشان داد. در سایر نواحی به دلیل پوشش



شکل ۱۰- نقشه نرخ جابجایی در راستای دید سنجنده مطابق بر نقشه‌ی جهت شیب لغزش، همانطور که در شکل پیداست اکثر پیکسل‌های در حال جابجایی در مناطق با شیب بالای ۳۰ درصد واقع شده‌اند.

Fig10. The displacement rate map along line of sight according to the slide slope map. As shown in the figure, most of the displacing pixels are located in the regions with slopes of over 30%

می‌رسد و در ادامه وقتی در امتداد پروفیل به سمت قسمت بالادست بخش جوان می‌رویم نرخ جابجایی به صفر نزدیک می‌شود. در شکل 14B، اثرات جابجایی در محدوده مثلث مشککی دیده می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری

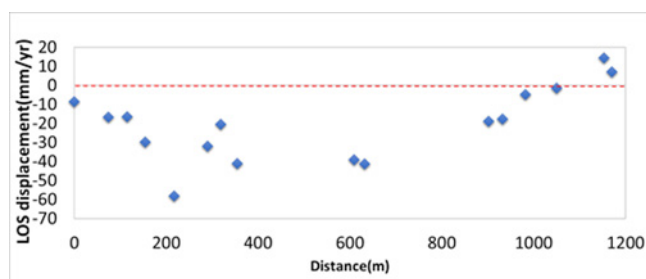
با توجه به نقشه زمین‌شناسی زمین‌لغزش و پیکسل‌های شناسایی شده در حال جابجایی توسط روش تداخل‌سنجی راداری می‌توان نتیجه گرفت که روش مورد نظر تا حد مطلوبی الگو و ساختار ژئومورفولوژیکی زمین‌لغزش را شناسایی کرده است. این امر زمانی بیشتر تأیید می‌گردد که به مقادیر شیب در پهنه لغزشی و میزان پراکندگی پیکسل‌های شناسایی شده در حال جابجایی در آن بیشتر تمرکز گردد. حدود ۲۵، ۳۸ و ۳۶ درصد پیکسل‌های با نرخ جابجایی بیش از ۱۰ میلی‌متر به ترتیب در شیب‌های بیشتر از ۶۰، ۴۵ الی ۶۰ و ۳۰ الی ۴۵ درصد واقع شده‌اند که مجموعاً ۸۹ درصد پیکسل‌ها را شامل می‌گردند و از طرفی ۱۰۰ درصد پیکسل‌های با نرخ جابجایی بالای ۴۰ میلی‌متر در شیب‌های بالای ۳۰ درصد واقع شده‌اند. بدین صورت می‌توان نتیجه گرفت که نتایج نرخ جابجایی از ساختار ژئومورفولوژیکی منطقه تبعیت می‌کند. هم‌چنین رفتارهای مختلفی در سه بخش ژئومورفولوژیک لغزش مشاهده شد. قسمت فعال بخش جوان‌تر با نرخ ۲۴ میلی‌متر در سال حرکت می‌کند، در حالی که جابجایی قسمت بالادست این بخش صفر می‌باشد. نرخ متوسط

1. GPS

2. TerraSAR-X

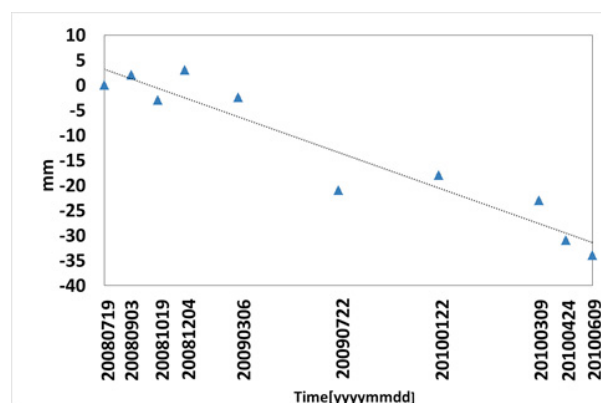
جدول شماره ۲- درصد پراکندگی پیکسل‌های با نرخ جابجایی بالای ۱۰ میلی‌متر در شیب‌های مختلف
Table 2. Distribution percentage of pixels with a displacement rate more than 10 mm/y in different slopes

