پایش حرکات توده‌ای با استفاده از پردازش داده ماهواره راداری و فن تداخل‌سنجی (InSAR) (مطالعه موردی: کلیجان‌رستاق ساری، مازندران)

ناهید قربان نژاد[۱]، سید رمضان موسوی[۲*]، قربان وهاب زاده [۳]، محمد رضا رمضانی [۴]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشدگروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی ساری ، دانشکده منابع طبیعی ساری ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری ،کیلومتر جاده ده ساری نکا روبروی هتل بادله، ایران

[*] ۲. استادیار گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی ساری ، دانشکده منابع طبیعی ساری ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری ،کیلومتر جاده ده ساری نکا روبروی هتل بادله، ایران

۳.دانشیارگروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی ساری ، دانشکده منابع طبیعی ساری ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری ،کیلومتر جاده ده ساری نکا روبروی هتل بادله، ایران

۴. دانش آموخته‌کارشناسی ارشد، فتوگرامتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر تهران، ایران

***پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:** srmmousavi@gmail.com srmmousavi@sanru.ir

چکیده

زمین‌لغزش یکی از مخاطرات است که درنتیجه دخالت عوامل مختلف طبیعی و انسانی در دامنه‌های شیب‌دار رخ می‌دهد. در دهه‌های اخیر به سبب تغییرات اقلیم، دوره‌های خشک‌سالی و تغییرات کاربری اراضی، وقوع آن به همراه خسارت مالی و جانی در اکثر نقاط دنیا قابل‌مشاهده است. کشور ایران و استان مازندران به خاطر وجود شرایط و عوامل مختلف زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدرولوژی، اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی دارای سابقه و زمینه بالای وقوع انواع زمین‌لغزش‌ها است. این مطالعه بر روی پایش و نقشه‌برداری از عرصه‌های طبیعی بخش کلیجان‌رستاق ساری، با استفاده از فن تداخل‌سنجی (InSAR) و پردازش داده‌های راداری و به‌کارگیری نرم‌افزارهای اسنپ (SNAP) متمرکز است. در این پژوهش، به جهت محدودیت پوشش جنگلی منطقه موردمطالعه، از داده‌های راداری ماهواره سنتینل-۱ در بازه‌ی زمانی بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ بهره‌گیری شده است. زمین‌لغزش‌های فعال و عرصه‌های مستعد زمین‌لغزش در منطقه به‌صورت نقشه‌های تخصصی اینترفروگرام پایش شده‌اند. برای صحت سنجی و دقت نتایج، بازدید میدانی به عمل آمد که صحت این مطالعه بیش از ۸۵ درصد بوده است. نتایج این پژوهش نشان داد که منطقه دارای استعداد زمین‌لغزشی بالایی است و عمده عرصه‌های ناپایدار و زمین‌لغزشی مربوط به مناطق نزدیک به گسل‌ها، چشمه‌ها و روی سازندهای حساس شمشک دوران دوم زمین‌شناسی و نیز روی عرصه‌های تغییر کاربری و اطراف جاده‌ها واقع هستند. **۴۲ درصد مناطق مستعد و رانشی در حاشیه جاده‌ها، ۴۰ درصد آنها در مناطق تغییر کاربر یافته و ۱۸ درصد در حاشیه رودخانه‌ها پراکنده هستند.** نتیجه اینکه روش تداخل‌سنجی برای پایش و شناسایی مناطق زمین‌لغزشی در مناطق دارای پوشش گیاهی و کشاورزی، یکی از روش‌های مناسبی است که ازلحاظ هزینه و زمان مناسب است و نتایج این مطالعه برای مدیریت اجرایی مخاطرات منطقه مفید است.

واژه‌های کلیدی: زمین‌لغزش، تصاویر ماهواره‌ای، سنتینل-۱، تداخل‌سنجی، کلیجان‌رستاق، ساری

Commented [1د]: زیرنویس شود

Deleted: در نتیجه

Deleted: قابل مشاهده

Deleted: زمین لغزش

Deleted: آنها

Commented [2د]: اصلاح انواع خطاهای نگارشی املایی و نشانه گذاری با نرم افزار ویراستیار انجام گیرد
https://virastyar.ir/
برای کل متن اجرا شود

Deleted: کیاهی

Deleted: از لحاظ

Mass movement monitoring using satellite radar and interferometry (InSAR) data processing (case study: Kalijan-Rostaq Sari, Mazandaran)

Nahid Gorbannejad[1], Sayed Ramzan Mousavi[2*], Ghorban Vahbzadeh[3], Mohamd Reza Ramzani[4]

1. M.Sc Student, Department of Watershed Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 10 km of Sari - Neka road, in front of Badale hotel, Sari, Iran
2*. Assistant Professor, Department of Watershed Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 10 km of Sari - Neka road, in front of Badale hotel, Sari, Iran
3. Associate Professor, Department of Watershed Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 10 km of Sari-Neka road, in front of Badale hotel, Sari, Iran
4. MSc of Photogrammetry, Khajeh Nasir University of Technology, Tehran, Iran

---

* **Corresponding author e-mail address:** Sayed Ramzan Mousavi[2*]

srmmousavi@sanru.ir srmmousavi@gmail.com

Abstract

Landslide is one of the hazards that occurs as a result of the intervention of various natural and human factors in the steep slopes. In recent decades, due to climate changes, periods of drought, and changes in land use, it can be seen in most parts of the world, along with financial and human losses. The country of Iran and the province of Mazandaran has a high history of occurrence of various types of landslides due to the existence of various conditions and factors of geology, geomorphology, hydrology, climate and land use changes. This study focuses on monitoring and mapping the natural areas of Kilijan-Rostaq Sari sector, using interferometry (InSAR) and radar data processing and using SNAP software. In this research, due to the limitation of the forest cover of the studied area, the radar data of Sentinel-1 satellite has been used in the period between 2014 and 2020. Active landslides and landslide-prone areas in the region have been monitored in the form of specialized interferogram

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, 12 pt, Complex Script Font: Times New Roman, 14 pt

Formatted: Font: Times New Roman, 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Space Before: 0 pt, After: 0 pt, Line spacing: single

Formatted: Font: Times New Roman, 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Font: Times New Roman, 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Font: Times New Roman, 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Font: Times New Roman, 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Font: Times New Roman, 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Font: Times New Roman, 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Space After: 0 pt, Line spacing: single

Formatted: Font: Times New Roman, 12 pt

Formatted: Font: Times New Roman, 12 pt

Formatted: Font: Times New Roman, 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Formatted: Font: Times New Roman, 12 pt, Complex Script Font: 12 pt

Commented [ɜ]: زیرنویس شود

maps. In order to verify the accuracy and accuracy of the results, a field visit was carried out, and the accuracy of this study was more than 85%. The results of this research showed that the region has a high potential for landslides, and most of the unstable and landslide areas are related to the areas near faults, springs, and on the sensitive formations of Shamshak of the second geological period, as well as on the areas of land use change. And they are located around the roads. 42% of prone and drifting areas are scattered along the roadsides, 40% of them are in changed user areas, and 18% are scattered along the banks of rivers. The result is that the interferometry method for monitoring and identifying landslide areas in areas with vegetable and agricultural cover is one of the appropriate methods that is suitable in terms of cost and time, and the results of this study are useful for the executive management of regional risks.

Keywords: Landslide, lunar images, Sentinel-1, InSAR, Kalijan-Rostaq, Sari

مقدمه

در مناطق مختلف دنیا، مخاطرات طبیعی به صور متنوع و در اندازه‌ها، اشکال و محیط مختلف اتفاق می‌افتد که سالانه خسارات و زیان‌های مالی و جانی فراوان به بار می‌آورند (۲۴). از مجموع بلایای طبیعی، زمین‌لغزش یکی از مخاطرات بسیار خطرناک و پرهزینه‌ای بوده به‌نحوی‌که زمین‌لغزش‌ها معمولاً جاده‌ها، آبادی‌ها، شهرها، تأسیسات، جنگل‌ها، مراتع و حوزه‌های آبخیز را دچار خسارات و زیان می‌کنند (۲۲). زمین‌لغزش‌ها (Landslides) جزئی از حرکات توده‌ای (Massmovements) هستند که به‌صورت حرکات تند یا کند مواد سنگی، خاکی یا مجموع هر دو درروی دامنه به سمت پایین تحت تأثیر نیروی جاذبه است (۶ و ۲۰). این پدیده زمین‌شناسی زمانی رخ می‌دهد که نیروی حاصل از وزن مواد بیش از نیروی مقاومت برشی خاک باشد (۲). در چند سال اخیر بارش‌های سنگین و طولانی‌مدت در اکثر نقاط کشور سبب وقوع سیلاب‌های خطرناک و به‌ویژه در استان‌های شمالی و نیز وقوع زمین‌لغزش‌های متعدد گردیده است (۱۰). سرعت فرآیند مطالعات و کاهش هزینه و بالا بودن دقت مطالعات در پیش‌بینی و پیش‌گیری وقوع زمین‌لغزش‌ها از مخاطرات طبیعی یکی از دغدغه‌های جدی مدیران و مردم در مواجه آن‌ها است (۱۰). در ایران، به خاطر کوهستانی بودن بخش وسیعی کشور و وجود فراز و نشیب‌های متنوع، به‌ویژه در نواحی شمال ایران، وقوع پدیده زمین‌لغزش یکی از متداول‌ترین بلای طبیعی به شمار

Commented [دع]: مناسب به نظر می‌رسد. اما چند نکته فنی و علمی می‌تواند بهبود یابد:
۱.تداوم و ارائه‌ی منابع: برای افزایش اعتبار مقاله، می‌توانید در ادامه مقدمه به معرفی و ارجاع به منابع مورد استفاده جدید بپردازید، به‌ویژه برای آوردن اطلاعات آماری و علمی.
۲.توضیحات بیشتر درباره‌ی روش‌های مورد استفاده: به جای اشاره مختصر به روش‌های مورد استفاده، می‌توانید به طور دقیق‌تر و جامع‌تر به این روش‌ها اشاره کنید و اهمیت ویژگی‌های آن‌ها را برجسته کنید.
۳.توضیحات بیشتر درباره‌ی نتایج مطالعه: پس از معرفی موضوع و روش‌ها، می‌توانید به طور مختصر به نتایج اصلی مطالعه اشاره کنید تا خواننده ایده‌ای از محتوای مقاله بگیرد.
٤.محدودیت‌های پژوهش را بیان کنید
٥.اهداف پژوهش را بیان کنید

Deleted: جزیی

Deleted: زمین شناسی

می‌آید (۱۰). استراتژی مطالعه زمین‌لغزش شامل شناخت فرایند، تجزیه خطر و پیش‌بینی زمین‌لغزش در آینده برای کاهش پیشرفت و خسارت ناشی از آن است (۱۷). برای شناخت عوامل مؤثر بر حرکات توده‌ای مطالعات زیادی به‌وسیله ژئومورفولوژیست‌ها صورت گرفته ولی به دلیل پیچیدگی این‌گونه حرکت‌ها و تأثیر عوامل متعدد در آن، هنوز قابل پیش‌بینی نیست. به‌طورکلی می‌توان عواملی مانند جنس سازند زمین‌شناسی، نوع مواد سطحی، شرایط توپوگرافی، نیروی ثقل، وضعیت تکتونیکی، شرایط آب و هوایی و نوع کاربری را در وقوع حرکات توده‌ای مؤثر دانست (۱). زمین‌لغزش موجب ایجاد رسوب و سیلاب‌های گل‌آلود و درنهایت پر شدن مخازن سدها می‌گردد (۲). فعالیت‌های انسانی در سطوح شیب‌دار کوهستانی در طی کواترنری، باعث تشدید رخداد زمین‌لغزش‌های جدید و یا فعالیت مجدد زمین‌لغزش‌های تثبیت‌شده قدیمی می‌شود، هم‌چنین تغییر در ویژگی‌های اقلیمی و درنتیجه آن تغییر در ویژگی‌های هیدرولوژیکی و تنوعات زیستی، باعث رخداد بیش‌ازپیش زمین‌لغزش در این نواحی خواهد شد (۵). ازآنجاکه رخداد گروهی از زمین‌لغزش‌ها به‌واسطه‌ی حرکت کند و بطئی به سهولت قابل‌درک و شناسایی نیست، اندازه‌گیری میزان حرکت آن مستلزم مطالعات و ابزارهای خاصی است. تاکنون روش‌های گوناگونی برای شناسایی و پایش پدیده‌ی زمین‌لغزش و تهیه‌ی نقشه‌های خطر ارائه شده است، از جمله روش تاکئومتری، ترازیابی، فتوگرامتری برد کوتاه، مشاهدات حاصل از شبکه‌های ژئوتیکی (GPS)، تداخل‌سنجی راداری و لیدار (۱۵) هستند. اگرچه رخداد لغزش به عواملی متعددی مانند بارندگی زیاد، وجود چشمه‌های فراوان، جنس لایه‌های زمین و تأثیر گسل‌ها، هم‌جهت بودن شیب لایه‌ها و شیب طبیعی زمین و دخالت انسان بستگی دارد (۱۴)، لیکن شواهد نشان می‌دهد زلزله مهم‌ترین محرک ناپایداری دامنه‌ها است (۲۶). ازآنجاکه پیش‌بینی زمان رخداد زمین‌لغزش‌ها از توان علم و دانش خارج است، لذا با شناسایی مناطق حساس به زمین‌لغزش و رتبه‌بندی آن می‌توان تا حدود زیادی خسارات ناشی از بروز زمین‌لغزش را محدود نمود (۸).

