

برآورد مساحت و حجم توده‌ی لغزشی با استفاده از تکنیک‌های InSAR و مشاهدات GPS (مطالعه موردی پهنه لغزشی روستای گوگرد)

حسن احمدزاده* - استادیار ژئومورفولوژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
شهرام روستایی - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
محمد رضا نیکجو - استادیار گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
مریم دهقانی - استادیار گروه مهندسی راه و ساختمان و محیط‌زیست دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۱۵ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۸/۱۱

چکیده

زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از مخاطرات ژئومورفولوژیک ممکن است در قلمرو معین، با بزرگی و دوره‌های زمانی مشخص رخ دهد. تخمین حجم و مساحت توده‌ی لغزشی نیازمند اطلاعات زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی است که امروزه تنها با روابط تجربی بین حجم زمین‌لغزش‌ها و مساحت زمین‌لغزش، و بکارگیری داده‌های دورسنجی و تکنیک‌های تداخل‌سنجی قابل‌محاسبه می‌باشد. توده‌ی لغزشی روستای گوگرد در سطحی در حدود ۲۰۰ هکتار روی یک زمین‌لغزش قدیمی به وسعتی در حدود ۸۷۶ هکتار اتفاق افتاده است که روی این توده ناپایدار ۴۶۸ خانوار با ۲۵۶۶ نفر جمعیت زندگی می‌کنند. در این پژوهش اطلاعات مربوط به تعداد ۲۶ زمین‌لغزش در منطقه‌ی قطور، شامل مساحت، حجم و عمق با استفاده از ۲۵ تصویر سنجنده ASAR ماهواره‌ی ENVISAT و الگوریتم StaMPS و SBAS در تکنیک InSAR تهیه شد. سپس یک رابطه تجربی برای برآورد حجم توده‌ی لغزشی گوگرد به‌کاربرده شد محاسبات نشان داد که در طی ۷ سال اخیر با احتساب متوسط طول، عرض و عمق جابجایی به ترتیب ۲۶۰۰، ۸۰۰ و ۳۵ متر، مجموع سطح جابجایی و حجم مواد جابجا شده معادل $2 * 106 \text{ m}^2$ و $7.3 * 107 \text{ m}^3$ می‌باشد. استخراج اطلاعات سری زمانی جابجایی از اینترفروگرام‌ها نیز نشان می‌دهد که سالانه $2.1 * 104 \text{ m}^2$ مواد با سرعتی معادل $\phi = 10 \text{ mmyr}^{-1}$ جابجا می‌شود. لذا در این منطقه لغزش‌ها فعال هستند و ممکن است لغزش‌های جدیدی با بزرگی قابل‌ملاحظه به وقوع بپیوندند.

واژگان کلیدی: مخاطرات محیطی، حجم و مساحت زمین‌لغزش، تکنیک InSAR، روستای گوگرد.

مقدمه

حرکات توده‌ای در نواحی کوهستانی یکی از فرآیندهای طبیعی و از مهم‌ترین عوامل به وجود آورنده‌ی چشم‌اندازها هستند (وان وستن^۱، ۱۹۹۳). این چشم‌اندازهای سست و شکننده امکان ایجاد و توسعه‌ی سکونتگاه‌ها و دیگر ساخت‌وسازهای مهندسی را محدود می‌نمایند (روستایی و احمدزاده؛ ۱۳۸۴).

ارزیابی ژئومورفولوژیکی توپوگرافی کوهستان، نیازمند پیشرفت‌هایی در زمینه‌ی مورفومتری و توصیف چند مقیاس است (بیشاپ و شرودر^۲، ۲۰۰۳. بیشاپ و همکاران^۳، ۲۰۱۱) و این نیز نیازمند متدولوژی‌های جدیدی در مورد مطالعات زمین می‌باشد (مارستون^۴، ۲۰۱۱).

یکی از وظایف عملی قابل توجه دانش ژئومورفولوژی، شناسایی لندفرم‌های پایدار و مکان‌هایی با حداقل احتمال گرفتاری به پدیده‌های کاتاستروفیک یا آرام ناشی از فرآیندهای طبیعی یا انسانی است که به نوعی، اثر نامطلوبی به اشغال یا استفاده‌ی انسانی می‌گذارد (روزنفیلد^۵، ۲۰۰۴) و وقتی که این پیامدها در جامعه و یا زیرساخت، تأثیر می‌گذارند، به بلایای طبیعی تبدیل می‌شوند (آیالا^۶، ۲۰۰۲). استراتژی زمین‌لغزش شامل شناخت فرآیند، تحلیل خطوط و پیش‌بینی زمین‌لغزش در آینده برای کاهش پیشرفت و خسارات ناشی از آن می‌باشد (لان و همکاران^۷، ۲۰۰۴).

تخمین حجم توده‌ی لغزشی نیازمند اطلاعات زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی در دامنه‌ی گسسته شده می‌باشد. جمع‌آوری این اطلاعات بسیار مشکل و هزینه‌بر است. اما چنانکه نقشه‌ی لغزشی به شکل دیجیتالی در دسترس باشد، محاسبه حجم و مساحت مجموع لغزش‌ها امکان‌پذیر می‌باشد. (رضایی مقدم و همکاران؛ ۱۳۹۰: ۲۰۴). امروزه داده‌های دور سنجی قابل دسترس، اطلاعات دقیق و مفیدی را از عوارض سطح زمین و فرایندهای دینامیکی آن که در ارتباط با وقوع زمین‌لغزش‌ها هستند، ارائه می‌دهد. و برآورد ویژگی‌های کمی حرکات توده‌ای از قبیل (طول، عرض، ضخامت، شیب محلی، حرکت) با استفاده از دید استریوئی SAR، اینترفومتری (InSAR) و پروفیل توپوگرافیکی (LIDAR) صورت می‌گیرد. اینگونه داده‌ها می‌توانند با استفاده از داده‌های مربوط به مطالعات قبلی یا اندازه‌گیری‌های صحرائی تکمیل گردند.