شیب/نرخ جابجایی Velocity(mm)\Slope(percent)	>60%	60%-45%	45%-30%	30%-15%	15%>	مجموع Total
10-20	%15	%18	%18	%3	%2	%56
20-40	%7	%8	%14	%4	%2	%35
40-70	%3	%2	%4	%0	%0	%9
مجموع Total	%25	%28	%36	%7	%4	%100



شکل ۱۳- نرخ متوسط جابجایی در راستای دید ماهواره، طی پروفیل AB

Fig 13. Mean slope displacement in Line of through AB profile



شکل ۱۲- سری زمانی جابجایی نقطه‌ی مشکی مثلی

Fig 12. Time series of black triangle point's deformation

مقیاس بسیار کوچک‌تر لغزش نسبت به منطقه ماسوله انتخاب شده بودند و نسبت به پوشش گیاهی بسیار حساس بودند. [۲۹]. در مطالعه‌ای مشابه در سال ۲۰۱۶ که توسط لیو^۲ و همکاران در منطقه‌ای در چین صورت گرفت، به کمک روش طول بازهای کوتاه، تصاویر راداری ایلوس جهت بررسی دو زمین‌لغزش پردازش شدند. به دلیل عدم پوشش گیاهی در هر دو زمین‌لغزش تمامی مناطق توسط پیکسل‌ها پوشش داده شد که در مقایسه با زمین‌لغزش ماسوله، تراکم پیکسل‌ها بسیار بالاتر بود. با توجه به این تراکم رژیم‌های جابجایی و ژئومورفولوژیکی لغزش به طور کامل توسط نتایج تداخل‌سنجی شناسایی شد. قابل ذکر است که همین روش با داده‌های مشابه در زمین‌لغزش ماسوله با توجه به نرخ بسیار بالای جابجایی در برخی مناطق مانند فعال‌ترین بخش آن و هم‌چنین تراکم بسیار بالای پوشش گیاهی در بسیاری مناطق دیگر آن، موفق به کشف پیکسل با تراکمی نظیر این دو لغزش نگردید [۲۳].

گیاهی زیاد پیکسلی کشف نگردید که این خود نشانگر برتری تصاویر محدوده‌باند L که در بررسی لغزش ماسوله استفاده گردید، نسبت به طول موج‌های کوتاه‌تر C و X است. [۱۵]. در مطالعه‌ای مشابه در سال ۲۰۱۷ توسط تساری^۱ و همکاران دو زمین‌لغزش در شمال شرقی ایتالیا شناسایی شدند. جهت بررسی بیش‌تر تصاویر حوزه فرکانسی X سنجنده کازموس به کمک روش طول بازهای کوتاه پردازش شدند. دو لغزش مورد نظر به مانند لغزش ماسوله در منطقه‌ای با پوشش گیاهی قابل ملاحظه قرار داشتند. با توجه به شرایط منطقه و از دست رفتن همدوسی به دلیل پوشش گیاهی تعداد پیکسل‌های کشف شده در زمین‌لغزش اول به مانند زمین‌لغزش ماسوله کم بود اما همین تعداد، جابجایی تا ۲۰ میلی‌متر را نشان داد. در مورد لغزش دوم به دلیل نرخ جابجایی زیاد نتایج توسط روش تداخل‌سنجی ثبت نگردید. این منطقه شرایطی مشابه بخش بسیار فعال زمین‌لغزش ماسوله را داشت. دلیل اصلی نتایج ضعیف استفاده از تصاویر حوزه فرکانسی X بود که با توجه به

2. Liu

1. Tessari

interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11): 2375-2383.

5. Bhattacharya, D., Ghosh, J.K., Boccardo, P. and Komarkova, J., 2013. Automated geo-spatial system for generalized assessment of socio-economic vulnerability due to landslide in a region. European Journal of Remote Sensing, 46(1): 379-399.

6. Casagli, N., Catani, F., Del Ventisette, C. and Luzi, G., 2010. Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry. Landslides, 7(3): 291-301.

