



پایش جابجایی ارتفاعی زمین و تحلیل اثرات ژئومورفولوژیکی آن با استفاده از داده‌های دورسنجی

مقاله پژوهشی

علی عبدالملکی، امجد ملکی، علی خزایی

دریافت: ۱۸ بهمن ۱۳۹۹ / پذیرش: ۱۸ فروردین ۱۴۰۰

دسترسی اینترنتی: ۱۵ دی ۱۴۰۰

چکیده

یکی از مهم‌ترین اثرات زمین‌لرزه جابجایی زمین و تغییرات مورفولوژی حاصل از آن است. برآورد میزان جابجایی زمین و پایش تغییرات مورفولوژی این پدیده به منظور مدیریت بحران یکی از اقدامات اساسی بعد از وقوع زلزله محسوب می‌گردد. در دهه‌های اخیر، تلاش‌های گسترده‌ای جهت پایش تغییرات و جابه‌جایی پوسته زمین صورت گرفته است. با ترازیابی دقیق و مشاهدات زمینی، می‌توان تغییرات را با دقت زیاد اندازه‌گیری کرد که اندازه‌گیری زمینی مستلزم هزینه و به‌صورت نقطه‌ای و پراکنده قابل اندازه‌گیری است. استفاده از فن‌آوری سنس‌ازدور در علوم مختلف زمین به دلیل پوشش وسیع تصاویر ماهواره‌ای، بهنگام بودن تصاویر و هزینه پایین آن نسبت به روش‌های زمینی بسیار متداول است. یکی از کاربردهای سنس‌ازدور نمایش و کنترل جابجایی‌های پوسته زمین در اثر عواملی چون زلزله، رانش، فرونشست است. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری و روش تداخل سنس‌جی راداری، به دلیل پوشش گسترده و تصویربرداری دوره‌ای و با استفاده دقتی در حدود سانتی‌متر، ابزار مناسبی جهت در پایش تغییرات پوسته زمین است.

در حال حاضر تصاویر ماهواره‌های منظومه ماهواره Sentinel-1، که از سال ۲۰۱۴ توسط آژانس فضایی اروپا به‌صورت رایگان در اختیار عموم قرار گرفته است و نیز به‌طور مداوم نیز در حال تصویربرداری

پیشینه و هدف زلزله یکی از مهم‌ترین وقایع طبیعی است که هر ساله خسارات مالی و جانی فراوانی در سراسر جهان از خود به جای می‌گذارد. زلزله عبارت است از لرزش زمین در اثر آزادسازی سریع انرژی که اغلب موارد در اثر لغزش در امتداد یک گسل در پوسته زمین اتفاق می‌افتد. در اثر رخداد زمین‌لرزه ناپایداری‌های زمین‌شناختی-ژئوتکنیکی بسیاری مانند ریزش‌های سنگی متعدد، لغزش‌های خاکی و سنگی، جریان واریزهای و گل روانه، فرونشست غارهای آهکی، روانگرایی و گسیختگی گسترشی روی می‌دهد.

علی عبدالملکی^۱، امجد ملکی^۲ (✉)، علی خزایی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی در آمایش سرزمین، دانشکده ادبیات

و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲. دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه،

ایران

۳. کارشناس گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی،

کرمانشاه، ایران

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات : amjad_maleki@yahoo.com

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1400.12.4.5.2>

(شمال ازگله)، حدود ۳۰ سانتی‌متر جابجایی عمودی پوسته زمین (به‌طرف دربندی خان) به وقوع پیوسته است. اثرات فرونشست و بالآمدگی پوسته زمین ناشی از زلزله در محدوده منطقه مورد مطالعه علاوه بر تغییرات مورفولوژیکی در سطح منطقه بر روی هیدرولوژی منابع آب منطقه نیز اثرگذار بوده است. به‌عنوان مثال زلزله باعث تغییرات محسوس کاهشی حجم آب در سد تنگه حمام و افزایش حجم منابع آب در رودخانه سیروان شده است.

نتیجه‌گیری نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از تکنیک تداخلسنجی راداری علاوه بر این که می‌تواند ابزار کارآمدی در برآورد میزان جابجایی پوسته زمین قلمداد گردد، می‌تواند در برآورد نسبتاً دقیق تغییرات کمی منابع آب حاصل از جابجایی پوسته زمین استفاده گردد.

واژه‌های کلیدی: زمین‌لرزه، جابجایی پوسته زمین، تداخلسنجی راداری، تغییرات مورفولوژی، سرپل ذهاب

است، ابزاری مناسب جهت پایش زلزله پایش تغییرات پوسته زمین است. در تحقیق حاضر جهت نیل به هدف فوق با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و تکنیک تداخلسنجی راداری، به بررسی میزان تغییر شکل پوسته زمین ناشی از حرکات بعد از لرزه‌ای شهرستان سرپل ذهاب پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها در این پژوهش با استفاده از تکنیک تداخلسنجی راداری، میزان تغییر شکل ناشی از حرکات بعد از لرزه شهرستان سرپل ذهاب در بازه زمانی ۷ روزه ۲۰۱۷/۱۱/۱۱ تا ۲۰۱۷/۱۱/۱۷ بعد از وقوع زلزله با استفاده از داده‌های راداری (S_1A-IW-SLC)، با بیس لاین مکانی ۱۰۰ متر و تجزیه و تحلیل در نرم‌افزار SNAP، ArcGIS، SNTINEL و گوگل ارث استفاده شده است.

نتایج و بحث بررسی نتایج تغییر شکل پوسته زمین پس از زمین‌لرزه نشان می‌دهد؛ بیشترین میزان فرونشست زمین در شمال، شمال غرب شهر سرپل ذهاب (حدود ۹۰ سانتی‌متر جابجایی عمودی پوسته زمین) به سمت غرب، و بالآمدگی زمین در اطراف کانون زلزله

مقدمه

قرار گرفتن ایران در یکی از مناطق لرزه‌خیز جهان و احتمال وقوع زلزله‌های مخرب در همه نقاط کشور، اهمیت مطالعات لرزه‌خیزی و لرزه زمین ساختی را دوچندان کرده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تقریباً هر ده سال یکبار زمین‌لرزه بالای ۶ ریشتر در ایران رخ داده است. بعضی از انواع زلزله‌ها دارای عمق کم هستند و در مناطق پرجمعیت، خسارات مالی و جانی زیادی را وارد می‌کنند. برای مدیریت ریسک و ارزیابی خطر زمین‌لرزه‌ها، شناسایی جامع، مدل‌سازی و تهیه نقشه آن‌ها بسیار ضروری است (۱۰). این موضوع می‌تواند مبنای کسب آگاه از توزیع مکانی و زمانی گسل‌ها در نظر گرفته شود.

با وجود مطالعات بسیار در زمینه رخداد زلزله هنوز سؤالات زیادی مطرح است. وقوع زمین‌لرزه‌های مکرر در ایران بیانگر فعال بودن جنبش‌های زمین ساختی در عهد حاضر است. به لحاظ مورفوتکتونیک روند اصلی ناهمواری‌های ایران شمال‌غربی-جنوب شرقی است که نتیجه قرار گرفتن پوسته ایران در محل همگرایی دو صفحه عربستان در جنوب و صفحه توران در شمال است. در حال حاضر با ایجاد پوسته اقیانوسی در دریای سرخ، عربستان با سرعت ۳-۳/۵ سانتیمتر در سال و در جهت جنوب شرقی-شمال غربی، فلات ایران را تحت فشار قرار می‌دهد. بروز زلزله‌های متعدد با توجه به نوع مورفولوژی زمین، زمین‌شناسی و توپوگرافی در معرض انواع تغییرات زمین از جمله فرونشست و بالا آمدگی زمین، ریزش‌های سنگی متعدد، لغزش‌های خاکی و سنگی، جریان واریزه‌ای و گل روانه، فرونشست غارهای آهکی، روانگرایی و گسیختگی گسترشی قرار دارد. امروزه در ژئومورفولوژی نیز مانند سایر علوم، استفاده از سنجش‌ازدور در مطالعه عوارض سطح زمین جایگاه خاصی یافته است. افزایش روش‌های سنجش‌ازدور قابلیت اطمینان پایش زمین را افزایش داده است (۳). در مطالعات مربوط به زلزله، استفاده از تصاویر دوبعدی و سه‌بعدی ماهواره‌ای و تصاویر حرارتی می‌تواند کمک زیادی به تفسیر ژئومورفولوژیکی مناطقی که

تحت تنش‌های زمین ساختی قرار دارند، کند. با گسترش روزافزون فناوری سنجش‌ازدور، از سنجنده‌های متنوعی استفاده می‌کند که از نقطه‌نظر نوع منبع انرژی، می‌توان این سنجنده‌ها را به دودسته فعال و غیرفعال دسته‌بندی کرد. سنجش‌ازدور غیرفعال هنگامی مطرح می‌شود که یک منبع طبیعی انرژی که عمدتاً خورشید است، مورد استفاده قرار گیرد. از طرف دیگر سنجنده‌های فعال، امواجی را که خود منبع آن هستند تولید می‌کنند و با ارسال آن به سمت هدف موردنظر و دریافت انرژی برگشتی از آن، به هندسه و ویژگی‌های متنوع هدف پیش‌برد. از جمله سنجنده‌های فعال، سنجنده‌های راداری هستند که محبوبیت استفاده از آن‌ها در جامعه سنجش‌ازدور در سال‌های اخیر با ارسال سنجنده‌های راداری همچون سنتینل-۱ دوچندان شده است. یکی از عمده مزیت‌های استفاده از سنجش‌ازدور راداری این است که امواج در محدوده طیفی ماکروویو برخلاف محدوده نوری تحت تأثیر شرایط جوی قرار نمی‌گیرند و حتی قادرند در ابرها نیز نفوذ کنند. از دیگر مزایای سنجش‌ازدور راداری آن است که می‌تواند در شب و روز، بدون نیاز به انرژی خورشید تصویر تهیه کند. همچنین با توجه به اینکه هزینه مالی استخراج تغییرات زمین در اثر عوامل متعددی مانند زلزله، لغزش و... برای تداخل‌سنجی راداری بسیار مقرون‌به‌صرفه و دقیق است به همین منظور امروزه اکثر مطالعات در حوزه بررسی تغییرات به این سمت سوق داده شده‌اند. در دهه‌های اخیر، تلاش‌های گسترده‌ای جهت پایش تغییرات و جابه‌جایی پوسته زمین صورت گرفته است. در کمتر از دو دهه قبل، تکنیک تداخل‌سنجی راداری InSAR انقلابی بزرگ در زمینه مطالعات تغییر شکل پوسته زمین ایجاد کرد (۵). تصاویر ماهواره‌ای راداری، دارای کاربردهای بسیاری در پایش تغییرات پوسته زمین است و از آن جمله می‌توان کاربردهای لرزه‌ای شامل بررسی زلزله‌ها، گسل‌ها و تغییرات تک‌تونیک را نام برد. تکنیک تداخل‌سنجی راداری، جابه‌جایی سطح زمین را با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالایی اندازه‌گیری می‌کند (۱). تداخل‌سنجی راداری تکنیکی است که به واسطه آن اختلاف‌فاز

گسل تقریباً افقی را نشان می‌دهد. همچنین یک منبع بسیار تکانشی را که به سمت جنوب گسترش دارد استنباط کردند. این خصوصیات حرکتی ممکن است در بی‌ثباتی‌های شیب منطقه اثرگذار باشد. در همین زمینه وانگ و همکاران (۲۴) با استفاده از تداخل سنجی راداری به بررسی منبع دقیق پارامترهای زلزله سال ۲۰۰۳ بم پرداختند. تداخل سنجی راداری دیفرانسیل داده‌های تغییر شکل نزدیک میدان را باکیفیت بالا برای زلزله بم ۲۰۰۳ ارائه کرد. با استفاده از فیلتر لبه در زمینه تغییر شکل فاز، می‌توان بخش‌های گسیختگی را به وضوح تشخیص داد. طول کل پارگی تخمین زده شده حدود ۲۴ کیلومتر است. علاوه بر این، داده‌های سنجش از دور نوری نشان می‌دهد که گسل بم یک گسل نیست بلکه از یک سیستم گسل با عرض ۴-۵ کیلومتر تشکیل شده است که شاخه اصلی شناخته شده بین شهر بم و باروت به نظر می‌رسد. بر اساس این نتایج، پیشنهاد کردند که زمین‌لرزه بم یک گسل پنهان یا جدید را پاره کرده. بران و تانر (۹) با استفاده از تصاویر بانند C ماهواره سنتینل-۱، زلزله جنوب حلبچه (سرپل ذهاب) را مطالعه کردند. آن‌ها پردازش‌های خود را با استفاده از نرم‌افزار اسنپ (Sentinels Application Platforms)، انجام دادند. نتایج نشان‌دهنده فرورفتگی و نشست به میزان ۴۵ سانتیمتر و بالآمدگی ۴۹ سانتی‌متر در منطقه بود.