گرایی (۱۱) پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه آبخیز واستان در استان مازندران را با استفاده از فناوری نوین سنجش‌ازدور و روش رگرسیون چندمتغیره مطالعه نمودند، و در این حوضه دارای پوشش گیاهی، ۹ عامل شامل شیب دامنه، جهت دامنه، ارتفاع از سطح دریا، بارندگی، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از شبکه زهکشی، کاربری اراضی و زمین‌شناسی را به‌عنوان عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه هستند و مهم‌ترین عامل تغییر کاربری بالأخص حذف پوشش گیاهی است.

محمدی و همکاران (۲۱) پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از چند مدل در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) را در استان مازندران و بخشی از زیرحوزه رودخانه هراز مطالعه کرده و بیان داشتند که منطقه موردمطالعه به وقوع زمین‌لغزش حساسیت زیادی داشته و نشان داد که نقشه تهیه‌شده ابزار مفیدی در برنامه‌ریزی کاربری اراضی است.

سولاری و همکاران (۱۸) با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری برای مطالعه زمین‌لغزش‌ها در کشور ایتالیا انجام دادند که نشان دادند پدیده زمین‌لغزش به‌طور مکرر نقاط مختلف ایتالیا را تحت تأثیر قرار می‌دهد و خسارات و تلفات اقتصادی زیادی را به همراه دارد. آن‌ها نتیجه گرفتند که در میان انواع تکنیک‌های سنجش‌ازدور، فن تداخل‌سنجی راداری (InSAR) یکی از پرکاربردترین روش برای مطالعات زمین‌لغزش‌ها است.

طلایی و همکاران (۲۵) ارزیابی نقش رسوبات رسی نئوژن در وقوع زمین‌لغزش‌ها را جنوب استان اردبیل، شمال غرب ایران مطالعه کرده‌اند و نشان دادند که دست‌کم ۸۰ درصد از نمونه‌های خاک منطقه دارای پتانسیل تورمی متوسط و بالا بوده، ۸۷/۲ درصد از آن‌ها در

Deleted: قابل درک

Deleted: تا کنون

Deleted: سنجش از دور

Deleted: چند متغییره

Deleted: مهمترین

Deleted: بالاخص

Deleted: زیر حوزه

Deleted: مورد مطالعه

Deleted: تهیه شده

Deleted: زمین لغزش

Deleted: آنها

پهنه‌های با خطر زمین‌لغزش بالا و بسیار بالا قرار می‌گیرند. خاک‌های رسی تورم پذیر یکی از عوامل اصلی وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه هستند.

کوه بنانی و همکاران (۱۶) پژوهشی با عنوان پهنه‌بندی گستره خطر فرونشست زمین با بهره‌گیری از تداخل‌سنجی راداری در منطقه دشت کاشمر و خلیل‌آباد انجام دادند. و بیان داشتند که این منطقه در بیشترین حالت، ۱۷ سانتی‌متر در سال فرونشست دارد و بیشتر در حومه جنوب غرب شهر کاشمر و مناطق غربی دشت خلیل‌آباد متمرکز است. به دلیل ناهمگن بودن نرخ فرونشست، این منطقه مستعد شکل‌گیری شکاف‌های طولی است. نقشه پایانی به‌دست‌آمده می‌تواند به مدیران سازمانی و برنامه ریزان منابع اراضی و خاک در زمینهٔ حفاظت و مدیریت منابع آبی و مخاطرات طبیعی و جلوگیری از تخریب سرزمین کمک شایانی نماید.

لیو و همکاران (۱۷) پایش لغزش مرتبط با انسداد مخزن با استفاده از تداخل‌سنجی رادار روزنه مصنوعی را در منطقه مخزن سد یالونگ چین انجام دادند. نتایج نشان داد که سد پس از آبگیری دچار تغییر شکل آشکاری شده که نباید نادیده گرفته شود. همچنین تغییر شکل ناشی از سه زمین‌لغزش پس از آبگیری مخزن، تمایل به فعالیت و تسریع حرکت داشت و حالت شکست، لغزش پس‌رونده بود. و بیان داشتند که روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، نقش حیاتی در تحقیقات تشخیص زمین‌لغزش و حالت شکست در اطراف مخازن دارد و در ارائه هشدار اولیه جهت کنترل و مدیریت مخاطره وقوع زمین‌لغزش‌های بعدی کمک می‌کند.

ایران به دلیل مساعد بودن شرایط جغرافیایی و فقدان مدیریت جامع محیطی و عدم رعایت آستانه‌های محیطی به‌عنوان یک کشور پرخطر وقوع زمین‌لغزش‌ها بشمار می‌آید؛ به‌طوری‌که جزء ۱۰ کشور بلاخیز جهان قرارگرفته است و هرساله پدیده‌ی زمین‌لغزش در مناطق کوهستانی و مرتفع کشور خسارات و صدمات قابل‌توجه‌ای به بار می‌آورد (۱۳). با توجه به این‌که در استان مازندران زمین-لغزش‌های زیادی رخ می‌دهد، می‌توان با استفاده از فن سنجش‌ازدور از نوع تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و GIS مناطق مستعد زمین‌لغزش را به صورت تصویر و نقشه رقومی به نام اینترفروگرام نمایش داد و از آن برای تجزیه و تحلیل خطر و پیش‌بینی وقوع مجدد زمین لغزش‌های آتی استفاده و از بروز خسارت‌های مالی و جانی ناشی از آن جلوگیری کرد. این روش می‌تواند به عنوان یک الگوی جدید برای پایش و نمایش حرکات توده‌ای زمین نسبت به روش‌های معمولی پهنه‌بندی جایگزین شود؛ زیرا از دقت و سرعت بالاتر و هزینه کمتر برخوردار است.

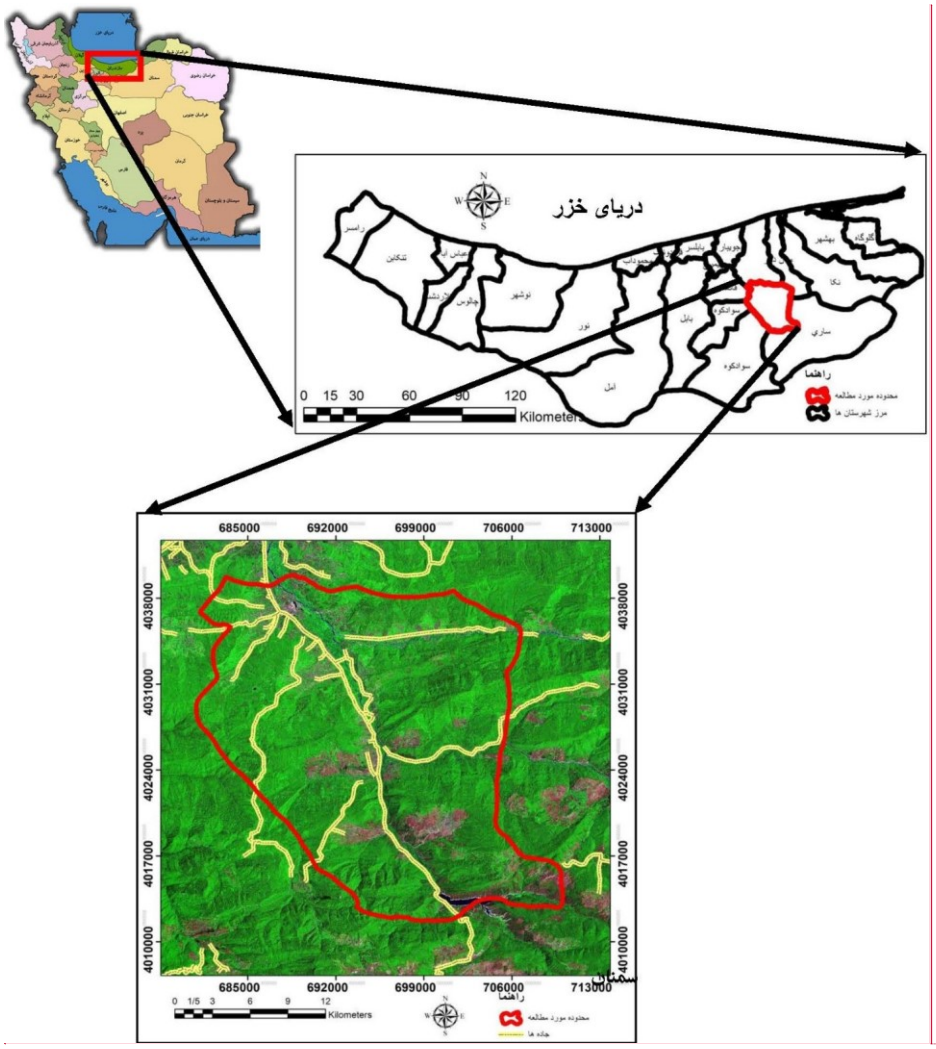
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در استان مازندران، در جنوب شهر ساری و در بخش کلیجان‌رستاق واقع شده است که دارای موقعیت جغرافیایی بین طول‌های جغرافیایی ″ ۶,۶۰ ′ ۰,۶ ° ۵۳ و ″۵۹ ′۲۰۲۶ °۵۳ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ″۵۱,۷۲ ′۱۳ °۳۶ و ″۲۹′۱۴,۳۰ °۳۶ شمالی واقع است (شکل ۱). عمده این منطقه دارای پوشش جنگلی و کشاورزی و آب و هوای گرم و مرطوب و پوشش جنگلی متراکم و میانگین بارندگی حدود ۱۰۰۰ میلی‌متر در سال است. این منطقه از لحاظ زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی دارای وضعیت ویژه‌ای بوده به‌نحوی‌که بین دو گسل بزرگ و فعال خزری و گسل شمال البرز واقع است. از جنبه سنگ‌شناسی شامل بیرون‌زدگی‌های سنگی دوران دوم، سوم و چهارم زمین‌شناسی است. بیش‌ترین بیرون‌زدگی سنگی شامل سازندهای دوران دوم زمین‌شناسی به‌ویژه سازندهای شمشک که دارای حساسیت فرسایش و ناپایداری بالا در شرایط بارندگی و بارش هستند. این منطقه، ازلحاظ زمین‌شناسی ساختمانی و تکتونیک،

Commented [دە]: ۱.عدم ارائه‌ی جزئیات کافی درباره‌ی روش تداخل‌سنجی (InSAR): می‌توانید به جزئیات بیشتری درباره‌ی روش تداخل‌سنجیInSAR ، از جمله تکنیک‌ها و مراحل انجام آن پرداخته و نحوه‌ی استفاده از داده‌های ماهواره‌ای راداری برای پایش حرکات توده‌ای را شرح دهید.
۲.نبود توضیحات کافی در مورد پردازش داده‌های ماهواره‌ای: باید به طور دقیق‌تر توضیح دهید که چگونه داده‌های ماهواره‌ای راداری در این مطالعه پردازش شده‌اند، از جمله نحوه‌ی تفسیر تصاویر راداری، استخراج اطلاعات مورد نیاز، و تجزیه و تحلیل نتایج.
۳.نبود توضیحات کافی در مورد تهیه‌ی اینترفروگرام: می‌توانید به تفصیل بیشتری درباره‌ی نحوه‌ی تهیه‌ی اینترفروگرام و نحوه‌ی تفسیر آن‌ها به عنوان ابزاری برای شناسایی و تحلیل حرکات توده‌ای اشاره کنید.
٤.عدم اشاره به اطلاعات فنی مانند دقت و صحت روش‌ها: می‌توانید در مقدمه‌ی این بخش به اطلاعات فنی مانند دقت و صحت روش‌ها، محدودیت‌ها و مزایای استفاده از هر یک از روش‌های InSAR و تداخل‌سنجی اشاره کنید.
با اضافه کردن این جزئیات و توضیحات، بخش مواد و روش‌ها برای مقاله شما بهبود خواهد یافت.