توده‌ی لغزشی مورد مطالعه واقع در روستای گوگرد از توابع بخش قطور، شهرستان خوی در استان آذربایجان غربی با موقعیت ریاضی $38^{\circ} 30' 30''$ عرض شمالی و $44^{\circ} 34' 00''$ طول شرقی در مسیر جاده ترانزیتی ایران و ترکیه می‌باشد. وسعت زمین لغزش قدیمی در این روستا حدود ۸۷۶ هکتار و منشأ آن تکتونیک است که در طول زمان تثبیت گشته ولی در سال‌های اخیر، ناپایداری‌های جدیدی در سطح حدود ۲۰۰ هکتار اتفاق افتاده است (شکل ۱). منطقه‌ی مورد مطالعه از نقطه نظر توپوگرافی نیز بسیار ناهموار است. حداکثر ارتفاع آن ۳۶۲۲ متر و حداقل ارتفاع در خروجی آن ۱۸۰۰ متر است. حدود ۹۰ درصد از وسعت منطقه، دارای شیب ۱۵ تا ۶۰ درصد و به بالا می‌باشد که این موضوع حاکی از پتانسیل بالا برای ایجاد ناپایداری در صورت مساعد بودن سایر شرایط (عوامل ثانویه لغزش) خواهد بود. طبق آمار خانه بهداشت در سال ۱۳۹۱ روستای گوگرد دارای ۴۶۸ خانوار و ۲۵۶۶ نفر جمعیت می‌باشد.

از میان داده‌های در دسترس که حدود ۶۷۷ لغزش را شامل می‌شود، ۲۰۷ لغزش توسط سیمونت و شومن در گینه‌ی نو (۱۹۶۷)، ۶۶ لغزش در ناحیه جنگلی جنوب کالیفرنیا در فاصله‌ی سال‌های ۱۹۶۶ تا ۱۹۶۹، ۲۸ لغزش در چین (ون ۲۰۰۴)، ۱۶ لغزش در جنوب شرق نروژ (گازتی ۲۰۰۹) و ۱۴ لغزش در طول جزایر جنوبی نیوزیلند (گیلون و هانکوکس ۱۹۹۲) مورد بررسی قرار گرفته است.

1. Van Westen

2. Bishop and Shroder

3. Bishop et al

4. Marston

5. Rosenfeld

6. Ayala

7. Lan, et al

8 - synthetic aperture radar interferometry

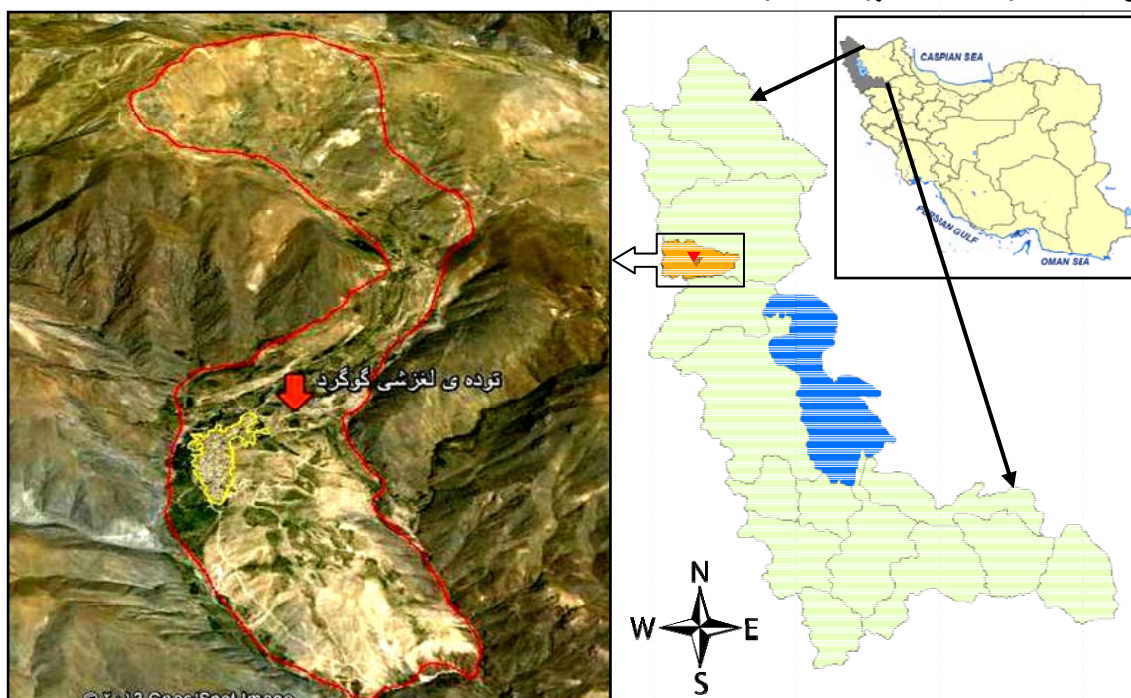
عثمان اوغلو (۲۰۱۱) در رساله دکتری خود در دانشگاه میامی به کاربردها و توسعه‌ی الگوریتم‌های جدید برای آنالیز جابجایی‌ها با استفاده از سری‌های زمانی InSAR می‌پردازد. نتایج ایشان نشان داد که روش‌های تداخل‌سنجی برای مطالعات جابجایی‌های زمین مناسب بوده و بهترین نتایج را می‌دهند.

خوانین‌زاده (۱۳۹۰) در تحقیقی به مطالعه زمین‌لغزش‌های منطقه‌ی طالقان با استفاده از ۱۸ تصویر سنجنده‌ی ASAR ماهواره‌ی Envisat و روش تداخل‌سنجی راداری پرداخت و نتایج به‌دست‌آمده، وجود هفت منطقه لغزشی را تأیید نمود.

رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۰) در مقاله‌ای به برآورد روابط ریاضی بین فاکتورهای حجم و مساحت لغزش توده‌ای در گردنه‌ی صائین (شهرستان نیر) پرداختند. در این تحقیق لغزش‌های یک دوره زمانی ۵ ساله از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۵ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آن‌ها نشان داد حجم کل مواد لغزش یافته در این دوره‌ی زمانی معادل $V_{LT} = 3.2 \times 10^7 m^3$ می‌باشد که از سرعت جابجایی معادل $\phi_L = 7.8 mmyr^{-1}$ برخوردار بوده است.