فیلدینگ و همکاران (۲۳) با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل و نرم‌افزار GAMMA (نرم‌افزار پردازش تصاویر ماهواره‌ای)، به بررسی تغییرات جابه‌جایی زمین و زمین‌لغزش ناشی از زلزله سرپل ذهاب پرداختند. نتایج نشان‌دهنده تغییرات حداکثر تا یک متر در جهت خط دید ماهواره و میزان رانش زمین در راستای مایل حداکثر ۵ متر در عمق ۱۷ کیلومتری زمین است. تولومی و همکاران (۲۰) با استفاده از تصاویر سعودی و نزولی سنجنده‌های ALOS-2 و Sentinel-1، زلزله سرپل ذهاب را مطالعه و با استفاده از نرم‌افزار SARSCAPE میزان جابه‌جایی را حداکثر تا یک متر در راستای جهت دید ماهواره برآورد کردند. آن‌ها برای حذف اثر توپوگرافی از مدل رقومی زمین SRTM با دقت ۹۰ متر استفاده کردند. بهلینگ و

بین تصاویر راداری اخذ شده از یک منظر، محاسبه می‌شود. این تصاویر ممکن است از موقعیت‌های تصویربرداری و یا حتی زمان‌های تصویربرداری مختلف، اخذ شده باشند (۴). علی‌رغم مزایای تکنیک تداخل سنجی راداری، تغییر در ماهت پراکندگی سطح زمین باگذشت زمان و زاویه میل، به‌کارگیری این روش را محدود می‌کند. تکنیک تداخل سنجی راداری برای اولین بار در سال ۱۹۸۶ میلادی استفاده شد. در پایان سال ۱۹۹۰ گروه‌های مختلفی راه‌های برای کاهش محدودیت‌های تداخل سنجی راداری ارائه کردند (۱۲). یک روش تشکیل اینترفروگرام و معکوس کردن آن‌ها برای استخراج جابه‌جایی افزایشی بازمان بود که روش متداول خط مبنای مکانی کوتاه نام گرفت (۱۴). شروع رادار با گشودگی مجازی از سال ۱۹۵۰ (۱۸)؛ و اولین استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری با استفاده از داده‌های هواپرد رادار در اوایل دهه هفتاد میلادی صورت گرفت (۸). تکنیک تداخل سنجی راداری فضا برد از سال ۱۹۹۳ با مجله Nature که بر روی جلد خود نتیجه حاصل از تحقیق ماسونت و همکاران را چاپ کرد، فراگیر شد (۱۵). شهرستان سرپل ذهاب از شهرستان‌های استان کرمانشاه است که در ۲۱ آبان ۱۳۹۶ زلزله‌ای با شدت ۷/۳ ریشتر رخ داده که باعث تغییرات مورفولوژیکی در سطح منطقه شد. از این رو در این تحقیق سعی می‌شود با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری به پایش جابه‌جایی ارتفاعی زمین و تحلیل اثرات ژئومورفولوژیکی در اثر رخداد زلزله در سطح شهرستان سرپل ذهاب نشان داده شود. تحقیقاتی بسیاری در زمینه تداخل سنجی راداری در سطح جهان و ایران انجام گردیده که به مواردی از آن‌ها در ذیل می‌پردازیم. گومبرت و همکاران (۶) در پژوهش خود مبنی بر منبع تحریک‌آمیز زلزله ۷/۳ ریشتری ازگله با استفاده از تکنیک تداخل سنجی و دیافراگم مصنوعی پرداختند. علی‌رغم خطر بالای رفتار لرزه‌ای، زلزله‌های بزرگ در منطقه و شبکه پیچیده‌ای از گسل‌های فعال، فاصله طولانی مدت مابین زلزله‌های بزرگ اتفاق افتاده در سطح منطقه هنوز دلیل زلزله‌های بزرگ در این منطقه اثبات نشده است. نتایج نشان‌دهنده یک حرکت عمدتاً رانشی بروی یک

منطقه دارد. به جز زمین‌لرزه‌های مشاهده‌شده در فاصله حدود ۲۵ کیلومتری جنوب قصر شیرین که مرتبط با وقوع فوج زمین‌لرزه‌های شهرستان قصر شیرین در آذرماه ۱۳۹۲ است، عملاً فعالیت لرزه‌ای قابل توجه در منطقه در طی صدسال اخیر مشاهده نمی‌گردد. غالب زمین‌لرزه‌های دستگاه روی داده در منطقه دارای بزرگی گشتاوری کمتر از ۵ هستند (۲). عملاً در بخش وسیعی از گستره اطراف کانون زمین‌لرزه اخیر سرپل ذهاب، زمین‌لرزه‌ای با بزرگی بالای ۶ مشاهده نمی‌گردد. یکی از مناطقی که فرضیه عدم وقوع زمین‌لرزه‌های با بزرگی بالا ۷ در بخش چین‌خورده - رو رانده زاگرس را قوت می‌بخشید، این بخش از زون لرزه-زمین‌ساختی زاگرس بود. به لحاظ لرزه‌خیزی تاریخی اما دو زمین‌لرزه ۹۵۸ و ۱۱۵۰ میلادی با بزرگی تخمینی به ترتیب $6/4$ و $5/9$ در مجاورت شهر سرپل ذهاب گزارش شده‌اند که سابقه لرزه‌خیزی بالای این شهر را نشان می‌دهد. زمین‌لرزه آوریل ۹۵۸ میلادی حلوان، سرپل ذهاب کنونی را ویران کرد. زمین‌لرزه که در بغداد حس شد و پس‌لرزه‌های آن که به‌تناوب در سرتاسر ماه‌های نخست سال ادامه داشت، بر منابع آب زیرزمینی در زاگرس اثر گذاشت. بزرگی زمین‌لرزه اصلی $6/4$ در مقیاس امواج سطحی (MS) برآورد شده است. زمین‌لرزه آوریل ۱۱۵۰ میلادی حلوان نیز زمین‌لرزه ویرانگر دیگری است که در منطقه حلوان (سرپل ذهاب) روی داد و سبب دگر ریختی‌های زمین در کوه‌ها شد. رباط بهروزی ویران شد و شمار زیادی از کوچ‌نشینان ترکمن کشته شدند. در بغداد زمین‌لرزه به‌شدت حس شد و زمین به‌نگام جنبش چند بار شکل امواج به خود گرفت و باعث ترک خوردن برخی دیوارها شد. بزرگی این زمین‌لرزه $5/9$ در مقیاس امواج سطحی (MS) برآورد شده است (۱۹). از نظر سازوکار گسل‌های این بخش از زاگرس، همان‌طور که مشاهده می‌گردد غالب سازوکارهای حاکم بر زمین‌لرزه‌های این زون از نوع معکوس یا تراستی بر روی صفحه‌های با روند شمال غرب-جنوب شرق کم‌وبیش مشابه سازوکار زمین‌لرزه اخیر سرپل ذهاب هستند.

همکاران (۱۷) با تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور نوری و راداری و لرزه‌شناسی اقدام به مطالعه پارامترهای منشأ، لرزه‌های ثانویه و شکستگی‌های ناگهانی شیب زمین در اثر زلزله سرپل ذهاب کردند. آن‌ها از تصاویر صعودی و نزولی سنجنده‌های Sentinel-2 و Sentinel-1 و همچنین از داده نوری Sentinel-2 استفاده کردند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که تلفیق روش‌های لرزه‌شناسی و استفاده از داده‌های سنجش‌ازدوری مختلف برای درک و فهم تغییرات سطح زمین بسیار مفید است. ماتسوکا و همکاران (۱۲) با استفاده از ۵۶ تصویر ماهواره Sentinel-1، زلزله سرپل ذهاب در غرب ایران را مطالعه و اقدام به پایش ساختمان‌های مسکونی با استفاده از روش همبستگی متوالی SAR کردند. آن‌ها موفق به برآورد مساحت و حجم تخریب با استفاده از تلفیق نقشه تخریب به‌دست‌آمده از روش ارائه‌شده و نقشه سه‌بعدی ساختمان‌ها شدند. همچنین پژوهش‌های متعددی در زمینه برآورد میزان جابه‌جایی زمین ناشی از زلزله با استفاده از تصاویر راداری صورت گرفته است. به‌عنوان مثال ماتسوکا و یامازاکی (۱۶)، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ERS/SAR، بر روی زلزله کوکائلی به بزرگی $7/4$ ریشتر در منطقه شمال غربی ترکیه مطالعه نمودند و دریافتند شدت بازپراکنش ساختمان‌های آسیب‌دیده نسبت به قبل از زلزله کاهش یافته، به‌طوری‌که فاز ساختمان‌های آسیب‌دیده بعد از زلزله دچار تغییر شده و میزان همبستگی بین تصویر قبل و بعد از زلزله کاهش پیدا کرده است. ترکر و همکار (۲۱) با استفاده از تجزیه و تحلیل دیجیتال عکس‌های هوایی پس از رویداد زلزله سال ۱۹۹۹ ایزمیت، ترکیه به تشخیص ساختمان‌های فروریخته پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تشخیص ساختمان‌های فروریخته از طریق تحلیل دیجیتال عکس‌های هوایی پس از زلزله بر اساس اطلاعات سایه بسیار دلگرم‌کننده است. همچنین نشان داده شده است که تعیین مقدار آستانه مطلوب برای جداسازی ساختمان‌های فروریخته از ساختمان‌های فروریخته مهم است. توزیع زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاه سده اخیر در گستره مه لرزه‌ای زمین‌لرزه $1396/08/21$ سرپل ذهاب ($MW=7/3$)، دلالت بر سابقه فعالیت لرزه‌ای کم

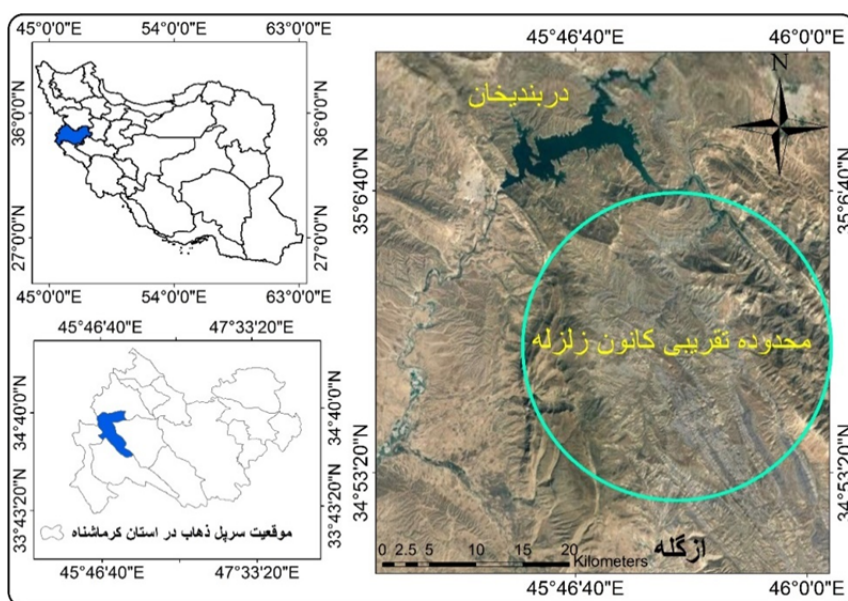
امر که بعد از رخداد هر زلزله چه تغییراتی در سطح پوسته زمین اتفاق می‌افتد در امر برنامه‌ریزی بسیار ضروری و حیاتی است به همین دلیل در این پژوهش با استفاده از تکنیک تداخل سنجی به پایش میزان جابجایی پوسته زمین در اثر زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

مرکز شهرستان سرپل ذهاب، شهر سرپل ذهاب است که در ۵۵۰ متری از سطح دریا و در ۱۴۷ کیلومتری راه اصلی کرمانشاه- قصر شیرین قرار دارد. موقعیت جغرافیایی این شهر در $52^{\circ} 52'$ طول شرقی و $34^{\circ} 24'$ عرض جغرافیایی است. دارای پنج دهستان است که شامل؛ قره‌بلاغ، بز میرآباد، قلعه شاهن، دشت ذهاب، پا طاق (به شیوه). این شهرستان از جلگه‌ای وسیع تشکیل شده که اطراف آن را ارتفاعات و تپه‌ماهورهای احاطه کرده که باعث ایجاد دشت‌های شده است (شکل ۱).