دارای ساختارهای چین‌خورده و تاقدیس و ناودیس‌های متعدد با روند شرقی – غربی است. گسل‌های مختلف در منطقه وجود دارند که عمدتاً دارای روند شرقی غربی است. با این وجود بیرون‌زدگی‌های آن‌ها را می‌توان در برخی از مناطق مورد مطالعه از قبیل کنار جاده‌ها مشاهده کرد. نهشته‌های کرتاسه بیشتر در بالادست و در جنوب منطقه مورد مطالعه گسترش دارند و بیشتر از مارن و مارن سیلتی به رنگ خاکستری متمایل به آبی تشکیل شده‌اند. نهشته‌های پالئوسن در این منطقه در بخش‌های شرقی و جنوب شرقی گسترش دارند و این نهشته‌ها معمولاً شامل مارن و با میان لایه‌های آهکی، آهک ماسه‌ای و مارنی هستند. بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده در برخی از قسمت‌های منطقه، نهشته‌های کنگلومرایی و ماسه‌سنگی و حتی نهشته‌های گچی وجود دارد. رسوبات سطحی منطقه متشکل از آبرفت‌های بستر رودخانه، نهشته‌های سیلابی، پادگانه‌های آبرفتی و آب‌شسته‌ی دامنه‌ای هستند. پادگانه‌های آبرفتی قدیمی بیشتر در پای دامنه‌ها وجود دارند شامل شن، ماسه، قلوه‌سنگ هستند (۱۰).



شکل ۱. نقشه‌ی موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در کشور و استان مازندران

Fig 1. Map of the geographical location of the study area in the country and Mazandaran province

در این مطالعه جهت پایش و نمایش زمین‌لغزش‌های موجود و کشف مناطق مستعد زمین‌لغزشی در منطقه کلیجان‌رستاق ساری با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای راداری سنجیده‌ی سنتینل ۱ در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ با تکنیک‌های تداخل‌سنجی (InSAR) در محیط نرم افزاری اسنپ (SANAP) پردازش و آنالیز شده و نتایج تصویری به صورت اینترفروگرام تهیه گردید. از روی این تصاویر تداخل‌سنج پیکسل‌های منتخب موسوم به پراکنش کننده‌های پایدار حدود دوازده هزار پیکسل در روش تداخل‌سنجی پراکنش کننده‌های پایدار و یازده هزار پیکسل در روش تداخل‌سنجی با خطوط مبنای در محدوده منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است. در ادامه‌ی پردازش نتایج

Commented [د٦]: شکل فاقد کیفیت است
نقشه‌ها خوانا بزرگ و باکیفیت (هر نقشه با حداقل اندازه ۱۳×۱۰ سانتي¬متر) با داشتن جهت شمال، اعداد گرید در حاشیه و اعداد مقیاس و راهنماي نقشه ارخوانا و با کیفیت و با نوشته ها فونت فارسی Blotus ارائه گردد.
درضمن نسبت مقیاس طول و عرضی هنگام درج نقشه ثابت باشد

بجای گرید از گراتیکول برحسب درجه و دقیقه استفاده شود
درمقیاس نباید عدد اعشاری دیده شود

Commented [د7]: فارسی شود

خروجی هر دو فن با یکدیگر تلفیق و ادغام گردید تا نقاط هم‌پوشانی هر دو روش مشخص گردیده است؛ و نتایج هردو روش مذکور نشان دهنده وجود جابجایی در توده‌های لغزشی کوچک و بزرگ منطقه و نشان از جابه‌جایی آن‌ها است (شکل ۲).

شکل ۲. تصویر میدانی از زمین‌لغزش‌های جاده‌ای بخش کلیجان‌رستاق ساری الف) رانش جاده‌ای محدوده روستای واستان ب) رانش جاده ای روستای اجارستاق

Fig 2. Field picture of road landslides in Kalijan-Rostaq District of Sari a) Road landslide in Vastan village area b) Road landslide in Ajarstaq village

تداخل‌سنجی یا InSAR[1]

فن تداخل‌سنجی (InSAR)، یک فناوری نوین دور سنجی است. در دهه‌های اخیر، با هدف مطالعه حرکات سطوح زمین، به‌ویژه در پدیده‌هایی نظیر زمین‌لغزش‌ها، زلزله‌ها و فرونشست‌ها استفاده می‌شود. در زلزله ۱۹۹۲ لندرز کالیفرنیا امریکا، برای اولین بار در علوم زمین این فن به کار گرفته شد. از این روش تاکنون در سراسر دنیا برای بررسی انواع بلایای طبیعی که باعث جابه‌جایی سطح زمین می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرد (۷). برای مطالعه پدیده زمین‌لغزش‌ها در بعضی از مناطق دنیا از فن دورسنجی استفاده شده است (۲۳). در این فن، با استفاده از تلفیق داده‌های به‌دست‌آمده از سامانه‌های تصویربرداری رادار نصب شده بر سکوهای ماهواره‌ای یا هواپیمایی، حرکت، ارتفاع و تغییرات سطح زمین نقشه‌برداری و پایش می‌شوند. اساس کار در این روش استفاده از تصاویر تکراری رادار از یک منطقه در دو زمان متفاوت است. با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته تصویری که از یک منطقه در یک‌زمان مشخص برداشت می‌شود (پایه) با تصویری که از همان منطقه در زمان دیگر توسط همان سنجنده برداشت می‌شود (پیرو)، ترکیب می‌شود. تصاویر به‌دست‌آمده حاوی مقادیر مختلط فاز و دامنه هستند (۱۲). بایوجی و همکاران (۴) بیان کردند که تغییرات ایجاد شده در سطح زمین،

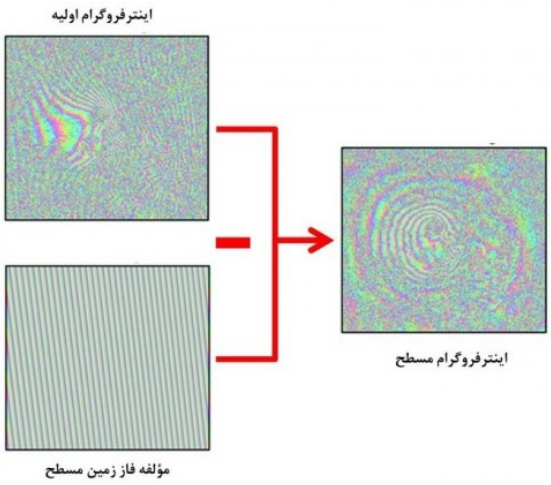
1- Interferometry Synthetic Aperture Radar

باعث ایجاد اختلاف فاز در دو تصویر رادار در دو زمان مختلف می‌گردد. اختلاف فاز به‌دست‌آمده از تصاویر پایه و پیرو، نشان‌دهنده میزان تغییرشکل در فاصله زمانی دو گذر ماهواره‌بر فراز عرصه است.

اینترفروگرام

اینترفروگرام یکی از نقشه‌های کاربردی و بصری رنگی و مدنی است که به وضوع تغییرات و جابه جایی افقی سطوح دامنه‌ها و عرصه‌های زمین را نمایش می دهد. امروزه با استفاده از اینترفروگرام در شناسایی وضوح میزان جابه‌جایی عمودی و افقی سطح زمین درنتیجه‌ی وقوع حوادث و مخاطرات زمین نظیر زلزله و زمین‌لغزش و یا فرونشست به شکل تصاویر رنگی و نوار گونه که میزان جابه‌جایی سطح زمین را در قبل و بعد از وقوع حوادث نشان می‌دهد (۱۸). در شکل ۳ اختلاف فاز دو تصویر برای محاسبه ارتفاع بکار می رود. در تداخل سنجی تفریقی با حذف اطلاعات توپوگرافی با استفاده از یک مدل ارتفاعی یا تصویر سوم، تداخل نمایی بدست می آید که تغییر ارتفاع در اثر پدیده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. اگر دو تصوی راداری (SAR) در زمان‌های متفاوت و اختلاف‌منظر صفر تهیه شده باشند، اطلاعات جابجایی منطقه را می‌توان استخراج کرد. درواقع، در بازه زمانی بین برداشت دو تصویر ممکن است که موقعیت مکانی نقاط به دلایلی همچون زلزله، زمین‌لغزش و یا فرونشست تغییر کند. این تغییرات را می‌توان به روش تداخل‌سنجی رادار دریچه مصنوعی دیفرانسیلی[1] شناسایی کرد. برای تولید نقشه جابجایی سطح زمین لازم است که اثرات فاز توپوگرافی و فاز اتمسفری برداشته شود. فاز توپوگرافی را به‌راحتی می‌توان با در اختیار داشتن مدل ارتفاعی رقومی زمین محاسبه و اثر آن را حذف کرد. اگرچه در سیستم سار (SAR) ، سیگنال رادار قادر به نفوذ در پوشش‌های ابری است اما فاز سیگنال به‌شدت تحت تأثیر شرایط اتمسفری به‌ویژه بخارآب است. به همین علت، در تهیه نقشه جابجایی سطح زمین لازم است که اثر فاز اتمسفری نیز برداشته شود. ازآنجاکه شرایط اتمسفری به‌صورت رندم تغییر می‌کند، مؤلفه فاز اتمسفری را می‌توان به‌صورت یک فرآیند سفید با فرکانس مکانی پایین در نظر گرفت و آن را با استفاده از روش‌های فیلتر کردن در دو حوزه زمان و مکان حذف کرد. پس از حذف اثر فاز توپوگرافی و فاز اتمسفری، فاز جابجایی به دست می‌آید که آن را می‌توان به دو مؤلفه خطی و غیرخطی تجزیه کرد (۲۵).