امیدوار و کاویان (۱۳۸۹) در تحقیقی در استان مازندران ابتدا اطلاعات مربوط به تعداد ۴۴۲ زمین‌لغزش در استان مازندران شامل مساحت، حجم و عمق تهیه کردند. سپس برای اندازه‌گیری سطح (AL) و حجم (VL) پرداخته‌اند و یک رابطه تجربی برای برآورد حجم ارائه، و این رابطه را ارزیابی کردند.

گازتی و همکاران (۲۰۰۸ و ۲۰۰۹) در مقاله‌ای تحت عنوان برآورد حجم و مساحت لغزش در ایتالیا ابتدا به توصیف یک طبقه‌بندی از ۵۸۱۴ لغزش برای اندازه‌گیری سطح (AL) و حجم (VL) پرداخته‌اند. سپس برای تعیین روابط تجربی بین AL و VL و مقایسه‌ی بین این روابط با روابط مشابه در لغزش‌ها از مجموع ۶۷۷ توده‌ی لغزشی استفاده نمودند. این نتایج با پهنه‌ی لغزشی روستای گوگرد واقع در منطقه‌ی قطور در شهرستان خوی مقایسه شده و نتایج حاصل از کاربرد این مطالعات در منطقه‌ی قطور به اثبات رسانده است.



شکل شماره ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

در این تحقیق ابتدا روابط موجود بین خصوصیات هندسی لغزش‌ها و حجم لغزش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. سپس با توجه به خصوصیات هندسی زمین‌لغزش‌ها، اندازه‌گیری‌ها انجام گرفته و نتیجه‌ای از وضعیت سطحی و زیرسطحی توده‌ی لغزشی حاصل گردید. در این پژوهش برای محاسبه حجم و مساحت لغزش در توده‌ی لغزشی گوگرد از

معادلات ارائه شده توسط محققین قبلی استفاده شده است. علاوه بر این از مشاهدات دقیق تر GPS و ۲۵ تصویر سنجنده ASAR رادار ENVISAT با هندسه‌ی تصویربرداری نزولی^۱ (واقع بر مدار شمالی-جنوبی) جهت برآورد پارامترهای مورد نیاز در روابط فوق (طول، عرض و عمق متوسط لغزش‌ها)، مانیتورینگ و رفتار سنجی زمین لغزش‌ها و بررسی مکانیزم حرکتی شیب در منطقه‌ی قطور خوی استفاده شده است. این تصاویر از نوع تصاویر SLC^۲ شده می‌باشد و در بازه‌ی زمانی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ جمع‌آوری شده‌اند.

پس از انتخاب مجموعه‌ی نهایی داده‌ها، تصاویر به صورت اولیه مورد بررسی قرار گرفت تا تصویر مرجع^۳ به نحو مقتضی انتخاب شود. تصویر مرجع معمولاً به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که از نظر طول باز مکانی و زمانی حداقل فاصله را با تصاویر دیگر داشته باشد. لذا تصویر ۲۰۰۷/۰۲/۱۷ به عنوان تصویر مرجع انتخاب شد و بقیه‌ی تصاویر تحت عنوان تصاویر پیرو^۴ نسبت به تصویر مرجع مورد آنالیز قرار گیرد. مشخصات اولیه‌ی تصاویر مورد استفاده در این تحقیق به شرح جدول شماره ۱ می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات تصاویر مورد استفاده در تحقیق

Nom	Mission	Sensor	Product	Date(mm-dd-yyyy)	Orbit	Track	Swath	Pass
1	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	06/28/2003	6931	364	I2	Descending
2	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	10/11/2003	8434	364	I2	Descending
3	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	11/15/2003	8935	364	I2	Descending
4	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	12/20/2003	9436	364	I2	Descending
5	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	02/28/2004	10438	364	I2	Descending
6	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	04/03/2004	10939	364	I2	Descending
7	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	05/08/2004	11440	364	I2	Descending
8	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	06/12/2004	11941	364	I2	Descending
9	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	07/17/2004	12442	364	I2	Descending
10	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	09/25/2004	13444	364	I2	Descending
11	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	03/04/2006	20959	364	I2	Descending
12	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	07/22/2006	22963	364	I2	Descending
13	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	12/09/2006	24967	364	I2	Descending
14	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	01/13/2007	25468	364	I2	Descending
15	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	02/17/2007 (master)	25969	364	I2	Descending
16	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	03/24/2007	26470	364	I2	Descending
17	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	03/08/2008	31480	364	I2	Descending
18	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	05/17/2008	32482	364	I2	Descending
19	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	08/30/2008	33985	364	I2	Descending
20	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	07/11/2009	38494	364	I2	Descending
21	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	08/15/2009	38995	364	I2	Descending
22	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	09/19/2009	39496	364	I2	Descending
23	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	11/28/2009	40498	364	I2	Descending
24	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	06/26/2010	43504	364	I2	Descending
25	ENVISAT-1	ASAR/IM	ASA_IM_0P	09/04/2010	44506	364	I2	Descending

¹ - Descending² - Single look complex³ - Master⁴ - Slave

پس از تعیین و انتخاب تصویر مرجع، در محیط نرم‌افزاری StaMPS آورده شد تا به صورت یک تصویر بصری در بیاید و سپس محدوده‌ی موردنظر به مرکزیت مختصات ۳۸/۴۶۳۵ درجه‌ی عرض شمالی و ۴۴/۵۴۹۵ درجه‌ی طول شرقی، به ابعاد تقریبی ۴۵ کیلومتر (۲۲۰۰ پیکسل) در راستای رنج و ۳۰ کیلومتر (۷۴۰۰ خط) در راستای آزیموت برش داده شد تا تجزیه و تحلیل‌ها روی این مقدار از تصویر صورت گیرد.