بررسی‌های لرزه‌زمین‌ساختی منطقه زاگرس به‌طور عمده به مطالعات لرزه‌خیزی این منطقه محدود گردیده است. این موضوع از آنجا ناشی می‌شود که گسلش لرزه زا در منطقه زاگرس در سطح زمین رخنمون ندارد (۲). اساساً تغییر شکل الاستیک و رویداد زمین‌لرزه‌های بزرگ در امتداد زون‌های گسلی اصلی در منطقه زاگرس به فوقانی‌ترین بخش پی‌سنگ (ژرفای ۸ تا ۱۲ کیلومتر) محدود گردیده و به دلیل وجود لایه-های تبخیری که در اقیانوس‌های مختلف پوشش رسوبی وجود دارد (۱۱). شکستگی به سطح زمین نمی‌رسد. به دلیل محدودیت مذکور، از مدت‌ها پیش بررسی ساخت‌های ریخت‌شناختی زاگرس در پیوند با تمرکز سطحی زمین‌لرزه‌ها مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. نتیجه این بررسی‌ها به شناسایی تعدادی از عوارض ریخت‌شناختی لرزه زا منجر گردید. کانون سطحی و سازوکار کانونی زمین‌لرزه ۲۱ آبان سرپل ذهاب حکایت از این دارد که گسل مسبب این زمین‌لرزه یکی از قطعه‌های با راستای شمال-شمال غرب گسل جبهه کوهستان (MFF) است که با زاویه بسیار کم (۱۵-۱۰ درجه) به سمت شرق شیب دارد. با توجه به اینکه ایران و استان کرمانشاه دارای موقعیت زلزله‌خیز است توجه و بررسی به این

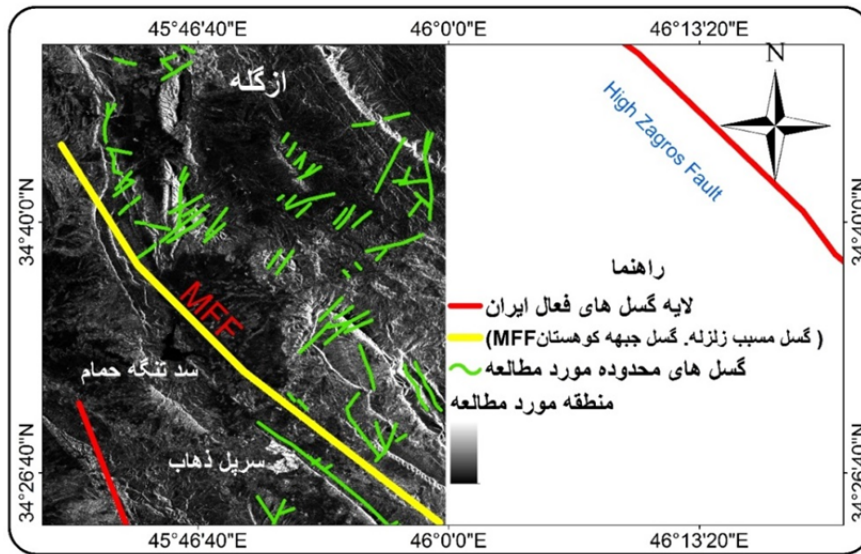


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

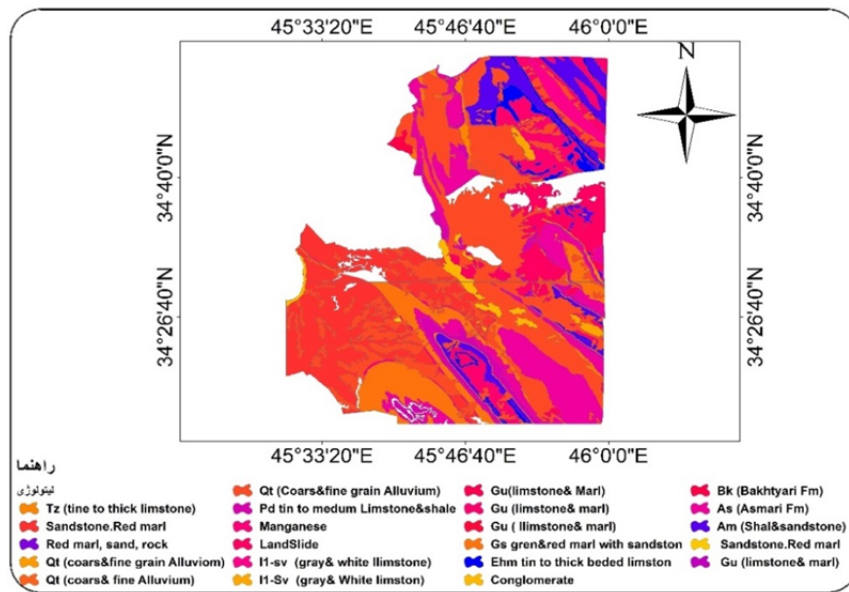
Fig. 1. Geographical location of the study area

پیش ژرفای زاگرس و حاشیه شمالی پلتفرم عربستان است. این پهنه‌های ساختاری توسط گسل‌های مهم از هم جدا شده‌اند (شکل ۲)، مرز بین زاگرس مرتفع و زاگرس چین‌خورده ساده، گسلی است؛ که تحت عنوان گسل تراستی اصلی زاگرس نام‌گذاری شده است. این گسل در حاشیه شمالی گستره مورد مطالعه قرار دارد. مرز پهنه ساختاری زاگرس چین‌خورده و فروبار دزفول نیز گسلی است که تحت عنوان گسل بالا رود نام‌گذاری شده است که بخشی از گسل پیشانی کوهستان است. گسل بالا رود در بیشتر مکان‌ها توسط رسوبات سنوزوئیک پوشیده شده است (۲). انشعاباتی از این گسل را در حاشیه شمالی و جنوبی طاق‌دیس گورپی می‌توان مشاهده نمود. گستره مورد مطالعه در پهنه ساختاری زاگرس چین‌خورده ساده در غرب ایران در فاصله ۱۵ کیلومتری مرز ایران و عراق قرار گرفته است. در ساعت ۲۱ و ۴۸ دقیقه (به وقت محلی) روز ۲۱ آبان ماه ۹۶ هجری شمسی، زمین‌لرزه‌ای با بزرگی گشتاوری ۷/۳ در فاصله ۱۰ کیلومتری از گله و حدود ۳۷ کیلومتری شمال غرب شهرستان سرپل ذهاب از استان کرمانشاه، واقع در مرز ایران و عراق به وقوع پیوست. شبکه لرزه‌نگاری کشوری وابسته به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، با توجه به استفاده از ایستگاه‌های محلی، به ویژه قرائت‌های فاز سه ایستگاه واقع در کشور عراق، کانون زمین‌لرزه را در مختصات ۳۴/۷۷ درجه عرض شمالی و ۴۵/۷۶ درجه طول خاوری مکان‌یابی نمود که از دقت مطلوب‌تری برخوردار است. بر اساس آخرین مکان‌یابی صورت گرفته، عمق کانونی زمین‌لرزه حدود ۱۸ کیلومتر برآورد شده است (۲). کانون سطحی و سازوکار کانونی زمین‌لرزه ۲۱ آبان سرپل ذهاب حکایت از این دارد که گسل مسبب این زمین‌لرزه یکی از قطعه-های با راستای شمال-شمال غرب گسل جبهه کوهستان (MFF) است که با زاویه بسیار کم (۱۰-۱۵) به سمت شرق شیب دارد (شکل ۳).

از نظر زمین‌شناسی شهر سرپل ذهاب در خط‌قعر یک ناودیس با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق قرار گرفته است. یال شمالی این ناودیس بانام کوه میان کال و لایه‌های با شیب برگشته مرز شمالی شهر را به وجود آورده است و رودخانه الوند با قطع این کوه از میان شهر می‌گذرد (۲). گسل یا گسله به شکستگی‌هایی اطلاق می‌شود که سنگ‌های دو طرف صفحه شکستگی نسبت به همدیگر حرکت کرده باشند. این جابه‌جایی می‌تواند از چند میلی‌متر تا صدها متر باشد. انرژی آزاد شده به هنگام حرکت سریع گسل‌های فعال، عامل وقوع اغلب زمین‌لرزه‌ها است. ایران ما به لحاظ زمین‌شناختی به چند منطقه از جمله منطقه زمین‌شناختی آذربایجان، زاگرس، ایران مرکزی و ... تقسیم می‌شود که منطقه زاگرس از جمله مناطق دارای سطح فعالیت بالا محسوب می‌شود. گسل‌ها در پوسته زمین در مقیاس‌های مختلفی تشکیل می‌شوند. عملکرد گسل‌ها، ترتیب قرارگیری واحدهای سنگی را برهم زده و مسائل پیچیده‌ای را به وجود می‌آورد. گسل‌ها می‌توانند توپوگرافی سطح زمین را تغییر دهند. گسل‌ها همچنین می‌توانند بر نحوه توزیع منابع طبیعی همچون آب‌های سطحی تأثیرگذار باشند. فرآیندهای تک‌تونیکی مخصوصاً گسل‌ها در ابعاد کمی و کیفی فرایندهای هیدروژئولوژیکی نقش اساسی و مهمی را ایفا می‌کنند. گسل‌ها گاه موجب تغییر مسیر رودها، ایجاد آبراهه‌ها، پدید آمدن چشمه‌های مختلف و ایجاد اشکال مختلف هیدروژئولوژیکی گوناگونی می‌شوند. گسل‌های اصلی منطقه از دو گروه امتدادلغز و رو رانده بوده که در شکل‌گیری ساختاری منطقه و تغییرات رخساره‌ای نقش اساسی ایفا نموده‌اند (۲۲). تقسیم‌بندی‌های متفاوتی توسط علوی ۱۹۹۴ و بربریان ۱۹۹۵ و دیگران برای زاگرس ارائه شده است که در جدیدترین تقسیم‌بندی، کوه‌های زاگرس از شمال شرق به جنوب غرب، به چند قسمت اصلی تقسیم‌بندی شده‌اند که شامل پهنه‌های زاگرس مرتفع، زاگرس چین‌خورده، فروبار دزفول و منطقه



شکل ۲. موقعیت گسل‌های منطقه مورد مطالعه و گسل جبهه کوهستان (MFF)
 Fig 2. Location of faults in the study area and mountain front fault (MFF)



شکل ۳. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه
 Fig. 3. Geology of the study area

تداخل نما می‌شود. با توجه به رابطه ۱، تداخل نما بدین صورت تشکیل می‌شود که مقدار مختلط تصویر پایه در مقدار مختلط مزدوج تصویر پیرو ضرب می‌شود (۱۳).

$$r_1 S_1 = A_1 e^{-j \frac{4\pi}{\lambda}} \quad [1]$$

$$S_1 = A_2 e^{-j \frac{4\pi}{\lambda}} r_2$$

روش تحقیق

در تداخل سنجی راداری، فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت‌های تصویربرداری و یا زمان‌های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه می‌شود. از تفاضل گیری بین این مقادیر، تصویر جدید حاصل می‌شود که اینترفروگرام نام دارد. تصاویر رجستر شده در مرحله قبلی وارد پروسه تولید