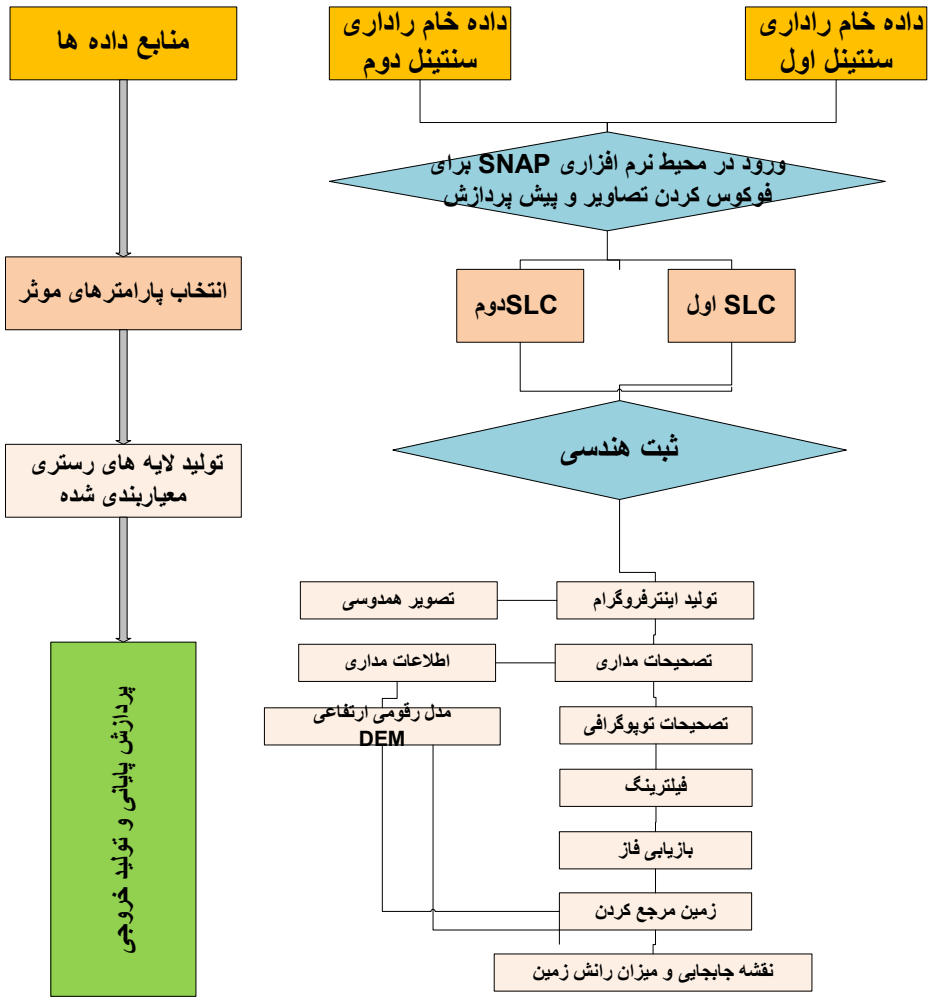
[1] Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar



شکل ۳. تصویری از تولید اینترفروگرام مسطح با استفاده از داده‌های راداری

Fig 3. An image of flat interferogram generation using radar data

در این مطالعه از آن جای که داده‌های ماهواره‌ای راداری سنتینل ۱ بکار گرفته شده، از نرم‌افزار اسنپ (SNAP) و همین‌طور نرم‌افزار ENVI برای پردازش داده راداری بکارگیری شد که مراحل تغییر در به‌صورت فلوچارت و دیاگرام در زیر می‌آید (شکل ۴). مدیریت زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان یکی از مخاطرات ژئومورفولوژی معمولاً شامل سه فاز کلی است که عبارت از شناسایی لغزش‌ها، پایش لغزش‌ها و درنهایت پایداری لغزش‌ها معمولاً با عملیات عمرانی همراه است. در مرحله اول یعنی شناسایی لغزش‌ها معمولاً از تصاویر ماهواره‌ای و پردازش آن‌ها، عکس‌های هوایی، عکس‌های پهبادی و نیز بازدیدهای میدانی کمک گرفته می شود، به بیانی دیگر از این اطلاعات، داده‌ها، مدارک، تصاویر و ابزارها برای شناسایی زمین‌لغزش‌ها در حوزه‌های مختلف استفاده می‌گردد. با تصویر چشمی و تصاویر ماهواره‌ای، پهبادی و عکس‌های هوایی توسط افراد باتجربه و نیز بازدیدهای میدانی گروه زمین‌شناسی و فهرست برداشت‌ها از زمین-لغزش‌ها با خصوصیات ظاهری و رفتاری آن‌ها تعیین می‌شود. در انتهای این بررسی نقشه‌های تحت عنوان نقشه‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش تهیه می‌شود. این روند اولاً زمان‌بر و حاوی اشتباهات و خطاهای دید انسانی بوده و ثانیاً در این تصاویر تنها لغزش‌های به وقوع پیوسته قابل‌تشخیص و بررسی خواهم بود؛ اما به جهت وسعت بالای تصاویر راداری اندازه‌ی چند ده کیلومتری تصاویر راداری می‌توان به‌راحتی از فن تداخل‌سنجی (InSAR) به‌منظور کشف شناسایی جابه‌جایی و تغییرات سطحی زمین استفاده کرد. با استفاده از نقشه‌های نرخ جابه‌جایی حرکات سطحی یک منطقه و پهنه وسیع در مدت‌زمان تهیه تصاویر موردبررسی و پایش قرار داد؛ یعنی اطلاعات به‌دست‌آمده از این خروجی فن تداخل سنجی راداری به نام نقشه‌های تصویری اینترفروگرام می‌توان روند تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را سرعت بخشیده و اعتبار و صحت اطلاعات آن را نیز بهبود بخشید. هم‌چنین با ملاحظه مناطق لغزشی در تصاویر ماهواره‌ای و مشاهده سطح توپوگرافی آن احتمال اینکه جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده ناشی از زمین‌لغزش باشد را نشان بدهد.



شکل ۴. فلوچارت روش تحقیق منطقه جنوب ساری

Fig 4. Flowchart of the research method of South Sari region

نتایج

همان‌طور که در نقشه (شکل ۵) ملاحظه می‌شود منطقه مورد مطالعه در بخش جنوب شهر ساری و دارای پوشش جنگلی و زراعی و آبادی‌های مختلف است این منطقه ازلحاظ توپوگرافی دارای شیب و ناهمواری‌های ملایم و به‌صورت تپه‌ماهوری است. با توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل ۶). سازندهای دوران سوم و چهارم پراکندگی دارند و عمده سازندها دارای حساسیت بالای فرسایشی بوده و باوجود گسل‌های فعال در منطقه عمده دامنه‌های مورد مطالعه دارای ناپایداری و فرسایش بالا هستند. لذا همان‌طور که در نقشه توزیع

Commented [د۸]: در این بخش ایرادات فنی و علمی برای بیان نتایج مقاله "پایش حرکات توده¬ای با استفاده از پردازش داده¬ ماهواره راداری و فن تداخل‌سنجی (InSAR) (مطالعه موردی: کلیجان¬رستاق ساری، مازندران)" به شرح زیر است:

1.عدم توضیحات کافی درباره‌ی نتایج حاصل از پردازش داده‌های ماهواره‌ای: نیاز به توضیحات بیشتری در مورد نتایج حاصل از پردازش داده‌های ماهواره‌ای راداری، از جمله تحلیل اینترفروگرام‌ها و تفسیر آن‌ها برای شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش و تحلیل جابه‌جایی سطوح زمین می‌باشد.

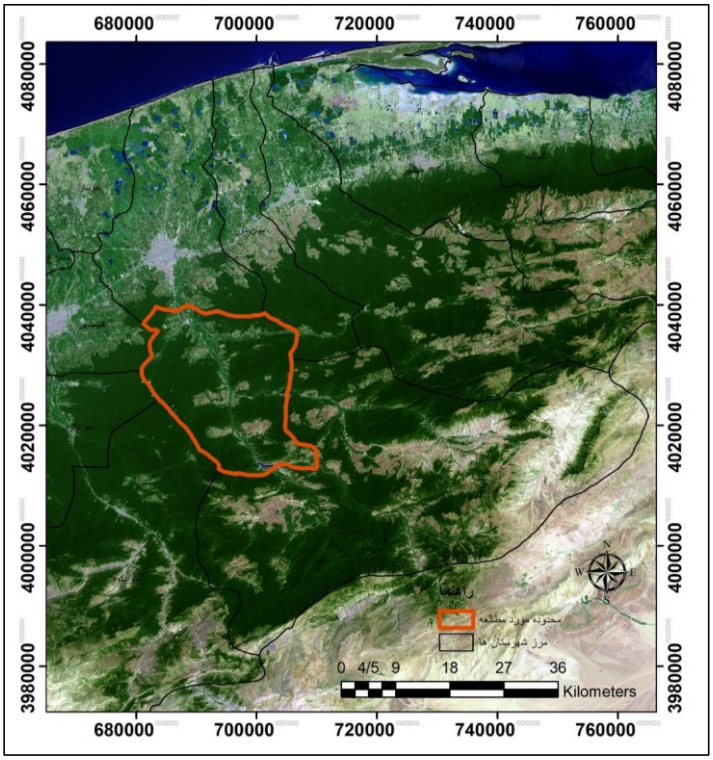
2.عدم توضیحات کافی درباره‌ی عوامل موثر بر حرکات توده‌ای: می‌توانید به جزئیات بیشتری درباره‌ی عوامل موثر بر حرکات توده‌ای مانند وجود گسل‌های فعال، تغییرات کاربری اراضی، وجود سازندها و سنگ‌های حساس به فرسایش و سست، و اثرات آن‌ها بر جابجایی سطوح زمین اشاره کنید.

3.عدم ارائه‌ی توضیحات کافی درباره‌ی نتایج تداخل‌سنجی: می‌توانید به توضیحات بیشتری درباره‌ی نتایج تداخل‌سنجی از جمله نقشه نرخ جابجایی سطحی و توزیع مناطق مستعد زمین‌لغزش از طریق این روش اشاره کنید.

4.عدم ارجاع به اطلاعات مرجع و مقایسه آنها با این تحقیق: برای افزایش اعتبار نتایج، می‌توانید به اطلاعات مرجعی که برای تحلیل و تفسیر نتایج استفاده شده است ارجاع دهید و مقایسه نمایید .

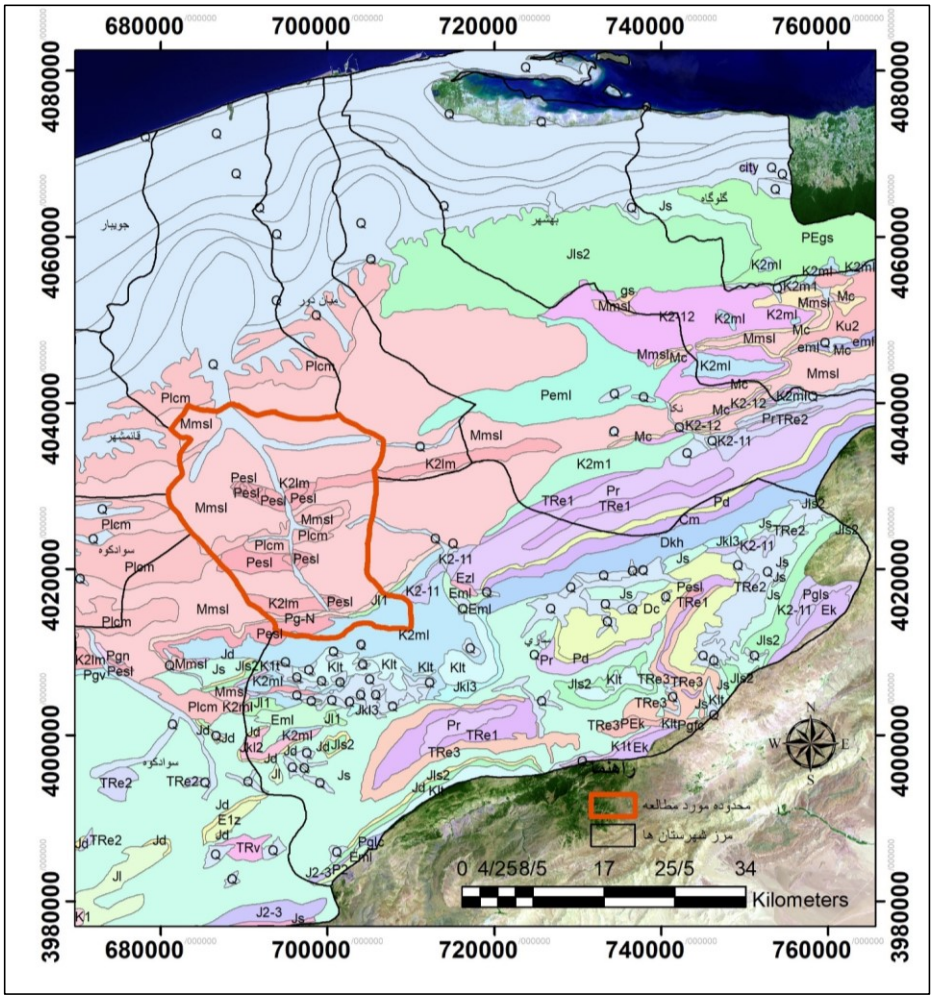
با اضافه کردن این توضیحات و جزئیات، بخش نتایج مقاله شما بهبود خواهد یافت و مطالعه‌ی خواننده را راحت‌تر و مفیدتر خواهد کرد.