در روش تداخل‌سنجی راداری از تکنیک پراکنش کننده‌های دائمی (PSInSAR^۱)، به عنوان یکی از بهترین روش‌های تداخل‌سنجی راداری در آشکارسازی زمین‌لغزش‌ها با الگوریتم‌های StaMPS و SBAS استفاده گردید. برای این منظور ابتدا تصاویر تداخل‌سنج با ضرایب Multi-look 4,20 پردازش شدند. به عبارتی هر پیکسل در آن‌ها نشان‌دهنده‌ی جابجایی مساحتی معادل $4 \times 20 = 80$ مترمربع بر روی زمین بودند. از طرفی زمین‌لغزش‌ها در وسعت کوچکی رخ می‌دهند؛ بنابراین تعداد پیکسل‌های نشان‌دهنده آن‌ها محدود می‌گشت. برای رفع این مشکل، آن‌ها را با ضرایب Multi-look 1، 5 به دست آوردیم. در این حالت هر پیکسل بیانگر ۵ مترمربع بر روی زمین است، بنابراین جابجایی‌های ناشی از زمین‌لغزش‌های با وسعت کم نیز در تصاویر تداخل‌سنج نمایان گردید.

اطلاعات مداری دقیق ماهواره Envisat در لحظه اخذ تصاویر نیز به منظور تعدیل اثر مؤلفه مداری (ترم هندسی) موسوم به ODR فایل‌ها از ftp سایت دانشگاه دلف هلند تهیه شده‌اند. همچنین به منظور به حداقل رساندن ترم توپوگرافی اختلاف فاز در تصاویر تداخل‌سنج تولیدی، از مدل رقومی SRTM منطقه شمال غرب ایران، با دقت ۳ ثانیه قوسی استفاده شده است.

جهت کاهش اثرات اتمسفری و محاسبه سری زمانی از روش خطوط مبنای عمودی کوتاه یا SBAS استفاده گردید.

$$\Delta\phi = \phi_{flat} + \phi_{topo} + \phi_{orbit} + \phi_{defo} + \phi_{tropo} + \phi_{noise} \quad (۱) \text{ معادله‌ی ۱}$$

در اینجا $\Delta\phi$ فاز اینترفرومتری (یا تغییر فاز بین دریافت‌های فاز در اثر جابجایی)، ϕ_{flat} فاز زمین مسطح، ϕ_{topo} فاز توپوگرافی، ϕ_{orbit} خطای فاز ناشی از خطاهای اطلاعات مدار، ϕ_{defo} سهم فاز وابسته به تغییر شکل زمین، ϕ_{tropo} سهم فاز تروپوسفر، و ϕ_{noise} نویز ترکیب شده است.

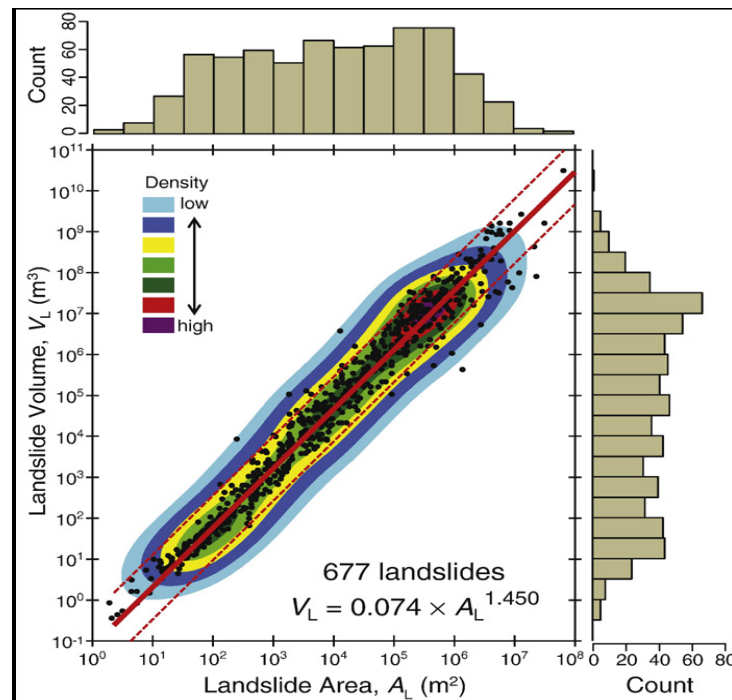
سپس با توجه به فرمول موردنظر فاکتورهای موردنیاز از روی داده‌های تداخل‌سنج و GPS استخراج گردید. برای محاسبه‌ی حجم لغزش در توده‌ی لغزشی گوگرد (شکل ۱)، از معادله‌ای که توسط گازوتی و همکاران (۲۰۰۹) ابداع شده استفاده شده است (معادله‌ی ۲). برای برآورد پارامترهای موردنیاز رابطه‌ی فوق، از داده‌های اپتیکی و راداری سنجنش‌ازدور، مطالعات میدانی و GPS استفاده شده است. رابطه بین مساحت لغزش (A_L) با حجم لغزش (V_L) با استفاده از اطلاعات ۶۷۷ لغزش در سطح جهانی به دست آمده است. این رابطه در ایران نیز مصداق پیدا می‌کند. لذا این رابطه‌ی تجربی برای لغزش‌های رخ داده در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ در منطقه‌ی قطور نیز بکار گرفته شده است. مساحت و حجم توده‌ی لغزشی روستای گوگرد نیز با استفاده از معادله زیر که توسط گازوتی و همکاران در سال ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ ارائه شده است برآورد گردید.

$$V_L = 0.074 \times A_L^{1.450} \quad (۲) \text{ معادله‌ی ۲}$$

در اینجا V_L حجم مواد و A_L وسعت مواد لغزش یافته است.

بررسی شکل شماره ۲ نشان می‌دهد که بین حجم و مساحت لغزش‌ها ارتباط خطی وجود دارد که نشان‌دهنده‌ی یک رفتار خود شباهتی بین حجم و مساحت انواع لغزش‌ها در سراسر جهان می‌باشد. مشاهدات فوق، به علت استفاده از لغزش‌هایی که از بیشترین میزان اطلاعات برخوردارند دارای اهمیت می‌باشد. لذا رابطه‌ی فوق می‌تواند برای لغزش‌های بسیار کوچک و بسیار بزرگ که فاقد داده‌های کافی می‌باشند بسیار راه گشا باشد.