تداخل نما معرف اختلاف ارتفاع این نقاط است همچنین $\Delta\phi Defo$ فاز ناشی از تغییرات ارتفاع (جابجایی)، $\Delta\phi FE$ فاز ناشی از تغییر زاویه دید سنجنده در امتداد آزیموت یا زمین مسطح که در زمان اخذ یک تصویر راداری، فاز ثبت شده تابعی از فاصله سنجنده از هدف است؛ که این فاصله (رنج)، علاوه بر توپوگرافی متأثر از رنج زمینی هدف (فاصله نقطه از پای نادیر) است، $\Delta\phi atm$ فاز مربوط به سهم اتمسفر، تغییر ضریب شکست در مسیر انتشار امواج راداری باعث ایجاد تأخیر زمانی در موج راداری می شود که اگرچه اثر آن بر دامنه قابل صرف نظر کردن است اما مستقیماً بر فاز امواج اثرگذار است. $\Delta\phi orb$ فاز ناشی از نویز که متأثر از اثرات اتمسفر و مدار. در سیستم های فاز به وجود آمده در اثر خطای مداری است. در سیستم های چند عبوری، مختصات دقیق مداری سنجنده ها در برآورد طول خط مبنای مکانی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به طوری که هرگونه خطای مداری سنجنده ها در لحظه اخذ تصاویر تداخل سنجی مستقیماً در محاسبه طول خط مبنای مکانی اثرگذار است. از آنجایی که فاز تداخل نما مقداری بین $-\pi$ تا $+\pi$ دارد و سنجنده تنها بخش غیر صحیح اختلاف فاز رفت و برگشت سیگنال را ثبت می کند. $2k\pi$ ابهامی است که در فاز ثبت شده در سنجنده به ازای هر پیکسل وجود دارد. بنابراین تابع W در رابطه بالا معرف تبدیل فاز به محدوده مورد نظر است (۱۳). نسل جدید خانواده ماهواره های GMES، ماهواره های راداری سنتینل ۱- است. این ماهواره توسط سازمان فضایی اروپا توسعه و طراحی شده است. سکوی A پروژه سنتینل ۱- در تاریخ ۳ آوریل سال ۲۰۱۴ به فضا پرتاب شد و از تاریخ ۳ اکتبر سال ۲۰۱۴ تصاویر آن در اختیار کاربران قرار گرفته است. مأموریت سنتینل ۱- شامل دو ماهواره Sentinel-1A و Sentinel-1B است که در مدار با ارتفاع ۶۹۳ کیلومتر و با اختلاف ۱۸۰ درجه فاز در حرکت اند. این سنجنده قابلیت اخذ تصویر راداری به صورت پلاریزاسیون دو گانه VV, VH, و HV, HHH دارد. ماهواره سنتینل ۱- قادر است هر ۱۲ روز یکبار از کل کره زمین تصویربرداری کند بنابراین در صورت استفاده از هر دو سکوی سنتینل ۱- توان تفکیک زمانی و یا به عبارتی

به طور کلی دو روش برای تداخل سنجی راداری وجود دارد که عبارت است از؛ روش تداخل سنجی تک مسیر و روش تداخل سنجی با تکرار مسیر. در روش تداخل سنجی تک مسیر، با استفاده از دو آنتنی که روی یک سکو نصب شده اند به صورت هم زمان اطلاعات جمع آوری می شود؛ که این حالت خود نیز به دو حالت تداخل سنجی در راستای پرواز و تداخل سنجی در جهت عمود بر راستای پرواز تقسیم می شود؛ و اما در تداخل سنجی با تکرار مسیر، سکو تنها حامل یک آنتن است. این آنتن یک منطقه را در دو عبور مختلف با هندسه تقریباً مشابه پوشش می دهد. این روش بر پایه اطلاعات دقیق از مسیر پرواز است و برای نظارت بر دگرشکلی، زمین لغزش و مطالعات آتش فشان بسیار حائز اهمیت است (۱۷). فاصله بین دو مسیر پرواز خط مبنا نامیده می شود. برای هر سیستم تصویربرداری SAR، خط مبنای بحرانی وجود دارد که در صورت بیش تر بودن طول خط مبنا از این مقدار، تداخل سنجی غیرممکن می شود. داده های ماهواره سنتینل ۱- به دلیل ماهت تصویربرداری به صورت بلوک ها و تکه های مجزا می باشند. از این رو باید آن ها را یکپارچه کرد به این عمل De-burst می گویند. از جمله مواردی که شرایط را برای تداخل سنجی راداری دشوار می کنند، شیب زیاد زمین، زاویه شدید برخورد، توان تفکیک پایین و طول موج کوتاه است. اختلاف فاز به دست آمده از تداخل سنجی راداری متأثر از چند مؤلفه است. برخی از مهم ترین آن ها عبارت اند از؛ مؤلفه مسیرهای مداری، مؤلفه توپوگرافی، مؤلفه جابه جایی و مؤلفه اتمسفری، با توجه به رابطه ۲ تأثیر پارامترهای ذکر شده بر اختلاف فاز حاصل شده قابل مشاهده است.

$$\Delta\phi_{int} = ((\phi_{Topo} + \Delta\phi_{Defo} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{FE} + \Delta\phi_{Noise} + \Delta\phi_{orb}) \quad [2]$$

در این رابطه؛ $\Delta\phi_{int}$ فاز تداخل سنجی راداری، $\Delta\phi_{Topo}$ فاز توپوگرافی، که زمانی به عنوان عامل مزاحم شناخته می شود، که هدف تداخل سنجی بررسی تغییرات ارتفاعی در بازه زمانی باشد. اختلاف فاز پیکسل های مجاور در

۲۰ متر در امتداد رنج است (۲ و ۴). داده‌های استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است.

بازدید سنتینل-۱ به ۶ روز خواهد رسید. پهنای نوار تصویربرداری در این حالت ۲۵۰ کیلومتر است. توان تفکیک مکانی در این نوع از تصویربرداری ۵ متر در امتداد آزیموت و

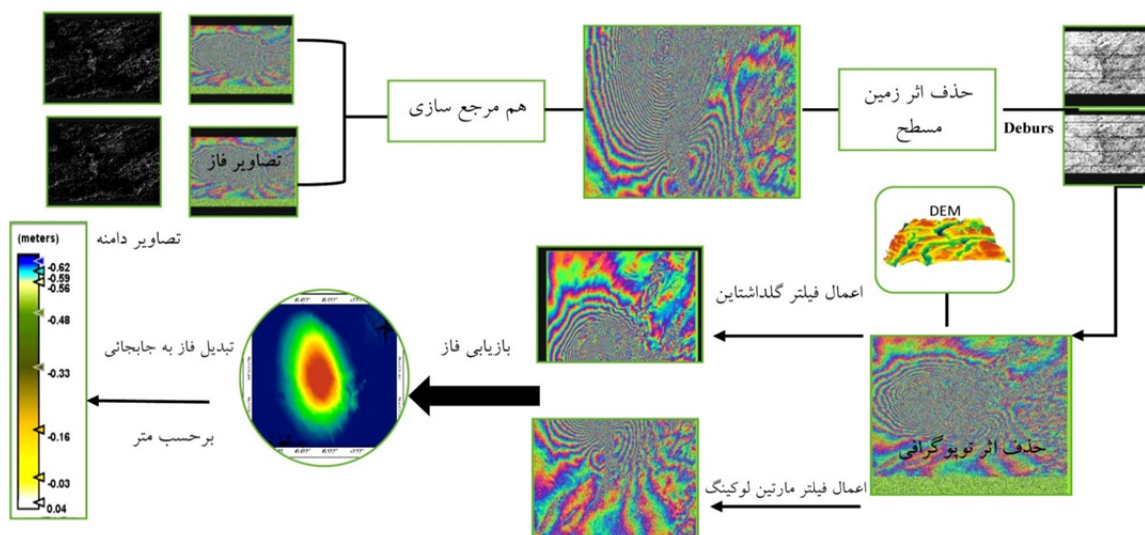
جدول ۱. مشخصات داده‌های اخذ شده

Table 1. Details of the obtained data

سنجنده	نوع تصویر	تاریخ اخذ تصویر	عبور	زاویه فرود	طول موج	قطبش
SENTINEL_1 LEVEL 1	SLC	۲۰۱۷/۱۱/۱۱ ۲۰۱۷/۱۱/۱۷	Ascending	۴۱ - ۴۶	۵/۶	vv

مبنای روش کار بوده است. بدین صورت که با استفاده از نرم افزار (اسنپ_سنتینل: Sentinels Application Platforms) نرم افزار تخصصی داده‌های راداری تصاویر مربوط به ماهواره سنتینل-۱ مربوط به ۱۹ آبان ۱۳۹۶ و سنتینل ۱ مربوط به ۲۶ آبان ۱۳۹۶ با همدیگر تلفیق گردید و سپس با استفاده از پیش پردازش‌ها و پردازش‌های لازم نقشه (میزان جابجایی) پوسته زمین ایجاد و برای صحت سنجی تحقیق از میزان کوه‌رنسی تصاویر استفاده شده است. مراحل و دستورات انجام گرفته در نرم افزار اسنپ و انجام مراحل عملی در این پژوهش در شکل ۴ ارائه شده است.

به منظور بررسی میزان تغییرات جابه‌جایی منطقه سرپل ذهاب، پردازش داده‌های سنتینل-۱ به فرمت SLC از نرم افزار SNAP SNTINEL استفاده گردید. تصویر اخذ شده در حالت صعودی ۲۰۱۷/۱۱/۱۱ به عنوان تصویر مستر (پایه یا اصلی) و تصویر ۲۰۱۷/۱۱/۱۷ عنوان تصویر اسلیو (فرعی یا پیرو)، در اینجا تصویر مستر، تصویری است که از لحاظ هندسی و رادیو متریکی مبنا بوده و تصویر اسلیو از لحاظ هندسی و رادیو متریکی با تصویر مستر هماهنگ می‌شود. این پژوهش به روش تحلیلی-توصیفی انجام شده و استفاده از نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای و در نهایت تجزیه و تحلیل داده‌ها و مشاهدات میدانی



شکل ۴. مراحل پیاده سازی

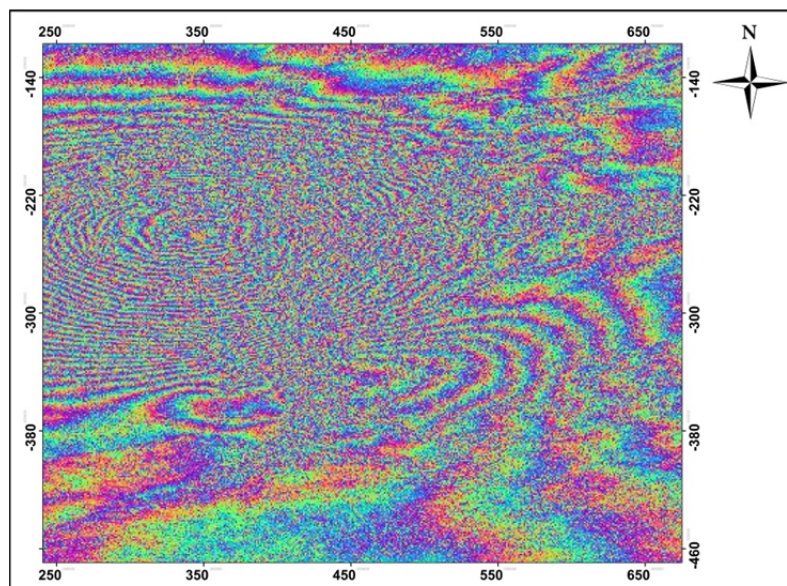
Fig. 4. Implementation steps

میزان تطابق سیگنال‌های تداخل سنجی است. در تصویر کوهرنس مقدار پیکسل‌ها بین ۰ و ۱ بوده و هرچه قدر کوهرنسی به عدد ۱ نزدیک باشد دقت محاسبات در آن پیکسل بیشتر بوده. اطلاعات اصلی برای ارزیابی فرونشست و برآمدگی از تصویر فاز و کوهرنسی به دست می‌آید. برای تولید تصویر فاز و کوهرنسی داده‌های برش خورد منطقه مورد مطالعه در نرم‌افزار SNAP SANTINEL فراخوانی و با استفاده از دستورات موجود در نرم‌افزار به تولید تصاویر فاز و کوهرنسی اقدام گردید (شکل ۵). با توجه به هدف پژوهش، جهت محاسبه میزان جابجایی پوسته زمین، بایستی اثر توپوگرافی تا حد امکان تقلیل یابد. بدین منظور از DEM SRTMI sec HG استفاده گردید.