7. Cascini, L., Fornaro, G. and Peduto, D., 2010. Advanced low-and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales. Engineering Geology, 112(1): 29-42.

8. Canuti, P., Casagli, N., Farina, P., Leva, D., Tarchi, D. and Nico, G., 2003, May. Some examples of slope movements monitored by ground-based SAR interferometry. In Proceedings IC-FSM2003 International Conference on Fast Slope Movements: Prediction and Prevention for Risk Mitigation: 71-77.

9. Canuti, P., Casagli, N., Ermini, L., Fanti, R. and Farina, P., 2004. Landslide activity as a geoinicator in Italy: significance and new perspectives from remote sensing. Environmental Geology, 45(7): 907-919.

10. Carlà, T., Intrieri, E., Di Traglia, F. and Casagli, N., 2016. A statistical-based approach for determining the intensity of unrest phases at Stromboli volcano (Southern Italy) using one-step-ahead forecasts of displacement time series. Natural Hazards, 84(1): 669-683.

11. Carlà, T., Intrieri, E., Farina, P. and Casagli, N., 2017, May. A New Approach to Assess the Stability of Rock Slopes and Identify Impending Failure Conditions. In Workshop on World Landslide Forum (733-739). Springer, Cham.

12. Di Martire, D., De Rosa, M., Pesce, V., Santangelo, M.A. and Calcaterra, D., 2012. Landslide hazard and land management in high-density urban areas of Campania region, Italy. Natural Hazards and Earth System Sciences, 12(4): 905.

13. Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F., 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 38(5): 2202-2212.



شکل ۱۴- (A) اثرات جابجایی در فعالترین قسمت لغزش که پله‌ها را تخریب نموده است، بخش تراسه‌ای (محدوده قرمز در شکل ۱۰) (B) اثرات جابجایی در محدوده نقطه مثلث مشکی
Fig 14. A) displacement in most active part of landslide destroyed buildings, terraces part (red polygon in Fig10) B) Displacement traces in black triangle point area

منابع

1. Akbarimehr, M., Motagh, M. and Haghshenas-Haghighi, M., 2013. Slope stability assessment of the Sarcheshmeh Landslide, Northeast Iran, Investigated using InSAR and GPS observations. Remote Sensing, 5(8): 3681-3700.
2. Bardi, F., Raspini, F., Frodella, W., Lombardi, L., Nocentini, M., Gigli, G., Morelli, S., Corsini, A. and Casagli, N., 2017. Monitoring the Rapid-Moving Reactivation of Earth Flows by Means of GB-InSAR: The April 2013 Capriglio Landslide (Northern Apennines, Italy). Remote Sensing, 9(2): 165.
3. Bayer, B., Simoni, A., Schmidt, D. and Bertello, L., 2017. Using advanced InSAR techniques to monitor landslide deformations induced by tunneling in the Northern Apennines, Italy. Engineering Geology.
4. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR

