

ارزیابی ناپایداری دامنه‌ها در ناحیه راه آهن لرستان با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (DInSAR)

امیر افشاری - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
منیژه قهرودی تالی* - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
سید حسن صدوق - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
محسن احتشامی معین آبادی - استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۰۱ تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۱۱/۰۳

چکیده

ناحیه راه آهن لرستان به دلیل خصوصیات متنوع زمین شناسی نظیر لیتولوژی، تکتونیک، لرزه‌خیزی و شرایط خاص آب و هوایی، از جمله مناطق دارای پتانسیل زمین لغزش است. بنابراین به منظور شناسایی و برآورد میزان سرعت حرکت مواد دامنه‌های ناپایدار مشرف به خطوط ریلی ناحیه لرستان در یک بازه زمانی سه ساله از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ از تصاویر راداری پایین گذر ماهواره Sentinel-1 سازمان فضایی اروپا استفاده شده است. در این پژوهش از نرم افزار SUBSOFT و روش پیشرفته تداخل سنجی تفاضلی (DInSAR) مبتنی بر الگوریتم پیوستگی پیکسل‌ها (CPT) که توسط کارگروه سنجش از دور دانشگاه پلی تکنیک کاتالونیا اسپانیا (UPC) معرفی شده، برای شناسایی ناپایداری دامنه‌های مشرف به خطوط ریلی ناحیه لرستان استفاده شده است. تحلیل‌ها با استفاده از ۵۰ تصویر راداری پایین گذر ماهواره اخیر انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که داده‌های راداری و روش پردازش تداخل سنجی تفاضلی به دلیل پوشش گسترده و فراوانی دیتا و دقت بالا، از پتانسیل خوبی برای آشکارسازی ناپایداری دامنه‌ها و محاسبه میزان جابه‌جایی آن‌ها برخوردار می‌باشد. تفسیر نمودارهای سری زمانی نشان داد که بیشترین میزان حرکات مواد دامنه‌ای در فصول پاییز و بهار اتفاق افتاده و بیشترین میزان حرکت مواد دامنه‌ای در بازه سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ حدود ۲۸/۸ سانتیمتر در محدوده ایستگاه تنگ هفت تا تنگ پنج می‌باشد. که نشان دهنده فعال بودن منطقه از لحاظ حرکات دامنه‌ای است.

واژگان کلیدی: حرکات دامنه‌ای، تداخل سنجی راداری، راه آهن لرستان، CPT، DInSAR

مقدمه

نظارت مستمر تغییرات سطح زمین و شناسایی مناطق مستعد حرکات دامنه‌ای، خصوصا در محدوده سکونتگاه‌های انسانی و زیرساخت‌های ارتباطی مانند جاده و خطوط ریلی، از موثرترین عوامل کاهش تلفات جانی و مالی مخاطرات طبیعی مانند فرونشست و حرکات دامنه ای می‌باشد. (الیوتی و همکاران^۱، ۱۹۹۹: ۲۷) تا کنون تکنیک‌های متعددی مانند استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS)، روش‌های ژئودزی و تاکنومتری^۲، دوربین‌های نقشه برداری، اسکن لیزری و لیدار برای پایش تغییرات سطح زمین ارائه شده است (هوپر و همکاران^۳، ۲۰۰۴: ۳۱۷). اما به دلیل هزینه زیاد برای اجرا، زمان بر بودن و پوشش سطحی محدود، استفاده از این روش‌ها، در محدوده‌های وسیع مقرون به صرفه نمی‌باشد (هونگ و همکاران^۴، ۲۰۰۷: ۱۶۷۳). اما در کنار این روش‌ها تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) با قابلیت کار در تمام شرایط جوی و طول مدت شب و روز و با قابلیت پوشش گسترده سطح زمین و قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا، امروزه یکی از دقیق‌ترین (در مقیاس میلی‌متر) و کم هزینه‌ترین فنون سنجش از دور برای تشخیص و نظارت تغییرات سطحی زمین، حرکات آهسته و ناپایداری دامنه ای در سراسر جهان است (گابریل و همکاران^۵، ۱۹۸۹: ۹۱۸۹، میترنیت و همکاران^۶، ۲۰۰۵: ۲۸۷، روت و نگلر^۷، ۲۰۰۶: ۷۱۳، کولیسانتی و وازووسکی^۸، ۲۰۰۶: ۱۰۵). سازوکار این روش استفاده از اختلاف فاز چندین تصویر راداری (SAR) با فرمت استاندارد (SLC^۹) که در زمان‌های مختلف از یک منطقه مشخص برداشت شده، می‌باشد که در نهایت به برآورد دقیق میزان جابه جایی زمین در راستای خط دید ماهواره (LOS) می‌انجامد (دی مارتیر و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۴: ۶۱) اگرچه اولین کاربرد داده‌های راداری در مطالعات ناپایداری زمین به اواسط دهه ۱۹۹۰ میلادی برمی‌گردد. (فرنو و همکاران^{۱۱}، ۱۹۸۶: ۱۸۵)، اما در دهه‌های اخیر به دلیل دسترس بودن داده‌های راداری با بازه زمانی نسبتاً طولانی نسبت به گذشته و توسعه و گسترش روش‌های جدید مانند تکنیک‌های تداخل سنجی مبتنی بر پراکنش گرهای پایدار (PSI)^{۱۲} (فرتی و همکاران^{۱۳}، ۲۰۱۱: ۱۱). روش طول خط مبنای کوتاه (SBAS)^{۱۴} (براردینو^{۱۵}، ۲۰۰۲: ۲۳۷۸) تکنیک پیوستگی پیکسل‌ها (CPT) (مورا و همکاران^{۱۶}، ۲۰۰۳: ۲۲۴۷) و سایر روش‌های مشابه و ترکیبی که توانسته‌اند بر مشکلات ناشی از عدم همبستگی زمانی و هندسی^{۱۷}، اعوجاجات هندسی^{۱۸}، اثرات اقلیم و توپوگرافی که در روش‌های تداخل سنجی گذشته وجود داشت غلبه کنند، بیش از پیش توجه محققین را به استفاده از

- 1 - Aleotti, et al
- 2 - Geodesy and Tacheometry
- 3- Hooper et al
- 4- Hong et al
- 5 - Gabriel et al
- 6 - Metternicht et al
- 7 - Rott et nagler
- 8 - Colesanti and Wasowski
- 9 - Singel look
- 10 - Dimartire et
- 11 - Fruneau et al
- 12 - Persistent scatters interferometry
- 13 - Ferretti et al
- 14- Small Baseline Subset
- 15 - Berardino et
- 16 - Mora et al
- 17 -Temporal and Geometrical decorrelation
- 18 -Geometrical decorrelation

این روش ها، جلب کرده است (براردینو و همکاران، ۲۰۰۲: ۲۳۷۹، یوسای^۱، ۲۰۰۳: ۷۵۶، کولیساتی و وازووسکی، ۲۰۰۶: ۱۰۸). در روش های معمول تداخل سنجی، از چندین تصویر راداری در بازه های زمانی متفاوت از یک منطقه، و اختلاف فاز آنها (اینترفروگرام) برای محاسبه میزان تغییرات استفاده می شود که به روش تداخل سنجی تفاضلی معروف است. اما این روش در مورد مناطقی که دارای تغییر شکل سریع می باشد مانند دامنه های مناطق فعال کوهستانی، از همبستگی پایینی برخوردار است (براردینو و همکاران، ۲۰۰۳: ۲۳۷۸). لذا برای رفع این مشکل باید تمامی پردازش ها با فاصله زمانی کمتر و تعداد بیشتری از تصاویر راداری (بیش از ۱۵ تصویر) و بر روی نقاطی انجام گیرد که در طول زمان دارای خصوصیات بازپراکنشی نسبتاً ثابتی باشند (هیلی و همکاران^۲، ۲۰۰۴: ۱۹۵۲). در این روش همبستگی اینترفروگرام ها تا حد زیادی افزایش یافته و میزان اندازه گیری جابه جایی سطح زمین تا حد میلیمتر کاهش می یابد (فرتی و همکاران، ۲۰۰۱: ۱۰). در ده های اخیر، در زمینه شناسایی و پایش تغییرات سطح زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری پژوهش های متعددی در حوزه علوم زمین در سراسر جهان انجام پذیرفته است که از جمله می توان به پژوهشی که توسط کونفورتو و همکاران در سال ۲۰۱۷ در مورد ارزیابی حرکات زمین لغزش ناشی از بارش با استفاده از ترکیب روش تداخل سنجی راداری و تحلیل ژئوتکنیکی، در منطقه کوهستانی پاپانیس در جنوب ایتالیا انجام شده، اشاره کرد. آنها با استفاده از تصاویر ماهواره ای TerraSAR-X در بازه زمانی اکتبر ۲۰۱۳ تا اکتبر ۲۰۱۴ و تکنیک همبستگی پیکسل ها (CPT) و روش ژئوتکنیکی مانند اندازه گیری تراز آبهای زیرزمینی، میزان سرعت حرکات مواد دامنه ای که پس از بارش شدید (۱۸۵ میلیمتری) تاریخ ۲۳ فوریه ۲۰۱۲ در جنوب ایتالیا رخ داد پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که مواد دامنه ای با سرعت ۳۰ تا ۴۰ میلیمتر در سال در بازه مورد نظر در جهت خط دید ماهواره حرکت داشته که نشست ساختمان ها و خرابی خطوط انتقال نیرو و جاده ها در منطقه مورد نظر تصدیق بر ادعای آنها بوده است. پژوهش دیگری نیز توسط دی مارتیر و همکاران در سال ۲۰۱۶ در مقاله ای با عنوان "سیستم یکپارچه تشخیص زمین لغزش بر پایه داده های مکانی و روش تداخل سنجی راداری" با استفاده از ترکیب روش میدانی و تکنیک تداخل سنجی راداری بر مبنای الگوریتم پراکنش گر های پایدار (PSI) و همبستگی پیکسل ها (CPT) با استفاده از تصاویر راداری ماهواره COSMO-SkyMed در یک بازه سه ساله از سال ۲۰۰۸ تا سال ۲۰۱۱ به شناسایی حرکات مواد دامنه ای شهرستان پالمو در منطقه سیسیل ایتالیا پرداختن نتایج داده های تداخل سنجی رنج حرکت مواد دامنه ای از ۳ تا ۴۶ سانتیمتر را در بازه سه ساله مورد مطالعه نشان داد که صحت آنها در بازدیدهای میدانی مورد کنترل و تایید قرار گرفت. همچنین می توان به کارهایی که در مورد زلزله (آتزوری^۳، ۲۰۱۳)، آتشفشان (لوجیوس^۴ و هکاران، ۲۰۱۳)، یخچال ها (استروزی^۵ و همکاران)، فرونشست (سانابریا^۶ و همکاران، ۲۰۱۴)، و ناپایداری دامنه ای (دانگ و همکاران^۷، ۲۰۱۸، فیچی و همکاران^۸، ۲۰۱۶، اینفانته و همکاران^۹، ۲۰۱۶، نوویلینو و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۴، بردونی و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۸، دوانتری و همکاران^{۱۲}، ۲۰۱۶، لازکی و همکاران^{۱۳}، ۲۰۱۵، کیسیلیو و