در مرحله اول برای انجام پژوهش تصاویر مربوط به مربوط به ماهواره سنتینل-۱ (رادار) از سایت کوپرنیکس مربوط به قبل و بعد از رخداد زلزله دانلود شد. تصاویر با توجه به محدوده مورد مطالعه برش داده شد و جهت پیش‌پردازش و تولید تصویر فاز و کوهرنسی آماده گردید.

تولید تصویر فاز و کوهرنسی

تصویر فاز تصویری که نشان‌دهنده اختلاف پرتوهای ارسالی راداری و سیگنال‌های دریافتی برای هر یک از پوشش‌ها است. به عبارت دیگر نشان‌دهنده اختلاف انرژی دریافتی و ارسالی هر پیکسل است. در تصویر فاز فریج‌ها نشان‌دهنده تغییرات سطح هستند. تصویر کوهرنس: نشان‌دهنده

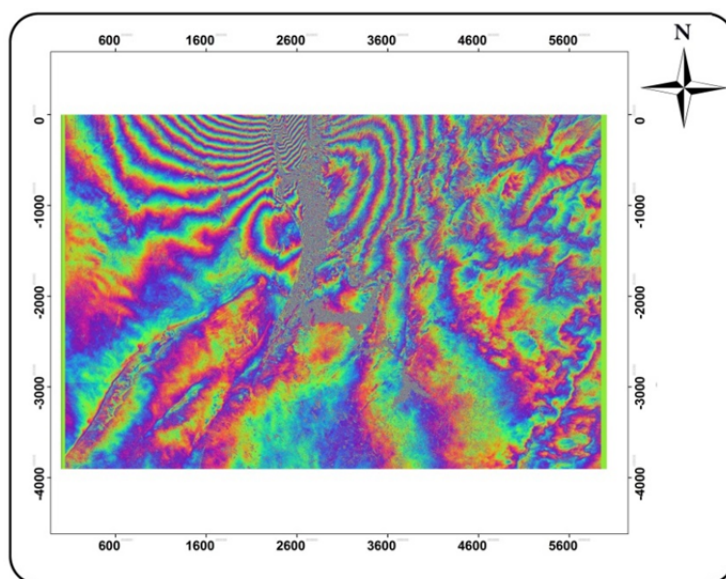


شکل ۵. تصویر فاز و کوهرنسی منطقه مورد مطالعه

Fig. 5. Phase and coherence image of the study area

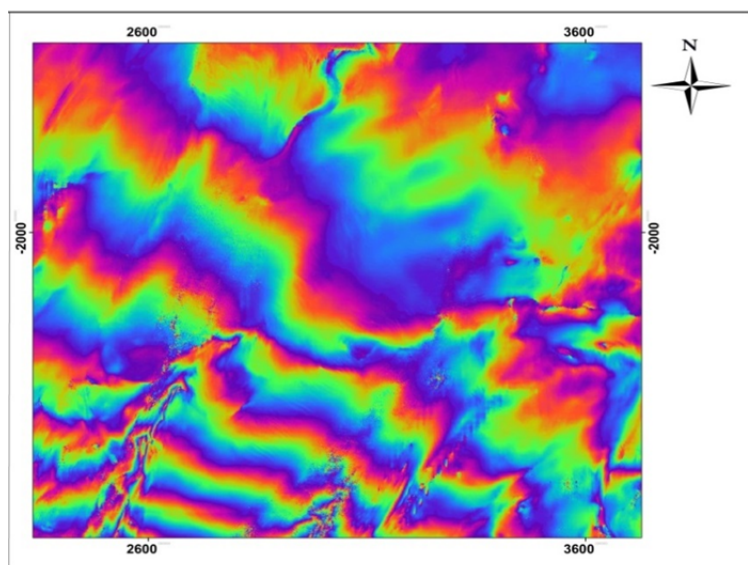
نتایج مسئله ایجاد نکند؛ زیرا این فیلتر در برطرف کردن خطاها بسیار قدرتمند عمل می‌کند (۱۸)، که کاملاً اثر نویز اسپیکل تصویر فاز و کوهرنسی را کم کرده است.

پس از به دست آمدن تصویر فاز و کوهرنسی برای کم کردن اثر نویز اسپیکل در داخل دیتاها از روش مارتین لوکینک و فیلتر گولداشتاین استفاده می‌کنیم (شکل ۶). شکل ۷ از فیلتر گولداشتاین زمانی استفاده می‌شود که تغییرات فازها مشکلی در



شکل ۶. استفاده از روش مارتین لو کینگ برای کم کردن اثر نویز اسپیکل

Fig. 6. Using the Martin Lu King method to reduce the effect of spike noise



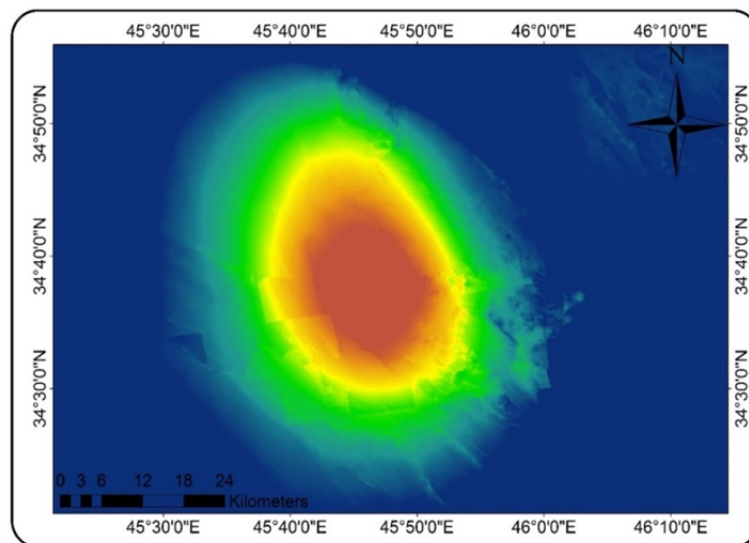
شکل ۷. اثر فیلتر گلدشتاین برای کم کردن اثر نویز اسپیکل

Fig. 7. Goldstein filter effect to reduce the effect of spike noise

مشکل مبهم در محاسبه تعداد صحیح سیکل‌های فاز وجود دارد که به‌عنوان ابهام‌زدایی (Phase Unwrapping) شناخته می‌شود. به فرایند بازیابی مقادیر فاز نامبهم و صحیح از یک مجموعه دوبعدی مقادیر فاز که در بازه $(\pi, \pi-)$ است، بازیابی فاز دوبعدی گفته می‌شود و درنهایت با اعمال و انجام فیلتر و ابهام‌زدایی فاز، با توجه به شکل ۸، نقشه‌های جابجایی رخ داده آن تهیه شد.

تولید نقشه فرونشست بالآمدگی و نقشه میزان جابجایی سطح زمین

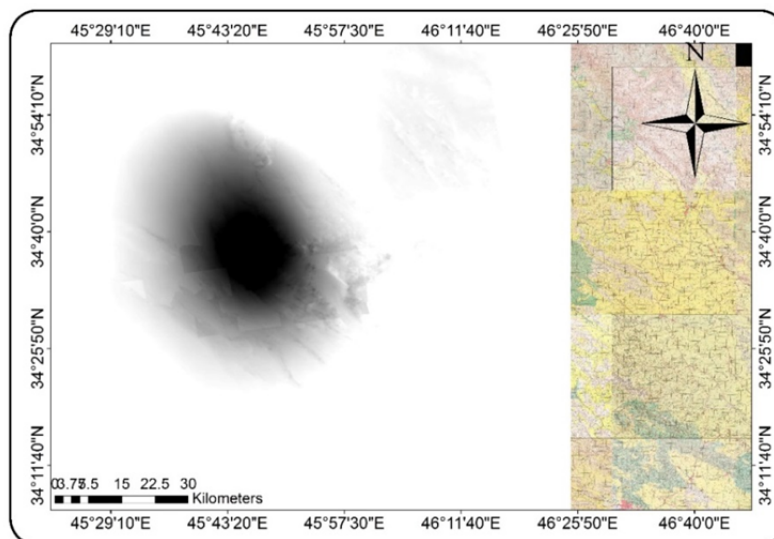
به‌منظور تهیه نقشه جابجایی سطحی منطقه باید با اعمال فیلتر Goldstein, Martin Loking بر روی تداخل‌نگاشت‌ها، خطاهای احتمالی از جمله خطای اسپیکل را رفع نمود. از آنجاکه اطلاعات فاز یک تداخل‌نگاشت در مقیاس 2π است یک



شکل ۸. تصویر فاز آن رپ شده که نشان دهنده فرونشست و بالا آمدگی پوسته زمین در منطقه مورد مطالعه، حاصل از تداخل سنجی راداری
 Fig. 8. Rapid phase image showing the subsidence and elevation of the earth's crust in the study area, obtained by radar interferometry

هم پوشانی داده شد. تصویر فاز جابجایی تصویری است که نشان دهنده جابجایی های ایجاد شده در منطقه مورد مطالعه است. میزان بالا آمدگی یا نشست پوسته زمین را نشان می دهد.

با توجه به شکل ۹ نقشه تصحیح هندسی شده، تصویر فاز جابجایی برای صحت انجام تصحیح هندسی با استفاده از نرم افزار ArcGIS بروی نقشه توپوگرافی محدوده مورد مطالعه

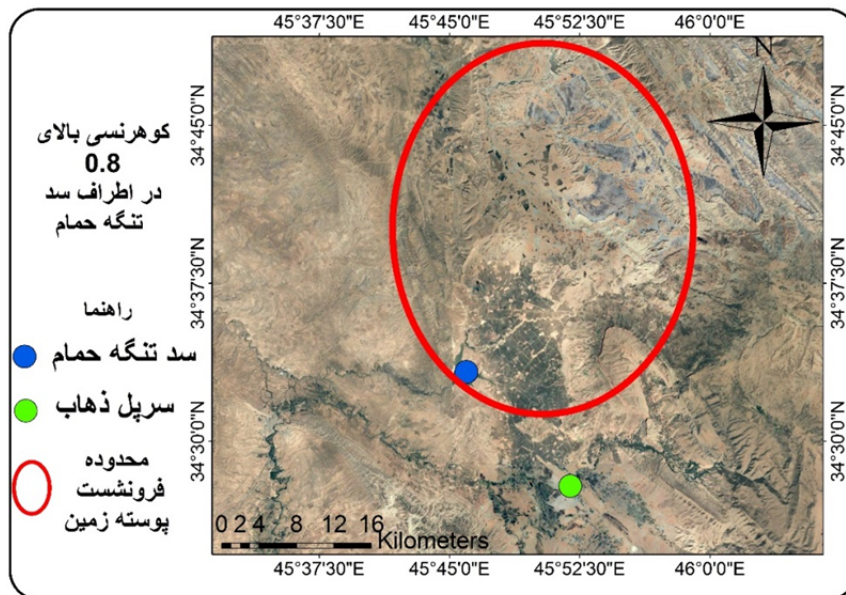


شکل ۹. تصویر تصحیح هندسی شده، نقشه فاز جابجایی بروی تصویر توپوگرافی منطقه مورد مطالعه
 Fig. 9. Geometric correction image of the displacement phase map on the topographic image of the study area