^۱ - persistence scatterer InSAR



شکل شماره ۲) اطلاعات مربوط به مساحت و حجم ۶۷۷ لغزش مورد بررسی که دارای مختصات لگاریتمی است. در این نمودار A_L (محور X)، متشکل از ۸ رده با بزرگی $2.1 \times 10^0 m^2 \leq A_L \leq 7 \times 10^7 m^2$ و V_L (محور Y)، متشکل از ۱۲ رده با بزرگی $3.4 \times 10^{-1} m^3 \leq V_L \leq 2.9 \times 10^{10} m^3$ می‌باشد که برای هر یک از لغزش‌ها مقادیر متفاوتی را تشکیل می‌دهد (اقتباس از گازوتی ۲۰۰۹).

لیتولوژی منطقه

قدیمی‌ترین و وسیع‌ترین سنگ‌های مشاهده‌شده در منطقه، که با علامت MtV در نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه مشخص شده است؛ شامل یک سری سنگ‌های آتشفشانی، همراه با مقداری شیست است که به شدت دگرسان شده‌اند. و اکثراً از نوع متاولکانیک، متاداسیت تا ریوداسیت می‌باشد. در جنوب شرقی منطقه سنگ‌های سبز رنگی دیده می‌شوند (واحد St) که شامل سرپانتینیت، سنگ‌های فوق بازیک سرپنتینی و در پاره‌ای نقاط همراه با تالک می‌باشد. در شرق و شمال غربی یک سری واحد دگرگون شده (Mb) که اکثراً جنس آن‌ها اسلیت، شیست و شیستهای فیلیتی می‌باشد و در بین آن‌ها میکا شیست هم دیده می‌شود. در قسمت‌های شمالی، غرب و جنوبی روستای گوگرد سنگ‌های قهوه‌ای‌رنگی به نام لیستونیت (Ls) مشاهده می‌شود که بر اثر کربناتی و سیلیسی شدن سنگ‌های فوق بازیک و سرپنتینی به وجود آمده‌اند. در قسمت‌هایی از شرق منطقه آهک پلاژییک با سن پالئوسن دیده می‌شود که با علامت Pelm و به رنگ بنفش است.

از نظر لیتولوژی کل محدوده‌ی اطراف روستای گوگرد به دلیل افیولیتی بودن بسیار مستعد فرسایش بوده و میزان رسوب زایی بالایی دارد. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در روی زمین لغزش، اختلاف ارتفاع بین تاج و پنجه جریان در حدود ۱۱۰۰ متر بوده و شیب دامنه بین ۲۵ تا ۴۵ متغیر است. توده‌های سنگی در این منطقه اغلب تکتونیزه و نمایی خردشده دارند. در قسمت شمالی، توده لغزشی (در محدوده روستای گوگرد) توسط گسل‌های تراستی روی هم رانده شده‌اند که گسل مزبور موجب خسارات زیادی به مناطق مسکونی در منطقه می‌شود. بررسی شیب و جهت شیب لایه‌های موجود در منطقه نشان می‌دهد که جهت لغزش تنها در برخی قسمت‌ها به‌ویژه در غرب روستای گوگرد با جهت لایه‌بندی مطابقت دارد.