1 - Usai

2 - Hilley et al

3 - Atzori et al

4 - Logios et al

5 - Strozzi et al

6 - Sanabria et al

7 - Dong et al

8 - Fiaschi et al

9 - Infante et al

10 - Novellino et al

11 - Bordoni et al

12 - Devanthéry et al

13 - Lazeky et al

همکاران^۱، ۲۰۱۴، ریدل و همکاران^۲، ۲۰۰۸، پیرت و همکاران^۳، ۲۰۰۸، خوانین زاده و همکاران ۱۳۹۱، شیانی و همکاران ۱۳۹۲، روستایی و همکاران ۱۳۹۲، احمد زاده و همکاران ۱۳۹۴) انجام شده است، اشاره کرد. هدف این مقاله شناسایی و برآورد میزان سرعت حرکت مواد دامنه‌های ناپایدار مشرف به خطوط ریلی ناحیه لرستان با استفاده از الگوریتم تداخل سنجی تفاضلی پیشرفته راداری مبتنی بر الگوریتم (CPT) در یک بازه زمانی سه ساله از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ با استفاده از تصاویر راداری پایین گذر ماهواره Sentinel-1 سازمان فضایی اروپا می‌باشد. این محدوده که بخش‌های مهمی از زاگرس مرتفع و بخش‌هایی از زاگرس چین خورده در استان لرستان و خوزستان را شامل می‌شود، از نظر ناپایداری دامنه‌ای و پدیده‌های ژئومورفولوژیکی دارای ویژگی‌های خاصی است (بربریان و کینگ^۴ ۱۹۸۱: ۲۲۰، فالکون^۵ ۱۹۷۴: ۲۰۲). فعالیت فرآیندهای ژئومورفیک، ساختار چین خورده طاقدیسی و ناودیسی، لیتولوژی نسبتاً مقاوم آهک‌های کرتاسه، گسلش شدید منطقه و قرار گرفتن در محدوده خطر بسیار زیاد زلزله، زمینه وقوع مخاطرات طبیعی مثل زلزله و انواع حرکات توده‌ای را در این محدوده فراهم آورده است. روزانه حجم بالایی از مسافر، کالاهای تجاری و مواد معدنی از این مسیر جابه‌جا می‌شود و با توجه به پایین بودن آستانه خطر خطوط ریلی نسبت به سایر خطوط حمل‌ونقل کوچک‌ترین حادثه می‌تواند منجر به خروج از خط قطار و تحمیل خسارات جانی و مالی شدیدی در این محدوده شود لذا شناسایی سازوکار زمین‌ساخت و خطرات مرتبط با این پدیده به منظور جلوگیری از بروز خسارات مالی و جانی در این منطقه ضروری می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه

راه آهن لرستان یکی از مناطق بسیار با اهمیت شبکه راه آهن سراسری ایران به شمار می‌رود که در محور سراسری شمال-جنوب به طول ۲۱۵ کیلو متر خط اصلی در دو استان لرستان و خوزستان واقع گردیده است. این مسیر دارای دو ایستگاه تشکیلاتی دورود و اندیمشک و ۱۳ ایستگاه بین‌راهی می‌باشد (شکل ۱)، محدوده مورد مطالعه در چارچوب نقشه‌های توپوگرافی در مختصات جغرافیائی ۱۵'، ۴۸' تا ۰۵'، ۴۹' شرقی و عرض‌های ۲۵'، ۳۲' تا ۳۰'، ۳۳' شمالی قرار دارد. به لحاظ ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه سرزمینی کوهستانی است که به جز تعدادی دره آبرفتی و دشت‌های سیلابی کوچک کنار رودخانه‌ای، ناحیه هموار ندارد. این ناحیه به دلیل خصوصیات متنوع زمین‌شناسی نظیر لیتولوژی، تکنونیک، لرزه‌خیزی و شرایط خاص آب و هوایی، از جمله مناطق دارای پتانسیل زمین‌لغزش است. به طوری که طبق آمار مرکز تحقیقات راه آهن جمهوری اسلامی ایران حدود ده ترانشه ناپایدار از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۶ در منطقه ثبت شده است. قرار گرفتن بر روی کمر بند زلزله خیز آلپ - هیمالیا، عبور گسل بزرگ زاگرس، تناوب لایه‌های سخت آهکی و لایه‌های سست ماری شیلی در یال تاقدیس‌های بزرگ در سراسر این ناحیه شرایط ناپایدار بخش‌های بزرگی از دامنه‌های طبیعی را ایجاد کرده است (بلواسی و همکاران، ۲۰۱۴: ۲۲۶).