صحت سنجی

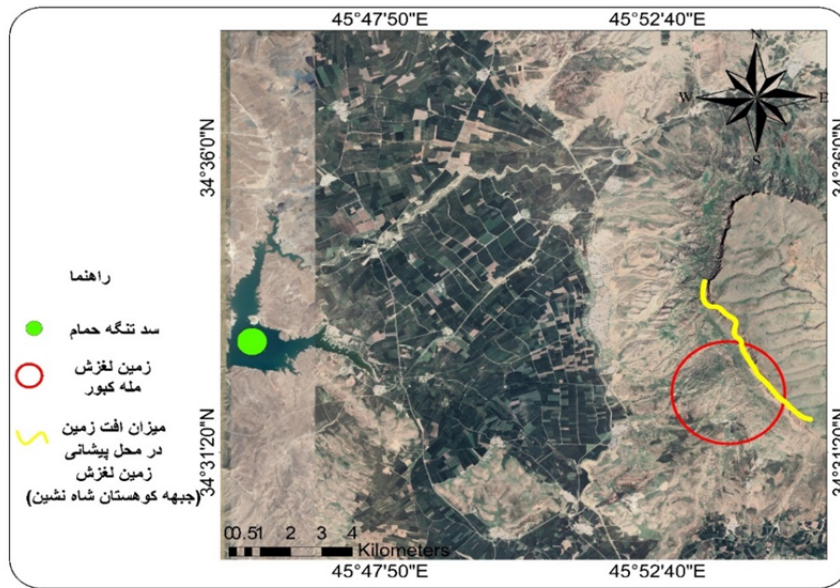
میدانی از منطقه، کوه شاه‌نشین بعد از رخداد زلزله به صورت کاملاً واضح دچار فرونشست زمین در محل پیشانی (افتگاه) بوده (شکل ۱۱). حداکثر کاهش ارتفاع در افتگاه و جبهه کوهستان شاه‌نشین ۲۰ متر و افزایش ارتفاع ناشی از لغزش چرخشی و انباشت رسوبات زمین‌لغزش بیش از ۱۵ متر ارزیابی شده است (۷). اعتبار سنجی دقت پیکسل‌ها در بالآمدگی پوسته زمین به وسیله کوه‌رنسی، این بالآمدگی در قسمت شمال غربی کانون زلزله (ازگله)، تشخیص داده شده که دقت محاسبات به وسیله کوه‌رنسی حکایت از دقت محاسبات در پیکسل‌ها دارد که مقدار کوه‌رنسی بالای ۰/۸ در محدوده موردنظر بوده. با توجه به نتایج در هر دو مکان دارای فرونشست و بالآمدگی میزان کوه‌رنسی بالای ۰/۸ بوده که این امر نشان از دقت بالای پیکسل‌ها و بازدیدهای میدانی از منطقه نشان از مطلوبیت نتیجه حاصله داشته است (شکل ۱۲).

برای اعتبار سنجی دقت پیکسل‌ها در تداخل‌سنجی از تصویر کوه‌رنسی و صحت سنجی نشست و بالآمدگی پوسته زمین از بازدیدهای میدانی و مصاحبه با اهالی منطقه استفاده شد. تصویر کوه‌رنسی نشان‌دهنده میزان تطابق سیگنال‌های تداخل‌سنجی است. مقدار پیکسل‌های تصویر کوه‌رنسی بین ۰ تا ۱ است. هرچه قدر کوه‌رنس به ۱ نزدیک‌تر باشد یعنی بالای ۰/۶ پیکسل از دقت بالای برخوردار است. مقدار پایین‌تر از ۰/۶ کوه‌رنسی قابلیت اعتماد دارد اما به نسبت پایین بوده دقت محاسبات در پیکسل موردنظر. با توجه به (شکل ۱۰)، اعتبار سنجی پیکسل‌های نشان‌دهنده فرونشست زمین به وسیله کوه‌رنسی در اطراف سد تنگه حمام، و اطراف کوه شاه‌نشین دارای کوه‌رنسی بالای ۰/۸ بوده که دقت بسیار بالای محاسبات در پیکسل را نشان می‌دهد. با توجه به بازدیدهای



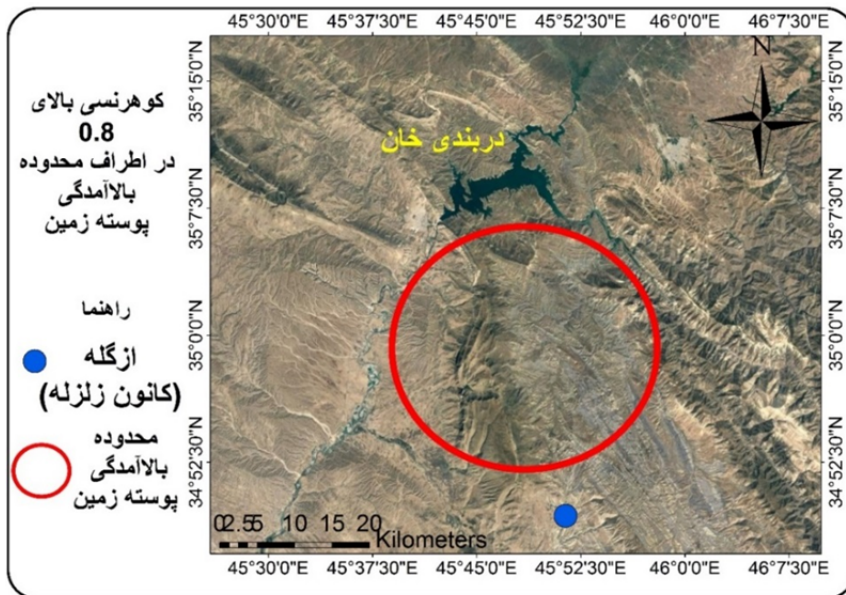
شکل ۱۰. صحت سنجی فرونشست به وسیله تصویر کوه‌رنسی در محیط نرم‌افزار SNAP SANTINEL

Fig. 10. Validation of subsidence by coherence imaging in SNAP SANTINEL software environment



شکل ۱۱. افت زمین در محل جبهه کوهستان شاهنشین

Fig. 11. Landslide at the site of the Shahneshtin mountain front



شکل ۱۲. صحت سنجی بالاآمدگی زمین به وسیله تصویر کوهرنسی در محیط نرم افزار SNAP SNTINEL

Fig. 12. Earth elevation validation by coherence imaging in SNAP SNTINEL software environment

و شمال غرب کانون زلزله (ازگله)، تشخیص داده شد که این نقشه با روش تداخل سنجی و با استفاده از نرم افزارهای SNAP SNTINEL و Google Earth در محیط نرم افزار ArcGIS به دست آمده است.

نتایج

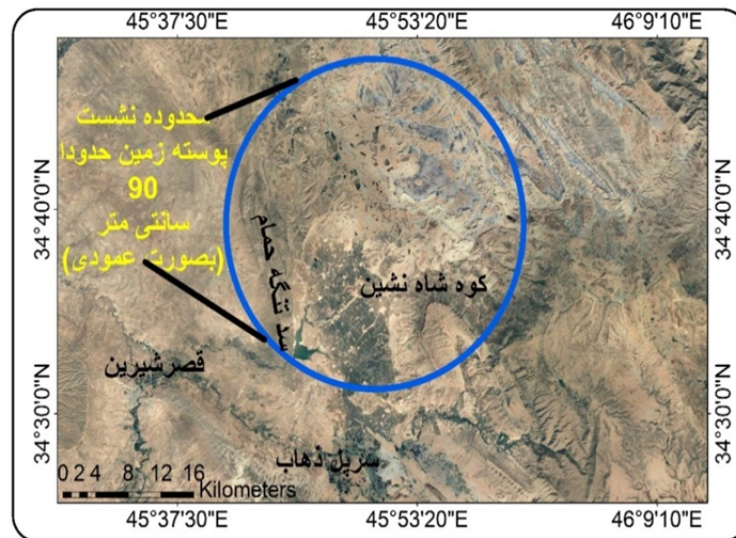
روش تداخل سنجی راداری در این پژوهش، ظرفیت مناسبی از قابلیت های آن در تعیین میزان جابه جایی پسته زمین در محدوده مورد مطالعه را معرفی کرد. با توجه به شکل ۱۳ نقشه استخراج شده (بالاآمدگی پسته زمین) در قسمت شمال



شکل ۱۳. تصویر تداخل سنجی بالا آمدگی پوسته زمین در شمال و شمال غرب کانون زلزله بروی گوگل ارث

Fig. 13. Earth crust elevation interference image in the north and northwest of the epicenter on Google Earth

نقشه استخراج و شناسایی (نشست پوسته زمین)، نشان می دهد که این تغییر ژئومورفولوژیکی در قسمت شمال، شمال غرب شهرستان سرپل ذهاب بعد از رخداد زلزله اتفاق افتاده است (شکل ۱۴).

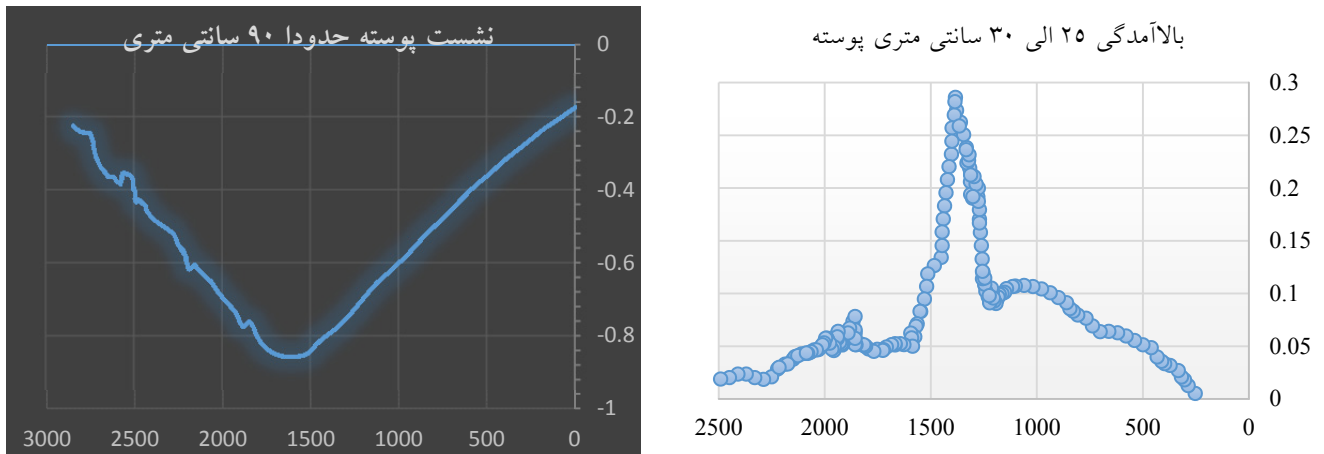


شکل ۱۴. تصویر فرونشست حاصل از تداخل سنجی راداری بروی گوگل ارث

Fig. 14. Depression image from radar interference on Google Earth

مورد مطالعه است، نشان دهنده جابجایی زمین در حالت صعودی (حدوداً ۲۵ الی ۳۰ سانتی متر در حالت عمودی) و در حالت نزولی (حدوداً ۹۰ سانتی متر به صورت عمودی) بعد از رخداد زلزله است.

این فرآیند با روش تداخل سنجی راداری و با استفاده از نرم افزارهای SNAP SANTIENEL و Google Earth و در نهایت در محیط نرم افزار ArcGIS به دست آمده، همچنین با توجه به شکل ۱۵ پروفیل میزان تغییرات در سطح منطقه

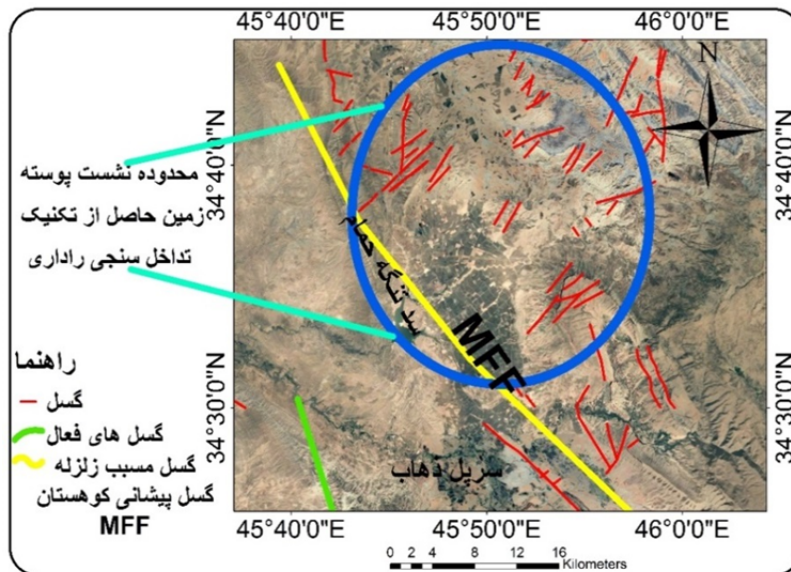


شکل ۱۵. ترسیم پروفیل میزان تغییرات جابجایی زمین در حالت صعودی و نزولی

Fig. 15. Drawing a profile of the rate of change of land movement in the ascending and descending state

زلزله) احاطه گردیده. (شکل ۱۷) فرایندهای دامنه‌ای اتفاق افتاده ناشی از رخداد زلزله در منطقه مورد مطالعه است.