زمین‌لغزش‌های تاریخی و قدیمی (شکل ۷) ملاحظه می‌شود تعداد زیادی زمین‌لغزش به شکل‌های مختلف رخ‌داده است. از این نقشه و موقعیت پراکندگی زمین‌لغزش‌ها نسبت به موقعیت رودخانه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که تعداد زیادی از زمین‌لغزش‌ها در دو طرف دامنه‌های رودخانه‌ها و دره‌ها واقع‌شده‌اند. نقشه توزیع گسل‌ها، زلزله‌های تاریخی و آبادی‌ها و رودخانه‌های اصلی و موقعیت منطقه مورد مطالعه (شکل ۸) نشان می‌دهد که بین محل وقوع زمین‌لغزش‌ها و گسل‌ها و محل کانون زلزله‌های قدیمی و رودخانه‌ها و تغییر کاربری رابطه نزدیک و مستقیمی وجود دارد.



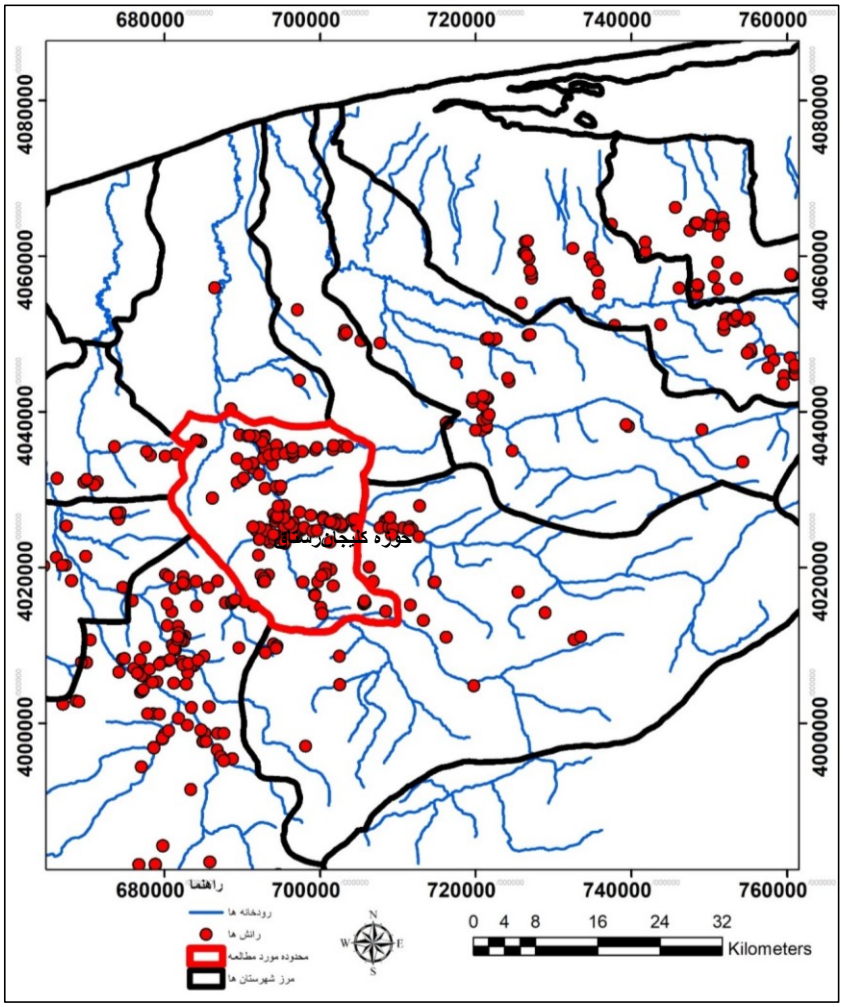
شکل ۵. تصویر ماهواره‌ای از منطقه مورد مطالعه و اطراف با پردازش داده ماهواره لندست ۸

Fig 5. Satellite image of the studغ area and its surroundings with Landsat 8 satellite data processing



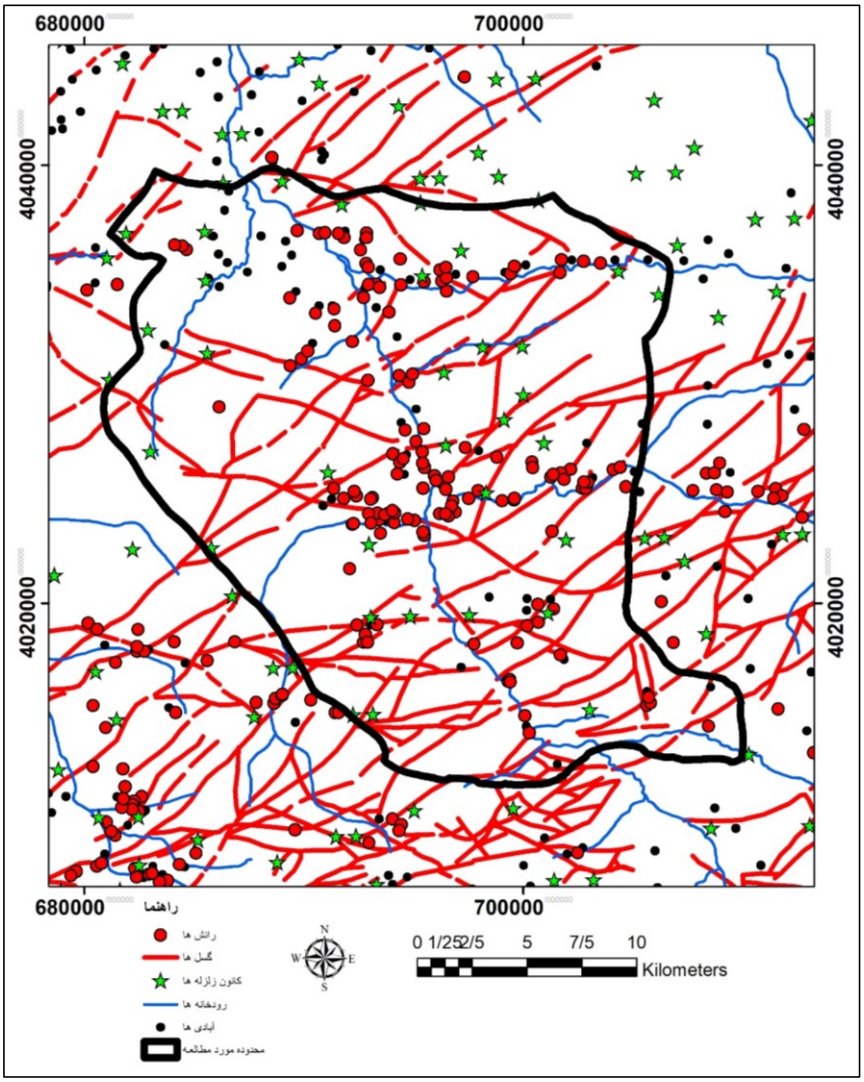
شکل ۶. نقشه زمین‌شناسی و توزیع سازندهای مختلف در منطقه مورد مطالعه و اطراف آن

Fig 6. Geological map and distribution of different formations of the studied area and its surroundings



شکل ۷. نقشه توزیع زمین‌لغزش‌های تاریخی و قدیمی و رودخانه‌های اصلی و موقعیت منطقه مورد مطالعه و اطراف آن

Fig 7. Distribution map of historic and old landslides and main rivers and the location of the studied area and its surroundings



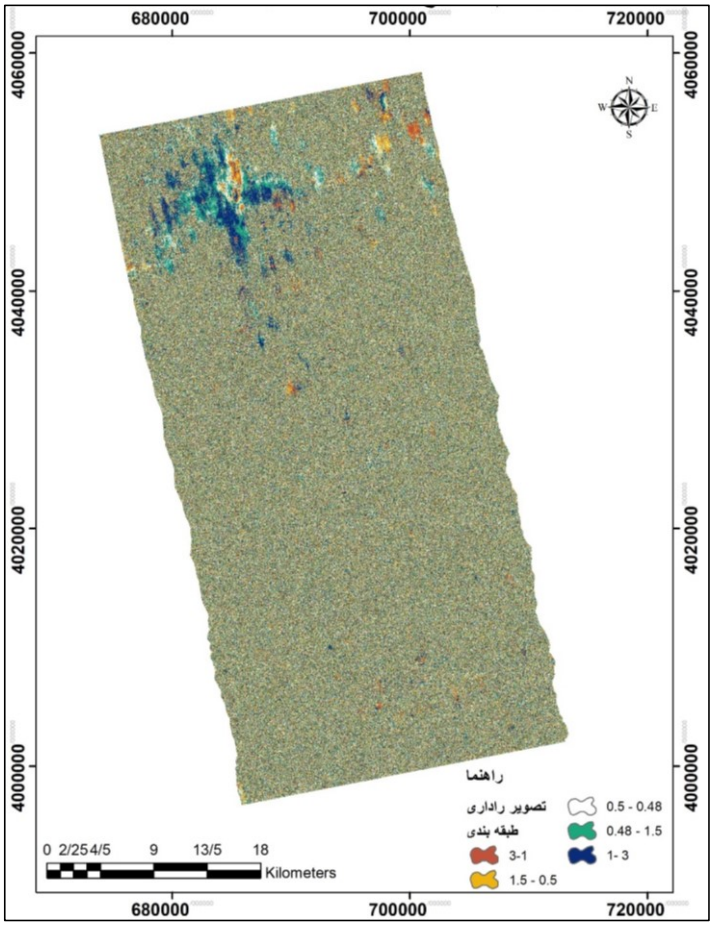
شکل ۸. نقشه توزیع گسل‌ها، زلزله‌های تاریخی، آبادی‌ها، رودخانه‌های اصلی و موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig 8. Distribution map of faults, historical earthquakes, settlements and main rivers and the location of the studied area

با پردازش داده‌های ماهواره‌ای راداری سنتینل ۱ در دو بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۲۰ و در محیط نرم‌افزاری اسنپ (Snap) نقشه اینترفروگرام زوج داده راداری سنتینل ۱ (شکل ۹) تولید شده که توزیع و پراکندگی مناطق زمین‌لغزشی و مستعد زمین‌لغزش را به‌صورت تصویری و رنگی نشان می‌دهد. از این نقشه تولیدشده می‌توان پتانسیل بالای زمین‌لغزشی این منطقه را پایش و نمایش داد. دلایل فراوانی ناپایداری دامنه‌های این منطقه به دلایل مختلف نظیر وجود گسل‌های فعال، وجود سازندها و سنگ‌های حساس به فرسایش و سست،