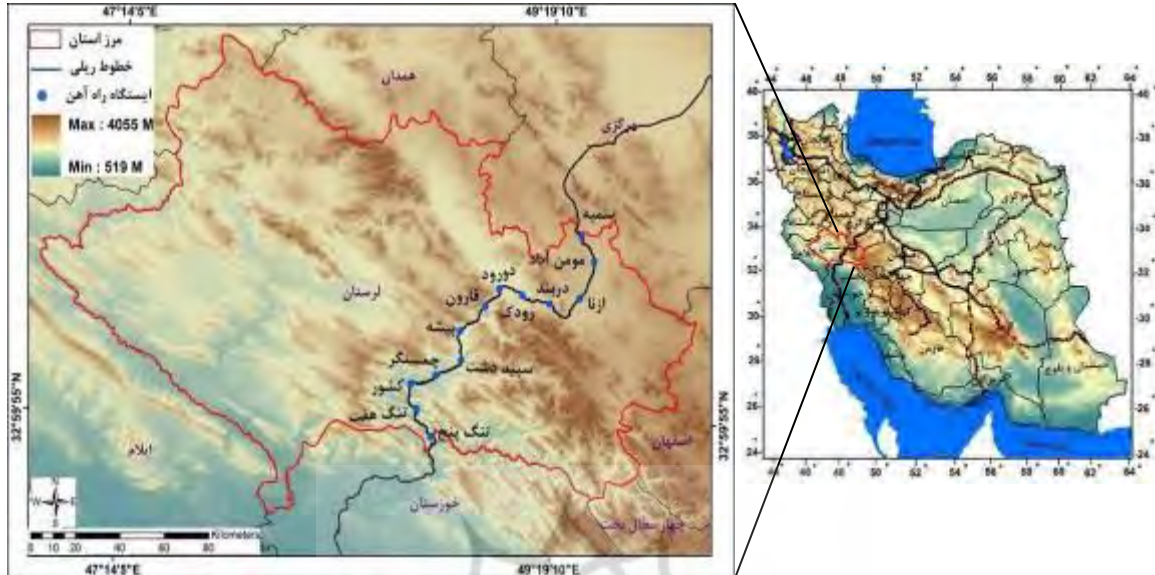
1 - Kiseleva et al

2 - Riedel et al

3 - Peyret et al

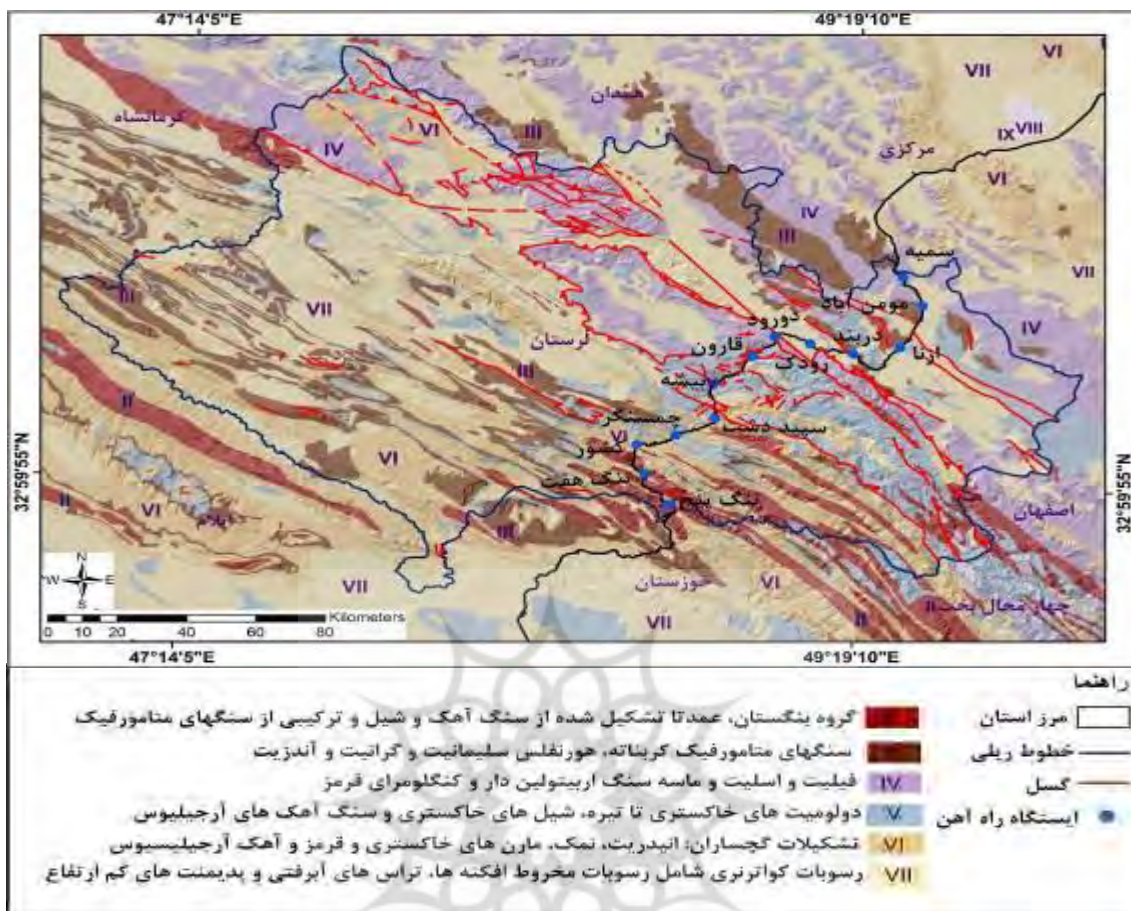
4 - Berberian and King

5 - Falcon et al



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی ناحیه راه آهن لرستان

از لحاظ ساختار زمین ساختی منطقه مزبور در پهنه زاگرس مرتفع و قسمتهایی از زاگرس چین خورده با روند شمال غربی - جنوب شرقی قرار گرفته است و از لحاظ توالی چینه شناسی ۹ واحد لیتولوژی در منطقه وجود دارد که قدیمی ترین آنها سنگ آهک بنگستان، شامل سنگ آهک های خاکستری تا تیره با لایه بندی خوب و تناوب آهک های رسی و شیلی بوده که غیر قابل تفکیک هستند. سازند گورپی با جنس سنگ آهک های مارنی و مارن های تیره روی آهک بنگستان قرار گرفته و توسط سازند ماسه سنگی، کنگومرایی، سیلت استون، و مارن زیتونی امیران پوشیده شده است. سازند تله زنگ با آهک های متوسط لایه تا توده ای با ضخامت متغیر در جنوب حوزه بر روی سازند امیران قرار گرفته است. سازند آهک و دولومیتی آسماری که ارتفاعات حوزه را می پوشاند بر روی سازند کشکان قرار می گیرد و به وسیله سازند مارنی گچی و ماسه سنگی گچساران پوشیده می شود. در نهایت، رسوبات کنگومرایی بختیاری با مساحتی بسیار کمی که در حوضه دارند، روی رسوبات قدیمی تر قرار می گیرند و رسوبات آبرفتی عهد حاضر به صورت ناپیوستگی در مسیر آبراهه ها و رودخانه ها بر جای گذاشته شده اند (شکل ۲).



شکل ۲: نقشه زمین شناسی و گسل‌های موجود در ناحیه راه آهن لرستان (مآخذ نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ لرستان)

روراندگی سراسری زاگرس از نوع گسل‌های راندگی - فشاری است و بر اساس مطالعه برو و ریکو (۱۹۷۱) این گسل در اصل متشکل از دو گسل موازی است که در بعضی جاها برهم منطبق هستند و در بعضی جاها از هم فاصله زیاد دارند. گسل جنوب غربی قدمت بیشتری دارد و یک گسل معکوس کم شیب و مرز ایران باختری و زاگرس به حساب می‌آید. جابه‌جایی افقی این گسل حدود ۴۰ کیلومتر است. دومین گسل زاویه قائم دارد و راستگرد است و در اصل مجموعه‌ای از چندین قطعه گسل کوچکتر در امتداد یکدیگر است که عبارتند از گسل معکوس اصلی زاگرس، گسل اصلی جوان زاگرس، گسل درود، گسل قلعه حاتم، گسل نهبوند، گسل زاگرس مرتفع، گسل گارون، گسل رازان و آب سرده، که نشان دهنده فعال بودن منطقه از لحاظ تکتونیکی می‌باشند (ملکی راد و همکاران، ۲۴۰، ۱۳۹۰). روند کلی این گسل‌ها شمال غربی- جنوب شرقی بوده و دست کم تعداد ۷ زلزله بزرگ بالای هفت ریشتر از سال ۱۰۰۸ میلادی تا کنون (۲۰۱۸) در این منطقه رخ داده است که منسوب به این گسل‌ها می‌باشند. (آمبرسیز و همکاران، ۱۳۷۰).

مواد و روش‌ها

در این پژوهش به منظور شناسایی دامنه‌های ناپایدار در محدوده خطوط ریلی ناحیه لرستان از تصاویر ماهواره‌ای، تصاویر سه بعدی گول ارث، پیمایش زمینی، نقشه‌های توپوگرافی، برداشت میدانی و تصاویر راداری دهانه ترکیبی ASAR با دقت بالا برای سری زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ استفاده شده است (جدول ۱). در واقع برای شناسایی ناپایدارهای بزرگ و دارای حرکت سریع در محدوده مورد مطالعه از روش‌های سنتی که پیمایش زمینی یکی از موثرترین آنهاست و برای اندازه‌گیری حرکات آهسته و شناسایی مناطق مستعد ناپایدار از تکنیک‌های پیشرفته تداخل سنجی تفاضلی راداری DInSAR استفاده شده است.

جدول ۱: نوع و تعداد تصاویر مورد استفاده

تعداد	تاریخ	مسیر	فریم	ماهواره
۴	نوامبر تا دسامبر ۲۰۱۵	108	482	Sentinel-1
۱۴	فوریه تا دسامبر ۲۰۱۶	108	482	Sentinel-1
۲۵	ژانویه تا دسامبر ۲۰۱۷	108	482	Sentinel-1
۷	ژانویه تا مارس ۲۰۱۸	108	482	Sentinel-1
۵۰	مجموع تصاویر			

روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) از اختلاف فاز ($\Delta\phi$) دو تصویر راداری (SLC) که از یک منطقه در زمانهای مختلف (خط مبنای زمانی) و با اندکی تغییر مدار (خط مبنای فضایی) برداشت شده، به اندازه گیری میزان تغییر شکل سطح زمین می‌انجامد (کلستانی و همکاران^۱ ۲۰۰۳: ۹، ماسونت و همکاران^۲ ۱۹۹۳: ۱۳۹). در واقع این اختلاف فاز ($\Delta\phi$) برای ساخت تداخل سنج (اینترفروگرام) استفاده می‌شود که وابسته به طول مسیر امواج رادار و میزان جابه جایی $\Delta\phi_{displ}$ است. البته اختلاف فاز ناشی از تلفیق دو تصویر SAR، علاوه بر تغییر شکل زمین از توپوگرافی منطقه، اتمسفر و هندسه ماهواره نیز تاثیر می‌پذیرد که بایستی تمامی آنها به نحوی از رابطه حذف شوند تا بتوان ادعا کرد که اختلاف فاز موجود تنها مربوط به تغییر شکل زمین می‌باشد که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود (هانسن^۳، ۲۰۰۱: ۱۲).

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{flat} + \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{noise} + \Delta\phi_{displ}$$

رابطه (۱)

$$= \frac{4\pi B_n \Delta h}{R_0 \tan \theta} + \frac{4\pi B_n \Delta h}{R_0 \sin \theta} + \delta_{dis} + \delta_{atm} + \delta_{noise}$$

که در اینجا B_n اشاره به خط مبنای عمودی، θ زاویه برخورد، Δr و Δh مقدار تفاوت فاصله رنج و ارتفاع نقاط ارزیابی شده و R_0 بیانگر فاصله مطلق رنج خط دید ماهواره بین سنجنده و هدف می‌باشد. اصطلاح فاز اشاره به مولفه های توپوگرافی سطح زمین دارد. $\Delta\phi_{flat}$ و $\Delta\phi_{topo}$ به ترتیب، به تغییرات نسبی فاصله بین سنجنده و هدف در طول دوره برداشت و سهم توپوگرافی منطقه، مربوط می‌شود. به طور خاص، $\Delta\phi_{flat}$ در موقعیت هایی که منطقه مورد مطالعه مسطح باشد محاسبه می‌شود در حالیکه $\Delta\phi_{topo}$ وابسته به توپوگرافی موجود منطقه مورد مطالعه می‌باشد. $\Delta\phi_{displ}$ مولفه ای از فاز است که به جابه جایی زمین که در مسیر خط دید ماهواره در برداشت های مختلف SAR تولید شده، اشاره دارد. سهم فاز مربوط به $\Delta\phi_{atm}$ به اختلال فاز ایجاد شده به علت تغییرات شرایط اتمسفر در طول دوره برداشت و در نهایت اصطلاح نویز فاز $\Delta\phi_{noise}$ نیز مربوط به تنزل فاز تداخل سنج است که به علت تغییرات بازتاب در برداشت های مختلف (عدم همبستگی زمانی^۴)، نوسانات کوچک زاویه برخورد بین برداشت ها (عدم همبستگی فضایی^۵)، و حجم پراکندگی یا بازتاب^۶ که به صورت یک توزیع حجمی از پراکنش در یک سلول با رزولوشن یکسان ظاهر می‌شود، مربوط می‌شود. در این مقاله پردازش های DInSAR با استفاده از نرم افزار SUBSOFT و روش CPT و با پردازش داده های پایین گذر SLC محدوده خطوط ریلی ناحیه لرستان انجام گرفته است.