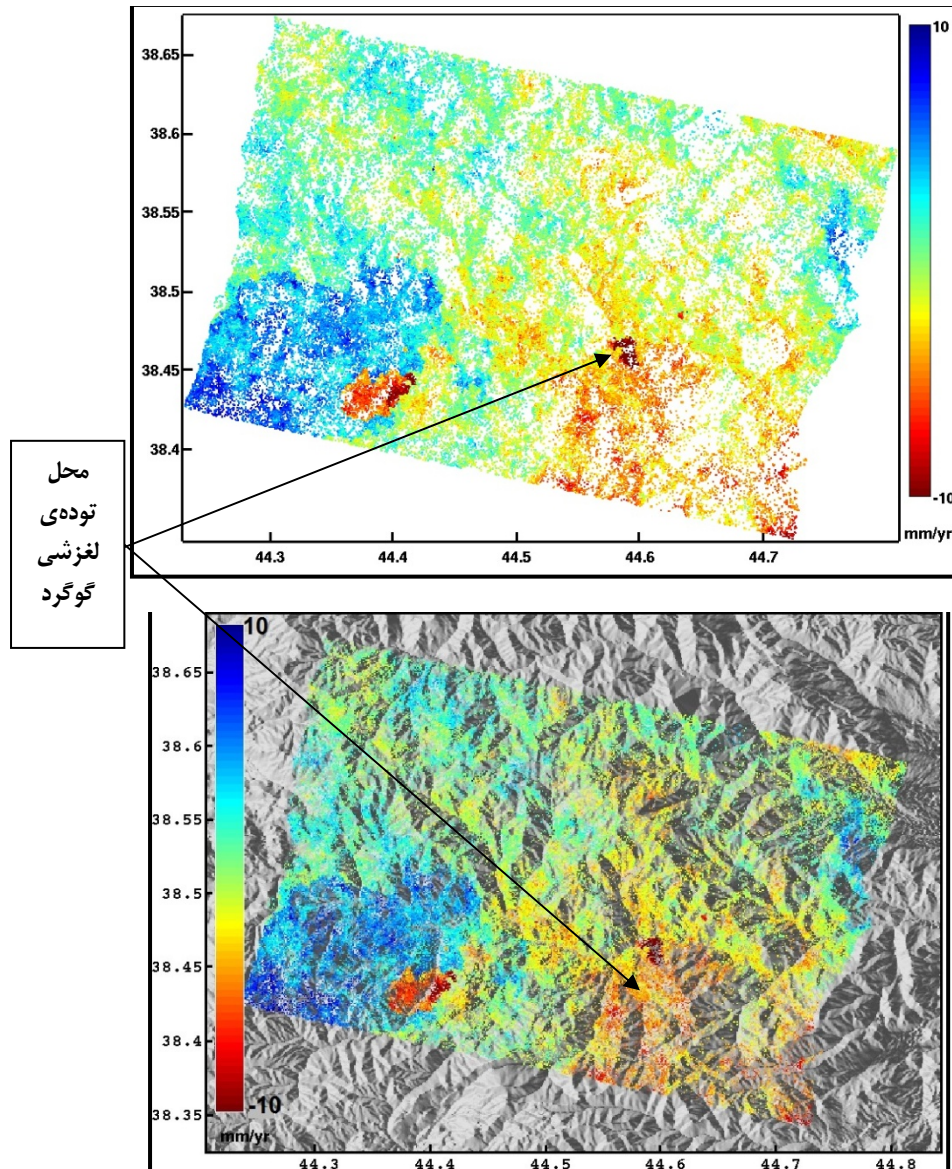
یافته‌های تحقیق

بررسی میدانی از علل ناپایداری نشان داد که عملکرد تکتونیک و خردشدگی سنگ‌ها، هوازدگی عمیق ناشی از حاکمیت یخبندان شدید و طولانی‌مدت، نفوذ آب چشمه‌های پرآب بالادست به داخل خاک اشباع و پهنه‌ی حساس به فرسایش، وقوع سیل‌هایی با حجم بالا و شیب زیاد دامنه‌ای می‌تواند از دلایل وقوع زمین‌لغزش در منطقه باشد. در کنار عوامل فوق، فعالیت‌های انسانی می‌تواند خطر ناشی از وقوع زمین‌لغزش‌های جدیدی را برای روستای گوگرد که در سطح یک توده‌ی لغزشی بزرگ واقع شده است، باشد (شکل ۴).



شکل ۴: نمونه‌ای از لغزش‌های اخیر در محدوده‌ی روستای گوگرد

برآورد حجم و وسعت توده‌ی لغزشی در این روستا می‌تواند قدرت تخریبی این لغزش را نشان دهد. اما از آنجایی که زمین‌لغزش‌ها یکی از پیچیده‌ترین پدیده‌های ژئومورفولوژیکی می‌باشند آگاهی از زمان وقوع و یا رفتار حرکتی آن‌ها نیز مشکل است. در این تحقیق برای نشان دادن بزرگی و نرخ جابجایی در روی پهنه‌ی لغزشی گوگرد، از داده‌های دورسنجی راداری و تکنیک پراکنش کننده‌های دائمی (PSInSAR)، به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های تدخلی سنجی راداری در آشکارسازی زمین‌لغزش‌ها، که می‌تواند گام مؤثری در این برآوردها باشد، استفاده گردید. برای این منظور ۲۴ اینترفروگرام از ۲۵ تصویر راداری ایجاد گردید. هر یک از این اینترفروگرام‌ها که تغییرات سطح زمین را در بازه‌ی زمانی اخذ دو تصویر (تصویر فعلی و تصویر تاریخ قبلی) نشان می‌دهد میزان جابجایی ایجاد شده در هر یک از بازه‌های زمانی ارزیابی گردید. برای نشان دادن میزان جابجایی در بازه‌ی زمانی تصاویر مورد استفاده از تحلیل سری زمانی آن‌ها استفاده می‌گردد. بررسی اینترفروگرام‌های حاصل از تصاویر راداری و تحلیل سری زمانی جابجایی نشان داد که حرکت روبه پایین در این توده همچنان وجود دارد و نرخ جابجایی‌ها در راستای دید ماهواره (LOS) 10 mmyr^{-1} می‌باشد (شکل شماره ۵). در این شکل که یک نمونه از اینترفروگرام‌های ایجاد شده از ۲۵ تصویر راداری آورده شده است راهنمای رنگی کنار آن قسمت‌های بالا آمده و پایین رفته را نشان می‌دهد. وجود لکه‌های تیره‌رنگ قهوه‌ای نشانگر وجود جابجایی سطح زمین به سمت پایین می‌باشد که این امر سبب فاصله‌گیری سطح زمین از سنجنده می‌شود و لذا اعداد منفی است و بالعکس. در بین جابجایی‌های مختلف در منطقه بیشتر روی توده‌ی لغزشی روستای گوگرد تأکید شده است لذا محل توده لغزشی در شکل ۵ نشان داده شده است. و رنگ قهوه‌ای تیره‌ی آن نسبت به اطراف حاکی از وجود حرکات رو به پایین در این سطح می‌باشد.