24. Lombardi, L., Nocentini, M., Frodella, W., Nolesini, T., Bardi, F., Intrieri, E., Carlà, T., Solari, L., Dotta, G., Ferrigno, F. and Casagli, N., 2016. The Calatabiano landslide (Southern Italy): preliminary GB-InSAR monitoring data and remote 3D mapping. *Landslides*, 76: 1-18.
25. Masure, P. and Lutoff, C., 2006. Urban system exposure to natural disasters: an integrated approach. *Assessing and Managing Earthquake Risk*: 239-260.
26. Rott, H., Scheuchl, B., Siegel, A. and Grasemann, B., 1999. Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: a case study from a mass waste above a reservoir in the Ötztal Alps, Austria. *Geophysical Research Letters*, 26(11): 1629-1632.
27. Sassa, K., 2005. Landslide disasters triggered by the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake in Japan. *Landslides*, 2(2): 135-142.
28. Strozzi, T., Farina, P., Corsini, A., Ambrosi, C., Thüring, M., Zilger, J., Wiesmann, A., Wegmüller, U. and Werner, C., 2005. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. *Landslides*, 2(3): 193-201.
29. Tessari, G., Floris, M. and Pasquali, P., 2017. Phase and amplitude analyses of SAR data for landslide detection and monitoring in non-urban areas located in the North-Eastern Italian pre-Alps. *Environmental Earth Sciences*, 76(2): 85.
30. Tong, X. and Schmidt, D., 2016. Active movement of the Cascade landslide complex in Washington from a coherence-based InSAR time series method. *Remote Sensing of Environment*, 186: 405-415.
31. Zhao, C., Lu, Z., Zhang, Q. and de La 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.
14. Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1): 8-20.
15. Haghshenas Haghighi, M. and Motagh, M., 2016. Assessment of ground surface displacement in Taihape landslide, New Zealand, with C-and X-band SAR interferometry. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 59(1): 136-146.
16. Highland, L. and Bobrowsky, P.T., 2008. The landslide handbook: a guide to understanding landslides. Reston: US Geological Survey. 129 pages.
17. Hilley, G.E., Bürgmann, R., Ferretti, A., Novali, F. and Rocca, F., 2004. Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. *Science*, 304(5679): 1952-1955.
18. Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. and Kampes, B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical research letters*, 31(23).
19. Hooper, A. and Zebker, H.A., 2007. Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series. *JOSA A*, 24(9): 2737-2747.
20. Hooper, A., 2008. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16).
21. Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R. and Casagli, N., 2012. Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*, 147: 124-136.
22. Lauknes, T.R., Shanker, A.P., Dehls, J.F., Zebker, H.A., Henderson, I.H.C. and Larsen, Y., 2010. Detailed rockslide mapping in northern Norway with small baseline and persistent scatterer interferometric SAR time series methods. *Remote Sensing of Environment*, 114(9): 2097-2109.
23. Liu, Y., Liao, M., Shi, X., Zhang, L. and Cunningham, C., 2016. Potential loess landslide deformation monitoring using L-band SAR interferometry. *Geo-spatial Information Science*, 19(4): 273-277.

Abstract**Determination of the Displacement Rate of the Masouleh Landslide for Management of Landslide Risk by Radar Interferometry**H. Sabeti¹, M. Motagh^{2,3}, M.A. Sharifi⁴, B. Akbari⁵, M. Akbarimehr⁶ and D. Fard⁷

Received: 15-07-2017 Accepted: 15-11-2017

One of the most common natural phenomena occurring in mountainous regions of the world is landslide which causes critical damages and is considered as a natural disaster. Iran is a country which annually suffers from this disaster and its consequent damage of about 500 billion Rials. Over the last 15 years, an increasing number of researches have aimed to demonstrate the applicability of the images captured by the space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) sensors in sensors. InSAR (SAR interferometry) is currently one of the most exploited techniques for the assessment of ground displacements, and is becoming a consolidated tool for Civil Protection institutions addressing landslide risk. Analyzing satellite SAR data plays a major role in investigating landslide related events at different stages, including detection, mapping, monitoring, characterization and prediction. In this regard, Masouleh region is highly important in terms of geology, geomorphology, and high potential for landslide occurrence. Therefore, in this study in order to create the displacement time series of the region, 11 radar images of the ALOS/PALSAR satellite within the time range of 2008 to 2010 were obtained and analyzed via Small Baseline (SBAS). The slide active zones were investigated based on geological field studies and the geomorphological characteristics of the region verified the displacement of various parts of the slide. The analysis results demonstrated that the highest displacement rate along the satellite view in the northern region, older and younger is 51, 46 and 70 mm/year, respectively, distancing from the satellite.

Keywords: *Masouleh landslide, SAR interferometry, SBAS, Natural hazard Mashhad's plain*

1. Corresponding Author and Master Student of Geodesy, School of surveying and geospatial engineering, College of engineering, University of Tehran.
2. Professor, GFZ German Research Center for Geosciences, Department of Geodesy, Potsdam, Germany
3. Professor, Institute of Photogrammetry and GeoInformation, Leibniz University Hannover, Germany
4. Associate Professor, School of Surveying and geospatial engineering, College of engineering, University of Tehran.
5. Forest, Range and Watershed Management Organizations of Iran
6. Member of the Board of Directors of Payesh Faza Mabna company
7. Student Forestry Master Of Science, College natural resources of Guilan University