به منظور شناسایی ناپایداری دامنه‌ای در محدوده خطوط ریلی ناحیه لرستان، ۵۰ تصویر راداری پایین گذر ماهواره Sentinel-1 سازمان فضایی اروپا، با دوره زمانی برداشت ۱۴ روز و شماره گذر ۱۰۸، و شماره فریم ۴۸۲ بین سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ استفاده شده است. به منظور پردازش بهتر، مساحتی در حدود 50×40 کیلومتر از محدوده دربرگیرنده خطوط

1 - Colesantiet al

2 - Massonnet et al

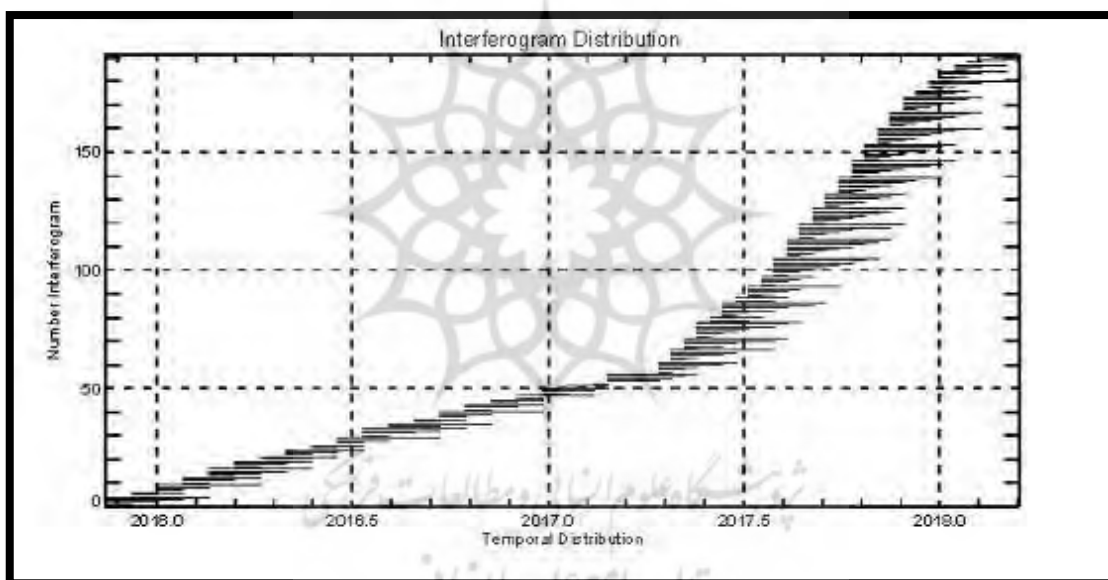
3 - Hanssen

4 - temporal decorrelation

5-spatial decorrelation

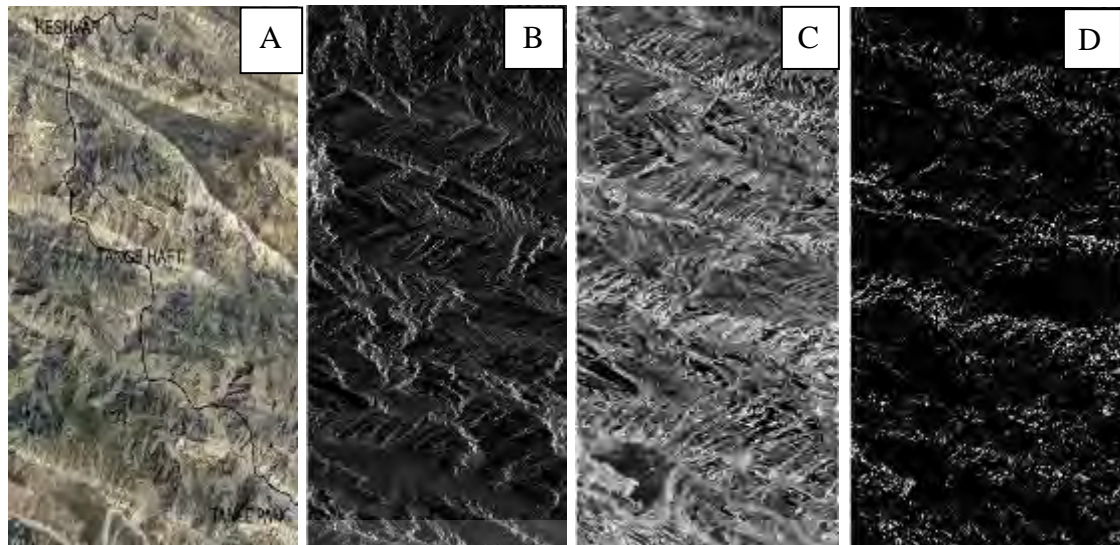
6 -volumetric scattering

ریلی، از تصویر 400×400 کیلومتر استاندارد SLC برش داده شد. لازم به ذکر است که تمام تصاویر SLC محدوده مورد مطالعه از نظر تداخل سنجی مورد پردازش قرار گرفت. به منظور افزایش همبستگی زمانی و فضایی مولفه‌ها و بالابردن کیفیت فاز تداخل سنجی‌ها (اینترفروگرام) از بین تمام ترکیب‌های ممکن برای ساخت تداخل سنجی (اینترفروگرام) تنها جفت‌های از تصاویر با خط مبنای فضایی کمتر از ۲۰۰ متر و خط مبنای زمانی کمتر از ۲۰۰ روز انتخاب شدند که با این روش، نهایتاً ۳۴۵ تداخل سنجی (اینترفروگرام) تولید شد. شکل ۳ نحوه توزیع زمانی و فضایی داده‌ها را نشان می‌دهد. سپس به منظور حذف اثر فاز مربوط به توپوگرافی در تولید تداخل سنجی‌ها (اینترفروگرام)، از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ۳۰ متر سنجنده ASTER استفاده شد. در ادامه فرآیند پردازش، میانگین نقشه‌های کوه‌رنسی به منظور انتخاب پیکسل به وسیله روش Coherence stability پردازش شد. Coherence با استفاده از پنجره چند نظاره ۱۵ خط در آزموت و ۳ نمونه در رنج محاسبه شد. نتیجه مولتی‌لوک در پیکسل‌های با رزولوشن پایین، از میانگین ۴۵ پیکسل از اینترفروگرام اصلی که با پیکسل‌های رزولوشن مکانی فضایی ۶۰ متر در ۶۰ متر انطباق دارد، به دست آمد و تغییرات سطح زمین تنها از طریق پیکسل‌هایی از منطقه مورد مطالعه که از کیفیت فاز بالاتری برخوردار بودند، تهیه شد. با توجه به نیاز به شبکه‌ای متراکم از نقاط پراکنش گر منسجم از منطقه مورد مطالعه، پردازش چند لایه با آستانه همبستگی ۰/۷ انجام شد.



شکل ۳: توزیع زمانی، فضایی اینترفروگرام محدوده مورد مطالعه

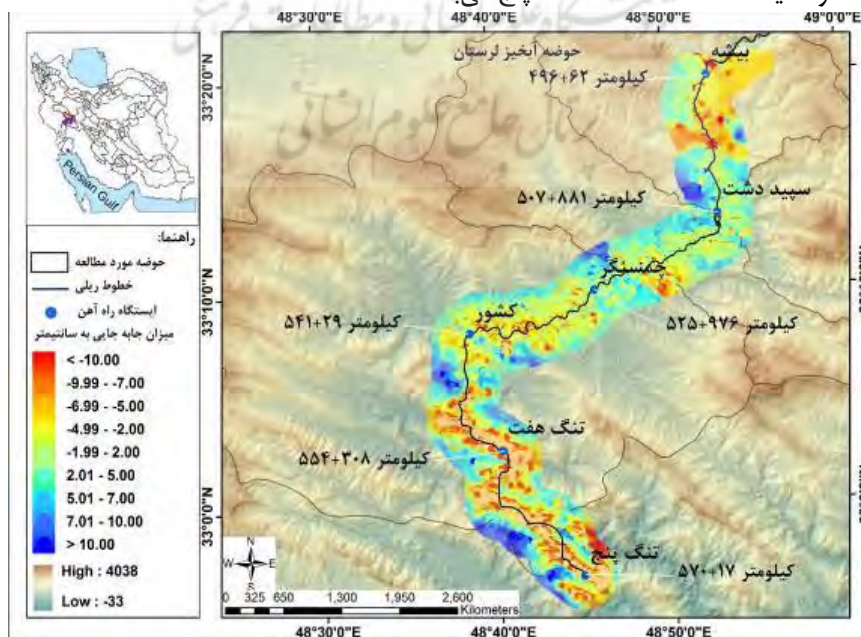
به دلیل شرایط توپوگرافی منطقه، در نمونه برداری از تصاویر راداری منطقه، پیکسل‌های دارای بازتابندگی بالا با پیکسل‌هایی با همبستگی بالا مطابقت زیادی نشان داد. علاوه بر این پیکسل‌هایی با همبستگی بالا، تنها با مناطق بدون پوشش گیاهی، مانند عوارض انسان ساخت (ساختمان، جاده، راه آهن) و برونزد های سنگی مطابقت دارد. در حالیکه تداخل سنجی‌ها در دامنه‌های با شیب تند و مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم منطقه دارای همبستگی پایین تری می‌باشد. برای پردازش‌های بیشتر و به منظور برآورد نقشه سرعت و سری زمانی تغییر شکل زمین، از روش تداخل سنجی تفاضلی DInSAR و الگوریتم CPT استفاده شد. در این مرحله، مهمترین مرحله تداخل سنجی، شناسایی نقاط ثابت مرجع برای ایجاد یک فرآیند ادغام قابل اعتماد می‌باشد. بدین منظور تعدادی نقاط کنترل که دارای کمترین تغییر شکل می‌باشند، انتخاب می‌شود. در منطقه مورد مطالعه این نقاط کنترل، ساختمان‌های شهر و برونزد های بزرگ سنگی انتخاب شد.