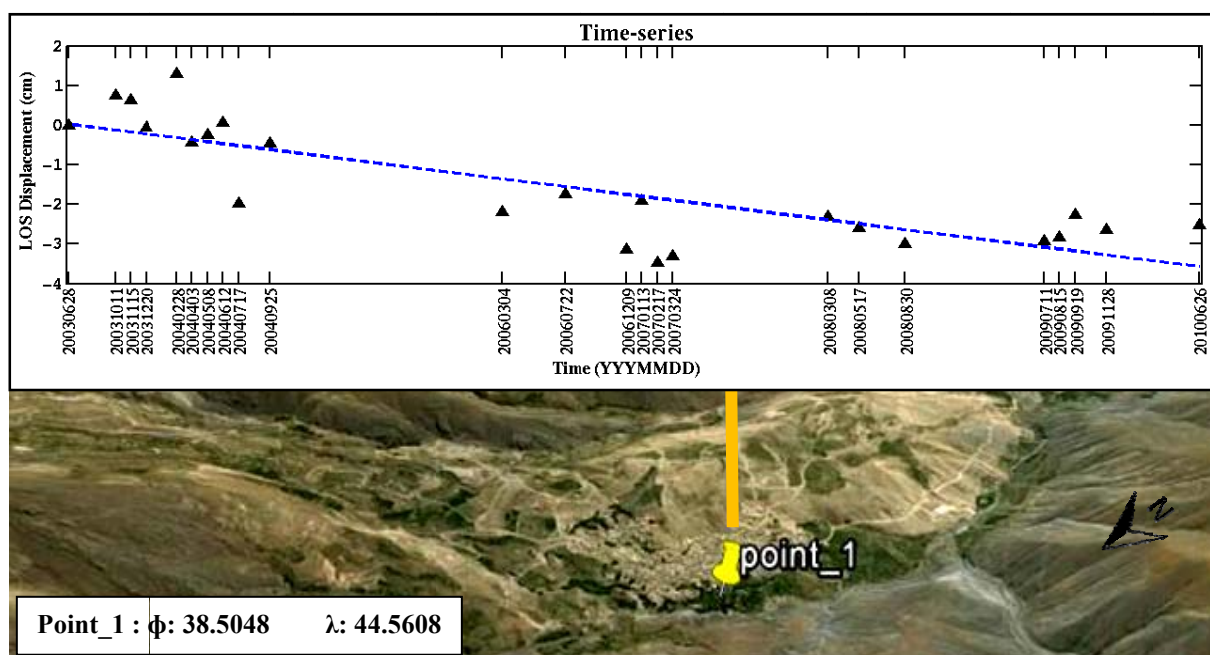


شکل ۵: متوسط نرخ جابجایی شیب روستای گوگرد، در راستای دید سنجنده (LOS) با روش InSAR

وجود لکه‌های قهوه‌ای رنگ تیره در تصویر تداخل‌سنج، وجود جابجایی به سمت پایین و وقوع زمین‌لغزش را نشان می‌دهد که این حرکات به صورت راهنمای تغییرات رنگی آورده شده است. اعداد مثبت (رنگ آبی) جابجایی به سمت بالا و اعداد منفی (رنگی قهوه‌ای) جابجایی به سمت پایین دست در راستای دید ماهواره می‌باشد (شکل ۵ بالا). برای تعیین جهات حرکتی، تصویر تداخل‌سنج روی نمای سه‌بعدی (3D) حاصل از داده‌های راداری همپوشانی شده است (شکل ۵ پایین).

بررسی میزان جابجایی‌های نشان داده شده در اینترفروگرام‌های حاصل از داده‌های راداری ۷ سال اخیر و اندازه‌گیری‌های زمینی با استفاده از GPS نشان داد که متوسط طول، عرض و عمق جابجایی به ترتیب ۲۶۰۰، ۸۰۰ و ۳۵ متر، مجموع سطح جابجایی و حجم مواد جابجا شده معادل $2 \times 10^6 m^2$ و $7.3 \times 10^7 m^3$ می‌باشد. استخراج اطلاعات سری زمانی جابجایی از اینترفروگرام‌ها نیز نشان می‌دهد که سالانه $2.1 \times 10^4 m^3$ مواد با سرعتی معادل $\varphi = 10 \text{ mm/yr}^{\frac{1}{2}}$ جابجا می‌شود (شکل ۶). لذا در این منطقه لغزش‌ها فعال هستند و ممکن است لغزش‌های جدیدی با بزرگی قابل ملاحظه به وقوع بپیوندند. این ارقام بیانگر این واقعیت است که خطر وقوع زمین‌لغزش که به صورت آرام

صورت می‌گیرد در کمین ساکنین و دارایی‌های آن‌هاست که ضرورت شناسایی و احداث سکونتگاه جدید در مکانی که از نظر مخاطرات ژئومورفیک پایدار باشد برای اسکان مجدد اهالی روستای گوگرد را نشان می‌دهد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که فعالیت لغزشی در پهنه‌ای به وسعت $2 \times 10^6 m^2$ می‌تواند کل و یا اکثر بخش‌های این روستا را در هم آمیزد و خطرات جانی و مالی جبران‌ناپذیری را موجب گردد. در بررسی جابجایی و تغییرات سطحی زمین با روش اینترفرومتری (InSAR) برای تعیین میزان جابجایی در روی قسمت‌های مختلف محدوده‌ی مورد مطالعه سری زمانی تغییرات روی آن نقاط ترسیم می‌شود تا روند تغییرات رو به بالا و یا رو به پایین در محل مشخص شود. بررسی شکل شماره (۶) که نشانگر نمونه‌ای از نمودار تحلیل سری زمانی جابجایی از نقاط پراکنده بر روی توده‌ی لغزشی گوگرد می‌باشد؛ روند حرکت و جابجایی رو به پایین در نقطه‌ی شماره‌ی ۱ را در بازه‌ی زمانی ۷ ساله (۲۰۱۰-۲۰۰۳) نشان می‌دهد. تحلیل سری زمانی در تصاویر تداخل‌سنج در جهت شناسایی سطح جابجایی‌ها در فاصله‌ی زمانی مورد بررسی صورت می‌گیرد.



شکل ۶) نمایش یک نمونه از سری زمانی جابجایی واقع بر روی شیب روستای گوگرد، معرف میزان جابجایی در راستای دید سنجنده در طول دوره ۷ ساله ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ به‌دست‌آمده از روش InSAR

بحث و نتیجه‌گیری

زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از مخاطرات ژئومورفولوژیک، ممکن است در قلمرو معین، با بزرگی و دوره‌های زمانی مشخص رخ دهد. برآورد بزرگی و حجم توده لغزشی روستای گوگرد که حدود ۴۷۰ خانوار در روی آن سکنی گزیده‌اند، ضروری است درعین حال ادامه فعالیت لغزشی در درون این توده‌ی لغزشی و نیز تأمین رسوبات عمده حوضه توسط این محدوده اهمیت کار را مضاعف می‌نماید. تخمین حجم و مساحت توده‌ی لغزشی نیازمند اطلاعات زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیک است که امروزه تنها با روابط تجربی بین حجم زمین‌لغزش‌ها و مساحت زمین‌لغزش قابل محاسبه می‌باشد؛ و به‌کارگیری داده‌های دورسنجی راداری و تکنیک‌های تداخل‌سنجی رفتار حرکتی یا ثبات توده‌های لغزشی را معین می‌کند.