با توجه به (شکل ۱۶)، محدوده‌ای که در نتایج تداخل‌سنجی به‌عنوان نشست پوسته زمین تشخیص داده‌شده، به‌وسیله گسل‌های منطقه و گسل (جبهه کوهستان، گسل مسبب



شکل ۱۶. تصویر فرونشست حاصل از تکنیک تداخل‌سنجی و گسل‌های موجود در منطقه بروی گوگل ارث (در محیط نرم‌افزار ArcGIS)

Fig. 16. Image of subsidence resulting from interferometric technique and faults in the area on Google Earth (in the ArcGIS software environment)



شکل ۱۷. فرآیند دامنه‌ای (ریزش) متأثر از زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ (روز دوم زلزله)

Fig. 17. Amplitude process (fall) affected by the earthquake November 13, 2017 (the second day of the earthquake)

بحث و نتیجه‌گیری

فرسایش قرار دهند و در مقدار جابجایی و حمل رسوب نیز تأثیر بسزایی داشته باشند. بالا آمدن پوسته زمین در افزایش سرعت حرکت آب‌بروی دامنه، فرسایش بیشتر مواد برای رسیدن به سطح اساس خود، افزایش انتقال حجم مواد بیشتری از روی دامنه و در نهایت ایجاد اشکال ژئومورفولوژیکی در سطوح کم شیب و برجای گذاری مواد تأثیر بسزایی دارد. نشست پوسته سطحی زمین با ایجاد تغییر در وضع توپوگرافی منطقه می‌تواند سبب بروز تغییرات چشم‌گیری در هیدرولوژی منطقه شود سبب تغییر در تراز ایستابی سطح و تغییر در مورفولوژی سطحی می‌شود. این مسئله بستر رودخانه‌ها و مسیل‌های کم شیب موجود در دشت‌ها را دگرگون می‌سازد و با تغییر در شیب بستر و در مواردی ایجاد شیب معکوس، امکان سیل‌گیری نواحی مسکونی را فراهم می‌سازد. نشست پوسته زمین باعث کاهش میزان نفوذپذیری سطحی و تغییر توپوگرافی، تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب رودخانه‌ها و آبراهه‌ها می‌گردد؛ که با بررسی و استفاده از علم سنجش‌ازدور رادار می‌توان این حرکات را بررسی نمود و با توجه به اثبات جابجایی صعودی و نزولی زمین در این تحقیق باید در تحقیقات آینده نیز اثر این فرایند بررسی گردد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های راداری سنتینل-۱ موفق به برآورد میزان جابجایی زمین در اثر زلزله ۲۱ آبان ماه سال ۱۳۹۶ سرپل ذهاب شدیم. نتایج حاصله میزان بیشینه حدوداً ۹۰ سانتی‌متری

امروزه استفاده از شواهد ژئومورفولوژیکی برای تعیین مکان احتمالی زلزله در کنار سایر مطالعات امری ضروری به نظر می‌رسد. از طرفی گسترش استفاده از سنجش‌ازدور در علوم مختلف زمین و بالطبع ژئومورفولوژی بر کسی پوشیده نیست. وقوع بلایای طبیعی در جای‌جای کشور پهناور ایران و به اشکال مختلف امری عادی است و این وضعیت ناشی از موقعیت جغرافیایی و استقرار آن در یک ناحیه خطر خیز دنیا (آسیب‌پذیری طبیعی) است. مخاطرات طبیعی نظیر سیل و زلزله آثار ژئومورفولوژیکی خاصی را در سطح زمین ایجاد می‌کنند و خود نیز تحت تأثیر فرم و فرایندهای ژئومورفولوژیکی می‌باشند. عوامل فعال ژئومورفولوژیکی از قبیل هوازدگی، فرسایش رودخانه‌ای، عمل باد، عملکرد انسان و ... خود منشأ شکل‌گیری برخی بلایای طبیعی از قبیل زمین‌لغزش، خزش، وقوع طوفان‌های شن و ماسه و غیره می‌باشند. در دهه‌های اخیر، تلاش‌های گسترده‌ای جهت پایش تغییرات و جابه‌جایی پوسته زمین صورت گرفته است. ایجاد ارتعاشات طبیعی زمین‌لرزه می‌تواند تنش برشی را در طول یک سطح مستعد گسیختگی افزایش دهد و به‌صورت نامحسوس باعث ایجاد حرکات دامنه‌ای گردد، بالا آمدن پوسته سطحی زمین باعث می‌گردد جریان‌های سطحی برای برقراری مجدد تعادل در ارتباط با سطح اساسشان، آبرفت‌ها را نیز دستخوش

روانگرایی و گسیختگی گسترشی در تاج تپه‌ها روی داده است. توزیع ناپایداری‌های زمین‌شناختی - ژئوتکنیکی در گستره وسیعی از منطقه رومرکزی در شمال غرب تا نزدیک به ایلام در جنوب شرق را در برمی‌گیرند که چنین پراکندگی وسیعی از این پدیده‌ها در مقایسه با زمین‌لرزه‌های با بزرگی مشابه دیگر کم‌نظیر است و جای بررسی و پژوهش دقیق‌تر دارد.

نشست پوسته زمین (در حالت عمودی) و ۳۰ سانتی‌متری بالآآمدگی پوسته در راستای دید ماهواره را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به (جدول ۲)، در اثر زمین‌لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب ناپایداری‌های زمین‌شناختی-ژئوتکنیکی بسیاری مانند ریزش‌های سنگی متعدد، لغزش‌های خاکی و سنگی، جریان واریزهای و گل روانه، فرونشست غارهای آهکی،

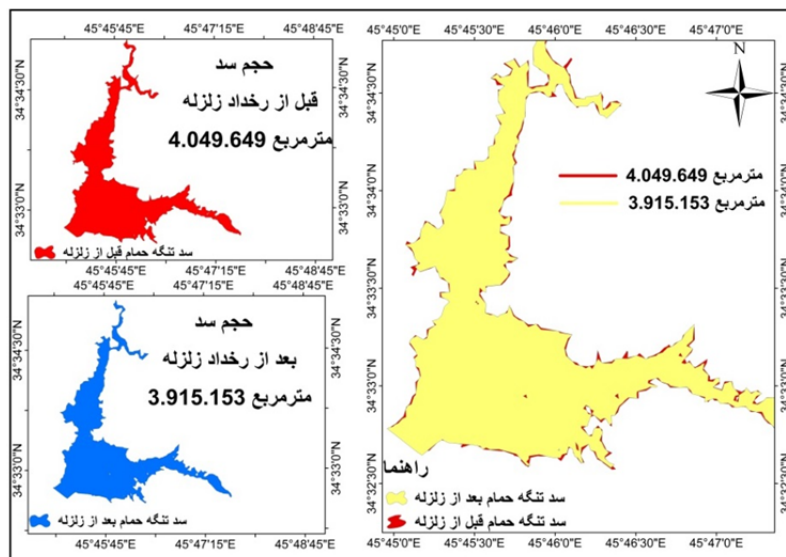
جدول ۲. توزیع ناپایداری‌های زمین‌شناختی-ژئوتکنیکی بعد از زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب

Table 2. Distribution of geological-geotechnical instabilities after the earthquake on November 13, 2017 Sarpol-e Zahab

موقعیت جغرافیایی	نوع عارضه	
سرپل ذهاب	فرونشست پوسته	با استفاده از تکنیک و روش تداخل‌سنجی راداری فرونشست پوسته زمین به میزان ۹۰ سانتی‌متر در جهت شمال غرب سرپل ذهاب نشان داده شده است.
سرپل ذهاب	بالآآمدگی پوسته	با استفاده از تکنیک و روش تداخل‌سنجی راداری بالآآمدگی پوسته زمین به میزان ۳۰ سانتی‌متر به طرف دربندی خان و در شمال ازگله نشان داده شده است.
مله کبود و قورچی باشی	زمین‌لغزش	زمین‌لغزش مله کبود- قورچی باشی با وسعت ۴۶۱ کیلومترمربع (۴۱۱ هکتار) در دامنه جنوبی کوه شاه‌نشین و در مجاورت دو روستای مله کبود و قورچی باشی در فاصله ۸ کیلومتری شمال سرپل ذهاب. پهنه‌ای به وسعت ۲۵ کیلومترمربع شکل گرفته بر روی یک پهنه لغزشی قدیمی وسیع‌تر است. علت اینکه از واژه پهنه لغزشی برای آن استفاده شده است وجود درز و شکاف‌های لغزشی متعدد بدون امکان تعیین مرز مشخص برای آن‌ها به‌عنوان یک لغزش منفرد است. بسیاری از این درز و شکاف‌ها در مسیر جاده سرپل ذهاب به تازه‌آباد بعد از روستای بز میرآباد تا بعد از روستای پالان علیا، به‌صورت عرضی جاده را قطع کرده
سنگ لغزش پاسگاه دارزنگه	لغزش	این سنگ لغزش با ابعاد متوسط در حدود ۱۰ کیلومتری جنوب ازگله در مجاورت پاسگاه دارزنگه روی داده است
ریزش‌ها و بهمن‌های سنگی	ریزش‌ها و بهمن‌های سنگی	در اثر زمین‌لرزه اخیر تعداد متعددی (حداقل ۳۰۰) ریزش سنگی یا پهنه‌های ریزشی کوچک و بزرگی در گستره‌ای به وسعت تقریبی بیش از ۲۰۰۰ کیلومترمربع روی داده‌اند. گسترده‌گی ریزش‌های سنگی در منطقه با خراشیدگی‌های سفیدرنگ طولیل بر روی دامنه‌ها از جمله چشم‌اندازهای مشخص ایجاد شده ناشی از این زمین‌لرزه در منطقه است
بابایادگار	پهنه ریزشی دره بابایادگار	یکی از مهم‌ترین پهنه ریزش‌های سنگی همراه این زمین‌لرزه دره بابایادگار در شمال روستای بان‌زرده واقع در انتهای غربی بخش داخلی ناودیس ریجاب است. در دامنه‌های دو طرف این دره به طول ۱.۵ کیلومتر ریزش‌های سنگی متعددی روی داده است.
پیران	ریزش‌ها و بهمن سنگی پیران	بزرگ‌ترین بهمن سنگی در شمال روستای پیران، واقع در طول جاده گردشگری دسترسی به آبشار پیران، روی داده است. این ناپایداری به طولی در حدود ۱.۸ کیلومتر جاده دسترسی به آبشار و تمامی مسیر سنگ‌چین جاده گردشگری را مسدود نموده و همچنین سبب ایجاد سد و دریاچه طبیعی در پای آبشار گردیده است. ابعاد بلوک‌های فروریخته تا هشتاد مترمکعب و وزن بیش از ۱۵۰ تن برآورد گردید. همچنین در شرق دره پیران ریزش‌های سنگی متعددی در قالب پهنه‌های ریزشی روی داده‌اند. پهنه‌های ریزشی شمال و شمال شرق دالاهو-پهنه ریزشی شمال ناودیس معلق ریجاب ریزش‌های منفرد- جریان واریزهای پیران-گل روانه چوار در استان ایلام-گسیختگی گسترشی در تاج تپه‌ها-روانگرایی و گسترش جانبی

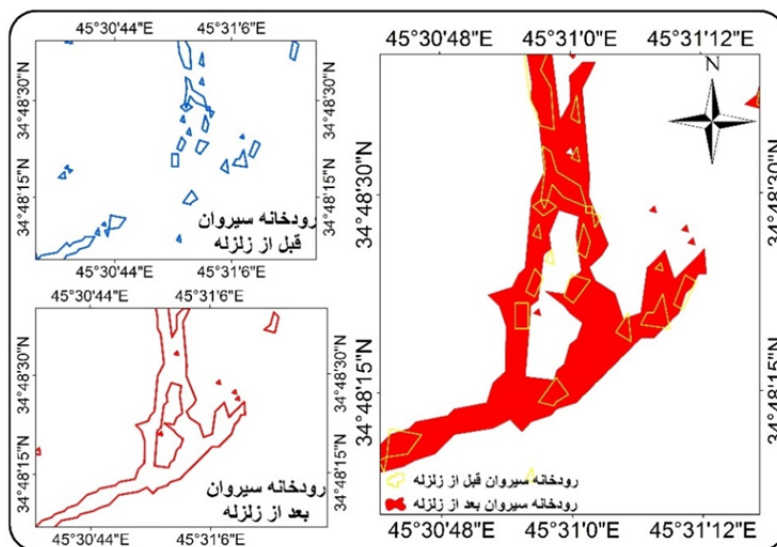
بعد از زلزله دچار تغییرات محسوس کاهش حجم آب بوده است. همچنین با توجه به بالا و پایین شدن پوسته زمین ناشی از زلزله در محدوده مورد مطالعه نقاطی نیز دچار افزایش حجم منابع آب شده است. از جمله این نقاط رودخانه سیروان است که با توجه به شکل ۱۹، دچار تغییرات شدید افزایشی دبی بعد از زلزله بوده است.