شکل ۴: A- تصویر ماهواره ای، B- تصویر راداری C- Coherence map، D- تصویر پراکنش گرهای (PS) محدوده خطوط ریلی لرستان

یافته ها و بحث

نتایج پردازش DInSAR، نقشه سری زمانی میزان جابه جایی مواد دامنه ای برای محدوده خطوط ریلی ناحیه لرستان بود. شکل ۴ میزان جابه جایی مواد دامنه های مشرف به خطوط ریلی ناحیه لرستان را نشان می دهد. مقادیر مثبت نشان دهنده میزان جابه جایی در جهت سنسورهای ماهواره و مقادیر منفی نشان دهنده میزان جابه جایی در خلاف جهت سنسور می باشد. به دلیل قرار گیری بیشترین نقاط دارای خطر ناپایدار در محدوده ایستگاه های بیشه تا تنگ هفت و به منظور سهولت در اندازه گیری میزان حرکات دامنه ای در منطقه مورد مطالعه و با توجه به حجم بالای نقاط استخراج شده از پردازش تصاویر راداری محدوده ای به شعاع دو کیلومتر در اطراف خطوط ریلی برای انجام محاسبات انتخاب شدند. شکل ۵ میزان جابه جایی مواد دامنه ای اندازه گیری شده را در محدوده سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ نشان می دهد که بیشترین میزان تغییر شکل در محدوده ایستگاه تنگ هفت تا تنگ پنج می باشد.



شکل ۵: میزان جابه جایی مواد دامنه ای اندازه گیری شده توسط پردازش تداخل سنجی راداری (DInSAR)

ناپایداری‌های دامنه‌ای در طبیعت همیشه نشانه‌هایی از خود به جا می‌گذارند که با استفاده از این نشانه‌ها می‌توان به شناخت بصری از ناپایدارها دست یافت، لذا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، عکسهای هوایی و بازدید میدانی می‌توان اطلاعات کیفی با ارزشی در مورد اندازه، عمق، سن و میزان فعالیت مواد دامنه‌های ناپایدار به دست آورد. در این پژوهش موقعیت نقاط ناپایدار بر روی نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و تصاویر سه بعدی گوگل ارث منطقه شناسایی شده است و در مرحله بعد با بازدید میدانی از منطقه، موقعیت جغرافیایی و کیلومتر مناطق مستعد خطر برداشت و موقعیت این نقاط بر روی نقشه خطوط ریلی ناحیه لرستان مشخص شد. (جدول ۱). شکل ۶ موقعیت و کیلومتر نقاط ناپایدار و شکل ۷ نمونه‌هایی از ترانشه‌های ناپایدار محدوده خطوط ریلی لرستان را نشان می‌دهند.

جدول ۱. موقعیت و کیلومتر ترانشه‌های آسیب پذیر خطوط ریلی ناحیه لرستان (مبدأ میدان راه آهن تهران)

الف: بین ایستگاه‌های دورود-قارون	د: بین ایستگاه‌های سپیددشت-چمسنگر	
۱- ترانشه کیلومتر ۴۷۱+۸۰۰	۱۹- ترانشه کیلومتر ۵۰۳+۳۰۰	
۲- ترانشه کیلومتر ۴۷۳+۰۵۰	۲۰- ترانشه کیلومتر ۵۱۲+۵۰۰	
۳- ترانشه کیلومتر ۴۷۵+۲۰۰	۲۱- ترانشه کیلومتر ۵۱۳+۷۵۰	
۴- ترانشه کیلومتر ۴۷۶+۰۵۰	۲۲- ترانشه کیلومتر ۵۱۴+۶۰۰	
۵- ترانشه کیلومتر ۴۷۷+۸۵۰	۲۳- ترانشه کیلومتر ۵۱۴+۶۵۰	
ب: بین ایستگاه‌های قارون - بیشه		
۶- ترانشه کیلومتر ۴۷۹+۱۰۰	۲۴- ترانشه کیلومتر ۵۱۸+۷۰۰	
۷- ترانشه کیلومتر ۴۸۰+۰۰۰	۲۵- ترانشه کیلومتر ۵۲۰+۸۰۰	
۸- ترانشه کیلومتر ۴۸۲+۰۰۰	۲۶- ترانشه کیلومتر ۵۲۳+۰۵۰	
ه: بین ایستگاه‌های چمسنگر - کشور		
۹- ترانشه کیلومتر ۴۸۲+۳۰۰	۲۷- ترانشه کیلومتر ۵۲۶+۵۰۰	
۱۰- ترانشه کیلومتر ۴۸۲+۶۰۰	۲۸- ترانشه کیلومتر ۵۲۷+۹۵۰	
۱۱- ترانشه کیلومتر ۴۸۳+۳۰۰	۲۹- ترانشه کیلومتر ۵۳۶+۳۵۰	
۱۲- ترانشه کیلومتر ۴۸۳+۴۵۰	۳۰- ترانشه کیلومتر ۵۳۶+۷۹۶	
۱۳- ترانشه کیلومتر ۴۸۴+۰۰۰	۳۱- ترانشه کیلومتر ۵۳۷+۵۰۰	
۱۴- ترانشه کیلومتر ۴۸۷+۵۰۰	و: بین ایستگاه‌های کشور- تنگ هفت	
۱۵- ترانشه کیلومتر ۴۸۹+۰۰۰	۳۲- ترانشه کیلومتر ۵۴۲+۸۵۰	
۱۶- ترانشه کیلومتر ۴۹۱+۰۰۰	۳۳- ترانشه کیلومتر ۵۴۳+۴۵۰	
ج: بین ایستگاه‌های بیشه- سپیددشت		
۱۷- ترانشه کیلومتر ۴۹۵+۵۰۰	۳۴- ترانشه کیلومتر ۵۴۶+۲۰۰	
ز: بین ایستگاه‌های تنگ هفت- تنگ پنج		
۱۸- ترانشه کیلومتر ۴۹۶+۳۰۰	۳۵- ترانشه کیلومتر ۵۶۷+۶۰۰	



شکل ۶: نقشه موقعیت و کیلومتر نقاط ناپایدار محدوده خطوط ریلی ناحیه لرستان

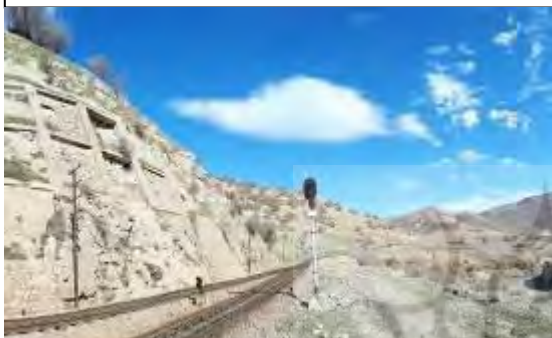
به منظور اعتبار سنجی روش تداخل سنجی راداری تفاضلی، چندین نقطه دارای پتانسیل خطر ناپایداری از نقشه نهایی به دست آمده توسط روش DInSAR انتخاب و با بازدید میدانی کنترل شد. نتایج نشان داد که این روش از دقت بالایی برای شناسایی مناطق خطر ناپایداری دامنه ای در محدوده های وسیع و کوهستانی نظیر ناحیه لرستان برخوردار است. در شکل ۸A ناپایداری قبل از ایستگاه بیشه در کیلومتر ۴۹۲ را مشاهده می شود که نمونه ۱ در تصویر مشخص است که فاصله اندکی از خطوط ریلی دارد و شکل ۸B نمونه ۲ مربوط به ناپایداری در کیلومتر ۳۰۰+۴۹۶ مابین ایستگاه های بیشه و سپید دشت می باشد که همانطور که در تصویر آن ملاحظه می شود، خطر جدی برای خطوط ریلی محسوب می شود. شکل ۹، سری زمانی جابه جایی مواد دامنه ای برای نمونه های A و B در دوره زمانی ژوئای ۲۰۱۵ تا ژوئای ۲۰۱۸ را نشان می دهد که میزان حرکات عمودی از سطح زمین تا ۳٫۵ سانتی متر بوده است. در شکل C، رخداد ناپایداری بعد از ایستگاه بیشه کیلومتر ۳۰۰+۵۰۳ و در شکل D، ناپایداری دامنه ای در کیلومتر ۵۰۰+۵۰۴ مابین ایستگاه های سپید دشت و چمسنگر را نشان می دهد که علیرغم اقدامات سازه ای همچنان ناپایداری وجود دارد. شکل ۱۱ مربوط به سری زمانی جابه جایی مواد دامنه ای برای نمونه های C و D در دوره زمانی ژوئای ۲۰۱۵ تا ژوئای ۲۰۱۸ می باشد که در نمونه D شدیدتر است. شکل E ۱۲ ناپایداری قبل از ایستگاه تنگ هفت کیلومتر ۳۰۰+۵۵۰ و D ۱۲ ناپایداری در کیلومتر ۵۵۰+۶۰۰ مابین ایستگاه های سپید تنگ هفت و تنگ پنج را آشکار می سازد که همانطور که ملاحظه می شود علیرغم جابه جایی کم مواد، با یک رواناب کوچک حجم زیادی از رسوبات به سمت خطوط ریلی حرکت می کند (شکل ۱۳).