در این تحقیق از معادله‌ای که توسط گازوتی و همکاران جهت محاسبه سطح و حجم زمین‌لغزش‌ها ارائه شده است استفاده گردید. بر اساس مطالعات میدانی و برداشت توسط GPS، متوسط طول، عرض و عمق جابجایی به ترتیب ۲۶۰۰، ۸۰۰ و ۳۵ متر، و مجموع سطح جابجایی $2 \times 10^6 m^2$ و حجم مواد جابجا شده معادل $7.3 \times 10^7 m^3$ می‌باشد که این مواد با سرعتی معادل $\phi = 10 \text{ mm/yr}$ جابجا می‌شود.

علاوه بر این از و ۲۵ تصویر سنجنده ASAR رادار ENVISAT بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ جهت مانتورینگ و رفتار سنجی زمین لغزش‌ها و بررسی مکانیزم حرکتی شیب استفاده شده است. این تصاویر با استفاده از تکنیک پراکنش کننده‌های دائمی (PSInSAR)، و الگوریتم‌های StaMPS و SBAS پردازش و ۲۴ تصویر تداخل‌سنج (اینترفروگرام) ایجاد شد.

هر یک از این اینترفروگرامها تغییرات سطح زمین را در بازه‌ی زمانی بین اخذ دو تصویر (تصویر فعلی و تصویر تاریخ قبلی) نشان می‌دهد. برای نشان دادن میزان جابجایی در کل بازه‌ی زمانی تصاویر مورد استفاده، از تحلیل سری زمانی آن‌ها استفاده گردید. بررسی اینترفروگرام‌های حاصل از تصاویر راداری و تحلیل سری زمانی جابجایی نشان داد که حرکت روبه پایین در این توده همچنان وجود دارد و نرخ جابجایی‌ها در راستای دید ماهواره (LOS) 10 mmyr^{-1} می‌باشد. وجود لکه‌های قهوه‌ای رنگ تیره در تصویر تداخل‌سنج، وجود جابجایی به سمت پایین و وقوع زمین لغزش را نشان می‌دهد که این حرکات به صورت راهنمای تغییرات رنگی آورده شده است. اعداد مثبت (رنگ آبی) جابجایی به سمت بالا و اعداد منفی (رنگی قهوه‌ای) جابجایی به سمت پایین دست در راستای دید ماهواره می‌باشد

تقدیر و تشکر

از آژانس فضایی اروپا (ESA) به خاطر در اختیار گذاشتن داده‌های سنجنده ASAR رادار ENVISAT تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

منابع و مأخذ

- Ayala, I., 2002, *Geomorphology, Natural Hazards, Vulnerability and Prevention of Natural Disasters in Developing Countries*, *Geomorphology*, Vol. 47, PP. 107-124.
- Bishop, M.P., James, A., Shroder, J.F., Walsh, S., (2011). *Geospatial technologies in geomorphological mapping: Concepts, issues, and research directions*. *Annals of the Association of American Geographers*, In press.
- Bishop, M.P., Shroder, J.F., (2003). *A perspective on computer modeling and fieldwork*. *Geomorphology* 53, 1-9.
- Bishop, M.P., Shroder, J.F., (2004). *Geographic Information Science and Mountain Geomorphology*. Springer-Praxis, Berlin.
- Bishop, M.P., Shroder, J.F., Colby, J.D., (2003). *Remote sensing and geomorphometry for studying relief production in high mountains*. *Geomorphology* 55, 345-361.
- Gillon, M.D., Hancox, G.T., 1992. *Cromwell Gorge landslides — a general overview*. In: Bell, D.H. (Ed.), *Landslides. Glissement de Terrain*, vol. 1, pp. 83-102.
- Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., Valigi, D., (2009). *Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy*. *Earth and Planetary Science Letters*, 279 (3-4), PP 222-229.
- Guzzetti, F., Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Reichenbach, P., 2002. *Power-law correlations of landslide areas in Central Italy*. *Earth and Planetary Science Letters* 195, 169-183
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, CP., (2008). *The rainfall intensity duration control of shallow landslides and debris flows*. *Landslides*, 5, PP3-17.
- Hong, Y., et al., (2007). *Use of satellite remote sensing data in the mapping of global landslide susceptibility*. *Springer Since, Nat Hazards*, DOI 10.1007/s11069-006-9104-z
- Khavaninzadeh, N., (2011). *Landslide Study using RADAR Interferometry*. Msc theses, university of Tehran, pp 148.

- Lan, H.X., Zhou, C.H., Wang, L.J., Zhang, H.Y., Li, R.H., (2004), *Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China*, Elsevier, *Engineering geology*. vol.76 , 109-128.
- Marston B., (2011). *Multi-Scale and Object-Oriented Analysis for Mountain Terrain Segmentation and Geomorphological Assessment*, MSc thesis, University of Nebraska. PP 94
- Omidvar, E., KAveyan, A., (2010). *estimation of the landslide volume and area in regional scale (Mazandaran province)*, *Iranian Journal of Natural Resources*, Nom. 4, pp 439-455.
- Osmanoglu B., (2011). *Application and development of new algorithm for displacement analysis using InSAR time series*. PhD thesis, University of Miami.164pp.
- Rezaei mogaddam, M.H., Feyzollahpoor, M., Asghari, S., (2011). *Mathematical estimation of the landslide volume and area factors in Saein neck*. *Geography*, Nom 28, pp 203-218.
- Roostaei. Sh., Ahmadzadeh. H., (2005). *GIS-based zonation of environmental hazards influence upon linear structures (Case study Tabriz-Mianeh area)*, *internasional conference of geo hazard and natural disasters*, university of Tabriz, Tabriz, Iran.
- Roostaei. Sh., Ahmadzadeh. H., (2012). *Landslide hazard Zonation in The Tabriz-Marand Road with the Use of GIS*. *Quantitative geomorphological research*, Vol. 1, No 1, PP 47-58.
- Rosenfeld, C. L., 2004, *Geomorphological Hazard*, *Encyclopedia of Geomorphology*, Vol. 1, P.423-426.
- Van Westen, C.J., (1993). *Application of Geographic Information Systems in Landslide Hazard Zonation*. ITC publication, PP15.