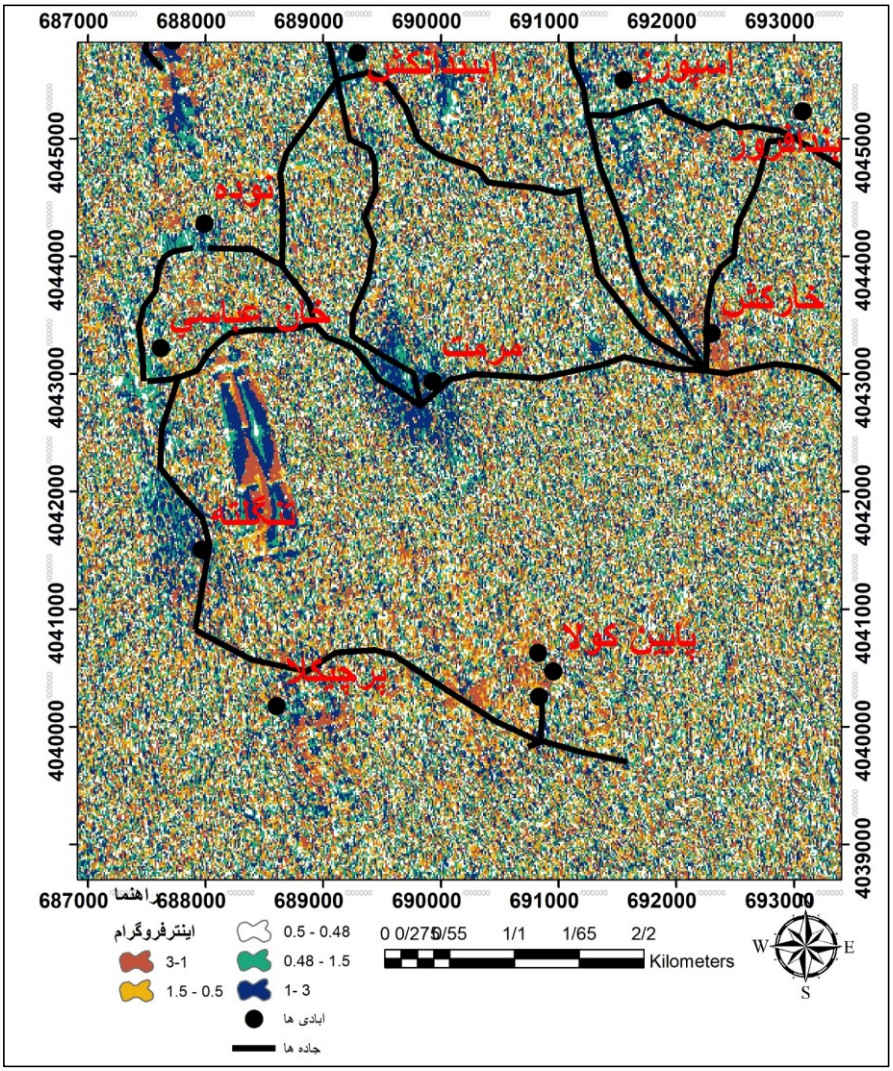
تغییرات کاربری اراضی، رودخانه‌ها و آبراهه‌های متعدد است. با توجه به وجود زمین‌لغزش‌های بزرگ در (شکل‌های ۹،۱۰،۱۱،۱۲) موقعیت جابه‌جایی و زمین‌لغزش‌های فعال نمایش داده‌شده است.

هم‌چنین نتایج این تحقیق نشان داد که علاوه بر توده‌های لغزشی موجود و برسی شده از قبل در منطقه، در چندین بخش حرکت و جابه‌جایی نسبت به خط دید سنجنده وجود دارد که هنوز آثار مخصوصی در منطقه به نمایش نگذاشته و لذا ممکن است در آینده این مناطق تبدیل به حرکت توده‌ای بزرگی شوند. متوسط نرخ جابه‌جایی سطوح زمین در راستای دید سنجنده در روش تداخل‌سنجی پراکنش کننده‌ای پایدار بین ۵/۱ تا ۴/۷- میلی‌متر در سال هست.



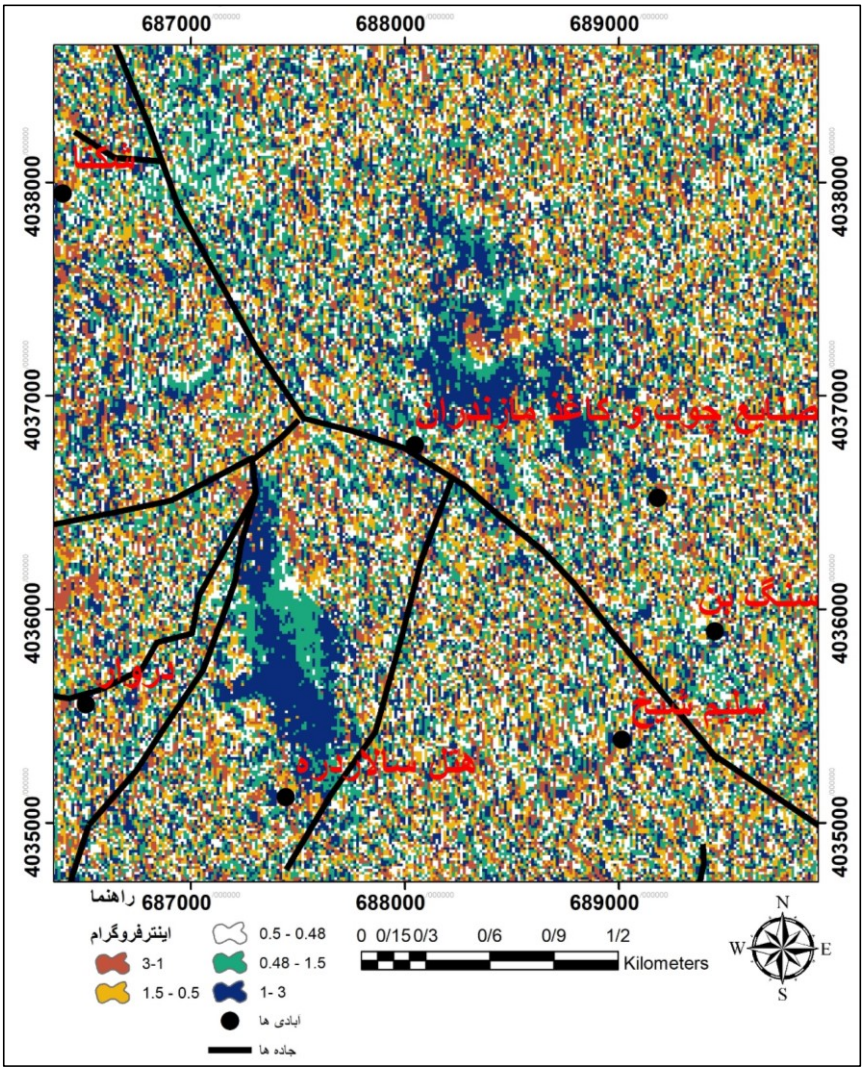
شکل ۹. نقشه نرخ جابجایی سطحی حاصل از فن تداخل‌سنجی با پراکنش کننده پایدار

Fig 9. Surface displacement rate map obtained by interferometric technique with stable scatterer



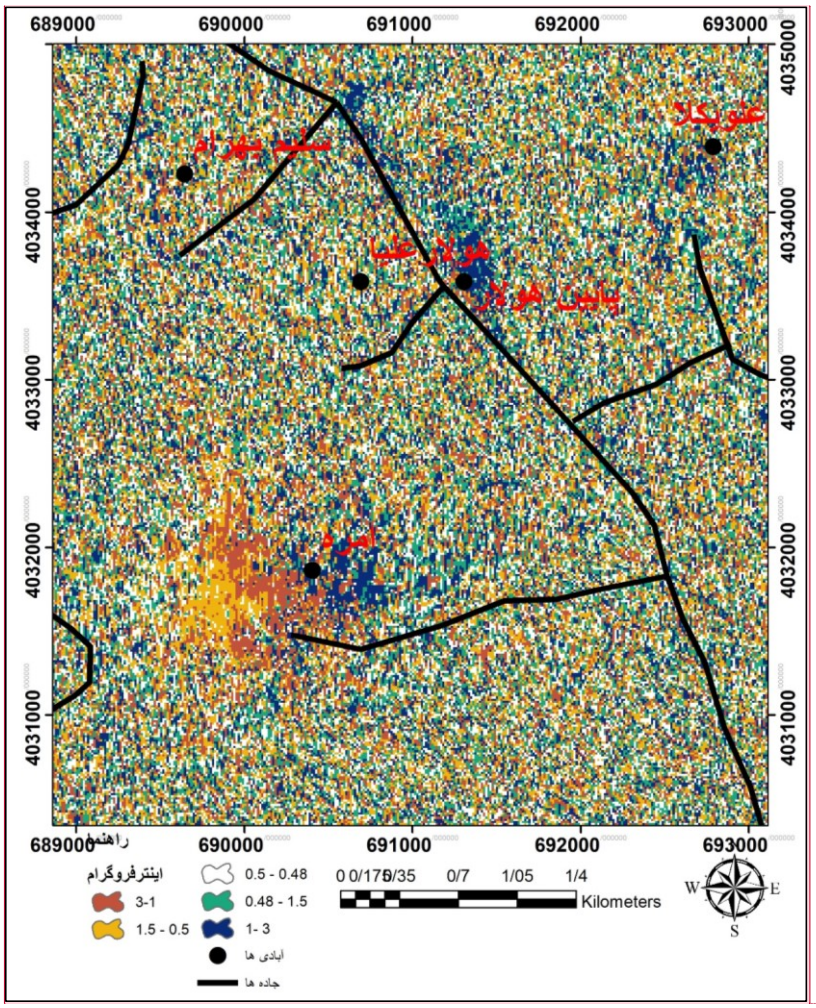
شکل ۱۰. نقشه موقعیت پراکندگی نقاط جابجایی سطحی زمین‌لغزش‌ها و مناطق مستعد درروی اینترفروگرام از پردازش زوج داده راداری سنتینل-۱ در اطراف روستای پایین کولا و اطراف.

Fig 10. The location map of the distribution of the points of surface displacement, landslides and prone areas on the interferogram from the data pair processing of Sentinel-1 radar around Painkoula village and the region



شکل ۱۱. نقشه موقعیت پراکندگی نقاط جابجایی سطحی زمین‌لغزش‌ها و مناطق مستعد درروی اینترفروگرام از پردازش زوج داده راداری سنتینل-۱ در اطراف روستای سنگ بن و منطقه.

Fig 11. The location map of the distribution of the points of surface displacement, landslides and prone areas on the interferogram from the data pair processing of Sentinel-1 radar around Seng Ben village and the region.



شکل ۱۲. نقشه موقعیت پراکندگی نقاط جابجایی سطحی زمین‌لغزش‌ها و مناطق مستعد برروی اینترفروگرام حاصل از پردازش زوج داده راداری سنتینل-۱ اطراف روستای امره و منطقه.

Fig 12. Map of the location of the distribution of the points of surface displacement, landslides and prone areas on the interferogram resulting from the pair processing of the Sentinel-1 radar data around the village of Amre and the region..

بحث و نتیجه‌گیری

زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان یکی از بلایای طبیعی در استان مازندران هرساله در اکثر نقاط شیب‌دار به دلایل مختلف نظیر وجود گسل‌های فعال، بارندگی شدید، تغییرات کاربری اراضی، وجود سازندهای حساس و سست رخ می‌دهد. این پدیده زمین‌شناسی که معمولاً خسارات جانی و مالی به همراه دارد عمدتاً به روش‌های سنتی و قدیمی موردبررسی قرارمی‌گیرد. در این مطالعه از روش جدید با

Commented [د۹]: بجای گرید از گرانیکول برحسب درجه و دقیقه استفاده شود

Commented [د۱۰]:

1.عدم ارائه جزئیات کافی از روش‌های استفاده شده: نیاز به توضیحات بیشتر درباره روش‌های استفاده شده برای تحلیل داده‌های ماهواره‌ای و تداخل‌سنجی، از جمله توضیحات در مورد نرم‌افزارها و الگوریتم‌های مورد استفاده است.

2.عدم ارائه توضیحات کافی در مورد مزایا و معایب روش انتخابی: می‌توانید به جزئیات بیشتری درباره مزایا و معایب استفاده از روش تداخل‌سنجی InSAR نسبت به روش‌های دیگر اشاره کنید.

3.عدم ارجاع به اطلاعات مرجع: برای افزایش اعتبار نتایج، می‌توانید به اطلاعات مرجعی که برای تحلیل و تفسیر نتایج استفاده شده است ارجاع دهید.

4.عدم بیان دقیق و کامل نتایج: نیاز به بیان دقیق‌تر و کامل‌تر نتایج حاصل از تحلیل داده‌های ماهواره‌ای و تداخل‌سنجی، از جمله ارائه ارقام دقیق از نرخ جابه‌جایی سطوح زمین و توزیع مناطق مستعد زمین‌لغزش، و همچنین بررسی مقایسه‌ای با روش‌های دیگر است.

با اضافه کردن این توضیحات و جزئیات، بخش بحث و نتیجه‌گیری مقاله شما بهبود خواهد یافت و مطالعه‌ی خواننده را راحت‌تر و مفیدتر خواهد کرد.