ریزش سنگ در کیلومتر ۴۷۱+۸۰۰



ترانشه ناپایدار کیلومتر ۴۷۶+۵۰۰



ترانشه ناپایدار کیلومتر ۴۷۷+۸۵۰



حرکت مواد دامنه ای کیلومتر ۴۷۸



ترانشه ناپایدار کیلومتر ۴۷۹+۱۰۰



جریان مواد واریزه کیلومتر ۴۹۵+۵۰۰

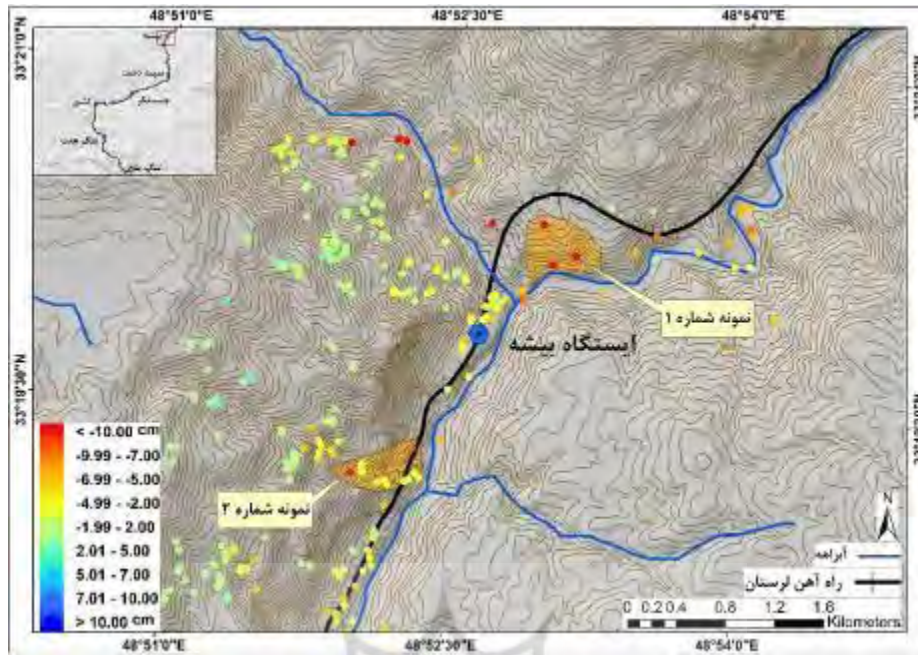


ترانشه ناپایدار کیلومتر ۵۱۸+۷۰۰



ترانشه ناپایدار کیلومتر ۴۲۶+۵۰۰

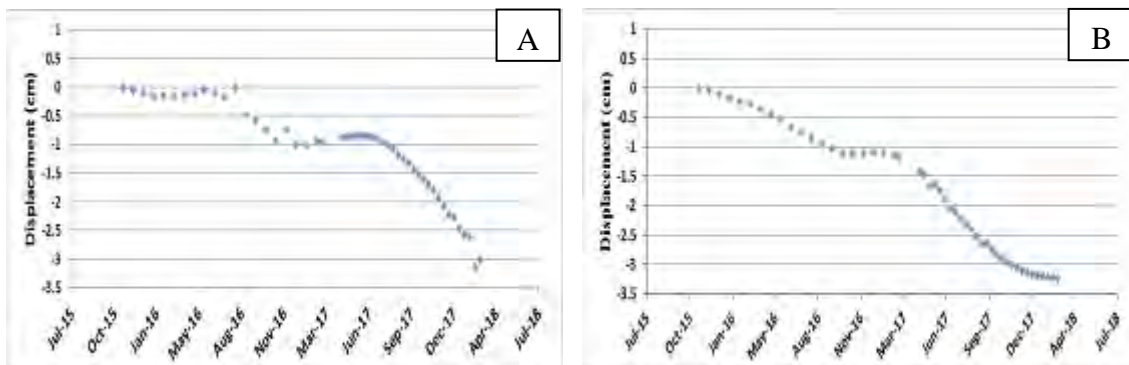
شکل ۷: نمونه‌هایی از ترانشه‌های ناپایدار محدوده خطوط ریلی لرستان



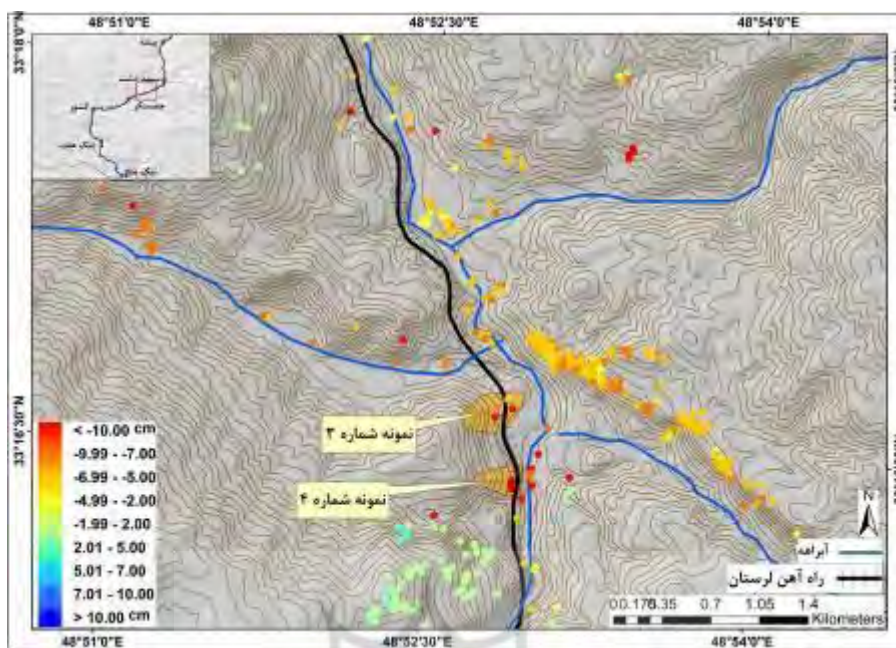
شکل ۸: جابه جایی به دست آمده توسط روش DInSAR در محدوده مورد ایستگاه بیشه



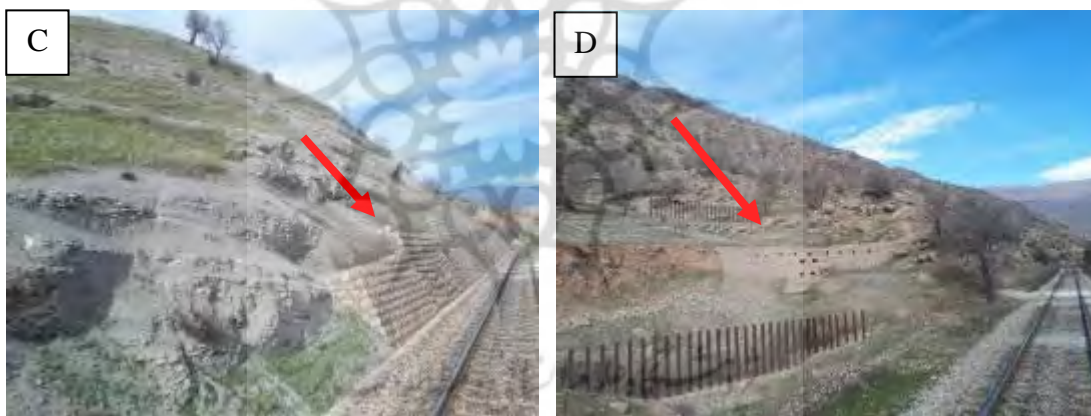
شکل ۹: A- نمونه ۱، ناپایداری قبل از ایستگاه بیشه کیلومتر ۴۹۲، B- نمونه ۲ ناپایداری در کیلومتر ۳۰۰+۴۹۶ مابین ایستگاه های بیشه و سپید دشت



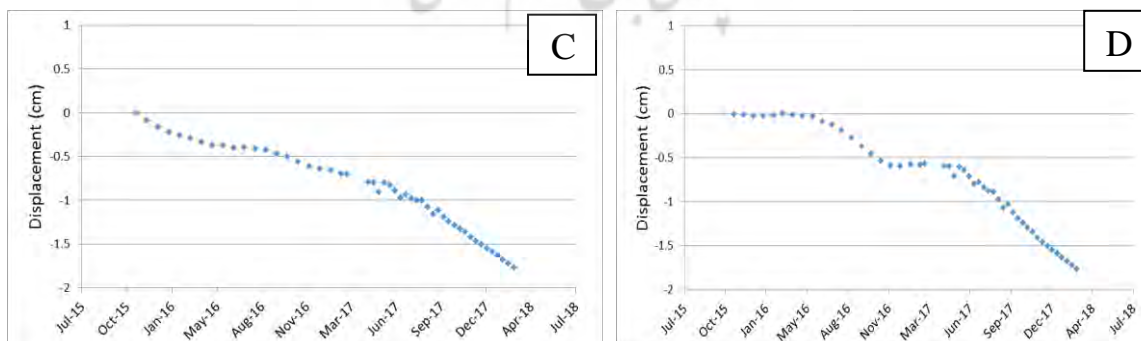
شکل ۱۰: سری زمانی جابه جایی مواد دامنه ای به دست آمده توسط روش DInSAR برای نمونه های A و B