فرونشست و بالا آمدگی پوسته زمین ناشی از زلزله در محدوده مورد مطالعه علاوه بر تغییرات مرفولوژیکی در سطح منطقه بر روی هیدرولوژی منابع آب منطقه مورد مطالعه نیز اثرگذار بوده است. با توجه به شکل ۱۸، در محدوده‌ای که به‌عنوان فرونشست در تکنیک تداخل‌سنجی مشخص گردیده است با کاهش منابع آبی مواجه هستیم. سد تنگه حمام در محدوده نشست پوسته زمین بعد از رخداد زلزله قرار دارد که



شکل ۱۸. کاهش حجم آب سد تنگه حمام در محدوده فرونشست ناشی از رخداد زلزله

Fig. 18. Reduction of water volume in the Strait of Hammam Dam, in the range of subsidence caused by the earthquake



شکل ۱۹. رودخانه سیروان قبل از زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ و رودخانه سیروان بعد از رخداد زلزله

Fig. 19. Sirvan River before the earthquake November 13, 2017 and Sirvan River after the earthquake

References

1. Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375-2383. doi:<https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>.
2. Earthquake Report November 12. 2017. Sarpol-e Zahab, Kermanshah Province (Fifth Edition). Volume 1: Seismological Aspects. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. (In Persian).
3. Ferretti A, Monti A, Prati C, Rocca F, Massonet D. 2007. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. https://www.researchgate.net/publication/234226330_InSAR_Principles_Guidelines_for_SAR_Interferometry_Processing_and_Interpretation
4. Fruneau B, Sarti F. 2000. Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry: isolation of deformation from atmospheric artifacts using correlation. *Geophysical Research Letters*, 27(24): 3981-3984. doi:<https://doi.org/10.1029/2000GL008489>.
5. Gabriel AK, Goldstein RM, Zebker HA. 1989. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B7): 9183-9191. doi:<https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183>.
6. Gombert B, Duputel Z, Shabani E, Rivera L, Jolivet R, Hollingsworth J. 2019. Impulsive source of the 2017 Mw= 7.3 Ezgeleh, Iran, earthquake. *Geophysical research letters*, 46(10): 5207-5216. doi:<https://doi.org/10.1029/2018GL081794>.
7. Goorabi A. 2021. Quantification of mass wasting volume associated with the giant landslide Maleh Kabood induced by the 2017 Kermanshah earthquake from InSAR. *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 21(60): 47-63. doi:<https://doi.org/10.52547/jgs.21.60.47>. (In Persian).
8. Graham LC. 1974. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. *Proceedings of the IEEE*, 62(6): 763-768. doi:<https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9516>.
9. Gunce HB, San BT. 2018. Measuring earthquake-induced deformation in the south of Halabjah (Sarpol-e-Zahab) using Sentinel-1 data on November 12, 2017. In: *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, vol 7. pp 346. <https://doi.org/310.3390/ecrs-3392-05159>.
10. Howells D. 1983. A history of Persian earthquakes, by NN Ambraseys and CP Melville, Cambridge University Press, Cambridge, 1982. No. of pages: 219. Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290110412>.
11. Iran-Iraq Earthquake is Deadliest of 2017-CNN. 2018. Available online: middleeast/iraq-earthquake/index.html accessed on 9 February 2018, <https://edition.cnn.com/2017/11/12>.
12. Karimzadeh S, Matsuoka M, Miyajima M, Adriano B, Fallahi A, Karashi J. 2018. Sequential SAR coherence method for the monitoring of buildings in Sarpole-Zahab, Iran. *Remote Sensing*, 10(8): 1255. doi:<https://doi.org/10.3390/rs10081255>.
13. Khoshlahjeh Azar M, Maghsoudi Y, momeeni S. 2018. displacement analysis of the 12 november 2017 Mw 7.3 Sarpol-e Zahab earthquake by SAR interferometry using Sentinel – 1. Conference: The 3rd National Conference on Geospatial Information Technology. doi:10.13140/RG.2.2.33839.18083
14. Lundgren P, Usai S, Sansosti E, Lanari R, Tesauro M, Fornaro G, Berardino P. 2001. Modeling surface deformation observed with synthetic aperture radar interferometry at Campi Flegrei caldera. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B9): 19355-19366. doi:<https://doi.org/10.1029/2001JB000194>.
15. Massonet D, Rossi M, Carmona C, Adragna F, Peltzer G, Feigl K, Rabaute T. 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364(6433): 138-142. doi:<https://doi.org/10.1038/364138a0>.
16. Matsuoka M, Yamazaki F. 2000. Use of interferometric satellite SAR for earthquake damage detection. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Seismic Zonation*, 103-108, 2000.11.
17. Motagh M, Vajedian S, Behling R, Haghshenas Haghighi M, Roessner S, Akbari B, Wetzel H-U, Darabi A. 2018. 12 November 2017 Mw 7.3 Sarpol-e Zahab, Iran, earthquake: Results from combining radar and optical remote sensing measurements with geophysical modeling and field mapping. In: *EGU General Assembly Conference Abstracts*. p 10528.
18. Qanadi MA, Enayati H, Khasali E. 2018. Generating Digital Elevation Model of the Earth Using Sentinel-1 Images and Interferometry. *Geographical Information Scientific-Research Quarterly*. Volume 27, Number 108, Winter 2019. 10.22131/SEPEHR.2019.34623.
19. Sherwin CW, Ruina J, Rawcliffe R. 1962. Some early developments in synthetic aperture radar systems. *IRE Transactions on Military Electronics*(2): 111-115. doi:<https://doi.org/10.1109/IRET-MIL.1962.5008415>.

20. Tolomei C, Svigkas N, Baneh AF, Atzori S, Pezzo G. 2018. Surface deformation and source modeling for the MW 7.3 Iran earthquake (November 12, 2017) exploiting sentinel-1 and ALOS-2 insar data. In: IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, pp 3063-3066. doi:<https://doi.org/3010.1109/IGARSS.2018.8518173>.
21. Turker M, San B. 2004. Detection of collapsed buildings caused by the 1999 Izmit, Turkey earthquake through digital analysis of post-event aerial photographs. *International Journal of Remote Sensing*, 25(21): 4701-4714. doi:<https://doi.org/10.1080/01431160410001709976>.
22. Vajedian S, Motagh M. 2018. Coseismic displacement analysis of the 12 November 2017 Mw 7.3 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake from SAR Interferometry, burst overlap interferometry and offset tracking. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 4 (2018), Nr 3, 4(3): 205-209. doi:<https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-3-205-2018>.
23. Vajedian S, Motagh M, Mousavi Z, Motaghi K, Fielding E, Akbari B, Wetzel H-U, Darabi A. 2018. Coseismic deformation field of the Mw 7.3 12 November 2017 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake: A decoupling horizon in the northern Zagros Mountains inferred from InSAR observations. *Remote Sensing*, 10(10): 1589. doi:<https://doi.org/10.3390/rs10101589>.
24. Wang R, Xia Y, Grosser H, Wetzel H-U, Kaufmann H, Zschau J. 2004. The 2003 Bam (SE Iran) earthquake: precise source parameters from satellite radar interferometry. *Geophysical Journal International*, 159(3): 917-922. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02476.x>.



Ground-displacement monitoring and geomorphological effects analysis using remote sensing data

Ali Abdolmaleki, Amjad Malki, Ali Khazai

Received: 6 February 2021 / Accepted: 1 April 2021
Available online 5 January 2022

Abstract

Background and Objective An earthquake is one of the most important natural events that cause a lot of financial and human losses every year around the world. An earthquake is an earthquake caused by the rapid release of energy, which often occurs due to landslides along a fault in the earth's crust. Earthquakes cause many geological-geotechnical instabilities such as multiple rockfalls, soil and rock landslides, runoff and mud flow, subsidence limestone caves, liquefaction, and expansion rupture. One of the most important effects of an earthquake is the displacement of the earth and the resulting morphological changes. Estimating the rate of land displacement and monitoring the morphological changes of this phenomenon in order to manage the crisis is one of the basic measures after the earthquake.

A. Abdolmaleki¹, A. Malki(✉)², A. Khazai³

1. MSc. Student of Geomorphology and Environmental Planning, Faculty of Literature and Human Sciences, University of Kermanshah, Iran
2. Associate Professor, Department of Geography Faculty of Literature and Human Sciences, University of Kermanshah, Iran
3. Education Expert, Department of Geography, Faculty of Literature and Human Sciences, University of Kermanshah, Iran

e-mail: amjad_maleki@yahoo.com

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1400.12.4.5.2>

In recent decades, extensive efforts have been made to monitor changes and displacements of the Earth's crust. With accurate alignment and ground observations, changes can be measured with great accuracy, which ground measurements are costly and can be measured sporadically. The use of remote sensing technology in the various earth sciences is very common due to the wide coverage of satellite images, the timeliness of the images, and its low cost compared to terrestrial methods. One of the applications of measurement is to show and control the movements of the earth's crust due to factors such as earthquake, drift, subsidence. The use of radar, satellite images, and radar interferometry methods, due to extensive coverage and periodic imaging and with an accuracy of about cm, is a good tool to monitor changes in the Earth's crust. Satellite imagery of the Sentinel-1 satellite system, which has been made available to the public free of charge by the European Space Agency since 2014 and is currently being continuously imaged, is a good tool for earthquake monitoring. A radar imaging technique is a new tool used for the discovery and display of land subsidence. In the present perusal, in order to achieve the above purpose, using satellite data and radar interferometry technique, the deformation of the earth's crust due to post-seismic movements in Sarpolzahab city has been investigated.

Materials and Methods In this paper, using radar imagery, the deformation field due to the seismic dimension of the county is obtained from 11/ 11/ 2017 to 17/11/2017 using radar data (S _ 1 A - IW), with a baseline of 100 m.

Results and Discussion Examination of the results of deformation of the earth's crust after an earthquake shows; The highest rate of land subsidence in the north, northwest of Sarpol-e-Zahab city (about 90 cm vertical displacements of the earth's crust) to the west, and land elevation around the epicenter (north of the herd), about 30 cm vertical displacements of the earth's crust (towards Darbandi Khan) It has happened. The effects of subsidence and uplift caused by the earthquake in the study area in addition to morphological changes in the area have also affected

the hydrology of water resources in the area. For example, earthquakes have caused significant changes in the volume of water in the Strait of Hammam dam and increased the volume of water resources in the Sirvan river.

Conclusion The results of this study showed that the use of radar interferometry technique, in addition to being an efficient tool in estimating the rate of crustal displacement, can be used in relatively accurate estimation of quantitative changes in water resources resulting from crustal displacement.

Keywords: Earthquake, Earth crust displacement, Synthetic aperture radar, Morphological changes, SARPOL-e ZAHAB

Please cite this article as: Abdolmaleki A, Malki A, Khazai A. 2022. Ground-displacement monitoring and geomorphological effects analysis using remote sensing data. Journal of RS and GIS for Natural Resources, 12(4): 95-118. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1400.12.4.5.2>