استفاده از داده‌های راداری سنتینل ۱ و روش تداخل‌سنجی (InSAR) با استفاده از نرم‌افزار اسنپ (Snap) تولید نقشه‌های اینترفروگرام شده است. در نقشه اینترفروگرام تولیدی از داده‌های راداری توزیع و پراکندگی مناطق زمین‌لغزشی و مستعد زمین‌لغزش به‌صورت رنگی و نوارها با نرخ جابه‌جایی مشخص شده است. این نقشه نشان می‌دهد که منطقه دارای پتانسیل زمین‌لغزشی بالایی است و نیازمند اجرای عملیات پایداری و تثبیت زمین‌لغزش است. نقشه‌های تولیدشده در محیط جی ای اس (GIS) و برداشت‌های میدانی به‌طور دقیق رابطه محل وقوع زمین‌لغزش‌ها با گسل خوردگی‌های متعدد در منطقه و نیز با سازندهای حساس به فرسایش، تغییرات کاربری اراضی و شبکه هیدروگرافی را نشان می‌دهد نتایج این پژوهش نشان داد که منطقه دارای استعداد زمین‌لغزشی بالایی بوده و عمده عرصه‌های ناپایدار و زمین‌لغزشی مربوط به مناطق نزدیک به گسل‌ها، چشمه‌ها و روی سازندهای حساس شمشک دوران دوم زمین‌شناسی و نیز روی عرصه‌های تغییر کاربری هستند؛ بنابراین، روش تداخل‌سنجی برای پایش و شناسایی مناطق زمین‌لغزشی در مناطق دارای پوشش، یکی از روش‌های است که از لحاظ هزینه و زمان مناسب، ارزان‌قیمت و با صحت بالاتر است. نتایج این تحقیق در مقایسه با روش‌های دیگر نظیر مدل رگرسیون لجستیک (۱۷) و روش مطالعات GIS (۲۱) دارای مزایا و دقت میدانی بیشتری است. یافته‌های حاصل از به‌کارگیری روش تداخل سنجی InSAR در این تحقیق ضمن تأیید و انطباق یافته‌های پژوهشگران مختلف (شریفی کیا (۲۳)، لئو و همکاران (۱۸)، کوهبنانی و همکاران (۱۶)، سولاری و همکاران (۲۵)، محمدی و همکاران (۲۱)، هوپرو همکاران (۱۲)) در موضوع پایش زمین‌لغزش‌ها، سرعت و دقت پایش را نشان می‌دهد. برای استفاده کاربردی از نتایج این تحقیق در آتی می‌توان زمان مطالعه از داده‌های این تحقیق را به‌عنوان مبنا در نظر گرفت و سپس تصاویر سال‌های بعد را به‌صورت پیاپی با آن مقایسه کنیم؛ یعنی با تمرکز بر مناطق مستعد لغزش و پایش مستمر آن‌ها، می‌تواند در مدیریت بحران طبیعی و زمین‌لغزش‌های منطقه مؤثر و مفید باشد.

تقدیر و تشکر

این مقاله حاصل بخشی از پایان‌نامه با عنوان " شناسایی نقاط مستعد زمین‌لغزشی جاده‌ای با استفاده از فن سنجش‌ازدور داخل‌سنجی (InSAR) و تحلیل GIS (مطالعه موردی: بخش کلیجان‌رستاق حوضه تجن ساری) در مقطع کارشناسی ارشد در سال ۱۴۰۱ است که با حمایت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجراشده است.

منابع

1- Ahmadi h. 2015. Applied geomorphology, volume 1 (water erosion). Tehran University Press. 577 (in Persian).

2- Alipour H, Malekian A. 2014. Landslide risk zoning in Jahan Esfrain watershed, North Khorasan. Journal of Geography and Development. 17, 61. 641-615. (in Persian) https://civilica.com/doc/1474483/download/

3- Bayati Khatibi M. 2016. Determining the potential sensitivity of sloping surfaces in mountain basins to the occurrence of landslides, using the method of determining the special factor of a case study: Qoranguchai basin located in the eastern slope of the Sahand Mountains (East Azerbaijan). Tabriz University, Geography Special. Spring. https://www.sid.ir/paper/6953/fa#downloadbottom

4- Bayuaji L, sumantyo J. T, Kuzeplaser H. 2010. D-InSAR for land subsidence mapping, Canadian jornal of remote sensing, https://doi.org/10.1016/S1872-5791(08)60059-7

5- Biranvand H, Saif A, Shahrukh Vandi M. 2012. Paleogeography and geomorphological evolutions of the old Simre lake, Journal of Geography and Urban-Regional Studies, No. 6, pp. 97-110. (in Persian) https://civilica.com/l/97463/

6- Crosta B.G. 2009. Dating, triggering, odeling and hazard assessment of large landslides. Geomorphology 103, 1 – 4. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.04.007

7- Daniel R. C, Maisons C, Carnec S, Mouelic C, King D, and Hosford S. 2003. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground-based measurement, Remote Sensing of Environment, 88, 468-478. https://doi: 10.1016/j.rse.2003.09.005

8- Erener A, Sarp G, Duzgun S. 2019. Use of GIS and Remote Sensing for Landslide Susceptibility Mapping.

9- Geological map of Sari on a scale of 1/100,000; Publications of the Geological Organization of Iran

10- Ghorbanzadeh O, Meena S.R, Blaschke T, Aryal J. 2019. UAV based slope failure detection using deep-learning convolutional neural networks. Remote Sensing 11(17), 2046. 2046; https://doi.org/10.3390/rs11172046

11- Graii P. 2018. Determining the most suitable method of zoning the risk of landslides in the watershed and Sari province. Earth Science Research, second year, number 6, summer, pp. 114-93. https://www.sid.ir/paper/207346/fa#downloadbottom

12- Hooper A.J. 2006. Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 112, https://doi:10.1029/2006JB004763

13- Karam A. 2008. Quantitative modeling and zoning of landslide risk in folded Zagros (case study: Serkhon watershed - Chaharmahal Bakhtiari province) Ph.D. thesis in natural geography, Tarbiat Modares University, Tehran.

14- Khazai B, Sitar N. 2004. Evaluation of factors controlling earthquake-induced landslides caused by Chi-Chi earthquake and comparison with the Northridge and Loma Prieta events. B. Khazai, N. Sitar / Engineering Geology 71 79–95. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00127-3

15- Khovaninzadeh N. 2018. Use of radar interferometric method to study landslides. Mapping and Geomatics Engineering Department, Technical Colleges Campus, University of Tehran, 148 p. (in Persian)

16- Koh Banani H; Yazdani M; Hosseini S. 2018. Land subsidence risk zoning using radar interferometry (case study: Kashmar plain and Khalilabad). Desert Management, 7(13), 65-76. Doi: 10.22034/JDMAL.2019.36526

17- Lan H. X, Zhou C.H, Wang L.J, Zhang H. J, Li R.H. 2004. Landslide watershed , yunnan,china. Engineering geology vol.76, 101-128.

18- Liu Z, Xu B, Wang Q, Yu W, Miao Z. 2022. Monitoring landslide associated with reservoir impoundment using synthetic aperture radar interferometry: A case study of the Yalong reservoir. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China. https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.12.001

10- Mousavi Z. 2018. Landslide Zoning and Modeling Using Logistic Regression Model, Master's Thesis. University of Mazandaran.

20- Moqimi A, Alavi Panah K, Jafari T. 2017. Evaluation and zoning of factors affecting the occurrence of landslides in the northern slopes of Aladagh. Geography Research. 64, 53-75. https://journals.ut.ac.ir/article_26906_0.html

21- Mohammadi M, Noor H. 2016. Landslide susceptibility zoning using a new combined method in the GIS environment, the study area is located in Mazandaran province and a part of Haraz river sub-basin. Environmental science and technology, 21st period, 12th issue, March.

22- Raushi S., Hijazi A., Rajabi M., Jalali N., Najafi Igdir A. 2017. The use of fuzzy logic in landslide risk zoning in Nazlochai watershed. Quantitative geomorphological research Journal. No 4, Spring, pp103-119. (in Persian) https://www.sid.ir/paper/507496/fa#downloadbottom

23- Sharifi Kia M. 2013. Determining the amount of ground subsidence using the radar interferometric method of Dasht Noug Behrman, space planning and preparation, 16th period, number 9, autumn 2013. https://www.sid.ir/Fa/Journal/ViewPaper.aspx?ID=86437

24- Solari L, Del Soldato M, Raspini F, Barra A, Bianchini S, Confuorto P, Casagli N, Crosetto M. 2020. Review of Satellite Interferometry for Landslide Detection in Italy. DOI:10.3390/rs12081351

25- Talai R., Mohammad Alizadeh A. 2018. Evaluation of the role of Neogene clay sediments in the occurrence of landslides, south of Ardabil province, northwest of Iran. https://jwem.areeo.ac.ir/article_120331_0cd6ff7aac3f74cb7d1a92f783430809.pdf

26- Yin Y, li B, wang W. 2019. Dynamic analysis of the stabilized Wangjiayan landslide in the Wenchuan Ms 8.0 earthquake and aftershocks. DOI:10.1007/s10346-014-0497-6

چکیده مبسوط

پایش حرکات توده‌ای با استفاده از پردازش داده ماهواره راداری و فن تداخل‌سنجی (InSAR) (مطالعه موردی: کلیجان‌رستاق ساری، مازندران)

طرح مسئله: حرکت‌های توده‌ای عبارت از جابه‌جایی حجم زیادی از توده‌ای خاک، سنگ و یا ترکیبی از آن‌ها به‌طرف پایین شیب در اثر نیروی ثقل است (۱۴). این پدیده زمانی رخ می‌دهد که نیروی حاصل از وزن مواد بیش از نیروی مقاومت برشی خاک باشد (۸). در مناطق مختلف دنیا، بلایای طبیعی به صور متنوع و در اندازه‌ها، اشکال و محیط مختلف اتفاق می‌افتد. این مخاطرات، سالانه در سراسر جهان خسارات و زیان‌های مالی و جانی به بار می‌آورند (۲۶). از بین مجموع بلایای طبیعی، زمین‌لغزش یکی از مخاطرات بسیار خطرناک و پرهزینه‌ای بوده به‌نحوی‌که زمین‌لغزش‌ها معمولاً جاده‌ها، آبادی‌ها، شهرها، تأسیسات، جنگل‌ها، مراتع و حوزه‌های آبخیز را دچار خسارات و زیان می‌کنند (۵). در چند سال اخیر بارش‌های سنگین و طولانی‌مدت در اکثر نقاط کشور سبب وقوع سیلاب‌های خطرناک و به‌ویژه در استان‌های شمالی و نیز وقوع زمین‌لغزش‌های متعدد گردیده است (۱۳). سرعت فرآیند مطالعات و کاهش هزینه و بالا بودن دقت مطالعات در پیش‌بینی و پیش‌گیری وقوع زمین‌لغزش‌ها از مخاطرات طبیعی از دغدغه‌های جدی مدیران و مردم در مواجه آن‌ها است (۲۰). در ایران، به خاطر کوهستانی بودن بخش وسیعی کشور و وجود فراز و نشیب‌های متنوع، به‌ویژه در نواحی شمال ایران، وقوع پدیده زمین‌لغزش یکی از متداول‌ترین بلای طبیعی به شمار می‌آید (۱۳). استراتژی مطالعه زمین‌لغزش شامل شناخت فرایند، تجزیه خطر و پیش‌بینی زمین‌لغزش در آینده برای کاهش پیشرفت و خسارت ناشی از آن است (۲۳).

هدف: با توجه به این‌که در استان مازندران زمین‌لغزش‌های زیادی رخ می‌دهد، می‌توان با استفاده از فن سنجش‌ازدور از نوع تداخل‌سنجی (InSAR) و GIS مناطق مستعد زمین‌لغزش جاده‌ای تا حدودی پیش‌بینی کرد و از خسارت‌های مالی و جانی ناشی از آن را کاهش داد و هزینه مطالعه را کاهش و دقت و سرعت مطالعه را افزایش داد.