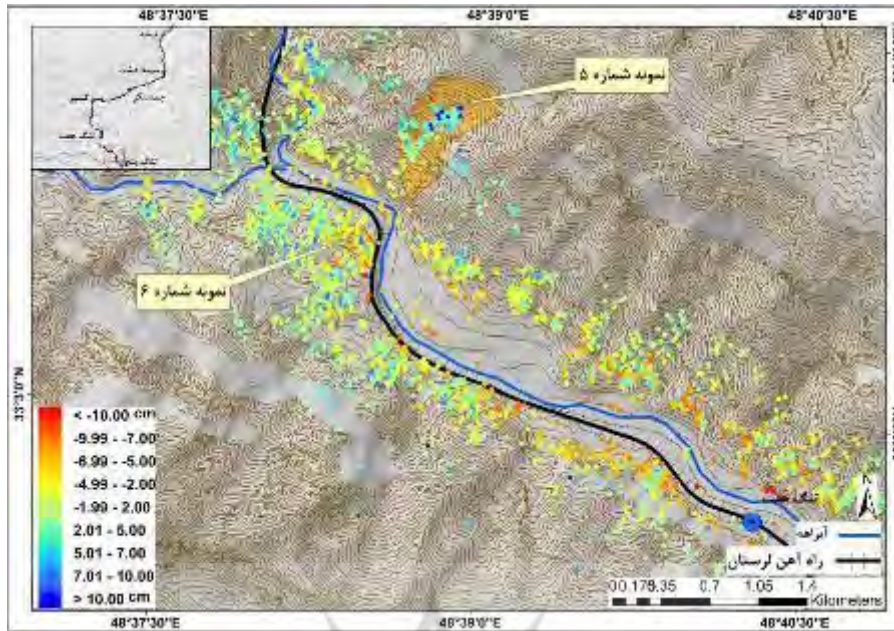
شکل ۱۱: جابه جایی به دست آمده توسط روش DInSAR مابین ایستگاه سپید دشت و چمنگر.



شکل ۱۲: C- نمونه ۳ ناپایداری بعد از ایستگاه بیشه کیلومتر $۳+۳۰۰.۵$ D- نمونه ۳ ناپایداری در کیلومتر $۵۰۴+۵۰۰$ مابین ایستگاه های سپید دشت و چمنگر



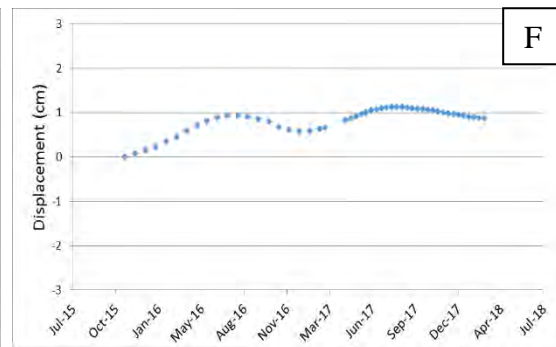
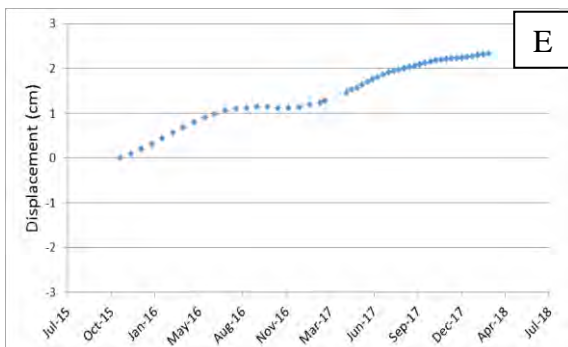
شکل ۱۳: سری زمانی جابه جایی مواد دامنه ای به دست آمده توسط روش DInSAR برای نمونه های C و D



شکل ۱۴: جابه جایی به دست آمده توسط روش DInSAR مابین ایستگاه تنگ هفت و تنگ پنج



شکل ۱۵: میزان جابه جایی به دست آمده توسط روش DInSAR در محدوده مورد مطالعه . E- نمونه ۵ ناپایداری قبل از ایستگاه تنگ هفت کیلومتر $۳۰۰+۵۵$ D- نمونه ۶ ناپایداری در کیلومتر $۶۰۰+۵۵$ مابین ایستگاه های تنگ هفت و تنگ پنج



شکل ۱۶- سری زمانی جابه جایی مواد دامنه ای به دست آمده توسط روش DInSAR برای نمونه های E و F

نتیجه گیری

خطوط ریلی ناحیه لرستان به دلیل عبور از ارتفاعات زاگرس مرتفع و چین خورده با دارا بودن تناوبی از سازندهای زمین‌شناسی با مقاومت‌های مختلف مستعد رخداد ناپایداری‌های متعددی است. با توجه به صعب‌العبور بودن بخش وسیعی از منطقه مورد مطالعه امکان دسترسی به برخی از دامنه‌های مشرف به خطوط ریلی امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا در این پژوهش از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری با استفاده از تصاویر پایین گذر Sentinel-1 برای شناسایی دامنه‌های ناپایدار و اندازه‌گیری حرکات آهسته مواد دامنه‌ای در محدوده خطوط ریلی ناحیه لرستان استفاده شده است. به منظور صحت سنجی نتایج داده‌ای راداری با استفاده از بازدید میدانی، تعداد ۳۵ نقطه آسیب‌پذیر در محدوده خطوط ریلی ناحیه لرستان شناسایی شد که نتایج این پژوهش نشان داد که داده‌های راداری و روش پردازش تداخل سنجی تفاضلی به دلیل پوشش گسترده و فراوانی دیتا و دقت بالا، از پتانسیل خوبی برای آشکارسازی ناپایداری دامنه‌ها و محاسبه میزان جابه‌جایی آن‌ها برخوردار می‌باشد. تفسیر نمودارهای سری زمانی به خوبی نشان داد که بیشترین میزان حرکات مواد دامنه‌ای در فصول پاییز و بهار اتفاق افتاده که میزان بارش در این فصل‌ها در این منطقه بیشتر از سایر فصل‌هاست. بیشترین میزان حرکت مواد دامنه‌ای در بازه سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ حدود ۲۸/۸ سانتیمتر در محدوده ایستگاه تنگ هفت تا تنگ پنج می‌باشد. به طور کلی برای سازه‌های خطی مانند راه آهن لرستان که مدام در معرض خطر ناپایداری قرار دارد نظارت مستمر می‌تواند یکی از اقدامات غیرسازه‌ای سودمند برای کاهش خطر ناپایداری باشد. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات دی مارتیر و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۶ که با روش ترکیب روش میدانی و تکنیک تداخل سنجی راداری بر مبنای الگوریتم پراکنش گرهای پایدار (PSI) و همبستگی پیکسل‌ها (CPT) با استفاده از تصاویر راداری ماهواره COSMO-SkyMed در یک بازه سه ساله از سال ۲۰۰۸ تا سال ۲۰۱۱ در دامنه‌های شهرستان پالمو در منطقه سیسیل ایتالیا پرداختن نشان داد که استفاده از تصاویر راداری با رزولوشن بالا و روش تداخل سنجی راداری بهترین و مقرون به صرفه‌ترین گزینه در پایش حرکات آهسته مواد دامنه‌ای خصوصاً در مناطق وسیع مانند منطقه کوهستانی مناسب است و همچنین پژوهش اخیر حداکثر حرکت مواد دامنه‌ای را ۴۶ سانتیمتر در بازه سه ساله تعیین نمودند و این پژوهش به ۲۸،۸ سانتی متر رسید. در پژوهش کنفورتو و همکاران در سال ۲۰۱۷، با استفاده از تصاویر ماهواره TerraSAR-X و ترکیب تکنیک همبستگی پیکسل‌ها (CPT) و اندازه‌گیری‌های میدانی، در بازه زمانی اکتبر ۲۰۱۳ تا اکتبر ۲۰۱۴ در منطقه پاپانیس در جنوب ایتالیا، به میزان حداکثر ۴۰ سانتیمتر رسیدند. هر دو پژوهش در منطقه کوهستانی انجام شده بود لیکن با بارش بیشتر و محققین به افزایش سطح پیرومتری آب‌های زیر زمینی در اثر بارش مزبور به عنوان عمل ناپایداری دامنه‌ای تأکید نمودند. نتایج بررسی‌های میدانی در این پژوهش نیز نشان داد که بیشتر حرکات مواد دامنه‌ای در فصول پاییز و بهار که میزان بارش افزایش می‌یابد، رخ داده است.

سپاسگزاری

این مقاله به کمک تیم زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه فدیریک دوم ناپل ایتالیا^۲ انجام گرفته است که بدینوسیله از اساتید بزرگوار پرفسور دومینیکو کالکاترا^۳ و دیگو دی مارتیر^۴ برای فراهم نمودن امکانات مورد نیاز قدردانی می‌شود و همچنین از سازمان فضایی اروپا (Esa)^۵ برای در اختیار دادن تصاویر راداری ماهواره Sentinel-1 و همچنین شرکت راه آهن جمهوری اسلامی ایران برای ایجاد تسهیلات و امکانات بازدید از خطوط ریلی ناحیه لرستان سپاسگزاری می‌شود.