روش تحقیق: در این مطالعه از داده‌های ماهواره‌ای راداری سنتینل ۱ بکار گرفته شده از نرم‌افزار اسنپ و همین‌طور نرم‌افزار ENVI در پردازش استفاده کردیم. مدیریت زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان یکی از مخاطرات ژئومورفولوژی معمولاً شامل سه فاز کلی است که عبارت از شناسایی لغزش‌ها، پایش لغزش‌ها و درنهایت پایداری لغزش‌ها معمولاً با عملیات عمرانی همراه است. در مرحله اول یعنی شناسایی لغزش‌ها معمولاً از تصاویر ماهواره‌ای و پردازش آن‌ها، عکس‌های هوایی، عکس‌های پهبادی و نیز بازدیدهای میدانی کمک گرفته شده است. و به بیانی دیگر از این اطلاعات و داده‌ها و مدارک و تصاویر و ابزارها برای شناسایی زمین‌لغزش‌ها در حوزه‌های مختلف استفاده می‌گردد. با تصویر چشمی و تصاویر ماهواره‌ای، پهبادی و عکس‌های هوایی توسط افراد با تجربه و نیز بازدیدهای میدانی تیم زمین‌شناسی چک لیست‌هایی از زمین‌لغزش‌ها با خصوصیات ظاهری و رفتاری آن‌ها تعیین می‌شود. در انتهای این بررسی نقشه‌های تحت عنوان نقشه‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش تهیه می‌شود. این روند اولاً زمان‌بر و حاوی اشتباهات و خطاهای دید انسانی بوده و ثانیاً در این تصاویر تنها لغزش‌های به وقوع پیوسته قابل‌تشخیص و بررسی خواهم بود؛ اما به جهت وسعت بالای تصاویر راداری اندازه‌ی چند ده کیلومتری تصاویر راداری می‌توان به‌راحتی از فن تداخل‌سنجی (InSAR) به‌منظور کشف شناسایی جابه‌جایی و تغییرات سطحی زمین استفاده کرد. با استفاده از نقشه‌های نرخ جابه‌جایی حرکات سطحی یک منطقه و پهنه وسیع در مدت‌زمان تهیه تصاویر موردبررسی و پایش قرار داد؛ یعنی اطلاعات به‌دست‌آمده از این نقشه‌ها روند تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را سرعت بخشیده و اعتبار و صحت

اطلاعات آن را نیز بهبود بخشد. هم‌چنین با ملاحظه مناطق لغزشی در تصاویر ماهواره‌ای و مشاهده سطح توپوگرافی آن احتمال اینکه جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده ناشی از زمین‌لغزش باشد را نشان بدهد.

نتایج و بحث: در این پژوهش برای پایش و نمایش زمین‌لغزش‌های موجود و کشف مناطق مستعد زمین‌لغزشی در منطقه کلیجان‌رستاق ساری که از داده‌های ماهواره‌ای راداری سنجنده‌ی سنتینل ۱ در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ با فن تداخل‌سنجی (InSAR) پراکنش کننده‌ی پایدار و تداخل‌سنجی با خطوط مبنای کوتاه مورد پردازش و آنالیز قرار گرفته است. از این داده‌های راداری تصویر اینترفروگرام تداخل‌سنجی تهیه شد. همچنین از روی این تصاویر تداخل‌سنج پیکسل‌های منتخب موسوم به پراکنش کننده‌های پایدار حدود دوازده هزار پیکسل در روش تداخل‌سنجی پراکنش کننده‌های پایدار و یازده هزار پیکسل در روش تداخل‌سنجی با خطوط مبنای مورد مطالعه در محدوده منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است. در ادامه‌ی پردازش، نتایج خروجی هر دو فن با یکدیگر تلفیق و ادغام گردید؛ تا نقاط هم‌پوشانی هر دو روش مشخص گردیده است. نتایج هردو روش مذکور نشان دهنده وجود جابجایی در توده‌های لغزشی کوچک و بزرگ منطقه و نشان از فعالیت جابه‌جایی آن‌ها است. هم‌چنین نتایج این تحقیق نشان داد که علاوه بر توده‌های لغزشی موجود و بررسی شده از قبل در منطقه، در چندین بخش حرکت و جابه‌جایی نسبت به خط دید سنجنده وجود دارد که هنوز آثار مخصوصی در منطقه به نمایش نگذاشته و لذا ممکن است در آینده این مناطق تبدیل به حرکت توده‌ای بزرگی شوند. متوسط نرخ جابه‌جایی سطوح زمین در راستای دید سنجنده در روش تداخل‌سنجی پراکنش کننده‌ای پایدار بین ۵/۱ تا ۴/۷- میلی‌متر در سال هست.

نتیجه‌گیری: از آن‌جایی که زمین‌لغزش‌ها یکی از بلایای طبیعی مهم استان مازندران بوده و هرساله در نقاط شیب‌دار به دلایل مختلف نظیر وجود گسل‌های فعال، بارندگی شدید، تغییرات کاربری اراضی، وجود سازندهای حساس و سست رخ می‌دهد. خسارات جانی و مالی زیادی به همراه دارد. مطالعه این مخاطره معمولا به روش‌های سنتی و قدیمی صورت می‌گیرد؛ اما در این مطالعه، از روش جدید با استفاده از داده‌های راداری سنتینل ۱ و روش تداخل‌سنجی (InSAR) با استفاده از نرم‌افزار پیشرفته اسنپ (Snap)، تولید نقشه‌های پیشرفته به‌صورت اینترفروگرام انجام شده است. در نقشه اینترفروگرام تولیدی از داده‌های راداری توزیع و پراکندگی مناطق زمین‌لغزشی و مستعد زمین‌لغزش به‌صورت رنگی و نوارها با نرخ جابه‌جایی مشخص شده است. این نقشه نشان می‌دهد که منطقه دارای پتانسیل زمین‌لغزشی بالایی است و نیازمند اجرای عملیات پایداری و تثبیت زمین‌لغزش است. نقشه‌های تولیدشده در محیط جی ای اس (GIS) و برداشت‌های میدانی به زیبایی رابطه محل وقوع زمین‌لغزش‌ها با گسل خوردگی‌های متعدد در منطقه و نیز با سازندهای حساس به فرسایش، تغییرات کاربری اراضی و شبکه هیدروگرافی را نشان می‌دهد نتایج این پژوهش نشان داد که منطقه دارای استعداد زمین‌لغزشی بالایی است و عمده عرصه‌های ناپایدار و زمین‌لغزشی مربوط به مناطق نزدیک به گسل‌ها، چشمه‌ها و روی سازندهای حساس شمشک دوران دوم زمین‌شناسی و نیز روی عرصه‌های تغییر کاربری هستند؛ بنابراین، روش تداخل‌سنجی برای پایش و شناسایی مناطق زمین‌لغزشی در مناطق دارای پوشش، یکی از روش‌های است که ازلحاظ هزینه و زمان مناسب، ارزان‌قیمت و با صحت بالاتر است.

واژگان کلیدی: زمین‌لغزش، تصاویر ماهواره‌ای، سنتینل-۱ ، تداخل‌سنجی، اسنپ، کلیجان‌رستاق

Extended Abstract

Mass movement monitoring using satellite radar and interferometry (InSAR) data processing (case study: Kalijan-Rostaq Sari, Mazandaran)

Problem design: Mass movement is the movement of a large volume of soil, stone or a combination of them down the slope due to gravity (14). This phenomenon occurs when the force resulting from the weight of the material exceeds the shear strength of the soil (8). In different regions of the world, natural disasters happen in different ways and in different sizes, shapes and environments. These hazards cause financial and human losses worldwide every year (26). Among all natural disasters, landslides are one of the most dangerous and costly hazards, so that landslides usually cause damage to roads, settlements, cities, facilities, forests, pastures, and watersheds (5). In the last few years, heavy and prolonged rains in most parts of the country have caused dangerous floods, especially in the northern provinces, as well as numerous landslides (13). The speed of the study process and cost reduction and the high accuracy of studies in predicting and preventing the occurrence of landslides from natural hazards are among the serious concerns of managers and people (20). In Iran, due to the mountainous nature of a large part of the country and the presence of various ups and downs, especially in the northern regions of Iran, the occurrence of landslides is one of the most common natural disasters (13). Landslide study strategy includes recognizing the process, risk analysis and predicting future landslides to reduce the progress and damage caused by it (23).

Purpose: Considering that there are many landslides in Mazandaran province, it is possible to predict areas prone to road landslides by using interferometric remote sensing technology (InSAR) and GIS. It reduced the financial and life damages caused by it and reduced the cost of the study and increased the accuracy and speed of the study.

Methodology: In this study, we used the Sentinel One radar satellite data using Snap software and ENVI software in processing. The management of landslides as one of the geomorphological hazards usually includes three general phases, which are the identification of landslides, the monitoring of landslides, and finally the stability of landslides, which is usually associated with construction operations. In the first stage, the identification of landslides is usually helped by satellite images and their processing, aerial photos, drone photos, and field visits. In other words, these information, data, documents, pictures and tools are used to identify landslides in different areas. Checklists of landslides with their appearance and behavioral characteristics are determined by visual images and satellite images, drones and aerial photos by experienced people as well as field visits by the geological team. At the end of this survey, maps under the title of landslide zoning maps will be prepared. First of all, this process is time-consuming and contains mistakes and errors of human vision, and secondly, in these images, only the slips that have occurred can be identified and analyzed; However, due to the large size of radar images, the size of several tens of kilometers, the interferometer (InSAR) technology can be easily used to detect displacement and surface changes of the earth. Using displacement rate maps, surface movements of a wide area and area were investigated and monitored during the time of image preparation; That is, the information obtained from these maps will speed up the process of preparing landslide risk zoning maps and improve the validity and accuracy of the information. Also, considering the landslide areas in the satellite images and observing its topographical surface, it will show the possibility that the obtained displacements are caused by landslides.

Results and discussion: In this research, in order to monitor and display the existing landslides and to discover landslide-prone areas in the Kalijan-Rostaq-Sari area, which is based on the Sentinel 1 radar satellite data in the period from 2014 to 2020 with Interferometer (InSAR) stable scattering and interferometry with short baselines have been processed and analyzed. An interferometric interferogram image was prepared from these radar data. Also, from these interferometer images of selected pixels known as stable scatterers, about twelve thousand pixels were selected in the stable scatterer interferometric method and eleven thousand pixels in the interferometric method with the study baselines within the study area. Is. In the continuation of the processing, the output results of both fans were combined and merged with each other; The overlapping points of both methods have been determined. The results of both mentioned methods indicate the presence of movement in small and large sliding masses of the region and indicate their movement activity. Also, the results of this research showed that in addition to the existing and examined landslides in the region, there are movements and displacements in several parts relative to the line of sight of the surveyors, which have not yet shown any special effects in the region. And therefore, these areas may become a big mass movement in the future. The average displacement rate of the earth's surface in the line of sight of the sensor in the stable scattering interferometric method is between 1.5 and 4.7 mm per year.

Conclusion: Since landslides are one of the most important natural disasters in Mazandaran province and occur every year in steep places due to various reasons such as active faults, heavy rainfall, changes in land use, sensitive and weak formations. it happens. It causes a lot of loss of life and money. The study of this risk is usually done in traditional and old ways; But in this study, using the new method using Sentinel 1 radar data and the interferometric method (InSAR) using the advanced Snap software, advanced maps have been produced in the form of interferograms. In the interferogram

map produced from radar data, the distribution and dispersion of the landslide and prone to landslide areas are shown in color and the bands with displacement rates are specified. This map shows that the area has a high potential for landslides and requires the implementation of stability operations and stabilization of landslides. The maps produced in the GIS environment and the field observations beautifully show the relationship between the location of the landslides and the numerous faults in the region, as well as the formations sensitive to erosion, the changes in land use and the hydrographic network. The results of this research show He said that the region has a high potential for landslides, and most of the unstable and landslide areas are related to areas close to faults, springs, and on sensitive Shamshak formations of the second geological period, as well as on areas of land use change; Therefore, the interferometry method for monitoring and identifying landslide areas in covered areas is one of the methods that is cheaper and more accurate in terms of cost and time.

Keywords: Landslides, satellite images, Sentinel-1, Interferometry (InSAR), Snap, Kalijan-Rostaq