۱- Diego Di Martire et al

2- Pierluigi Confuorto et al

2 - Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, Federico II University of Naples, via Claudio 21, 80125 Naples, Italy

3 - Domenico Calcaterra

4 - Diego Di Martire

5 - European space agency

منابع

- ملکی راد، زینب (۱۳۹۰). بررسی ساختارهای لرزه ای در استان لرستان، همایش منطقه ای زمین شناسی فلات ایران، ۵۴ اسفند ماه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زرنند-صص ۲۴۶-۲۳۸.
- بلواسی، ایمانعلی، رضایی مقدم، محمد حسین، نیکجو، محمد رضا، ولیزاده، کامران، خلیل (۱۳۹۴). مقایسه مدل شبکه عصبی مصنوعی با فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در ارزیابی خطر زمین لغزش، دانش مخاطرات/دوره ۲، شماره ۲ تابستان ۱۳۹۴/ ص ۲۵۰-۲۲۵.
- خوانین زاده، نغمه، معتق، مهدی، شریفی، محمد علی (۱۳۸۹). مطالعه و بررسی زمین لغزش با استفاده از تداخل سنجی راداری نشریه علمی - ترویجی مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دوره اول، شماره ۳.
- روستایی، شهرام، روستایی، مهاسا، شریفی کیا، محمد، یاراحمدی، جمشید (۱۳۹۲). کاربرد تداخل سنجی تفاضلی راداری در شناسایی و پایش زمین لغزشها، مطالعه موردی: حوزه آبخیز گرم چای میانه نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز ۲۳۳۱-۲۳۳۱، صفحات ۲۳۱، جلد ۵، شمار
- احمد زاده، حسن، روستایی، شهرام، نیکجو، محمد رضا، دهقانی، مریم (۱۳۹۴). برآورد مساحت و حجم توده‌ی لغزشی با استفاده از تکنیکهای *IRRRR* و مشاهدات *PPS* (مطالعه موردی پهنه لغزشی روستای گوگرد). پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۲، صص. ۲۸-۱۸.
- شیرانی، کورش، سیف، عبدالله، شریفی کیا، محمد (۱۳۹۳). ارزیابی کارایی سنجنده های *RRRR* و *PLLRRR* به کمک تداخل سنجی تفاضلی در شناسایی و پایش زمین لغزش ها در زاگرس. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز ۳۳۳۳-۳۰۳، صفحات ۸۲۲+ جلد ۶، شماره ۳.
- Atzori, S., 2013. Understanding earthquakes: the key role of radar images. *Nucl. Instrum.Methods Phys. Res.* 720, 178-181. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2012.12.005>.
- Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 58 (1), 21-44.
- Berardino, P., Constantini, G., Franceschetti, G., Iodice, L., Pietranera, L., Rizzo, V., 2003. Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Matera (Basilicata, Italy). *Eng. Geol.* 68 (1-2), 31-51.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 40, 2375-2383.
- Berberian, M., and King, G.C.P., 1981, Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v.18, no.2, p.210-265.
- Bordoni, M., Bonì, R., Colombo, A., Lanteri, L., Meisina, C. A methodology for ground motion area detection (GMA-D) using A-DInSAR time series in landslide investigations. *Catena* 163 (2018) 89-110. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.013>
- Bovenga, F., Wasowski, J., Nitti, D.O., Nutricato, R., Chiaradia, M.T. Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. *Remote Sensing of Environment* 119 (2012) 272-285. <https://doi:10.1016/j.rse.2011.12.013>.
- Colesanti, C., & Wasowski, J. (2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, 88, 173-199.

- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2003). Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology Special Issue on Remote Sensing and Monitoring of Landslides*, 68(1–2), 3–14.
- Costantini, M., Ferretti, A., Minati, F., Falco, S., Trillo, F., Colombo, D., Novali, F., Malvarosa, F., Mammone, C., Vecchioli, F., Rucci, F., Fumagalli, F., Allievi, F., Grazia Ciminelli, F., Costabile, S. Analysis of surface deformations over the whole Italian territory by interferometric processing of ERS, Envisat and COSMO-SkyMed radar data. *Remote Sensing of Environment* 202 (2017) 250–275. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.017>.
- Devanthery, N., Crossetto, M., Cuevas-González, M., Monserrat, O., Barra, A., Crippa, B. Deformation monitoring using Persistent Scatterer Interferometry and Sentinel-1 SAR data. *Procedia Computer Science* 100 (2016) 1121 – 1126. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2016.09.263>
- Di Martire, D., Ascione, A., Calcaterra, D., Pappalardo, G., Mazzoli, S., 2015. Quaternary deformation in SE Sicily: insights into the life and cycles of forebulge fault systems. *Lithosphere* 7 (5), 519–534. <http://dx.doi.org/10.1130/L453.1>.
- Di Martire, D., Iglesias, R., Monnels, D., Centolanza, G., Sica, S., Ramondini, M., Pagano, L., Mallorquí, J.J., Calcaterra, D., 2014. Comparison between differential SAR interferometry and ground measurements data in the displacement monitoring of the earthdam of Conza della Campania (Italy). *Remote Sens. Environ.* 148, 58–69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.014>.
- Di Martire, D., Tessitore, S., Brancato, D., Grazia Ciminelli, M., Costabile, S., Costantini, M., Vito Graziano, G., Minati, F., Ramondini, M., Calcaterra, D. Landslide detection integrated system (LaDIS) based on in-situ and satellite SAR interferometry measurements. *Catena* 137 (2016) 406–421. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.002>.
- Dong, J., Liao, M., Xu, Q., Zhang, L., Tang, M., Gong, J. Detection and displacement characterization of landslides using multitemporal satellite SAR interferometry: A case study of Danba County in the Dadu River Basin. *Engineering Geology* 240 (2018) 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.015>
- Duro, J., Closa, J., Biescas, E., Crossetto, M., & Arnaud, A. (2005). High resolution differential interferometry using time series of ERS and ENVISAT SAR data. *Proc. of the 6th. Geomatic Week Conference, February 2005, Barcelona, Spain (CDROM)*.
- Falcon, N.L., 1974. Southern Iran: Zagros Mountains. In: A. Spencer (Editor), *Mesozoic-Cenozoic Belts. Spec. Publ. Geological Society of London*, 4, 199-211.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39 (1), 8–20. <http://dx.doi.org/10.1109/36.898661>.
- Fruneau, B., Achace, J., Delacourt, C., 1996. Observation and modeling of the Saint-Etienne-de-Tine'e landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics* 265 (3–4), 181–190.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94, 9183–9191.
- Hanssen, R. F. "Radar interferometry: data interpretation and error analysis," Chapter 2, pp. 10-15, Pub. Springer, 2001.
- Hilley, G.E., Burgmann, R., Ferretti, A., Novali, F., Rocca, F., 2004. Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. *Science* 304, 1952–1955.
- Hong, Y., Adler, R., and Huffman, G.: Use of satellite remote sensing data in the mapping of global landslide susceptibility, *Nat. Hazards*, 43, 245–256, 2007b.

- Hong, Y.; Adler, R.F. and Huffman, G. (2007). An experimental global prediction system for rainfall-triggered landslides using satellite remote sensing and geospatial datasets, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote*, 45: 1671–1680.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31, L23611. <http://dx.doi.org/10.1029/2004GL021737>.
- Infante, D., Confuorto, P., Dimartire, D., Ramondini, M., Calcaterra, D., 2016. Use of DInSAR data for multi-level vulnerability assessment of urban setting affected by slow-moving and intermittent landslides. *Procedia engineering* 158(2016) 470-475.
- Kiseleva, E., Mikhailov, V., Smolyaninova, E., Dmitriev, P., Golubev, V., Timoshkina, E., Hooper, A., Samiei-Esfahany, S., Hanssen, R. PS-InSAR monitoring of landslide activity in the Black Sea coast of the Caucasus. *Procedia Technology* 16 (2014) 404 – 413. doi: 10.1016/j.protcy.2014.10.106.
- Lagios, E., Sakkas, V., Novali, F., Bellotti, F., Ferretti, A., Vlachou, K., Dietrich, V., 2013. *eeeeeee™ ddd GSS rrdddd dffotttt inn miii trrigg ff nnntrriii ooloooo* (2222–2012): tectonic implications. *Tectonophysics* 594, 38–59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.03.012>.
- Lazecky, M., Canaslan Comut., Hlavacova, I., Gurboga, S. Practical Application of Satellite-Based SAR Interferometry for the Detection of Landslide Activity. *procedia earth and Planetry Science* 15(2015)613-618. doi: 10.1016/j.proeps.2015.08.113.
- Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorqui, J.J., Berardino, P., Sansosti, E., 2004. A small baseline approach for investigating deformations on full resolution differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 42, 1377–1386.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., et al. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by Radar Interferometry. *Nature*, 364, 138–142.
- Metternicht, G., Hurni, L., Gogu, R 2005. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geospatial system for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment* 98:284-303.
- Mora, O., Mallorqui, J.J., Broquetas, A., 2003. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric sar images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41 (10):2243–2253. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2003.814657>.
- Novellino, A., Cigna, F., Sowter, A., Syafiudi, M.F., Di Martire, D., Ramondini, M., Calcaterra, D., 2015. Intermittent Small Baseline Subset (ISBAS) InSAR Analysis to monitor landslides in Costa Della Gaveta, Southern Italy. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 26–31 July 2015, Milan, Italy, pp. 3536–3539 <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326584>.
- Prati, C., Ferretti, A., & Perissin, D. (2010). Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations. *Journal of Geodynamics*, 49, 161–170. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2009.10.011>.
- Rott, H., & Nagler, T. (2006). The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazard. *vvveees in eeeee Rssaacc,, ((()) , :00.//// / . asr.2005.06.059*.
- Sanabria, M.P., Guardiola-Albert, C., Tomás, R., Herrera, G., Prieto, A., Sánchez, H., Tessitore, S., 2014. Subsidence activity maps derived from DInSAR data: Orihuela case study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14, 1341–1360. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-14-1341-2014>.
- Strozzi, T., Delaloye, R., Poffet, D., Hansmann, J., Loew, S., 2011. Surface subsidence and uplift above a headrace tunnel in metamorphic basement rocks of the Swiss Alps as

detected by satellite SAR interferometry. Remote Sens. Environ. 115, 1353–1360. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.001>.

- Usai, S., 2003. A least squares database approach for SAR interferometric data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41 (4), 753–760 (part 1).
- Wasowski, J., Bovenga, F., 2014. Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi-Temporal Interferometry: current issues and future perspectives. *Eng. Geol.* 174, 103–138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.003>.

